

Guide pour le positionnement GPS

(Juillet 1993)

Troisième impression, avec corrections, avril 1998

Ce produit est disponible auprès de :

Ressources naturelles Canada*
Géomatique Canada
Division des levés géodésiques
Section des services d'information
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
Tél. : (613) 992-2061
Télec. : (613) 995-3215
Courriel : information@geod.nrcan.gc.ca
URL : <http://www.geod.nrcan.gc.ca/>

*Antérieurement le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources

DÉNÉGATION DE RESPONSABILITÉ

Le présent document ne vise à faire ni n'effectue la promotion de quelque produit que ce soit.

Publié avec l'autorisation
de Ressources naturelles Canada

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1994
No de cat. M52-74/1995F
ISBN 0-660-94918-0

AVANT-PROPOS

Le Global Positioning System (GPS), qui est pleinement opérationnel depuis le mois de juillet 1995, a augmenté de façon marquée l'efficacité de l'établissement de la position aux fins de géoréférence. La Division des levés géodésiques participe depuis 1983 à des projets exploitant le GPS, ce qui lui confère une base d'expérience solide.

En 1991, la Direction de la conservation et de l'économie, Environnement Canada, a demandé l'appui de la Division des levés géodésiques pour appliquer le GPS à la gestion des données sur les eaux souterraines au Canada. À la suite de discussions, un projet de démonstration a été réalisé dans la région de Waterloo à l'automne 1991 et un séminaire d'information sur la technologie du GPS a été présenté. À la suite de cette présentation, Environnement Canada a demandé à la Division des levés géodésiques de formuler un guide adapté à ses besoins en matière d'utilisation du GPS. Un tel document fut donc préparé et financé par Environnement Canada.

On a constaté que la plus grande partie de l'information présentée dans ce document serait également applicable et tout aussi importante dans d'autres domaines où l'on souhaite appliquer la technologie du GPS pour satisfaire des besoins en matière de positionnement. C'est ainsi qu'a vu le jour la présente version généralisée du guide sur le positionnement GPS.

Plusieurs employés de la Division des levés géodésiques ont contribué à la rédaction du présent document par leurs commentaires et suggestions. Nous sommes grandement reconnaissants de leur apport.

C'est avec plaisir que la Division des levés géodésiques a saisi l'occasion de partager son expertise avec Environnement Canada et d'ainsi promouvoir l'application de la technologie du GPS. Nous espérons que ce guide répondra à vos attentes. Nous vous encourageons à nous faire parvenir vos commentaires et suggestions.

Caroline Erickson
Division des levés géodésiques
Géomatique Canada
Ressources naturelles Canada

TABLE DES MATIÈRES

DÉNÉGATION DE RESPONSABILITÉ	ii
AVANT-PROPOS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
NOTATION ET ACRONYMES	viii

CHAPITRES

1. INTRODUCTION	1
2. NOTIONS DE BASE DU GPS	3
2.1 DESCRIPTION DU SYSTÈME	3
2.2 SIGNAUX GPS	5
Observations de phase de l'onde porteuse	6
Observations issues du code (pseudodistances)	7
Comparaison des pseudodistances et des observations de phase	8
Message du satellite	9
2.3 TYPES DE POSITIONNEMENT GPS	9
Positionnement autonome et positionnement relatif	10
Positionnement statique et positionnement cinématique	12
Traitement en temps réel et traitement après mission	13
2.4 VISIBILITÉ ET DISPONIBILITÉ DES SATELLITES	14
Géométrie des satellites	16
Accès sélectif et antileurrage	19
2.5 ERREURS	20
3. NOTIONS DE BASE DU POSITIONNEMENT	24
3.1 MESURES DE L'EXACTITUDE	24
Exactitude et précision	24
Exactitude absolue et exactitude relative	28
3.2 ALTITUDES ET GÉOÏDE	30
Altitudes orthométriques et altitudes au-dessus de l'ellipsoïde	30
Modèles du géoïde	32
3.3 SYSTÈMES DE COORDONNÉES ET CADRES DE RÉFÉRENCE	33
Systèmes de coordonnées	33
Cadres de référence altimétrique	35
Cadres de référence planimétrique et le NAD83	36

4. TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT GPS	39
4.1 TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT BASÉES SUR LES OBSERVATIONS DE PSEUDODISTANCES	40
Positionnement autonome	40
Positionnement différentiel.....	41
4.2 TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT BASÉES SUR LES OBSERVATIONS DE PHASE	43
Statique classique	45
Cinématique (basée sur les observations de phase)	45
Semi-cinématique	45
Pseudo-cinématique.....	46
Statique rapide	47
5. PROCÉDURES GPS.....	48
5.1 PLANIFICATION ET PRÉPARATION.....	48
Choix d'une technique de positionnement.....	49
Choix du type de récepteur.....	50
Validation.....	54
Reconnaissance	56
Conception du levé	57
Préparatifs	60
5.2 TRAVAUX SUR LE TERRAIN.....	62
Tâches du chef d'équipe	63
Tâches de l'observateur	64
Tâches du responsable du traitement des données	66
5.3 TRAITEMENT DES DONNÉES ET RAPPORT FINAL.....	67
5.4 DÉTERMINATION DE L'ALTITUDE AU MOYEN DU GPS.....	69
Altitudes orthométriques de faible exactitude par GPS différentiel	70
Altitudes orthométriques de grande exactitude obtenues grâce à des observations de phase	72
BIBLIOGRAPHIE.....	76
APPENDICES	
A - GLOSSAIRE.....	79
B - SOURCES D'INFORMATION SUR LES SATELLITES GPS.....	87
C - ZONES D'ACTIVITÉ GÉOMAGNÉTIQUE ET SOURCES D'INFORMATION.....	91
D - SOURCES D'INFORMATION SUR LES CANEVAS PLANIMÉTRIQUE ET ALTIMÉTRIQUE.....	96
E - SOURCES D'INFORMATION SUR LE GÉOÏDE.....	100
F - EXEMPLES DE FORMULAIRES RAPPORT D'OBSERVATIONS GPS SUR LE TERRAIN.....	105
G - LE SYSTÈME CANADIEN DE CONTRÔLE ACTIF.....	111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Fréquence et longueur des ondes porteuses	7
Tableau 2.2	Principaux avantages et inconvénients des observations de pseudodistances et de phase	9
Tableau 2.3	Types de DOP	18
Tableau 2.4	Importance des erreurs.....	22
Tableau 3.1	Relation entre l'écart-type et la probabilité - Cas unidimensionnel.....	26
Tableau 3.2	Mesures courantes de l'exactitude utilisées avec le GPS.....	27
Tableau 3.3	Exigences quant au modèle du géoïde en positionnement autonome ou relatif	33
Tableau 3.4	Conversion au NAD83	37
Tableau 3.5	Incidence du NAD83 sur les paramètres de localisation.....	38
Tableau 4.1	Résumé des méthodes de positionnement GPS basées sur des observations de pseudodistances.....	40
Tableau 4.2	Résumé des méthodes de positionnement GPS basées sur les observations de phase de l'onde porteuse	44
Tableau 5.1	Observations GPS nécessaires pour les différentes techniques de positionnement.....	51
Tableau 5.2	Reconnaissance du terrain	56
Tableau 5.3	Spécifications de contrôle et configuration du réseau	58
Tableau 5.4	Tâches à accomplir sur le terrain	62
Tableau 5.5	Contribution de l'incertitude relative associée au géoïde dans la détermination de l'altitude orthométrique au moyen du GPS.....	72
Tableau 5.6	Erreur approximative attribuable à l'incertitude associée au géoïde pour des altitudes relatives déterminées d'après des levés GPS précis	74

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Les trois segments du GPS.....	3
Figure 2.2	Constellation des satellites du GPS.....	4
Figure 2.3	Équipement GPS.....	5
Figure 2.4	Onde porteuse.....	6
Figure 2.5	Information modulée sur chaque onde porteuse	7
Figure 2.6	Codes C/A et P.....	8
Figure 2.7	Positionnement autonome.....	10
Figure 2.8	Positionnement relatif.....	11
Figure 2.9	Positionnements statique et cinématique.....	12
Figure 2.10	Traitements en temps réel et après mission.....	13
Figure 2.11	Hauteurs et angles de masquage.....	14
Figure 2.12	Azimut.....	15
Figure 2.13	Graphique de visibilité des satellites	16
Figure 2.14	Carte du ciel.....	17
Figure 2.15	GDOP défavorable et favorable.....	18
Figure 2.16	Courbe du PDOP.....	19
Figure 2.17	Erreurs courantes.....	20
Figure 3.1	Exactitude et précision.....	25
Figure 3.2	Fonction de distribution normale des probabilités.....	25
Figure 3.3	Exactitude relative GPS (ppm) : a) ppm b) constante + ppm.....	29
Figure 3.4	Géoïde et ellipsoïde.....	31
Figure 3.5	Relation entre l'altitude orthométrique et l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde	31
Figure 3.6	Le système terrestre conventionnel.....	34
Figure 3.7	Système de coordonnées géodésiques.....	35
Figure 5.1	Phases d'un projet GPS	48
Figure 5.2	Techniques GPS proposées en fonction de l'exactitude planimétrique exigée	49
Figure 5.3	Coûts représentatifs pour différents types de récepteurs en janvier 1992	51
Figure 5.4	Facteurs à prendre en considération lors du choix d'un récepteur	53
Figure 5.5	Concept de la validation	55
Figure 5.6	Configuration d'un réseau radial	58
Figure 5.7	Configuration d'un réseau GPS statique classique	60
Figure 5.8	Mesure de la hauteur de l'antenne.....	65
Figure 5.9	Détermination de l'altitude orthométrique par les techniques GPS différentielles	71
Figure 5.10	Détermination de l'altitude orthométrique par des techniques de mesures de porteuse.....	73
Figure C.1	Zones d'activité géomagnétique au Canada.....	94
Figure G.1	Réseau des stations du système canadien de contrôle actif.....	113

NOTATION ET ACRONYMES

ρ	Distance récepteur-satellite
σ	Écart-type
λ	Longueur d'onde
f	Observation de phase de l'onde porteuse
1D	Unidimensionnel
2D	Bidimensionnel
2drms	Two-distance root mean square
3D	Tridimensionnel
ACP	Point de contrôle actif
ACS	Système de contrôle actif
AS	Antileurrage
Az.	Azimut
BNDG	Base nationale de données géodésiques (tenue à jour par la DLG)
c	Vitesse de la lumière dans le vide
CCM	Centre canadien de cartographie, Ressources naturelles Canada
CDU	Panneau de commande et d'affichage
CGVD28	Datum de référence altimétrique du Canada de 1928
DLG	Division des levés géodésiques, Ressources naturelles Canada
DoD	Département de la Défense des États-Unis
DOP	Diminution de la précision
DoT	Département des Transports des États-Unis
ECP	Écart circulaire probable
EDM	Mesure électronique des distances
ESP	Écart sphérique probable
f	Fréquence
GDOP	Diminution de la précision d'origine géométrique
GPS	Système de positionnement global
GSD95	Modèle du géoïde 1995 de la Division des levés géodésiques
h	Altitude au-dessus de l'ellipsoïde
H	Altitude orthométrique
HDOP	Diminution de la précision horizontale

Hz	Hertz (cycles par seconde) - Unité de mesure de la fréquence
IERS	Service international sur la rotation de la Terre
ITRF	Cadre international de référence terrestre
MHz	Mégahertz (voir Hz)
N	Ambiguïté
N	Ondulation géoïde
NAD27	Cadre de référence nord-américain de 1927
NAD83	Cadre de référence nord-américain de 1983
NAVCEN	U. S. Coast Guard Navigation Centre - Centre d'information GPS
NGS	U.S. National Geodetic Survey
P	Pseudodistance
PDOP	Diminution de la précision locationnelle
ppm	Parties par million
R.F.	Radiofréquence
rcvr	Récepteur
RINEX	Format d'échange de données GPS indépendant du récepteur
rms	Moyenne quadratique ou écart moyen quadratique
RNCan	Ressources naturelles Canada
SA	Accès sélectif
SIG	Système d'information géographique
SLCT	Secteur des levés, de la cartographie et de la télédétection
SNRC	Système national de référence cartographique
t_r	Temps de réception
t_t	Temps de transmission
UERE	Erreur équivalente sur la distance pour l'utilisateur
UTM	Projection de Mercator transverse
VDOP	Diminution de la précision verticale
WGS84	Système géodésique mondial de 1984
x_r, y_r, z_r	Coordonnées du récepteur
x_s, y_s, z_s	Coordonnées du satellite

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le Global Positioning System (GPS) (Système de positionnement global) est un système de radionavigation par satellites mis en place par la Défense américaine en vue d'applications de positionnement militaire et, en second lieu, mis à la disposition de la communauté civile. La navigation, l'arpentage et les systèmes d'information géographique (SIG) ne sont que quelques-uns des domaines dans lesquels la technologie du GPS a été appliquée avec succès.

Le GPS est un système complexe qui peut servir à établir une position avec une exactitude allant de 100 m à quelques millimètres, selon l'équipement utilisé et la procédure suivie. En règle générale, plus l'exactitude du positionnement est grande, plus les coûts sont élevés et plus les procédures d'observation et de traitement sont complexes. Il importe donc aux utilisateurs de comprendre quelles techniques leur permettent d'atteindre l'exactitude souhaitée, moyennant des coûts et une complexité les moins grands possibles. Le présent guide vise à fournir les connaissances de base et l'information concernant les procédures nécessaires pour appliquer de manière efficace la technologie du GPS.

Ce guide comprend quatre parties principales élaborées en vue d'atteindre cet objectif. Les principes fondamentaux du GPS sont exposés au chapitre 2, les concepts de base du positionnement, au chapitre 3, les techniques de positionnement GPS, au chapitre 4 et les procédures d'application du GPS, au chapitre 5. Bien qu'il existe des liens importants entre ces différents chapitres, le lecteur peut choisir de les consulter séparément en se référant à la table des matières.

Les principes fondamentaux du GPS exposés au chapitre 2 fournissent un point de départ à ceux qui cherchent à mieux comprendre le système. L'exposé sur les signaux GPS dans ce chapitre revêt une importance particulière puisque ceux-ci sont à l'origine des diverses techniques de positionnement et de leur exactitude respective. Le chapitre 2 traite d'autres thèmes, entre autres, une description du système, la classification générale des types de positionnement GPS, la visibilité des satellites et les erreurs.

Il convient de ne pas sous-estimer l'importance des notions de base en positionnement exposées au chapitre 3. Pour espérer comparer ce qui est réalisable grâce aux différentes techniques et aux différents équipements disponibles, il est essentiel de comprendre les diverses mesures de l'exactitude utilisées dans le cadre du GPS. La différence entre l'ellipsoïde, la surface de référence utilisée pour l'altitude établie au moyen des satellites GPS, et le niveau moyen de la mer traditionnellement utilisé pour l'établissement d'altitude constitue une notion particulièrement importante en positionnement. Ces notions ainsi qu'une description des systèmes de coordonnées et de référence sont présentées au chapitre 3.

Le chapitre 4, où sont résumées les techniques de positionnement, est peut-être celui qui intéressera le plus ceux qui souhaitent appliquer le GPS. En début de chapitre, des tableaux illustrent le niveau d'exactitude que chaque technique permet d'obtenir lorsque appliquée avec

succès. Chacune de ces techniques est ensuite décrite. En étudiant ces techniques il faut garder à l'esprit que de nouvelles méthodes sont constamment mises au point. Comprendre les principes généraux des méthodes exposées dans le chapitre devrait permettre d'assimiler plus facilement les nouvelles techniques, au fur et à mesure qu'elles deviennent disponibles.

Le dernier chapitre traite des procédures permettant de réaliser un projet GPS, depuis sa conception jusqu'aux derniers résultats. Étant donné que chaque projet à réaliser et chaque jeu d'accessoires exigent des procédures bien distinctes, il serait impossible d'aborder toutes les possibilités dans ce seul chapitre. On y présente plutôt des considérations et des procédures générales, applicables à presque tout projet de positionnement GPS. Pour des instructions détaillées, il est sage de consulter la documentation des fabricants. La dernière partie du chapitre 5 présente des considérations sur l'établissement de l'altitude au moyen du GPS. Les appendices au présent guide fournissent également nombre de renseignements utiles.

Un guide comme celui-ci ne saurait répondre à toutes les interrogations sur l'industrie considérable et en expansion rapide du positionnement GPS. Il est à espérer que le présent document aidera les utilisateurs à apprécier les avantages incroyables du système et à les mettre à profit pour répondre à leurs besoins en matière de positionnement.

CHAPITRE 2

NOTIONS DE BASE DU GPS

Le présent chapitre expose les notions de base du Global Positioning System (système de positionnement global). Le GPS permet d'obtenir toute une gamme de niveaux d'exactitude, compte tenu des types d'observations effectuées et des procédures suivies. En règle générale, plus le niveau d'exactitude doit être grand, plus le coût est élevé et plus le GPS est complexe à utiliser. Pour comprendre quelles techniques répondent le mieux à des besoins spécifiques et pourquoi, il est important de saisir les concepts qui sous-tendent le GPS. Nous exposerons d'abord les éléments fondamentaux avant d'expliquer les composantes du signal des satellites GPS, les techniques générales de positionnement, la visibilité des satellites et les sources d'erreur dans le système.

2.1 DESCRIPTION DU SYSTÈME

Le GPS se compose d'une constellation de satellites de radionavigation, d'un segment de contrôle au sol qui gère le fonctionnement des satellites et, enfin, des utilisateurs avec récepteurs spécialisés qui utilisent les données des satellites pour répondre à une vaste gamme de besoins en positionnement (figure 2.1). Le système a été mis en place par le ministère américain de la Défense (DoD) afin de répondre à des besoins de positionnement pour la défense et, à titre de sous-produit, pour servir la communauté civile.

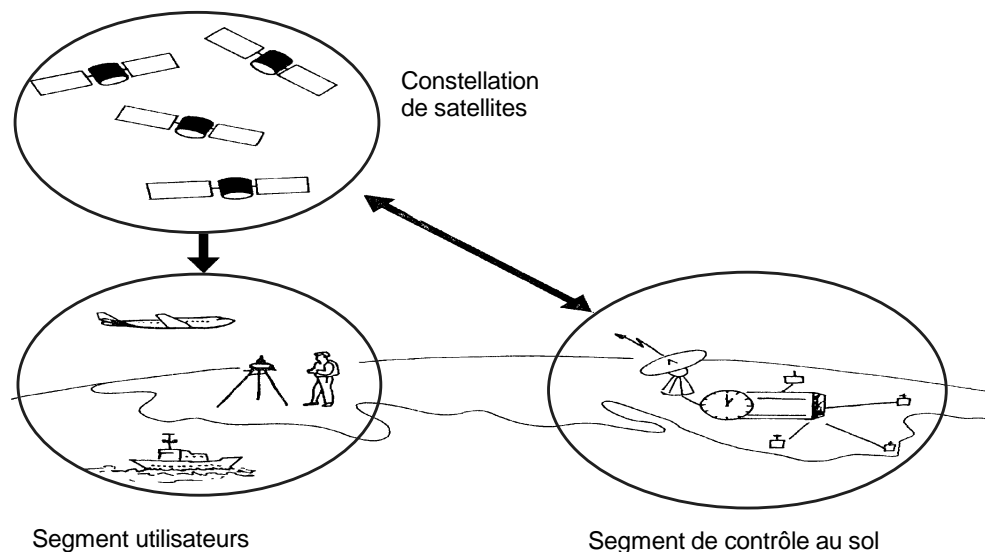


Figure 2.1 Les trois segments du GPS

La constellation de satellites, qui est pleinement opérationnelle depuis juillet 1995, comprend 21 satellites, en plus de 3 satellites actifs de rechange, positionnés à 20 000 km (environ trois fois le rayon terrestre) au-dessus de la surface de la Terre. Les satellites sont répartis de telle manière qu'au moins quatre d'entre eux soient visibles presque n'importe où dans le monde à tout moment (figure 2.2). Chaque satellite reçoit et stocke des données en provenance du segment de contrôle, tient le temps avec grande précision grâce à ses horloges atomiques précises et transmet des signaux à la Terre.

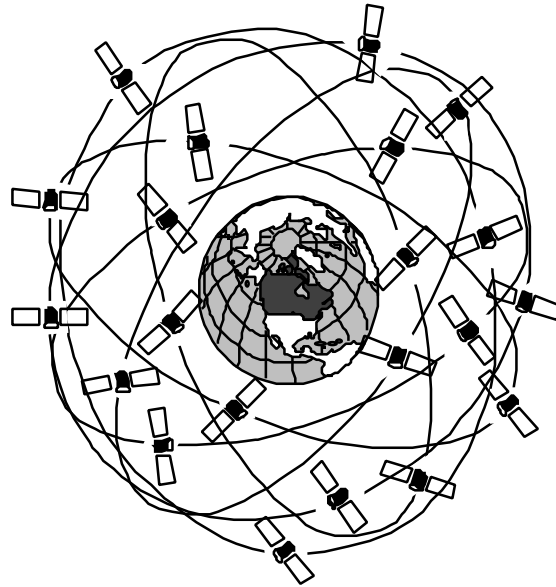


Figure 2.2 Constellation des satellites du GPS

Le segment de contrôle au sol (figure 2.1) gère le système de satellites sur une base permanente. Il compte cinq stations de poursuite réparties tout autour de la Terre, dont l'une, située à Colorado Springs, constitue la station maîtresse. Ce segment de contrôle suit tous les satellites, veille à ce qu'ils fonctionnent adéquatement et calcule leurs positions dans l'espace.

Si un satellite ne fonctionne pas correctement, le segment de contrôle au sol peut le déclarer «hors d'état de marche» et adopter les mesures nécessaires pour corriger le problème. Dans un de tel cas, le satellite ne doit pas servir au positionnement avant d'être à nouveau déclaré fonctionnel. Les positions calculées des satellites permettent de dériver des paramètres qui servent à prévoir les positions futures de ces mêmes satellites. Ces paramètres sont téléchargés depuis le segment de contrôle jusqu'aux satellites et sont appelés éphémérides.

Le segment utilisateurs comprend tous ceux qui utilisent de l'équipement de poursuite GPS pour capter les signaux du système afin de satisfaire des besoins particuliers en matière de positionnement. On trouve sur le marché toute une gamme d'appareils conçus pour capter les signaux GPS dans le but d'offrir aux utilisateurs un éventail toujours croissant d'applications. Presque tous les appareils de poursuite GPS se composent des mêmes éléments de base : une antenne, une section R.F. (radiofréquence), un microprocesseur, un panneau de commande et d'affichage (CDU), un enregistreur et un bloc d'alimentation. Ces composantes peuvent prendre la forme d'unités distinctes, peuvent être intégrées en une seule unité ou être partiellement intégrées (figure 2.3). Habituellement, toutes les composantes à l'exception de l'antenne sont regroupées en un seul appareil appelé récepteur. De nos jours, certains récepteurs GPS commercialement disponibles se réduisent à une carte qui peut être montée dans un ordinateur portable ou intégrée à d'autres systèmes de navigation.

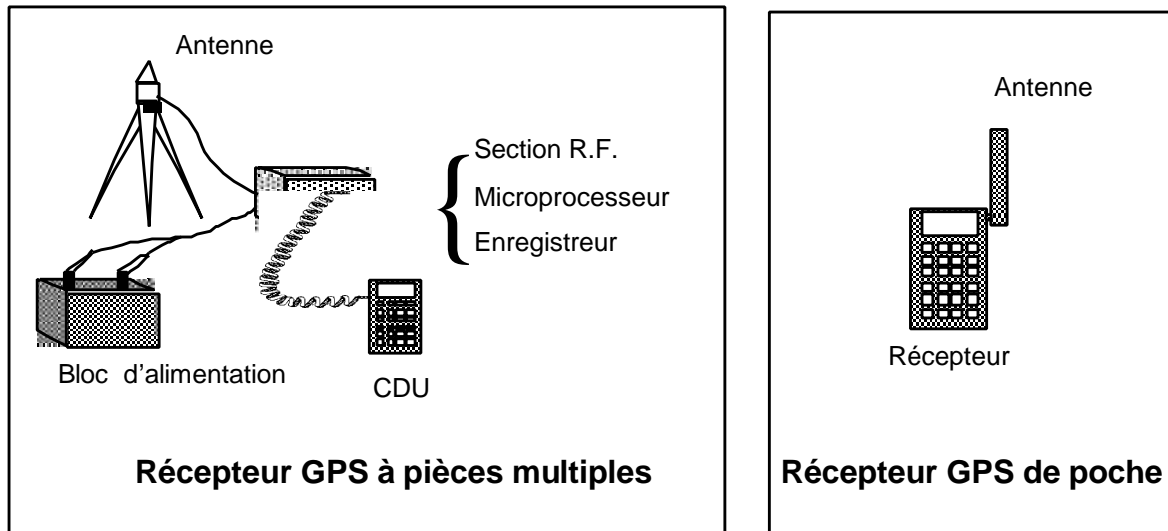


Figure 2.3 Équipement GPS

2.2 SIGNAUX GPS

Chaque satellite GPS émet continuellement des signaux qui renferment une multitude de renseignements. Compte tenu du type de positionnement effectué et de l'exactitude souhaitée, un utilisateur peut n'être intéressé qu'à une partie des renseignements compris dans le signal GPS. De même, un récepteur GPS donné peut utiliser qu'une partie seulement des informations disponibles. Il importe donc de comprendre le contenu et l'utilisation des signaux GPS. Les signaux GPS consistent en des ondes porteuses sur lesquelles sont transmis le code C/A d'accès libre, le code P ainsi que le message du satellite. Les différents types d'observations que permettent ces composantes sont décrits ci-dessous.

Observations de phase de l'onde porteuse

Les signaux des satellites GPS sont émis en permanence sur deux fréquences porteuses, 1575,42 et 1227,60 MHz, désignées respectivement L1 et L2. Puisque les ondes radio se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière, la longueur d'onde des signaux porteurs GPS se calcule comme suit :

$$\lambda = c / f \quad (2.1)$$

où λ représente la longueur d'onde (c.-à-d. la longueur d'un cycle) en mètres, c , la vitesse de la lumière (approximativement 3×10^8 m/s) et f , la fréquence porteuse en Hz (c.-à-d. le nombre de cycles par seconde). La figure 2.4 offre une représentation d'un segment de l'onde porteuse émise qui illustre les définitions de la longueur d'onde et du cycle. La fréquence et la longueur d'onde (calculées d'après l'équation [2.1]) des porteuses L1 et L2 sont indiquées au tableau 2.1.

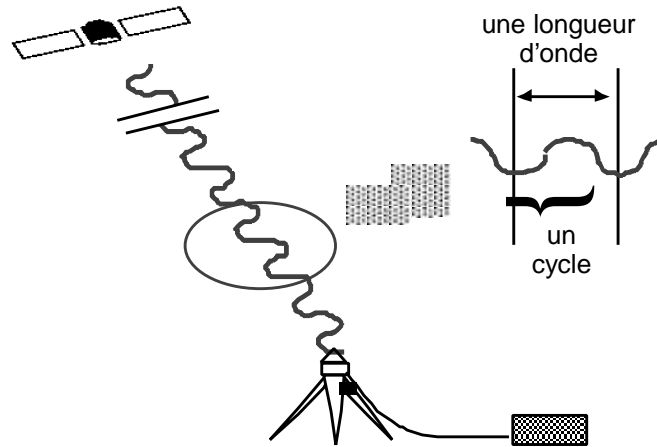


Figure 2.4 Onde porteuse

Les récepteurs GPS, qui enregistrent les observations de phase, mesurent la fraction d'une longueur d'onde (c.-à-d. la fraction de 19 cm dans le cas de l'onde porteuse L1) dès qu'ils acquièrent le signal d'un satellite et lui additionnent de manière continue par la suite un compte de cycles complets. Au moment initial de l'acquisition, le nombre entier de cycles entre le satellite et le récepteur du signal est inconnu et de ce fait est appelé ambiguïté. Donc, l'observation de phase et l'ambiguïté de phase représentent ensemble la distance satellite-récepteur. En d'autres termes,

$$\text{distance satellite-récepteur} \cong \text{obs. de phase } (\phi) + \text{ambiguïté } (N) - \text{erreurs}$$

$$\text{d'où l'équation de base:} \quad \Phi = r + N \lambda + \text{erreurs} \quad (2.2)$$

où Φ correspond à l'observation de phase de l'onde porteuse en mètres ($-\lambda\phi$), r , à la distance satellite-récepteur en mètres, N , à l'ambiguïté (c.-à-d. au nombre de cycles) et λ , à la longueur d'onde de la porteuse en mètres. Les erreurs sont décrites à la section 2.5.

Tableau 2.1 Fréquence et longueur des ondes porteuses

Porteuse	Fréquence (f)	Longueur d'onde (l)
L1	1575,42 MHz	19 cm
L2	1227,60 MHz	24 cm

Les codes et les messages des satellites sont acheminés sur l'onde porteuse par modulation. L'onde porteuse L1 est modulée par un code d'accès libre désigné code C/A, par un code précis désigné code P et par le message du satellite. L'onde porteuse L2 est modulée par le code P et par le message du satellite (figure 2.5).



Figure 2.5 Information modulée sur chaque onde porteuse

Observations issues du code (pseudodistances)

Ce sont les pseudodistances (communément appelées observations du code) qui permettent d'établir instantanément la position grâce aux satellites GPS. Celles-ci sont dérivées de la comparaison des codes transmis par le satellite et leur réplique générée par le récepteur. Les codes se composent d'une série d'éléments binaires de valeur 1 ou 0 appelés chips. Le code C/A présente une fréquence de 1,023 MHz (c.-à-d. 1,023 million de chips par seconde) et le code P, une fréquence de 10,23 MHz. La figure 2.6 présente des exemples des codes C/A et P.

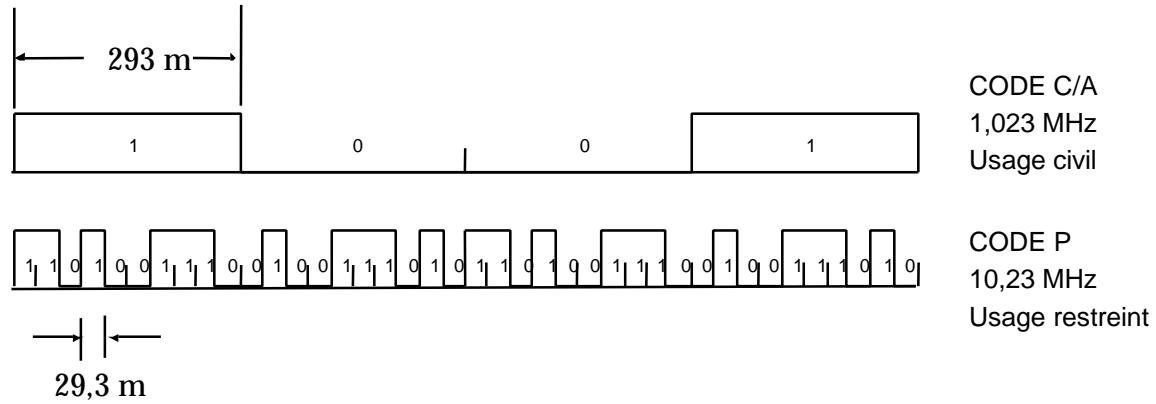


Figure 2.6 Codes C/A et P

Les longueurs des chips de 293 m et de 29,3 m, respectivement pour les codes C/A et P, ont été calculées d'après l'équation 2.1, où λ représente la longueur d'un chip. Le code P est généralement dix fois plus précis que le code C/A, cependant depuis le mois de janvier 1994, il n'est plus disponible à des fins civiles à moins d'une permission spéciale conformément aux politiques annoncées (McNeff, 1991); on ne peut donc envisager d'utiliser que le code C/A pour les applications civiles.

Les pseudodistances correspondent à la différence de temps entre le moment où le code est émis par un satellite et celui où il atteint un récepteur GPS, multipliée par la vitesse de la lumière. Autrement dit,

$$\text{pseudodistance} = \text{vitesse de la lumière} \times (\text{temps de réception} - \text{temps d'émission})$$

$$\text{ou} \quad P = c (t_r - t_t) \quad (\text{en mètres}) \quad (2.3)$$

où P représente la pseudodistance, c, la vitesse de la lumière, t_r , le temps de réception du signal et t_t , le temps d'émission du signal. L'observation provenant du code consiste en réalité en une mesure directe de la distance satellite-récepteur (r), c.-à-d. :

$$\text{pseudodistance} = \text{distance} + \text{erreurs}$$

$$\text{ou} \quad P = r + \text{erreurs} \quad (\text{en mètres}) \quad (2.4)$$

Les erreurs sont décrites à la section 2.5.

Comparaison des pseudodistances et des observations de phase

À ce stade-ci, il est possible de comparer brièvement les pseudodistances et les observations de phase de l'onde porteuse. La longueur d'onde de la porteuse (19 cm dans le cas de L1) est beaucoup moindre que la longueur des chips du code C/A (293 m) et

peut donc être utilisée pour obtenir des positions d'une exactitude beaucoup plus grande que celle que permettent les pseudodistances. En effet, le niveau d'exactitude possible au moyen des pseudodistances est habituellement de l'ordre de quelques mètres alors que les observations de phase permettent un positionnement exact à quelques centimètres près.

Cependant, si l'on compare les équations (2.2) et (2.4), on se rend immédiatement compte de la difficulté qu'il y a à employer les observations de phase plutôt que les pseudodistances. Avec ces dernières, on mesure directement la distance satellite-récepteur. Avec les observations de phase, le terme d'ambiguïté (nombre de cycles entiers) doit être estimé avant que l'on puisse tirer avantage de la précision de cette observation. L'estimation de l'ambiguïté mène à des complexités dans l'utilisation des observations de phase, inexistantes avec les pseudodistances. Le tableau 2.2 résume les avantages et les inconvénients des deux types d'observations.

Tableau 2.2 Principaux avantages et inconvénients des observations de pseudodistances et de phase

	Pseudodistances	Observations de phase
Avantages	Non ambiguës Simples	Possibilité d'une grande exactitude de positionnement
Inconvénients	Faible exactitude de positionnement	Complexité plus grande

Message du satellite

Le message du satellite, modulé sur les deux fréquences L1 et L2, contient, entre autres renseignements, les éphémérides diffusées ainsi que l'état de santé du satellite. Les éphémérides comprennent les paramètres nécessaires pour calculer la position d'un satellite dans l'espace à un moment donné et l'état de santé du satellite indique si celui-ci fonctionne correctement. Presque tous les récepteurs utilisent les éphémérides diffusées conjointement avec les observations de pseudodistances, les observations de phase ou les deux pour établir la position dans l'espace du récepteur GPS.

2.3 TYPES DE POSITIONNEMENT GPS

Jusqu'à présent, nous avons décrit les trois segments du GPS et les composantes des signaux diffusés par les satellites. Les principales méthodes de positionnement existantes peuvent maintenant être expliquées. Noter que le présent chapitre ne renferme qu'un exposé général de ces méthodes de positionnement GPS qui sont explicitées au chapitre 4.

Positionnement autonome et positionnement relatif

Le positionnement au moyen du GPS peut s'effectuer de façon autonome ou de façon relative. En positionnement autonome, les coordonnées d'un récepteur en un point «inconnu» sont établies relativement au cadre de référence des satellites d'après les positions «connues» des satellites GPS suivis. Le positionnement autonome est également dit positionnement absolu et, souvent, simplement positionnement par point (de l'anglais «point positioning»). Dans le positionnement relatif, les coordonnées d'un récepteur en un point «inconnu» sont établies relativement à celles d'un récepteur en un point «connu».

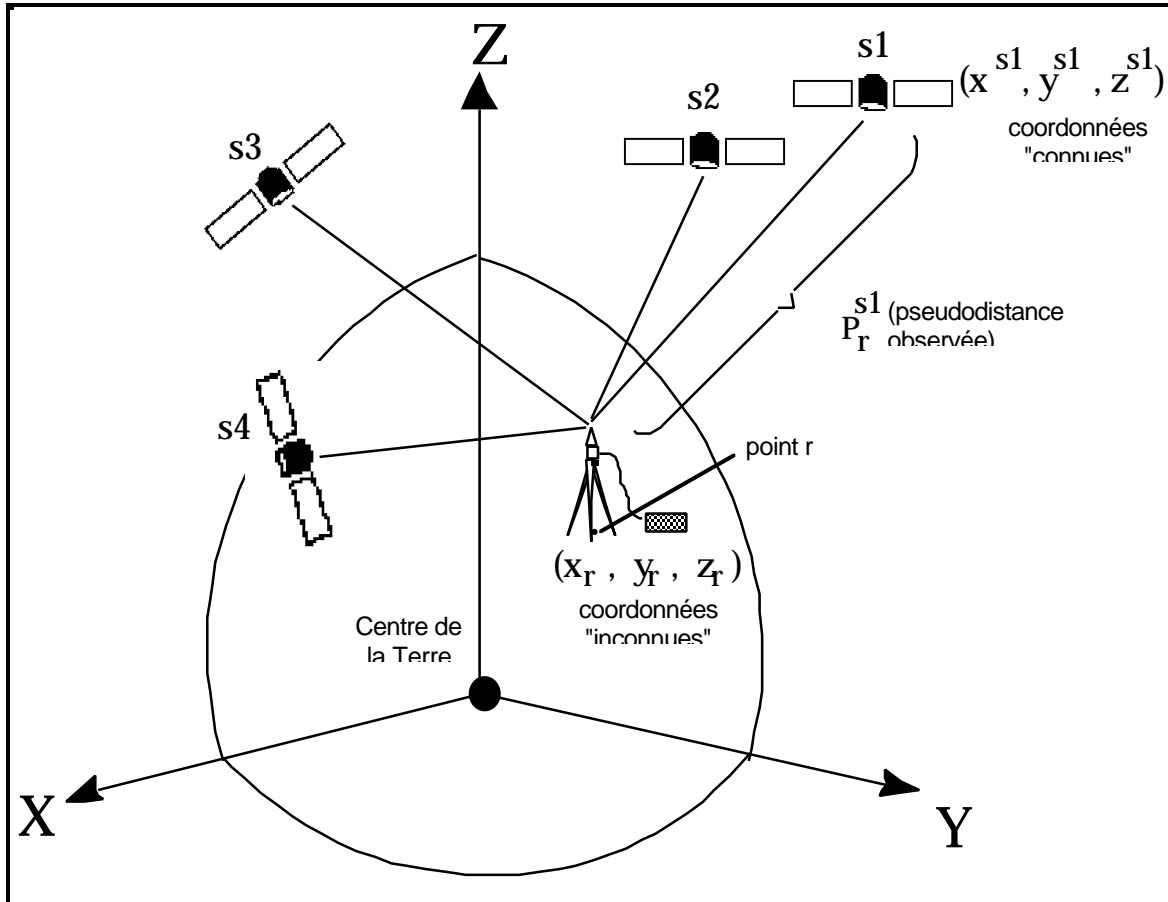


Figure 2.7 Positionnement autonome

La figure 2.7 illustre la notion de positionnement autonome. Grâce aux éphémérides, la position de n'importe quel satellite à n'importe quel moment dans le temps peut être calculée.

Sur la figure, s1, s2, s3 et s4 représentent quatre satellites différents qui sont suivis. La position de ceux-ci est donnée par rapport au centre de la Terre dans le système de coordonnées x, y et z. Les coordonnées de s1 sont notées (x^{s1}, y^{s1}, z^{s1}) . Les coordonnées de r, le point inconnu, relativement au centre de la Terre, sont (x_r, y_r, z_r) . La pseudodistance

observée, P_r^{s1} , permet d'établir la relation entre les coordonnées connues du satellite 1 et les coordonnées inconnues du récepteur au moyen de l'équation d'un vecteur dans l'espace tridimensionnel :

$$P_r^{s1} = \sqrt{(x^{s1} - x_r)^2 + (y^{s1} - y_r)^2 + (z^{s1} - z_r)^2} + \text{erreurs} \quad (2.5)$$

Une équation similaire à celle décrivant la relation entre le satellite 1 et le récepteur, peut être formulée pour les différents satellites suivis. Grâce à un minimum de quatre satellites, toutes les inconnues (x_r , y_r , z_r et un terme relié à la synchronisation des horloges qui fait partie des erreurs) peuvent être calculées.

La notion de positionnement relatif est illustrée à la figure 2.8. Plutôt que d'établir la position d'un point sur la Terre par rapport aux satellites (comme c'est le cas en positionnement autonome), la position d'un point sur la Terre est établie par rapport à celle d'un autre point connu. L'avantage du positionnement relatif sur le positionnement autonome réside dans l'exactitude beaucoup plus grande qu'il permet, puisque la plupart des erreurs dans les observations GPS sont communes aux points «connu» et «inconnu» et peuvent être annulées durant le traitement des données.

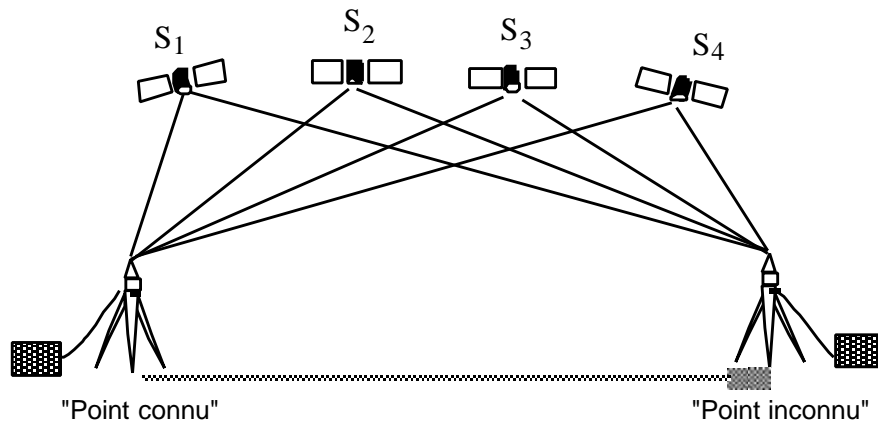


Figure 2.8 Positionnement relatif

Les expressions positionnement différentiel et positionnement relatif sont parfois employées indifféremment l'une pour l'autre. Toutefois, étant donné que le positionnement différentiel (qui sera abordé à la section 4.1) désigne plus souvent un type particulier de positionnement relatif, appliquant des corrections mesurées à un point de position «connue» aux observations effectuées en un autre, de position «inconnue», le positionnement relatif est l'expression retenue dans le présent document pour décrire la notion générale illustrée à la figure 2.8.

Positionnement statique et positionnement cinématique

Le positionnement GPS peut être également dit statique ou cinématique. En positionnement statique, un récepteur GPS est stationnaire alors qu'en positionnement cinématique, le récepteur recueille les données GPS tout en se déplaçant. La figure 2.9 illustre les notions de positionnements statique et cinématique aussi bien en positionnement autonome que relatif. Noter qu'en positionnement cinématique relatif, le récepteur, dit de contrôle, est stationnaire en un point connu alors qu'un second récepteur, dit mobile, se déplace suivant la trajectoire à positionner.

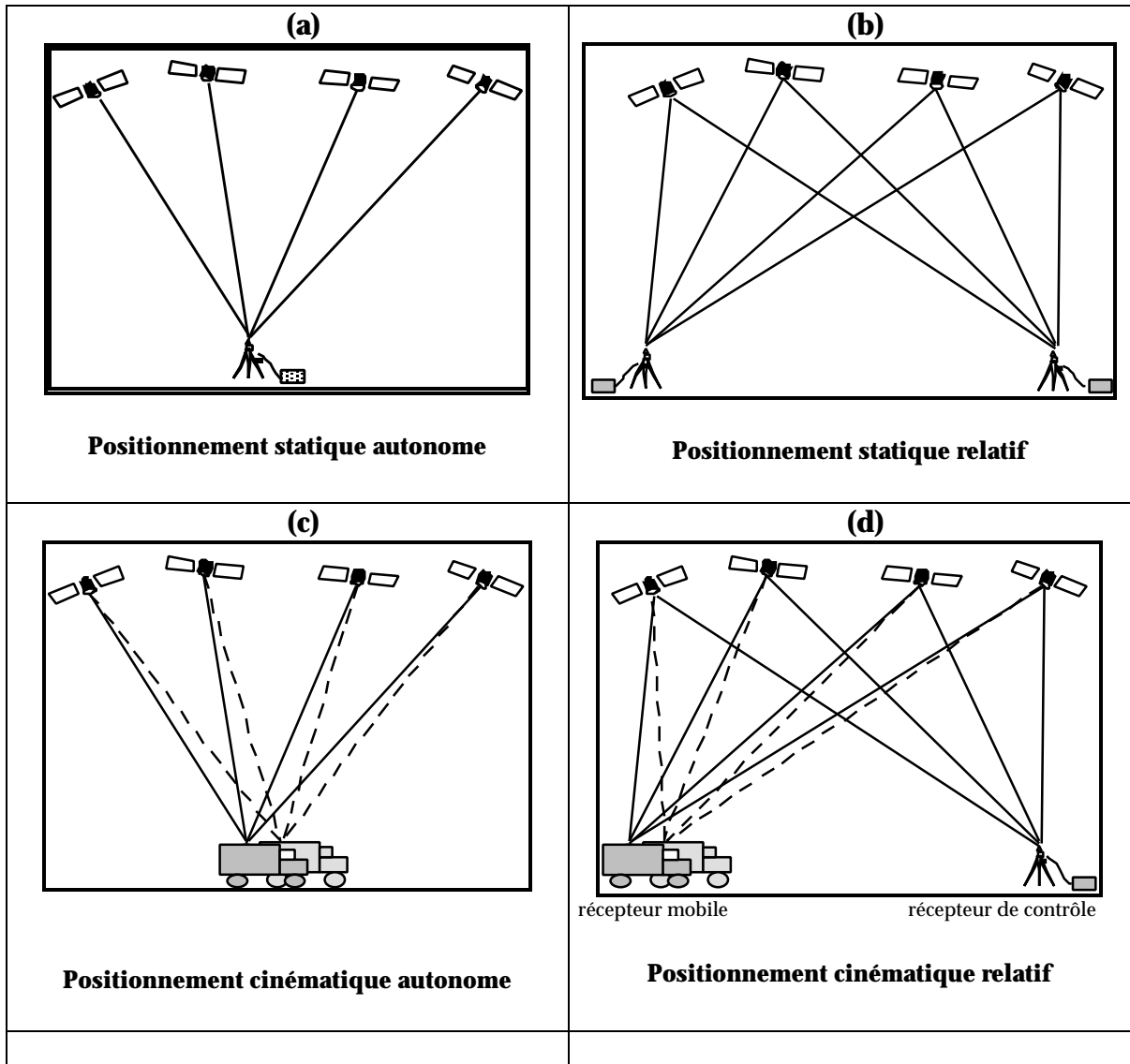


Figure 2.9 Positionnements statique et cinématique

Traitement en temps réel et traitement après mission

Les positions GPS peuvent être obtenues par traitement en temps réel ou après mission (figure 2.10). Dans le traitement en temps réel, les positions sont calculées presque instantanément et sur place. En traitement après mission (post-traitement), les données sont combinées et réduites une fois qu'elles ont toutes été recueillies. En positionnement relatif en temps réel, un système de communication est indispensable pour transmettre les corrections du récepteur de contrôle à un récepteur mobile (figure 2.10b). Le traitement après mission d'un positionnement relatif exige le rassemblement des données recueillies par tous les récepteurs après la période d'observation (figure 2.10d). Même en positionnement autonome en temps réel, il reste nécessaire, pour beaucoup d'applications GPS, de télécharger les données dans une base de données propre à l'application de l'utilisateur (figure 2.10c).

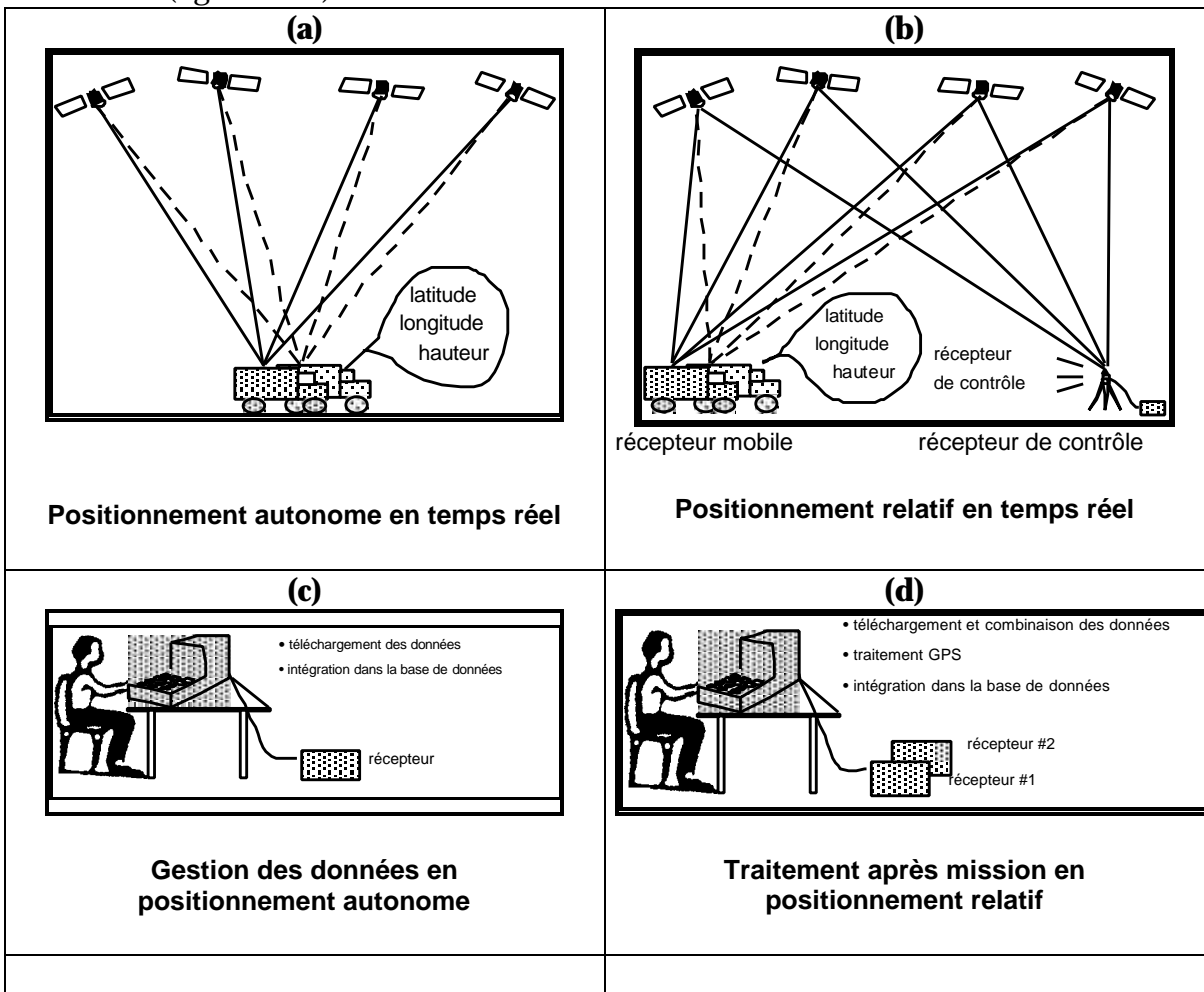


Figure 2.10 Traitements en temps réel et après mission

Le positionnement autonome de très faible exactitude, basé sur les observations de pseudodistances et les éphémérides diffusées, est habituellement calculé par les récepteurs GPS en temps réel, tandis que le positionnement relatif de très grande exactitude, basé sur les observations de phase, est presque toujours le résultat d'un traitement après mission.

Les méthodes de positionnement qui permettent un niveau d'exactitude se situant entre ces deux extrêmes offrent l'option de faire le traitement en temps réel ou après mission

Tout positionnement GPS peut être classé comme étant statique ou cinématique, autonome ou relatif, en temps réel ou après mission. Au chapitre 4, des méthodes de positionnement GPS sont exposées, mais chacune de celles-ci peut également être classée selon la terminologie ci-dessus. Tous les utilisateurs du GPS, quel que soit le type de positionnement employé, doivent connaître les moments les plus favorables pour la collecte de données; ce qui nous amène aux questions de visibilité et de disponibilité des satellites.

2.4 VISIBILITÉ ET DISPONIBILITÉ DES SATELLITES

Les utilisateurs du GPS doivent savoir quels satellites suivre à quel moment et où les trouver, pour obtenir de meilleurs résultats. La terminologie permettant de décrire la visibilité des satellites est présentée ci-après suivie d'un exposé sur leur géométrie, leurs azimuts et leurs hauteurs, sur l'accès sélectif et sur l'antileurrage (ou antibrouillage).

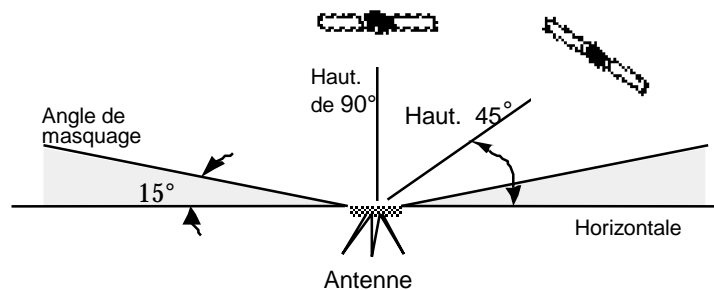


Figure 2.11 Hauteurs et angles de masquage

La position des satellites par rapport à un point particulier sur la Terre est décrite en termes de leur hauteur et de leur azimut. La hauteur d'un satellite est l'angle entre l'horizontale et la ligne de visée du satellite à l'emplacement de l'antenne (désignée «Haut.» à la figure 2.11).

L'azimut est l'angle mesuré dans le sens horaire entre le nord et la position du satellite dans le ciel (désigné «Az.» à la figure 2.12). Les récepteurs et les logiciels de traitement GPS comportent habituellement une option qui permet d'adopter un angle de masquage particulier (aussi appelé angle de coupure). L'angle de masquage est la hauteur sous laquelle les signaux GPS ne sont pas enregistrés ou utilisés (figure 2.11). Un satellite est dit «visible» à un moment donné s'il se trouve au-dessus de l'angle de masquage adopté et supposant l'absence de tout obstacle.

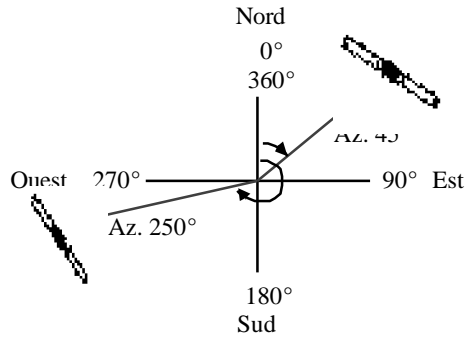


Figure 2.12 Azimut

Les obstacles sont des objets qui bloquent le signal entre un satellite et un récepteur. Si, par exemple, le satellite dont on souhaite capter les signaux se trouve à une hauteur de 20 degrés et à un azimut de 70 degrés et un immeuble s'élève à la même hauteur et dans la même direction, le signal du satellite est bloqué. Il est donc très important d'éviter les obstacles pour optimiser le positionnement GPS.

Pour n'importe quel endroit sur la Terre, pour une date et une heure données, il est possible de prévoir quels satellites seront visibles ainsi que leur position dans le ciel. Cette prévision est réalisée au moyen d'un logiciel conçu à cette fin et des fichiers d'almanach, qui contiennent des paramètres tronqués des orbites des satellites, ou encore des fichiers d'éphémérides radiodiffusés, qui contiennent les paramètres complets des orbites des satellites. Beaucoup de récepteurs affichent l'information sur la disponibilité des satellites en vue et permettent de télécharger les fichiers d'almanach. Des fichiers d'almanach à jour sont aussi disponibles de l'U.S. Coast Guard Navigation Centre (voir l'appendice B pour les détails). Des logiciels servant à calculer la visibilité des satellites sont disponibles sur le marché et accompagnent habituellement le progiciel du récepteur GPS. Au moment de calculer la disponibilité des satellites, l'utilisateur doit prendre soin de n'utiliser que des almanachs récents, ne datant pas de plus d'un mois.

La figure 2.13 présente un exemple de graphique de visibilité des satellites pour une période de 12 heures le 1^{er} septembre 1992, à Waterloo (Ontario), pour un angle de masquage de 15 degrés. Le nombre de satellites visibles est porté en regard de l'heure locale. Pendant deux intervalles, seulement trois satellites sont visibles, ce qui est insuffisant pour un positionnement autonome. Pendant une courte période (de 7 à 8 heures), six satellites sont visibles; il s'agit là d'une occasion favorable puisque, en règle générale, plus les satellites sont nombreux, meilleures sont les chances de réussir un positionnement GPS. On notera que maintenant que le GPS est pleinement opérationnel, il est très rare de voir des moments avec moins de quatre satellites visibles.

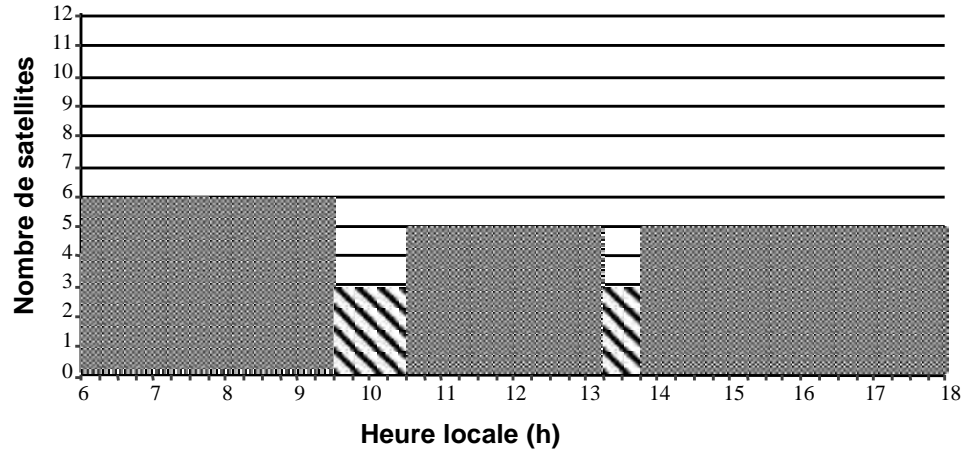


Figure 2.13 Graphique de visibilité des satellites

La couverture offerte par les satellites se répète de jour en jour, mais survient quatre minutes plus tôt chaque jour. Cela signifie que le graphique de visibilité des satellites du 2 septembre serait identique à celui du 1^{er} septembre (figure 2.13), mais décalé de quatre minutes vers la gauche. Le graphique de visibilité des satellites du 8 septembre (une semaine plus tard) serait décalé d'environ une demi-heure vers la gauche et celui du 1^{er} octobre (un mois plus tard), d'environ deux heures vers la gauche.

Géométrie des satellites

Une carte du ciel semblable à celle de la figure 2.14 sert parfois à illustrer la visibilité des satellites. Pour interpréter une telle carte, le lecteur doit imaginer se trouver au centre de celle-ci. Chaque cercle concentrique représente une hauteur et chaque rayon, un azimut. Dans la figure, la zone ombrée sous la hauteur de 15 degrés représente l'angle de masquage. La trajectoire de tous les satellites visibles au cours d'une période de deux heures est tracée. Le numéro figurant sur chaque ligne tracée sert à identifier le satellite. À titre d'exemple, la trajectoire satellite 13 sur la carte va d'une hauteur de 40 degrés et d'un azimut de 270 degrés à une hauteur approximative de 63 degrés et à un azimut de 10 degrés.

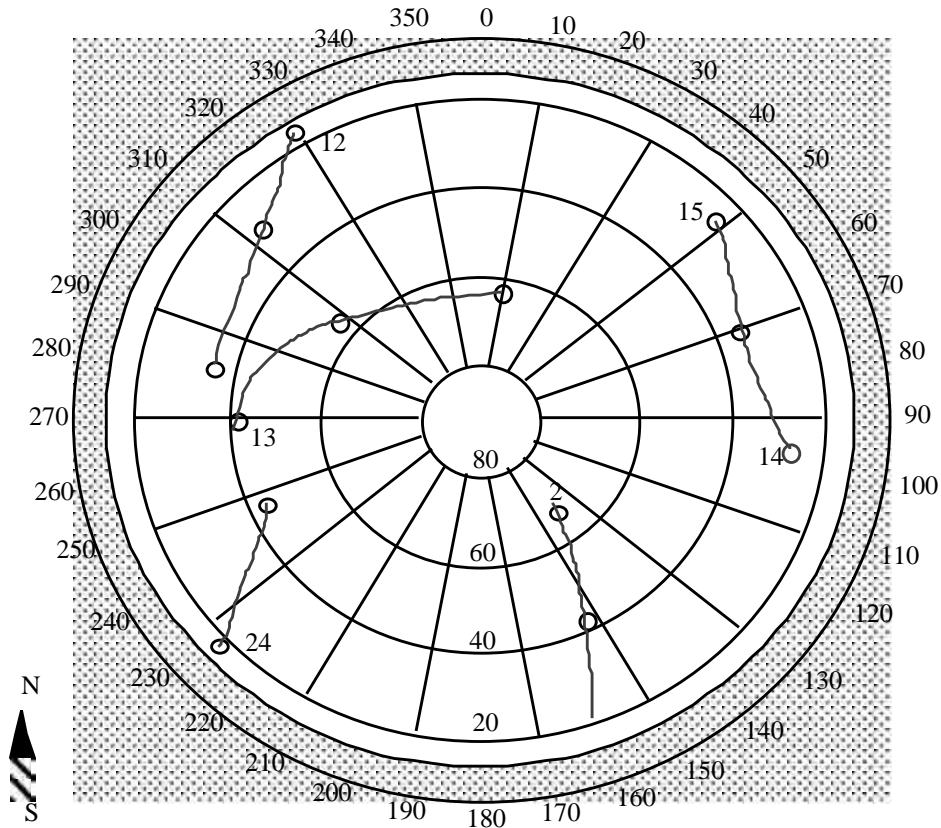


Figure 2.14 Carte du ciel

La géométrie des satellites a une incidence directe sur l'exactitude du positionnement. Le positionnement autonome le plus précis s'obtient lorsque les satellites sont bien répartis dans le ciel (p. ex. un satellite au zénith et les autres, également répartis à une hauteur approximative de 20 degrés). Les conditions géométriques ne sont plus optimales lorsque les satellites sont regroupés dans un seul quadrant du ciel. Puisqu'elle contribue à l'exactitude du positionnement, la géométrie des satellites est quantifiée au moyen d'un paramètre de diminution de la précision d'origine géométrique (GDOP). La figure 2.15 fournit l'exemple d'un GDOP favorable et d'un autre, défavorable, selon la configuration des satellites.

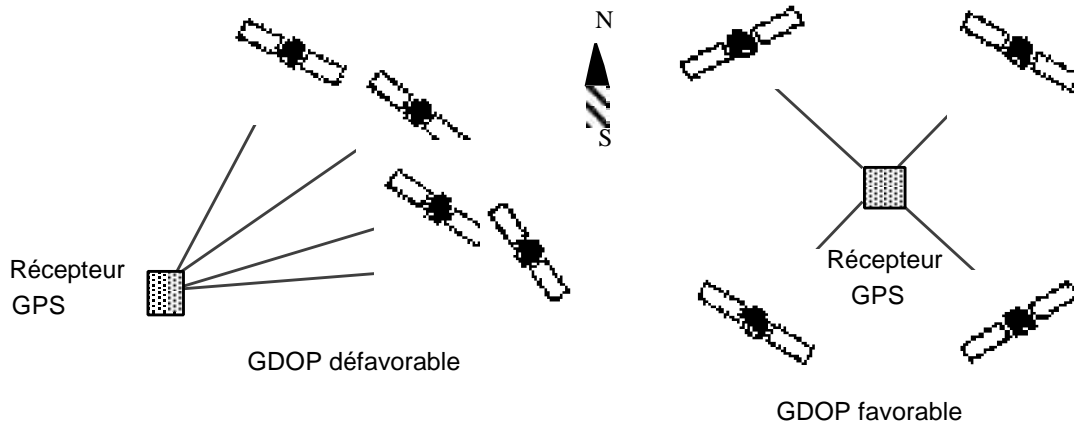


Figure 2.15 GDOP défavorable et favorable

En multipliant toutes les erreurs prévues sur les pseudodistances (ce que l'on nomme l'erreur équivalente sur la distance pour l'utilisateur (UERE)) (voir la section 2.5) par le GDOP, l'utilisateur obtient une estimation du niveau d'exactitude du positionnement autonome en fonction des quatre composantes estimées (trois coordonnées et le temps). D'autres types de DOP (diminution de la précision), lorsque multipliées par l'UERE, permettent d'obtenir des estimations de l'exactitude de la position, suivant l'horizontale et suivant la verticale comme l'indique le tableau 2.3.

La plupart des progiciels GPS permettent de calculer les DOP avant une période d'observation. L'information nécessaire pour calculer les DOP est la même que celle qui est nécessaire pour le calcul de la disponibilité des satellites et l'établissement de la carte du ciel (c.-à-d. un fichier d'almanach ou d'éphémérides récent, la latitude et la longitude approximatives, la date et la période d'intérêt). La figure 2.16 illustre le PDOP (diminution de la précision de la position) correspondant au graphique de visibilité des satellites présenté à la figure 2.13. Il faut noter une tendance générale à la baisse du PDOP au fur et à mesure qu'augmente le nombre de satellites disponibles et inversement.

Tableau 2.3 Types de DOP

Acronyme	Type	Composante(s) de la position
GDOP	Géométrie	Position 3D et temps
PDOP	Position	Position 3D
HDOP	Horizontale	Position horizontale 2D
VDOP	Verticale	Hauteur 1D

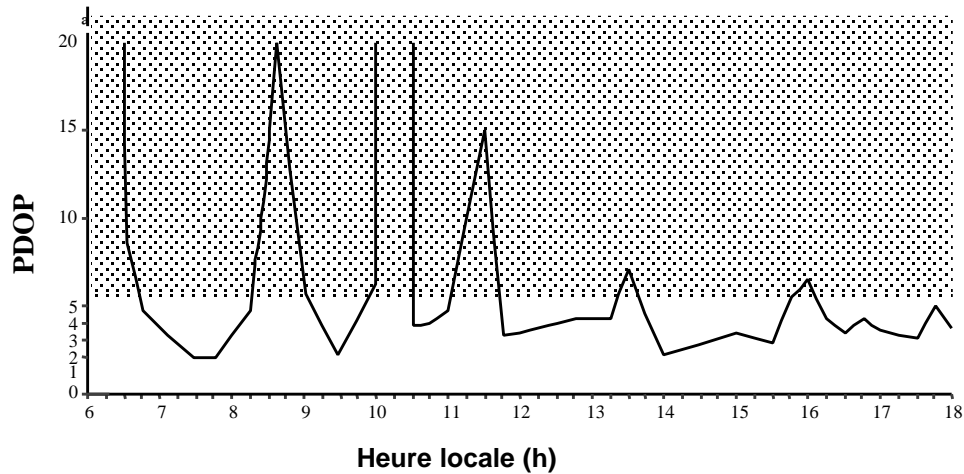


Figure 2.16 Courbe du PDOP

En positionnement GPS, plus le PDOP est faible, meilleurs sont les résultats obtenus. Un PDOP de 5 ou de 6 est habituellement recommandé comme limite supérieure pour le positionnement, en particulier pour de courtes périodes d'observation (p. ex. quelques minutes). Sur la figure 2.16, la région dans laquelle le PDOP est supérieur à 6 est ombrée afin d'illustrer les périodes qui ne sont pas propices aux observations GPS. Ainsi, au jour et à l'endroit indiqués, les observations devraient être effectuées entre 7 h et 8 h plutôt qu'entre 8 h et 9 h, compte tenu du PDOP favorable pendant la première de ces deux périodes. En positionnement statique relatif sur de longues périodes (p. ex. supérieures à une heure), le PDOP est moins important étant donné que l'utilisateur tire alors profit non seulement de la configuration géométrique des satellites, mais également de la géométrie de leur trajectoire dans le ciel pendant la période d'observation.

Accès sélectif et antileurrage

Deux expressions servent souvent à qualifier l'état du GPS : l'accès sélectif (SA) (également appelé disponibilité sélective) et l'antileurrage (AS) (également appelé antibrouillage). Elles désignent toutes deux des techniques pour protéger l'utilisation des signaux GPS à des fins militaires et ont pour conséquence de limiter l'exactitude possible pour les utilisateurs civils. L'accès sélectif consiste en une dégradation de l'information quant à la synchronisation des horloges des satellites contenue dans le message transmis par les satellites et qui, depuis le mois de novembre 1991, est appliquée de façon permanente. C'est en raison principalement de l'accès sélectif que l'exactitude du positionnement autonome basée seulement sur l'information diffusée est limitée à 100 m en planimétrie et à 156 m, en altimétrie, au niveau de confiance de 95 % (DoD et DoT des États-Unis, 1986), alors qu'elle pourrait être de 20 à 30 m et de 30 à 45 m respectivement sans l'application de l'accès sélectif (Cannon, 1991).

L'antileurrage consiste à refuser l'accès au code P aux utilisateurs civils (à l'exception de ceux qui bénéficient d'une autorisation spéciale de la part du DoD des

États-Unis). Cette mesure conforme aux politiques annoncées (McNeff, 1991) est déjà en place depuis la fin janvier 1994. Son application a consisté à remplacer le code P par un code Y, sur les porteuses L1 et L2, qui possède les mêmes propriétés que le code P, mais est inconnu des utilisateurs non autorisés.

2.5 ERREURS

Il importe que les utilisateurs intéressés aux applications comprennent les sources d'erreur affectant les observations GPS puisqu'elles ont une incidence directe sur les méthodes à adopter dans le but d'obtenir l'exactitude voulue. Les erreurs entraînent des écarts entre les distances «mesurée» et «réelle» séparant le satellite du récepteur; c'est pourquoi un terme d'erreur a été incorporé aux équations de base pour les observations de phase (2.2) et celles issues du code (2.4). Les particularités des types d'erreurs survenant dans les observations GPS ainsi que la façon de les corriger figurent dans plusieurs publications (p. ex. Wells et al., 1986; Lachapelle, 1991) et sont abordées brièvement ci-après.

Les erreurs qui ont une incidence sur la mesure des distances GPS sont illustrées à la figure 2.17. L'erreur d'orbite est la différence entre la position d'un satellite calculée au moyen des éphémérides diffusées et la position «réelle» du satellite dans l'espace. La valeur nominale de telles erreurs varie de 5 à 25 m (Lachapelle, 1991). Les erreurs attribuables à la synchronisation des horloges des satellites sont de l'ordre de 10 à 30 m incluant l'effet de l'accès sélectif (SA), si l'on suppose que les corrections diffusées dans le message du satellite sont appliquées (Wells et al., 1986).

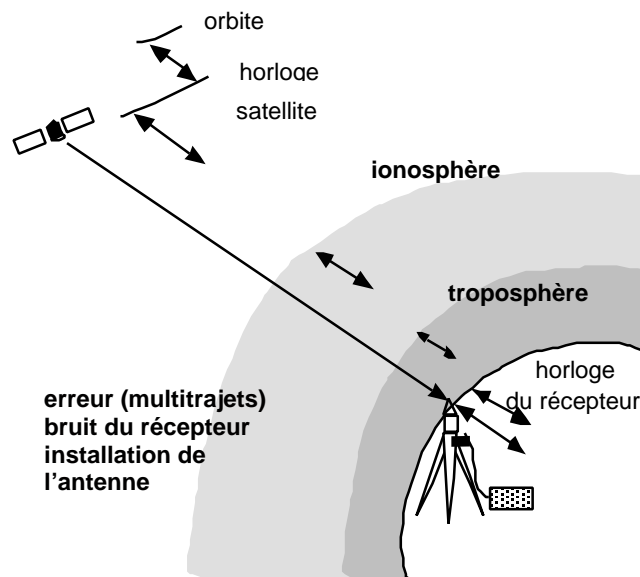


Figure 2.17 Erreurs courantes

Jusqu'à présent dans notre exposé, nous avons supposé que les signaux GPS se déplaçaient à la vitesse de la lumière. Cette hypothèse ne tient pas dans deux des couches de l'atmosphère : la couche d'électrons libres qui va de 50 à 1000 km au-dessus de la terre, appelée ionosphère, et celle qui va jusqu'à 80 km au-dessus de la terre, appelée troposphère (Wells et al., 1986). Les effets ionosphériques dépendent d'un grand nombre de variables reliées entre elles, notamment le cycle solaire, la période de l'année, l'heure, la situation géographique et l'activité géomagnétique. Les erreurs ionosphériques varient de 1 à 50 m au zénith (c.-à-d. à une hauteur des satellites de 90 degrés) et peuvent atteindre jusqu'à 150 m à l'horizon (c.-à-d. lorsque la hauteur est de 0 degré). Les erreurs pour des satellites se trouvant à de faibles hauteurs sont supérieures en raison de la trajectoire plus longue des signaux dans la troposphère et dans l'ionosphère. Des coefficients d'un modèle pour la correction de l'effet ionosphérique sont transmis par les satellites et permettent de réduire partiellement ces erreurs (Seeber, 1993). Il est cependant possible de les corriger efficacement par des observations bifréquences. Les erreurs troposphériques peuvent atteindre 2 m au zénith et jusqu'à environ 20 m à une hauteur de 10 degrés (Wells et al., 1986). Différents modèles de correction sont utilisés par les récepteurs ou les logiciels de traitement pour réduire efficacement ces erreurs.

Les erreurs de l'horloge du récepteur varient de 10 à 100 m selon la qualité de l'horloge (Wells et al., 1986). Cependant en positionnement, cette erreur de l'horloge est estimée avec les coordonnées et n'a donc pas une grande incidence sur l'exactitude qu'il est possible d'obtenir.

Des erreurs dues à la propagation par trajets multiples (multitrajets) sont introduites lorsque des signaux reçus directement se combinent à d'autres, réfléchis par des objets voisins, de telle manière que le vrai signal subit une interférence attribuable au signal réfléchi. L'erreur dite bruit du récepteur dépend quant à elle de la résolution des observations issues du code ou des observations de phase à l'intérieur du récepteur GPS. L'ordre de grandeur des erreurs attribuables aux multitrajets et au bruit du récepteur est proportionnel à la longueur de chip du code pour les mesures de pseudodistances ou à la longueur d'onde pour les observations de phase. Dans le cas des observations de pseudodistances issues du code C/A, l'erreur due aux multitrajets peut s'élever à 20 m (Lachapelle et al., 1989), alors que, pour les observations de phase sur L1, elle ne peut dépasser 5 cm (Georgiadou et Kleuseberg, 1988). Typiquement, le bruit du récepteur peut introduire des erreurs de quelques mètres dans le cas des observations de pseudodistances et de quelques millimètres dans le cas des observations de phase. La conception du récepteur aussi bien que de l'antenne peuvent influencer les multitrajets et le bruit dans les observations (Van Dierendonck et al., 1992).

Les erreurs sur une distance satellite-récepteur mesurée sont résumées au tableau 2.4. Toutes les erreurs présentées au tableau 2.4, combinées selon les lois de la propagation des erreurs, constituent l'erreur équivalente sur la distance pour l'utilisateur (UERE). C'est cette valeur, multipliée par le DOP (diminution de la précision), qui fournit une estimation du niveau d'exactitude possible en positionnement autonome.

Le saut de cycle est une erreur propre aux observations de phase de l'onde porteuse. En se référant à l'exposé ci-haut sur l'équation de l'observation de phase (2.2), on

se rappellera que la phase est mesurée de façon continue, mais comporte un terme d'ambiguïté au moment de l'acquisition initiale du signal du satellite par le récepteur. La perte momentanée du signal d'un satellite entraîne des sauts de cycle, au cours desquels un nombre entier de longueurs d'ondes peuvent être perdues. Ces sauts de cycle doivent être corrigés lors du traitement des données si un niveau d'exactitude sous le décimètre est souhaité.

Tableau 2.4 Importance des erreurs

Erreur	Ordre de grandeur
Horloge du satellite	de 10 à 30m (incluant les effets de l'accès sélectif et en supposant que les corrections diffusées ont été apportées)
Orbite	de 5 m à 25 m (éphémérides diffusées)
Ionosphère	de 1 à 100 m (après application du modèle diffusé) 1 m (observations bifréquences)
Troposphère	0,5 m (après application d'un modèle)
Multitrajets	
Obs. du code C/A	de 50 cm à 20 m (selon l'équipement GPS et le lieu)
Obs. de phase	jusqu'à quelques cm (selon l'équipement GPS et le lieu)
Bruit du récepteur	
Obs. du code C/A	de 10 cm à 3 m (selon l'équipement GPS)
Obs. de phase	de 0,5 à 5 mm (selon l'équipement GPS)

Le grand nombre de techniques de positionnement GPS et les niveaux d'exactitude qui en découlent résultent des types d'observations effectuées (pseudodistances, phase ou les deux) et des moyens utilisés pour corriger les erreurs mentionnées au tableau 2.4. Une exactitude de 2 à 20 (2drms) est possible en positionnement autonome, en corrigeant, entre autres, les erreurs d'orbite et d'horloge. En positionnement relatif, la plupart des erreurs d'orbite ainsi que les erreurs troposphériques et ionosphériques le long du trajet satellite-récepteur sont communes aux deux emplacements et n'ont en conséquence qu'une faible incidence sur les positions relatives. Plus les récepteurs GPS sont rapprochés l'un de l'autre, plus les erreurs sont communes aux deux et plus grande est l'exactitude obtenue en positionnement relatif. Inversement, plus les deux récepteurs GPS sont éloignés l'un de l'autre, moins ces erreurs sont communes aux deux et moins grande est l'exactitude en positionnement relatif.

Pour l'obtention d'un positionnement statique relatif de grande exactitude, des approches perfectionnées de traitement des erreurs sont utilisées, notamment la combinaison d'observations par des techniques de double différenciation, de même que des techniques de modélisation et d'estimation avancées. Des récepteurs bifréquences peuvent aussi être utilisés pour supprimer presque entièrement les erreurs dues à

l'ionosphère. Nous ne traiterons pas en détail dans le présent document de ces techniques pour le positionnement statique, mais celles-ci sont bien documentées dans de nombreux ouvrages publiés sur le GPS.

Dans le présent chapitre, nous avons exposé les principes du GPS, les composantes du signal, les types de positionnement, la visibilité des satellites ainsi que les sources d'erreur. Avant d'aborder la façon d'utiliser le GPS pour répondre aux besoins en matière de positionnement, certaines notions fondamentales en matière de localisation à la surface de la Terre doivent être traitées et font l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 3

NOTIONS DE BASE DU POSITIONNEMENT

Le présent chapitre expose les principes de positionnement importants dans l'application du système de positionnement global (GPS), notamment les mesures de l'exactitude, les altitudes et le géoïde ainsi que les systèmes de coordonnées et les cadres de référence. Il est particulièrement important de comprendre la différence entre les altitudes déterminées au moyen du GPS et celles déterminées par les méthodes classiques de nivellement (abordées à la section 3.2).

3.1 MESURES DE L'EXACTITUDE

Lorsque vous procédez à une mesure quelconque, il est important de quantifier sa «qualité». Par exemple, si une position doit être déterminée au moyen du GPS, on souhaiterait savoir avec un degré de certitude quantifiable si cette position est exacte à 100 m ou à 10 cm près. Il importe également de connaître les diverses expressions qui nous permettent de quantifier l'exactitude d'une mesure et leur relation entre elles afin de comparer les exactitudes mises de l'avant dans le GPS. La présente section vise à expliquer la terminologie de base des mesures de l'exactitude.

Exactitude et précision

Il vaut la peine de clarifier le sens des mots «exactitude» et «précision». L'exactitude indique dans quelle mesure une valeur estimée (ou une mesure) se rapproche de la valeur «réelle» mais inconnue, tandis que la précision indique dans quelle mesure une valeur estimée se rapproche de la valeur estimée moyenne. L'exactitude peut être grande, mais la précision, faible et vice versa, comme on peut le constater à la figure 3.1. Le centre des cercles y représente la position «réelle» et chaque point, une estimation différente.

Les erreurs qui limitent l'exactitude d'une mesure peuvent être classifiées en erreurs grossières, erreurs systématiques et erreurs aléatoires. Les erreurs grossières (dites aussi d'inattention) résultent d'une panne quelconque du matériel ou d'une faute de l'observateur. À titre d'exemple, si l'opérateur d'un récepteur GPS consigne une hauteur de l'antenne au-dessus du repère de 0,5 m plutôt que la bonne hauteur de 1,5 m, on dit qu'il a commis une erreur grossière. De telles erreurs doivent être détectées et corrigées. Les erreurs systématiques sont celles qui faussent les observations suivant un modèle ou un comportement répété et prévisible. L'idéal serait que de telles erreurs soient supprimées des observations par modélisation. Ainsi, une bonne partie de l'erreur due au retard troposphérique, mentionnée à la section 2.5, peut être supprimée grâce à un modèle mathématique qui représente les effets de la troposphère. Une fois les erreurs grossières et les erreurs systématiques supprimées des observations, reste plus que les erreurs aléatoires (dites aussi accidentelles). La précision (figure 3.1) tient aux effets aléatoires seulement, alors que l'exactitude tient aux effets aussi bien systématiques qu'aléatoires (Mikhail, 1976).

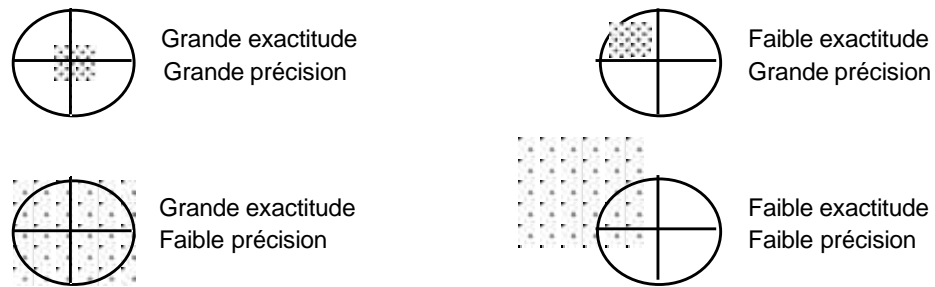


Figure 3.1 Exactitude et précision

Les erreurs aléatoires présentent la particularité que si un nombre suffisant d'observations a été effectué, il existe une probabilité égale d'erreurs négatives et d'erreurs positives, ce qui laisse une valeur moyenne nulle pour l'erreur. Selon la théorie statistique, les erreurs aléatoires tendent à se distribuer autour de la moyenne selon la fonction de distribution normale des probabilités (figure 3.2). En vertu de la théorie de la distribution normale, la zone se trouvant sous la courbe représente toutes les possibilités d'erreur aléatoire.

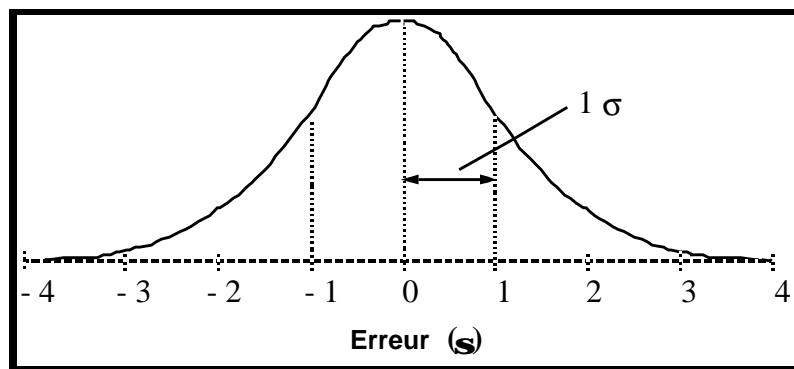


Figure 3.2 Fonction de distribution normale des probabilités

L'écart-type, représenté par le symbole σ , sert à quantifier la dispersion de part et d'autre de la moyenne et est illustré sur la courbe de la fonction de distribution normale des probabilités (figure 3.2). La certitude d'une solution peut être quantifiée par multiples de l'écart-type ou par une probabilité. La fonction de distribution normale des probabilités établit la relation entre les deux éléments. Par exemple, un écart-type de 1σ correspond à une probabilité de 68,3 % (autrement dit, le pourcentage de la zone sous la courbe de la figure 3.2 est limité par la valeur 1), et une probabilité de 95 % correspond à $1,96\sigma$ (Mikhail, 1976). Les autres relations entre les écarts-types et la probabilité sont résumées au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Relation entre l'écart-type et la probabilité - Cas unidimensionnel*

Multiples de σ	Probabilité
1 σ	68,27 %
2 σ	95,45 %
3 σ	99,73 %

Probabilité	Multiples de σ
90 %	1,645 σ
95 %	1,960 σ
99 %	2,576 σ

* Mikhail (1976)

L'écart-type, bien qu'il soit en fait une mesure de la précision, car il quantifie la dispersion de part et d'autre de la moyenne, est l'expression souvent utilisée comme mesure de l'exactitude en positionnement. On peut en obtenir une approximation expérimentale, en prenant un nombre important, N, de mesures x, en faisant la somme des carrés des différences entre chaque mesure et la moyenne des x, que l'on divise par le nombre total de mesures moins une, avant d'extraire la racine carrée du résultat obtenu comme l'indique l'équation (3.1).

$$s_x = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2 \right) / (N - 1)} \quad (3.1)$$








où \bar{x} = moyenne des x

La mesure rigoureuse de l'exactitude consiste à quantifier la dispersion de valeurs estimées de part et d'autre de la valeur «réelle» et peut être calculée selon la même équation que celle de l'écart-type en substituant dans celle-ci la valeur «réelle» (x_v) à la moyenne des x. Cette expression est appelée écart moyen quadratique (emq) [en anglais, root mean square (rms)]. Bien que l'emq et σ répondent à des définitions légèrement différentes du point de vue statistique, ces valeurs sont souvent employées l'une pour l'autre comme nous le ferons dans le présent document.

Une autre expression moins courante servant à quantifier l'exactitude d'une mesure est l'erreur probable (EP), qui correspond à une incertitude de 50 % et à 0,674 σ (National Geodetic Survey, 1986). Noter que l'écart-type, l'emq et l'erreur probable représentent toutes des mesures unidimensionnelles de l'exactitude et que, dans le GPS, des mesures de l'exactitude bidimensionnelle et tridimensionnelle sont également importantes.

Tableau 3.2 Mesures courantes de l'exactitude utilisées avec le GPS

Table 3.2 Fonction de distribution normale des probabilités

	(2)	(3)	(4) Prob.	(5) Approximation	(6) Illustration	(7) Expressions connexes
1D	rms	Moyenne quadratique	68,3 %*	σ		MSE - Erreur quadratique moyenne (carré de la rms)
	PE	Erreur probable	50 %*	$0,674 \sigma^*$		
2D		Écart d'ellipse	39,4 %*	Établie par σ_x, σ_y et corrélation		
	ECP	Écart circulaire probable	50 %*	Rayon : $0,589 (\sigma_x + \sigma_y)^*$		ECP - Également appelé CPC (écart circulaire probable)
2 drms		2 fois la moyenne quadratique de la distance	Variable de 95,4 à 98,2 % +	Rayon : $2 \sigma + \sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$		Seconde définition moins employée : rms bidimensionnelle (rayon du cercle : 1σ)
		Écart ellipsoïdal	19,9 %*	Établie par $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ et corrélation		
3D	SEP	Écart sphérique probable	50 %*	Rayon : $0,513 (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^*$		SEP - Également appelé SPE (écart sphérique probable)

*(Mikhail, 1976) + (Langley, 1991) ** (National Geodetic Survey, 1986)

Le tableau 3.2 illustre les mesures courantes de l'exactitude GPS dans des cas unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels. Dans le tableau, la première colonne indique la dimension, la deuxième, l'acronyme utilisé (le cas échéant), la troisième, le nom, la quatrième, la probabilité associée exprimée en pourcentage, la cinquième, la relation avec l'écart-type, la sixième, une représentation graphique et la septième, les expressions correspondantes en anglais.

Notez que dans les cas bidimensionnels et tridimensionnels, une ellipse d'erreur et un ellipsoïde d'erreur figurent dans le tableau. De telles mesures d'exactitude rendent compte de probabilités d'erreur variables suivant la direction. Les ellipses d'erreur sont définies d'après les écarts-types des coordonnées et leurs corrélations. Ces corrélations, qui rendent compte de l'incidence d'une erreur pour l'une des composantes sur une autre, font que l'orientation des axes des ellipses diffère de celle des axes des coordonnées. Bien que les erreurs soient exprimées en fonction de x et de y dans le tableau, le même principe s'applique à la latitude et à la longitude. Les ellipsoïdes d'erreur sont établis suivant le même principe que les ellipses d'erreur, mais dans un espace tridimensionnel.

Les autres expressions mentionnées au tableau 3.2 pour des espaces bidimensionnel ou tridimensionnel sont définies par des valeurs uniques qui correspondent à des rayons plutôt qu'à des axes d'ellipses ou d'ellipsoïdes plus complexes. L'erreur circulaire probable (ECP) et l'erreur sphérique probable (ESP) correspondent à une probabilité de 50 %, respectivement pour les cercles et les sphères. La colonne 5 du tableau 3.2 indique les relations approximatives entre les rayons de ces mesures de l'exactitude et les axes des ellipses et ellipsoïdes d'erreur plus rigoureusement définis.

Une dernière mesure de l'exactitude plus couramment utilisée dans un espace bidimensionnel dans le GPS est la «2drms». Elle se définit comme un cercle de rayon 2σ , où σ représente l'écart-type d'un vecteur dans un espace bidimensionnel. La probabilité à 2drms varie d'environ 95,5 à 98,2 % selon les ordres de grandeur relatifs de σ_x et de σ_y (Langley, 1991).

Exactitude absolue et exactitude relative

Tout comme les positionnements GPS, absolu (autonome) ou relatif, décrits à la section 2.3, les mesures de l'exactitude peuvent être considérées comme absolues ou relatives. L'exactitude absolue est une estimation de la qualité de la détermination par rapport à la position véritable dans le cadre de référence terrestre et l'exactitude relative, une estimation de la qualité de la mesure d'un vecteur entre deux points (p. ex. de l'exactitude de la mesure d'une distance entre deux points).

Les exactitudes absolues sont toujours représentées par des valeurs constantes. Par exemple, des positions déterminées en positionnement GPS autonome sont exactes à 100 m près (2drms) en planimétrie et à 156 m (2σ) en altimétrie (DoD et DoT des États-Unis, 1986). Les exactitudes relatives peuvent être représentées par des valeurs constantes, en parties par million (ppm), ou une combinaison des deux. Les parties par million sont utilisées pour exprimer la grandeur de l'inexactitude en fonction de la longueur du vecteur mesuré. Ainsi, 1 ppm correspond à une erreur de 1 mm sur une distance de 1 km et à une erreur de 1 cm sur une

distance de 10 km. La figure 3.3a illustre la relation linéaire entre la grandeur des erreurs et la longueur du vecteur pour des niveaux d'exactitude de 2,10 et 20 ppm.

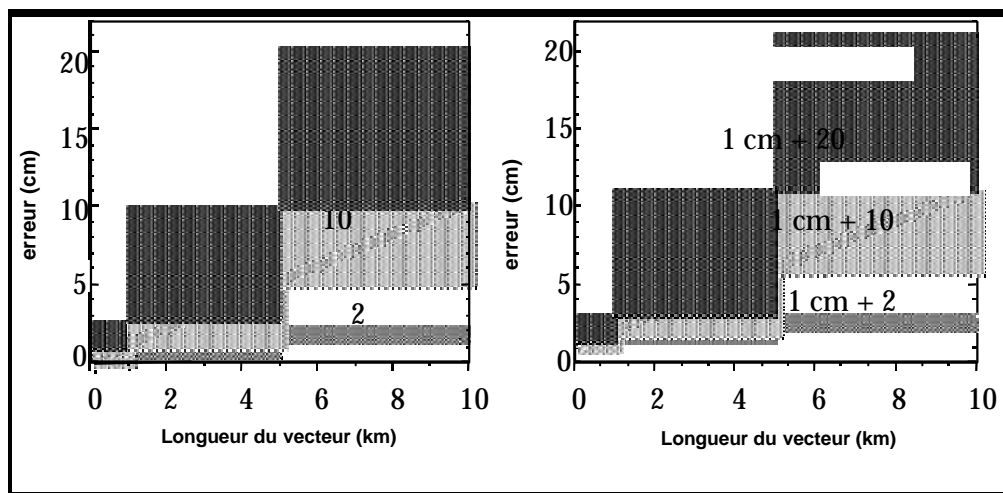


Figure 3.3 Exactitude relative GPS (ppm) : a) ppm b) constante + ppm

L'exactitude des vecteurs déterminés par GPS est souvent exprimée par la combinaison d'une constante (p. ex. 1 cm) et d'un terme linéaire (p. ex. 1 ppm). Ainsi, l'exactitude d'un levé précis peut être exprimée comme suit :

$$\text{exactitude (eqm)} = 1 \text{ cm} + 1 \text{ ppm} \quad (3.2)$$

La relation illustrée pour les ppm à la figure 3.3a l'est également à la figure 3.3b avec l'addition d'une constante de 1 cm. Dans le GPS, le terme constant rend compte des erreurs indépendantes de la longueur du vecteur, par exemple les erreurs dues à l'installation de l'antenne ou aux multitrajets, tandis que le terme linéaire rend compte des erreurs dépendant de la longueur comme les erreurs orbitales, troposphériques et ionosphériques résiduelles.

À la comparaison des figures 3.3a et 3.3b, on constate que la constante de 1 cm ajoutée au rapport de 2 ppm correspond, sur une distance de 10 km, à augmenter de 50 % l'importance de l'erreur, mais dans les cas de 10 et de 20 ppm, l'augmentation est presque négligeable. C'est la raison pour laquelle des mesures combinées de l'exactitude, comme dans l'équation (3.2), ne servent habituellement que dans les levés relatifs précis.

Exactitude, précision, écart-type, écart moyen quadratique, ECP, ESP, 2drms et ppm sont des expressions que tout utilisateur du GPS ou tout lecteur de la documentation publiée à ce sujet est susceptible de rencontrer. Les explications ci-dessus à leur sujet devraient donc être utiles pour les utilisateurs qui envisagent des applications. Tous les exposés sur l'exactitude dans le reste du présent guide se fondent sur ces expressions.

Parmi les autres aspects essentiels au positionnement sur la Terre, il faut inclure la relation entre les mesures à la surface du globe et celles qui sont effectuées au moyen des satellites GPS en orbite autour de la Terre. Ces questions seront abordées dans les deux sections suivantes, la première portant sur les systèmes altimétriques et la deuxième, sur les systèmes de coordonnées.

3.2 ALTITUDES ET GÉOÏDE

Des altitudes ainsi que des différences d'altitude peuvent être établies à l'aide du GPS, mais avec de moindres exactitudes et au prix de plus grandes complexités que les coordonnées planimétriques correspondantes. La principale difficulté que pose l'établissement des altitudes découle de la correspondance du positionnement GPS aux altitudes au-dessus de l'ellipsoïde alors que, la plupart du temps, l'utilisateur exige des altitudes orthométriques. Par conséquent, il importe beaucoup, pour ceux qu'intéresse l'application du GPS à l'établissement d'altitudes, de comprendre les différences entre ces systèmes et la façon de s'en accommoder. La présente section vise à fournir au lecteur l'information de base nécessaire.

Altitudes orthométriques et altitudes au-dessus de l'ellipsoïde

De manière classique, les altitudes ont été établies par les méthodes du nivellement, fondées sur le champ gravitationnel de la Terre et par rapport au niveau moyen de la mer. En chaque point de la Terre, la pesanteur présente une certaine valeur et une certaine direction qui peuvent être représentées par un vecteur. Chaque fois qu'un instrument est mis de niveau, la ligne de visée est réglée de manière à être perpendiculaire au vecteur de la pesanteur en ce point précis et, chaque fois qu'une mire de nivellement est dressée en un point, elle se trouve alignée sur le vecteur de la pesanteur. Les altitudes établies par nivellement sont habituellement appelées altitudes au-dessus du niveau moyen de la mer. Ces altitudes, dites aussi orthométriques, sont en fait établies par rapport au géoïde. L'altitude orthométrique est l'altitude couramment utilisée qui est indiquée, par exemple, sur les cartes topographiques.

Le géoïde est la surface équipotentielle (autrement dit, sur laquelle le potentiel gravitationnel est constant) qui correspond le mieux au niveau moyen de la mer. Il forme une surface lisse mais irrégulière, autour de la Terre. Du point de vue mathématique, il s'agit d'une surface très complexe à représenter. Par contre, l'ellipsoïde, qui consiste essentiellement en une sphère écrasée, est facile à représenter et à manipuler sur le plan mathématique. C'est pourquoi avec le GPS, un ellipsoïde est utilisé comme représentation approximative du géoïde et les altitudes sont déterminées d'après l'ellipsoïde plutôt que d'après le géoïde. La relation entre l'ellipsoïde et le géoïde est illustrée à la figure 3.4.

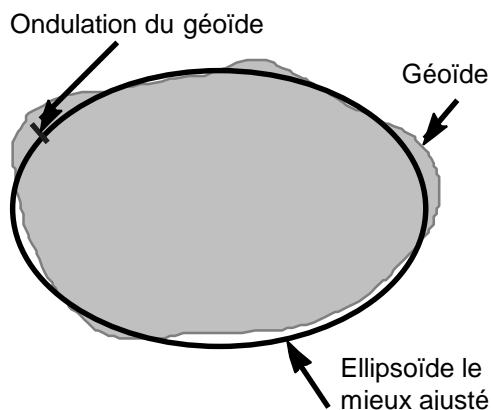


Figure 3.4 Géoïde et ellipsoïde

La distance séparant le géoïde de l'ellipsoïde est l'ondulation du géoïde. Cette ondulation peut prendre une valeur positive ou négative selon que le géoïde se trouve au-dessus ou en dessous de l'ellipsoïde en un point donné (figure 3.4). Si l'ondulation du géoïde, N , et si l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde, h , sont connues, l'altitude orthométrique peut être établie grâce à la relation illustrée à la figure 3.5. C'est-à-dire que l'altitude orthométrique est égale à l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde, moins l'ondulation du géoïde :

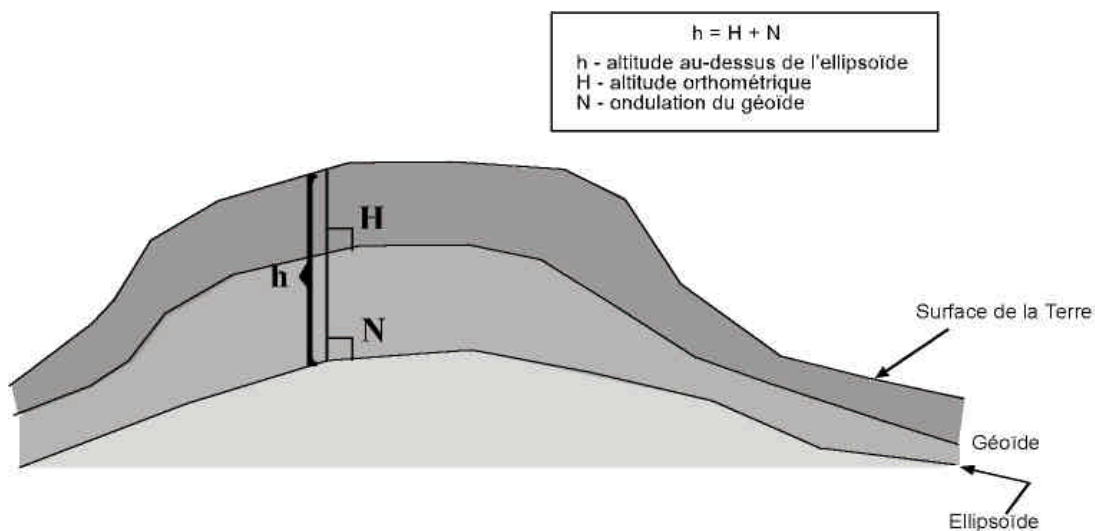


Figure 3.5 Relation entre l'altitude orthométrique et l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde

Il est évident qu'il faut connaître les ondulations du géoïde pour calculer des altitudes orthométriques au moyen du GPS.

Modèles du géoïde

Les ondulations du géoïde peuvent varier de plus ou moins 100 m à la grandeur du globe et de plus ou moins 50 m au Canada. Des modèles du géoïde, qui décrivent la configuration des ondulations du géoïde à la grandeur du globe, constituent le lien entre les altitudes orthométriques et les altitudes au-dessus de l'ellipsoïde. Les géodésiens ont produit de nombreux modèles du géoïde en combinant la théorie scientifique et divers types de mesures de la pesanteur. Un modèle du géoïde permet, pour une latitude et une longitude données, de relever ou d'interpoler l'ondulation du géoïde.

Les modèles du géoïde offrent des exactitudes et des couvertures variables. En règle générale, plus un modèle est exact, plus son calcul aura été exigeant et plus grand sera son besoin en espace mémoire de stockage. Certains modèles couvrent le monde entier et d'autres, certaines régions seulement. À titre d'exemple, la Division des levés géodésiques de RNCAN a calculé un modèle du géoïde (le GSD95) qui couvre seulement le Canada, mais dont l'exactitude et le niveau de détail sont supérieurs à ceux de tous les modèles globaux disponibles et qui est l'un des modèles les plus exacts disponibles au Canada. On peut se le procurer, sur disquette avec le logiciel servant à interpoler les ondulations du géoïde pour des endroits précis au Canada, en s'adressant à la Division des levés géodésiques (DLG). La DLG fournit également des données sur le géoïde ailleurs dans le monde à l'appui des travaux de Canadiens à l'étranger (voir l'appendice E pour plus de renseignements).

Un grand nombre de récepteurs ou de logiciels GPS comportent des modèles du géoïde intégrés. Autrement dit, ils permettent de tenir compte de l'écart entre le géoïde et l'ellipsoïde pour toute position établie à l'aide du GPS. Ils sont habituellement d'une faible exactitude, c.-à-d. d'environ 1 m (à 1σ), mais couvrent la totalité de la surface de la Terre. Certains récepteurs GPS de poche de faible exactitude feront même la conversion des altitudes ellipsoïdales à orthométriques à l'insu de l'utilisateur.

On doit toujours utiliser un modèle du géoïde pour obtenir des altitudes orthométriques. Cependant, l'exactitude qui en est exigée dépend du type de positionnement effectué et du niveau d'exactitude souhaité (positionnement autonome ou relatif) (tableau 3.3). Le positionnement autonome basé seulement sur l'information diffusée (figure 2.7) n'est exact qu'à 100 m près (à 2drms) en planimétrie et qu'à 156 m près (à 2σ) suivant la verticale (DoD et DoT des États-Unis, 1986); l'incidence d'une inexactitude de ± 1 m sur les ondulations du géoïde est négligeable.

Tableau 3.3 Exigences quant au modèle du géoïde en positionnement autonome ou relatif

Type de positionnement GPS	Utilisation du modèle?	Grande exactitude exigée?	
Autonome	Oui	Variable	<ul style="list-style-type: none"> Étant donné la faible exactitude inhérente au positionnement autonome, une grande exactitude quant au géoïde ne serait d'aucune utilité. Cependant, si l'exactitude du positionnement est améliorée par l'application de corrections pour les erreurs d'orbites et d'horloge introduites par l'accès sélectif, un modèle du géoïde plus exact peut être nécessaire selon l'exactitude souhaitée en altimétrie.
Relatif	Oui	Variable	<ul style="list-style-type: none"> Selon la longueur des vecteurs, le gradient du géoïde et l'exactitude souhaitée.

En positionnement relatif, la situation est très différente. D'après la figure 2.8, on se rappellera que le positionnement relatif consiste toujours à déterminer la position inconnue d'un point par rapport à un point de position connue. Par conséquent, non seulement faut-il se préoccuper de l'ondulation absolue du géoïde mais également de la différence entre les ondulations du géoïde aux points de position connue et inconnue. L'utilisation d'un modèle du géoïde est alors plus complexe et varie selon l'exactitude exigée; c'est pourquoi elle ne sera abordée qu'à la section 5.4, qui porte sur les méthodes de détermination des altitudes relatives au moyen du GPS.

Jusqu'ici, nous avons abordé deux surfaces différentes dont il faut tenir compte pour la détermination des altitudes : le géoïde et l'ellipsoïde. Ce dernier sert également de base pour les différentes mesures planimétriques effectuées à l'aide du GPS et du canevas national du Canada. Ceci nous amène à examiner les systèmes de coordonnées, les cadres de référence géodésiques et les réseaux de contrôle géodésiques ainsi que leurs relations avec le GPS.

3.3 SYSTÈMES DE COORDONNÉES ET CADRES DE RÉFÉRENCE

Il importe de comprendre les cadres de référence sur lesquels s'appuient les coordonnées planimétriques et altimétriques ainsi que leur relation avec les systèmes de coordonnées du GPS.

Systèmes de coordonnées

Dans le présent guide, nous avons implicitement fait référence à deux types de systèmes de coordonnées : le système terrestre conventionnel et le système géodésique.

Le système terrestre conventionnel est un système cartésien ayant comme origine le centre de la Terre. Son axe Z est orienté vers le pôle Nord, son axe X passe par le plan qui contient le méridien de Greenwich et son axe Y est perpendiculaire aux axes X et Z pour définir un système de la main droite. Les parties positives des axes du système sont représentées à la figure 3.6. Les coordonnées du système conventionnel terrestre se prêtent bien aux calculs mathématiques, comme on le

constate à l'équation du positionnement autonome (2.5). Cependant, pour un grand nombre d'applications, elles ne conviennent pas aussi bien que les coordonnées physiquement plus représentatives sur le globe comme celles du système géodésique.

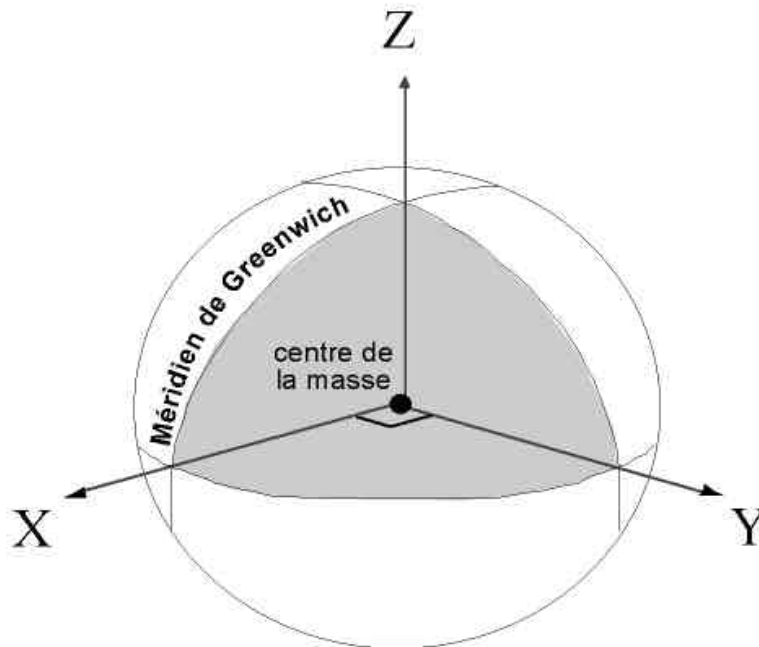


Figure 3.6 Le système terrestre conventionnel

Les coordonnées géodésiques comprennent les composantes habituelles que sont la latitude, la longitude et l'altitude, mais elles sont toutes basées sur l'ellipsoïde. La latitude est l'angle au centre de la Terre formé entre l'équateur et un point quelconque de la surface et elle est de valeur positive dans l'hémisphère Nord; la longitude est l'angle au centre de la Terre formé entre le méridien de Greenwich et un point quelconque de la surface et elle est de valeur positive à l'est de ce méridien; et l'altitude ellipsoïdale est l'altitude au-dessus de la surface de l'ellipsoïde telle que mentionnée plus haut. La latitude et la longitude du point «Origine» sont illustrées à la figure 3.7 (dans ce cas la longitude est négative). On représente également sur cette figure l'azimut d'un deuxième point «B» tel que mesuré au point Origine.

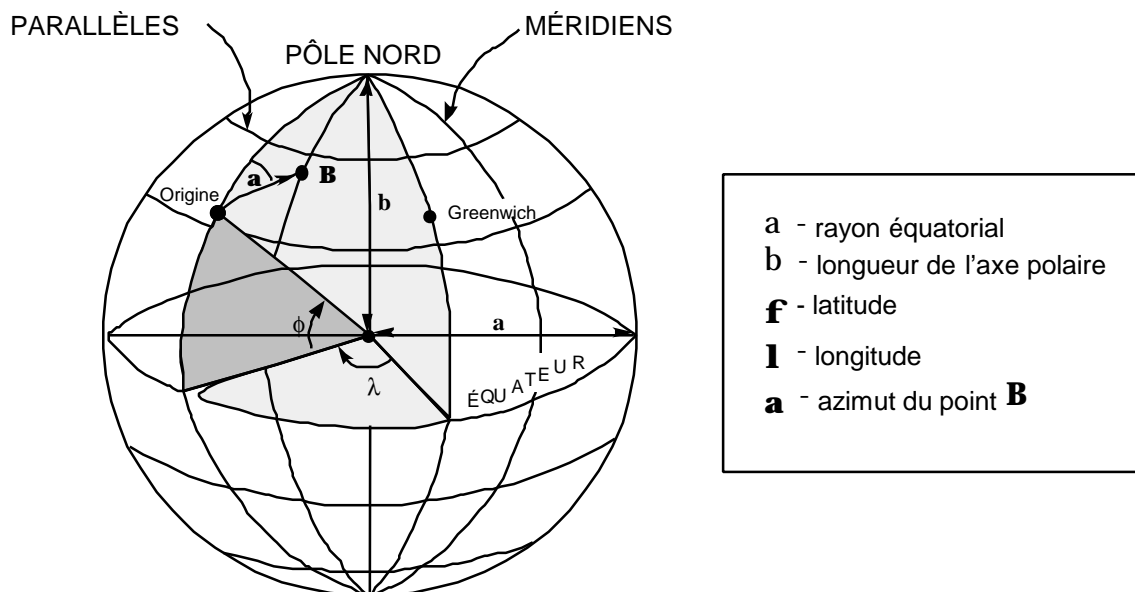


Figure 3.7 Système de coordonnées géodésiques

Cadres de référence altimétrique

Jusqu'ici, nous avons abordé les systèmes de coordonnées et la différence entre les altitudes orthométriques et les altitudes au-dessus de l'ellipsoïde, mais nous n'avons encore rien dit des cadres de référence (communément appelés systèmes de référence bien qu'un système de référence a une définition beaucoup plus vaste) sur lesquels s'appuient les coordonnées pour des applications réelles. Les cadres de référence comprennent un datum, pouvant être défini comme une surface ou un ensemble de quantités sur lesquelles sont basées les mesures, et un ensemble de points dont les coordonnées sont établies par rapport au datum pour permettre de référencer tout autre point. Il faut prendre en considération deux types de cadres de référence : les cadres de référence altimétrique et les cadres de référence planimétrique.

Au Canada, les altitudes au-dessus du niveau moyen de la mer sont basées sur le datum de référence altimétrique de 1928 (CGVD28). Le datum est dérivé du niveau moyen de la mer à Halifax, à Yarmouth et à Pointe-au-Père dans l'est du Canada, ainsi qu'à Vancouver et à Prince Rupert sur la côte Ouest (Young et Murakami, 1989). Le cadre de référence est matérialisé par un réseau de quelque 70 000 repères altimétriques (bornes fixées dans le sol et portant une altitude exacte) mis en place par nivellement géométrique et entretenu par la Division des levés géodésiques. L'altitude orthométrique de n'importe quel de ces repères peut être obtenue en s'adressant à la Division des levés géodésiques (voir l'appendice D). Au Canada, les altitudes des repères altimétriques et les altitudes figurant sur les cartes topographiques sont presque toutes basées sur le même système de référence. Des organismes provinciaux et un grand nombre d'organismes municipaux entretiennent également des réseaux de repères altimétriques; habituellement ceux des premiers présentent une exactitude de deuxième ordre et ceux des derniers une exactitude de troisième ordre. Des précisions quant aux ordres d'exactitude pour les

levés directs sont fournies dans le document intitulé «Spécifications pour levés de contrôle et recommandations sur la construction des repères» (Direction des levés et de la cartographie, 1978).

Au Canada, dans le but de faciliter les échanges de données, on devrait établir les altitudes par rapport au cadre de référence altimétrique national. Pour les projets à l'étranger, on devrait utiliser un réseau bien établi de repères altimétriques basé sur un datum de référence commun, le cas échéant, et clairement indiquer le cadre de référence sur lequel sont basées les altitudes.

Cadres de référence planimétrique et le NAD83

Le datum de référence planimétrique, sur lequel s'appuient les latitudes et les longitudes au Canada, est un ellipsoïde défini mathématiquement plutôt que le géoïde physiquement défini. Le cadre de référence est matérialisé par un grand nombre de repères géodésiques (c.-à-d. des bornes fixées dans le sol avec une latitude et une longitude exactes), qui ont été levés avec précision et dont les positions ont été compensées les unes par rapport aux autres de manière à former un canevas planimétrique uniforme sur lequel peuvent s'appuyer toutes les autres mesures planimétriques.

Les Canadiens devraient être familiers avec deux datum de référence planimétrique : le datum géodésique nord-américain de 1927 (NAD27) et le datum nord-américain de 1983 (NAD83), qui remplace le précédent. Le NAD27 a été calculé entre les années 1927 et 1932 d'après les levés sur les réseaux de points géodésiques au Canada, au Mexique et aux États-Unis. Après l'adoption de ce cadre de référence, tous les nouveaux réseaux géodésiques, rattachés au canevas existant par des levés, ont été soumis à une compensation avec contraintes afin de les intégrer au cadre de référence ou pour étendre ce dernier.

Grâce aux progrès techniques et à l'arrivée du positionnement par satellites, les mesures relatives sur les nouveaux réseaux sont devenues plus exactes que celles du cadre de référence NAD27 et étaient dégradées par leur intégration au NAD27. Les organismes géodésiques nationaux du Canada, du Mexique et des États-Unis ont reconnu qu'un nouveau cadre de référence s'imposait, puisque les coordonnées du NAD27 n'étaient plus assez exactes pour répondre aux exigences contemporaines. On a donc entrepris d'établir un nouveau datum et d'exécuter une nouvelle compensation des réseaux géodésiques nord-américains, ce qui a mené à l'adoption officielle du NAD83, en 1990.

Dans la transition du NAD27 au NAD83, les décalages des coordonnées géodésiques varient de 120 mètres vers l'ouest sur la côte Ouest, à 70 mètres vers l'est à Terre-Neuve, et à 100 mètres vers le nord dans l'Extrême Arctique. Les coordonnées correspondantes dans la projection de Mercator transverse universelle (UTM) ont été décalées de manière assez uniforme vers le nord sur une distance de 200 à 250 mètres (Pinch, 1990). Ces décalages résultent de l'élimination des aberrations dans les coordonnées NAD27 lors de la nouvelle compensation ainsi que de l'utilisation d'un ellipsoïde mieux ajusté à la forme de la Terre.

L'un des principaux avantages du NAD83, c'est sa compatibilité avec le cadre de référence des satellites GPS. Autrement dit, en positionnement autonome, les coordonnées calculées par un récepteur sont à toutes fins pratiques équivalente aux coordonnées NAD83. Si on doit utiliser un

autre système de référence, par exemple le NAD27, une transformation d'un système de coordonnées à l'autre est nécessaire.

Les coordonnées des points géodésiques, des cartes, des bases de données ainsi que des systèmes d'information géographique (SIG) sont touchées par ce nouveau cadre de référence. RNCAN se charge de convertir, du NAD27 au NAD83, les coordonnées des canevas géodésiques et des produits cartographiques, et cette opération est en bonne voie de parachèvement. Un certain nombre de politiques de RNCAN visant le NAD83 sont présentées au tableau 3.4 (voir SLCT [1990] pour de plus amples renseignements).

Tableau 3.4 Conversion au NAD83

	Politiques* et situation
Réseau géodésique national	<ul style="list-style-type: none"> • Le NAD83 a été officiellement adopté par RNCAN en 1990. • Les coordonnées NAD83 ont été calculées pour environ 105 000 points géodésiques au Canada. • La DLG a élaboré les outils nécessaires pour la transformation du NAD27 au NAD83 et fournit des conseils à ce sujet. • La DLG contribue à mettre au point des conversions au NAD83 pour d'autres cadres de référence géodésiques employés au Canada.
Cartes produites par RNCAN	<ul style="list-style-type: none"> • Le NAD83 servira de cadre de référence officiel pour tous les produits graphiques et numériques. • Les produits existants font l'objet d'une conversion continue et à long terme au NAD83. • À titre de mesure transitoire, des notes en marge permettant de convertir les coordonnées au NAD83 seront surimprimées sur les cartes existantes. • Le CCT publiera des explications sur la conversion et énumérera les décalages UTM pour chacune des cartes du SNRC aux échelles de 1/50 000 et de 1/250 000.

*SLCT (1990)

Les conséquences de l'adoption du NAD83 pour les personnes intéressées à l'information géocodée sont nombreuses. En premier lieu, il est recommandé que les bases de données et les SIG soient établis suivant le NAD83. Le nouveau cadre de référence offre l'avantage d'être exempt des principales aberrations dont était affligé le NAD27 et il est directement compatible avec les positions établies au moyen du GPS. De plus, au fur et à mesure que la décennie progresse, de plus en plus de données géographiques fondamentales seront référencées suivant le cadre de référence NAD83, entre autres, la série des cartes du Système national de référence cartographique.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le cadre de référence du GPS est compatible avec le NAD83. Par conséquent, en positionnement relatif, les coordonnées des points connus doivent toujours être fournies suivant le NAD83. Si les coordonnées sont par la suite nécessaires suivant un cadre de référence différent, les transformations peuvent être effectuées après l'obtention des coordonnées NAD83 du GPS. On résume au tableau 3.5 les aspects dont il faut tenir compte en

gestion de base de données ou de SIG ainsi qu'en positionnement GPS en raison de l'adoption du NAD83.

Tableau 3.5 Incidence du NAD83 sur les paramètres de localisation

Tâche	Incidence du NAD83
Gestion de base de données ou de SIG	<ul style="list-style-type: none"> • Le cadre de référence utilisé devrait être clairement précisé. • L'adoption du NAD83 est recommandée. • Il devrait être possible de passer au NAD83 à partir de n'importe quel autre cadre de référence d'usage courant.
Positionnement autonome avec le GPS	<ul style="list-style-type: none"> • Les coordonnées calculées sont compatibles avec le NAD83. • Les coordonnées d'un autre cadre de référence peuvent être converties au moyen du logiciel du récepteur ou par tout autre transformation acceptable.
Positionnement relatif avec le GPS	<ul style="list-style-type: none"> • Les coordonnées NAD83 doivent être utilisées pour les points connus.

Historiquement, les canevas planimétriques et altimétriques ont existé séparément à cause de la différence de leurs techniques de levé. Le GPS permet de déterminer simultanément et de manière interdépendante les coordonnées planimétriques et altimétriques bien que les altitudes calculées soient toujours des altitudes par rapport à l'ellipsoïde à moins d'être corrigées pour tenir compte des ondulations du géoïde. On devrait donc connaître la position planimétrique et altimétrique des points «connus» utilisés en positionnement relatif. Cette question sera abordée de manière plus approfondie lorsque nous traiterons des procédures à la section 5.1.

Tout utilisateur du GPS à des fins particulières en matière de positionnement est susceptible de rencontrer les notions de base associées à l'exactitude, au géoïde et aux cadres de référence qui sont exposées dans le présent chapitre. Dans le chapitre suivant, on traitera des principes fondamentaux du GPS et du positionnement pour expliquer les diverses méthodes possibles de positionnement au moyen du GPS.

CHAPITRE 4

TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT GPS

Le présent chapitre vise à familiariser d'une façon générale ceux qu'une application GPS intéresse avec la vaste gamme des techniques existantes ainsi qu'avec leur exactitude, leur degré de complexité et leurs coûts respectifs. Ces renseignements constituent un point de départ pour juger de la meilleure technique à utiliser pour une application donnée.

Les renseignements présentés dans ce chapitre sont limités de deux façons. Premièrement, les exactitudes signalées ne constituent qu'une idée générale de celles auxquelles on peut s'attendre à l'utilisation d'une technique donnée. Un grand nombre de variables influencent l'exactitude, par exemple la distance entre les points, les conditions ionosphériques, l'ordre de grandeur de l'accès sélectif, le type de récepteur utilisé et les stratégies de traitement adoptées. Deuxièmement, bien que les techniques actuellement disponibles soient exposées, d'autres pourraient bientôt s'y ajouter en raison des progrès rapides en technologie du GPS. Cependant, à partir des notions de base du GPS et du positionnement fournies aux chapitres 1 et 2 ainsi que de la présentation des techniques actuelles dans le présent chapitre, le lecteur devrait être en mesure d'évaluer rapidement les nouvelles techniques au fur et à mesure qu'elles deviendront disponibles.

Les techniques de positionnement GPS peuvent être classées selon qu'elles sont principalement basées sur des observations issues des codes, les pseudodistances, ou sur des observations de phase sur l'onde porteuse. Les techniques fondées sur des observations de pseudodistances sont, en général, plus simples et de plus faible exactitude, tandis que celles fondées sur des observations de phase sont plus complexes et d'une plus grande exactitude (tableau 2.2). Il existe une vaste gamme de méthodes de positionnement fondées sur l'utilisation d'un type d'observation ou l'autre. La mesure dans laquelle une méthode convient pour une application particulière dépend de l'exactitude souhaitée, des contraintes logistiques et des coûts.

Des exactitudes et des degrés de complexité représentatifs pour les diverses méthodes sont présentés au tableau 4.1 pour les techniques basées sur les observations de pseudodistances et, au tableau 4.2, pour les techniques basées sur les observations de phase. Chaque tableau énumère les méthodes, les principes de base qui les sous-tendent, les nombres minimums de récepteurs nécessaires, les durées d'observation nécessaires, les exactitudes et des commentaires. Au tableau 4.1, les exactitudes sont fournies pour un niveau de probabilité de 95 % et au tableau 4.2, pour l'écart quadratique moyen. Veuillez noter que les exactitudes en altimétrie s'appliquent aux altitudes au-dessus de l'ellipsoïde plutôt qu'aux altitudes orthométriques. Si on souhaite obtenir des altitudes orthométriques, il faut également tenir compte des ondulations du géoïde dont il a été question aux sections 3.2 et 5.4. Les méthodes de positionnement GPS énumérées aux tableaux 4.1 et 4.2 sont respectivement décrites aux sections 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1 Résumé des méthodes de positionnement GPS basées sur des observations de pseudodistances*

Méthode	Notions de base	Min. de récepteurs	Durée d'observation	Exactitude (prob. 95 %)	Commentaires
Autonome* (statique ou cinématique)	-Minimum de 4 satellites -Position instantanée	1	1 à 10 s	100 m en planimétrie 156 m en altimétrie	La plus simple, la moins coûteuse
Différentielle (statique ou cinématique)	-Minimum de 4 satellites -Les corrections calculées au récepteur de contrôle sont appliquées au récepteur mobile.	2	1 à 50 s	De 1 à 20 m en planimétrie et en altimétrie	Simple, peu coûteuse

* Il est possible d'améliorer l'exactitude du positionnement autonome à un niveau similaire à celui du positionnement différentiel en appliquant par traitement après mission des corrections pour les erreurs d'orbite et les erreurs d'horloge introduites par l'accès sélectif (voir section 4.1).

4.1 TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT BASÉES SUR LES OBSERVATIONS DE PSEUDODISTANCES

Les techniques basées sur les observations de pseudodistances peuvent être utilisées en positionnement autonome ou en positionnement différentiel (tableau 4.1). Seules les observations issues du code C/A sont abordées dans le cadre des techniques basées sur les observations de pseudodistances, puisque depuis le mois de janvier 1994, le code P n'est plus accessible à des fins civiles.

Positionnement autonome

Le positionnement autonome (figure 2.7) s'effectue par l'intersection à un seul récepteur à la surface de la Terre des observations sur quatre satellites ou plus (voir le détail à la section 2.3). Cette méthode permet d'obtenir une exactitude à 100 m près à 2drms en planimétrie et à 156 m près à 2σ en altimétrie (DoD et DoT des États-Unis, 1986), dans l'hypothèse d'une géométrie favorable (p. ex. PDOP < 6). Ces niveaux d'exactitude sont possibles en positionnement statique aussi bien que cinématique. Selon cette approche, la position peut être obtenue presque instantanément au moyen d'un seul récepteur GPS de poche peu coûteux. Le récepteur ne requiert que les observations de pseudodistances issues du code C/A et l'information diffusée par les satellites pour permettre l'obtention de l'exactitude spécifiée.

L'exactitude du positionnement autonome est limitée par les erreurs affectant la distance satellite-récepteur et résumée au tableau 2.4. Les principales erreurs en cause sont les erreurs d'orbite (inexactitude des éphémérides diffusées) et les erreurs attribuables à la synchronisation des horloges des satellites principalement due à l'accès sélectif (SA). Il est possible d'appliquer des corrections précises pour ces erreurs par traitement après mission. Des corrections à apporter aux horloges des satellites ainsi que les éphémérides précises sont calculées quotidiennement par la Division des levés géodésiques d'après les observations des stations de référence du Système canadien de contrôle actif (voir l'appendice G). Ces corrections permettent d'améliorer l'exactitude du positionnement autonome à un niveau de 2 à 20 m (95 %) en planimétrie et en altimétrie (Héroux et al., 1995). Le niveau d'exactitude possible reste fonction de la qualité du récepteur utilisé (niveau de bruit sur les mesures) et de l'existence ou non de multitrajets au lieu d'observations.

Positionnement différentiel

Le positionnement différentiel peut être réalisé avec traitement après mission ou en temps réel. La première approche est plus simple et moins coûteuse, tandis que la seconde est plus complexe, car elle exige un système de communications pour la transmission des données en temps réel. Les corrections différentielles peuvent s'appliquer soit aux observations, soit aux positions. Les principes qui sous-tendent les deux formes de corrections sont expliqués, bien que la première témoigne d'une approche plus rigoureuse et donc recommandée. Dans l'une et l'autre méthode, les coordonnées d'un point utilisé comme station de contrôle doivent être connues.

Par la méthode d'application de corrections aux observations, la distance «réelle», entre un satellite et une station de contrôle, se calcule comme suit :

$$\mathbf{r}_{rk}^s = \sqrt{(x^s - x_{rk})^2 + (y^s - y_{rk})^2 + (z^s - z_{rk})^2} \quad (4.1)$$

où (x^s, y^s, z^s) sont les coordonnées connues d'un satellite, dérivées des éphémérides radiodiffusées et (x_{rk}, y_{rk}, z_{rk}) sont les coordonnées connues du récepteur de contrôle (noter que l'équation (4.1) est analogue à l'équation (2.5)). Les erreurs sur la distance satellite-récepteur sont calculées par réagencement de l'équation (2.4) :

$$erreurs = P_{rk}^s - \mathbf{r}_{rk}^s \quad (4.2)$$

où P_{rk}^s représente la distance satellite-récepteur observée ou la pseudodistance et \mathbf{r}_{rk}^s , la distance «réelle». Puisque les principales erreurs relatives aux observations GPS (orbitales, d'horloge et atmosphériques) sont approximativement du même ordre de grandeur pour les régions environnantes de la station de contrôle, l'équation (4.1) peut servir à corriger les observations effectuées à des emplacements voisins. Par conséquent, les erreurs calculées à la station de contrôle constituent les corrections différentielles appliquées aux observations du récepteur

mobile (parfois aussi appelé récepteur distant ou éloigné). C'est là le principe fondamental du positionnement différentiel par la méthode d'application de corrections aux observations.

Par la méthode d'application de corrections aux positions, la position «réelle» du récepteur de contrôle (x_{rk}, y_{rk}, z_{rk}) est comparée avec la position calculée en positionnement autonome (x_r, y_r, z_r). Les erreurs de position ainsi obtenues (c.-à-d. les différences $x_r - x_{rk}, y_r - y_{rk}, z_r - z_{rk}$) pour la station de contrôle sont appliquées comme corrections différentielles aux positions déterminées par le récepteur mobile. Dans cette méthode, on doit utiliser exactement les mêmes satellites aux deux emplacements. Cette contrainte a pour effet que la non-visibilité d'un satellite en un des emplacements peut empêcher l'application réussie de la méthode. En positionnement différentiel, la méthode d'application de corrections aux observations est préférable à celle par laquelle des corrections sont appliquées aux positions.

Plus un récepteur mobile est éloigné de la station de contrôle, plus les erreurs aux deux emplacements diffèrent et moins le positionnement par des techniques différentielles est exact. Ainsi, Lachapelle et al. (1991) signalent des niveaux d'exactitude de 4 m à 9 m en planimétrie et de 5 m à 11 m en altimétrie (à une probabilité de 95 % et pour une PDOP < 3,0) par des techniques différentielles et cinématiques dans un rayon de 50 km alors que dans un rayon de 500 km ces mêmes exactitudes tombent respectivement à 6 à 11 m et 7 à 12 m.

Pour le positionnement différentiel avec traitement après mission, un récepteur est placé en un point «connu» et un deuxième est déplacé de l'un à l'autre des points dont on souhaite déterminer la position. Une fois les observations recueillies, elles doivent être combinées sur un ordinateur pour le post-traitement (figure 2.10d). L'un des aspects très importants des algorithmes de post-traitement est la simultanéité des observations effectuées au récepteur de contrôle avec celles effectuées au récepteur de mobile qui est essentielle pour le calcul et l'application des corrections différentielles appropriées. La gestion des données constitue un autre aspect important en positionnement différentiel. On peut positionner jusqu'à des centaines de points en une seule journée. Il est donc essentiel d'étiqueter et d'intégrer toutes ces données dans une base de données.

Comme nous l'avons déjà mentionné, pour effectuer un positionnement différentiel en temps réel, un système de communications est indispensable afin de transmettre les données de la station de contrôle au récepteur mobile (figure 2.10b). Un inconvénient de ce traitement est le délai entre le moment où une observation GPS est effectuée à la station de contrôle et celui où la correction est reçue et appliquée au récepteur mobile. Ce délai peut ne permettre d'obtenir qu'une exactitude légèrement inférieure à celle qu'il est possible d'obtenir en traitement après mission. Bien qu'il soit prévu que le positionnement différentiel en temps réel devienne plus plausible au cours des prochaines années en raison des progrès technologiques rapides en matière de GPS, présentement, la simplicité et le moindre coût des techniques de post-traitement les rendent plus appropriées pour un grand nombre d'applications.

4.2 TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT BASÉES SUR LES OBSERVATIONS DE PHASE

Au cours de la dernière décennie, plusieurs techniques ont été mises au point pour utiliser les observations de phase des ondes porteuses du GPS, dont les techniques dites statique, cinématique et semi-cinématique.

Avant d'aborder ces techniques, résumées au tableau 4.2, il est nécessaire de revoir certains éléments sur l'emploi des observations de phase. On se rappellera qu'à la section 2.2 il a été affirmé que les observations de phase permettent une bien plus grande exactitude que celles issues du code. Par contre, les observations de phase sont compliquées par le nombre inconnu de cycles (ambiguïté) au moment où un satellite est pris en poursuite (équation (2.2)). La diversité des techniques faisant intervenir des observations de phase est fonction des manières dont cette ambiguïté est traitée.

Noter que toutes les méthodes de positionnement GPS basées sur les observations de phase illustrées au tableau 4.2 sont des méthodes de positionnement relatif et non autonome (c.-à-d. qu'elles exigent au moins deux récepteurs).

En positionnement relatif à partir d'observations de phase, les ambiguïtés pour chaque satellite sont estimées en même temps que les coordonnées du point de position inconnue par rapport à celles d'une autre point de position connue. En théorie, ces ambiguïtés devraient être des nombres entiers, puisqu'elles représentent physiquement le nombre entier de cycles séparant un satellite du récepteur au moment du verrouillage du signal de ce satellite. Cependant, en raison des erreurs, les ambiguïtés estimées ne sont habituellement pas des nombres entiers. Plus les erreurs dans les observations sont importantes (p. ex. en raison de différences relatives dans l'ionosphère sur de longues distances), plus les ambiguïtés estimées sont susceptibles de s'écarter de nombres entiers.

Sur de courts vecteurs (par exemple de 10 à 15 km), il peut être possible de décider quelles ambiguïtés entières sont justes, de maintenir ces ambiguïtés constantes et de ne résoudre que pour les coordonnées (x, y et z) du point inconnu. Dans ces cas, où les ambiguïtés peuvent être fixées aux nombres entiers justes, il est possible d'obtenir une exactitude beaucoup plus grande. C'est pourquoi les différentes méthodes figurant au tableau 4.2 ont été conçues dans le but d'optimiser la possibilité d'établir les nombres entiers justes correspondant aux ambiguïtés. On peut maintenant aborder les cinq méthodes mentionnées au tableau 4.2 : statique, cinématique, semi-cinématique, pseudo-cinématique et statique rapide.

Tableau 4.2 Résumé des méthodes de positionnement GPS basées sur les observations de phase de l'onde porteuse

Méthode	Notions de base	No. min. de récepteurs	Durée d'observation	Exactitude (prob. 95 %)	Commentaires
Statique	Occupation simultanée de points.	2	1 h	1 cm + (de 1 à 10 ppm)	De complexité variable.
Cinématique (observations de porteuse)	Récepteur mobile positionné relativement au récepteur de contrôle statique. Exige la résolution de l'ambiguïté initiale.	2	-	de 10 cm à 1 m	Difficulté logistique du maintien du verrouillage pendant le déplacement.
Semi-cinématique (également appelée arrêts-déplacements)	Immobilisation provisoire du récepteur mobile aux points à positionner relativement au récepteur de contrôle.	2	~1 min. par point	quelques cm	Méthode limitée à des vecteurs inférieurs à ~10 km. Le verrouillage doit être maintenu pendant les déplacements entre les points.
Pseudo-cinématique	Chaque point est occupé deux fois par le récepteur mobile, à au moins une heure d'intervalle dans le but de tirer avantage du changement de la géométrie des satellites.	2	de 1 à 3 min.	quelques ppm	La double occupation d'un point est essentielle. Méthode lourde du point de vue logistique.
Statique rapide	Résolution de l'ambiguïté grâce à des techniques évoluées et à des données supplémentaires.	2	de 3 à 5 min.	quelques cm	S'applique habituellement à des vecteurs inférieurs à 10 km. Des observations «supplémentaires» sont nécessaires.

Remarque : Le niveau d'exactitude en altimétrie se rapporte aux altitudes au-dessus de l'ellipsoïde.

Statique classique

L'utilisation d'observations de phase et l'occupation simultanée de points pendant une heure ou plus est parfois désignée comme étant la méthode GPS statique classique, puisqu'elle correspond à la technique originale utilisée en arpentage au moyen du GPS. Selon cette technique, les récepteurs suivent les mêmes satellites simultanément pendant au moins une heure. L'une des principales raisons pour lesquelles les points sont occupés pendant plus d'une heure (parfois plusieurs heures) est que cela permet de tirer avantage du changement de la géométrie qui survient au fur et à mesure que les satellites poursuivent leur course dans le ciel. C'est ce changement de la géométrie qui contribue à résoudre les ambiguïtés et à améliorer la qualité des solutions.

Les niveaux d'exactitude que permet d'obtenir le GPS statique classique varient selon les procédures d'observation et de traitement ainsi qu'en fonction de la longueur des vecteurs mesurés, entre autres variables. Dans des applications exigeant une très grande exactitude (p. ex. pour les études des déplacements de la croûte terrestre, pour les levés géodésiques, etc.), des techniques évoluées et particulières de traitement des erreurs sont utilisées (tableau 2.4).

Cinématique (basée sur les observations de phase)

Les techniques cinématiques (figure 2.9d) exploitant les observations de phase de la porteuse diffèrent de celles basées sur les observations issues du code en ce qu'elles exigent que les ambiguïtés entières soient déterminées pour l'obtention d'exactitudes de l'ordre du décimètre. Les premières techniques GPS cinématiques exigeaient la résolution de l'ambiguïté avant le déplacement, mais des méthodes pour résoudre ces ambiguïtés en cours de déplacement (en anglais dites «on the fly») ont récemment été mises au point (p. ex. Hatch [1991a et 1991b], Remondi [1991]).

Les techniques cinématiques sont parfois appelées cinématiques continues (Kleusberg, 1990) ou cinématiques pures pour les distinguer des techniques dites semi-cinématiques qui exigent des arrêts aux divers points à positionner.

Le GPS cinématique utilisant les observations de phase de la porteuse est habituellement appliqué dans les cas où l'on cherche à établir une relation entre des éléments physiques et des données recueillies à bord d'un véhicule en mouvement. Par exemple, le GPS cinématique est exploité à bord d'avion pour obtenir les coordonnées pour la photographie aérienne (Merrell et al., 1990) et, à bord de véhicules automobiles, dans le but d'étiqueter et de relever des entités routières (Lapucha et al., 1990).

Semi-cinématique

Le GPS semi-cinématique est également appelé «arrêts-déplacements» (de l'anglais «Stop and Go») et a d'abord été mis au point par Remondi (1985). Cette seconde appellation reflète davantage la procédure de cette méthode, puisque le récepteur mobile s'immobilise en un point, puis se rend au point suivant et ainsi de suite. L'organisation physique nécessaire en GPS

semi-cinématique est identique à celle utilisée en GPS cinématique; en effet, un récepteur reste stationnaire en un point connu pour assurer le contrôle, tandis qu'un second, mobile, se déplace d'un point à positionner à l'autre. Avant que le récepteur mobile ne commence à se déplacer, les ambiguïtés entières pour tous les satellites doivent être résolues et le récepteur mobile doit maintenir un verrouillage du signal d'au moins quatre satellites pendant les déplacements. Le récepteur mobile est déplacé d'un point à l'autre; il est maintenu stationnaire pendant une période pouvant durer jusqu'à 10 secondes au point à positionner, avant de passer au point suivant.

Plusieurs techniques permettent de résoudre les ambiguïtés initiales, notamment l'occupation initiale d'un vecteur connu, une procédure de permutation d'antennes si le récepteur mobile et le récepteur de contrôle sont au même lieu au départ ou une séance d'observation statique classique. Ces techniques sont habituellement décrites dans la documentation accompagnant les récepteurs qui peuvent être utilisés en mode GPS semi-cinématique.

La principale contrainte des techniques semi-cinématiques est la nécessité de maintenir le verrouillage du signal des satellites pendant les déplacements. Si le signal est perdu, l'observateur peut avoir à retourner au dernier point connu, où les ambiguïtés peuvent de nouveau être résolues. La présence d'obstacles dans la zone de travail tels que des arbres, des ponts ou des immeubles, peut compromettre une utilisation réussie du GPS en mode semi-cinématique. Cependant, dans des zones dégagées où l'on cherche à géoréférencer avec exactitude de nombreux points, le GPS semi-cinématique peut se révéler une solution efficace.

Pseudo-cinématique

L'expression GPS pseudo-cinématique est une appellation quelque peu erronée puisque ce type de GPS ne comporte aucun aspect cinématique. En GPS pseudo-cinématique, les récepteurs de contrôle et mobile sont utilisés de façon similaire au GPS cinématique et semi-cinématique. Cependant, le récepteur mobile occupe chacun des points deux fois pendant quelques minutes, à des intervalles d'au moins une heure. Il n'est pas nécessaire que le récepteur maintienne le verrouillage sur les satellites pendant les déplacements d'un point à un autre et on peut en fait en arrêter le fonctionnement.

Les procédures GPS pseudo-cinématiques sont fondées sur la notion de la résolution de l'ambiguïté. Comme nous l'avons déjà mentionné, c'est le changement de la géométrie des satellites en fonction du temps plutôt que le nombre d'observations effectuées qui permet vraiment de résoudre les ambiguïtés. Par conséquent, si l'on combine deux ensembles d'observations, chacun d'une durée de quelques minutes pour un même point mais obtenus à une heure d'intervalle, il reste suffisamment d'information pour obtenir les ambiguïtés entières et calculer une bonne solution de positionnement.

Le positionnement pseudo-cinématique ne s'est pas largement répandu en raison des contraintes logistiques, à savoir se rendre deux fois au même point, à une heure d'intervalle. Dans un grand nombre de cas, le positionnement statique classique ou statique rapide s'avèrent de meilleurs choix.

Statique rapide

L'expression statique rapide décrit des procédures de positionnement statique échelonnées sur des minutes plutôt que des heures d'observation. Cette technique se fonde sur la résolution des ambiguïtés en de très courtes périodes d'observation. Les méthodes de résolution de l'ambiguïté avec de telles courtes périodes sans tirer avantage du changement de la géométrie des satellites s'appuient sur des renseignements additionnels et des méthodes évoluées de traitement. Ces renseignements additionnels peuvent prendre la forme d'observations issues du code P ou de satellites redondants (p. ex. sept ou huit satellites plutôt que le minimum de quatre). Les levés statiques rapides devraient être effectués sur de courts vecteurs (p. ex. moins de 10 km). Les exactitudes possibles sont habituellement de l'ordre de quelques centimètres (1σ).

Le positionnement GPS statique rapide est semblable au positionnement semi-cinématique en ce que des récepteurs de contrôle et mobiles sont utilisés; toutefois, il n'est pas grevé par la nécessité logistique de maintenir le verrouillage sur les satellites pendant les déplacements entre les divers points à positionner.

CHAPITRE 5

PROCÉDURES GPS

Même si les techniques de positionnement GPS varient de façon importante, comme nous l'avons vu au chapitre 4, les procédures à suivre peuvent être regroupées en quatre phases communes : planification et préparation; travaux sur le terrain; traitement des données; production du rapport final (figure 5.1). La validation et la reconnaissance constituent une partie intégrante de la phase de planification et de préparation.

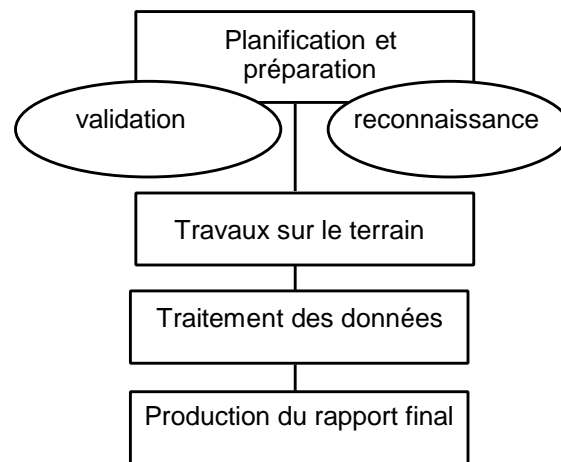


Figure 5.1 Phases d'un projet GPS

Le présent chapitre expose les différentes composantes de chacune de ces phases, puis traite de considérations particulières pour l'emploi du GPS aux fins de l'établissement des altitudes orthométriques.

5.1 PLANIFICATION ET PRÉPARATION

La planification et la préparation d'un projet GPS sur le terrain commencent par l'énoncé des besoins en positionnement et s'achèvent lorsqu'on est entièrement prêt à exécuter avec succès les travaux sur le terrain. Les différentes étapes intermédiaires varient grandement en fonction de l'ordre de grandeur, de l'exactitude et du lieu du projet.

Au cours d'une étape préliminaire, les points à positionner doivent être identifiés et les exigences en matière d'exactitude doivent être formulées. On devrait ensuite tracer sur une carte, les points à positionner et les points géodésiques d'appui disponibles. Les cartes topographiques de RNCAN aux échelles de 1/50 000 et de 1/250 000 conviennent bien à cette fin. Les cartes routières provinciales et cantonales peuvent également être très utiles. On y trouve les distances approximatives entre les points, l'information d'accès aux emplacements ainsi que la mention des interférences et obstacles potentiels en plus de servir de référence tout au long des phases de la planification, de l'exécution du projet et de la production du rapport final.

Parmi les étapes importantes que comprend la phase de la planification et de la préparation décrite ci-après, mentionnons le choix de la technique de positionnement, le choix d'un type de récepteur, la validation, la reconnaissance, la conception du levé et les préparatifs. Comme nous le verrons, un bon nombre de ces étapes de planification sont interdépendantes.

Choix d'une technique de positionnement

Un grand nombre d'aspects influent sur le choix d'une technique de positionnement. Le niveau d'exactitude nécessaire, le milieu géographique, la distance entre les points à positionner et les coûts constituent des considérations majeures. Des techniques de positionnement GPS sont proposées à la figure 5.2 en fonction des exactitudes planimétriques exigées (d'après les valeurs fournies aux tableaux 4.1 et 4.2.)

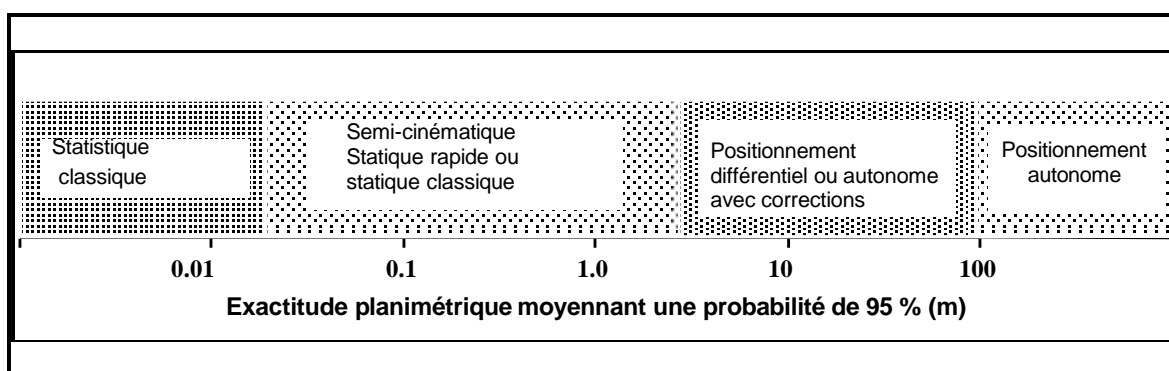


Figure 5.2 Techniques GPS proposées en fonction de l'exactitude planimétrique exigée

Noter que la figure indique la technique à utiliser pour atteindre une exactitude donnée plutôt que la plage d'exactitudes que permet d'obtenir une technique. Par exemple, bien qu'une solution différentielle ou une solution autonome avec corrections des erreurs d'orbite et d'horloge puisse fournir une exactitude comprise entre 2 m et 20 m, on devrait retenir une de ces solutions plutôt qu'un positionnement autonome basé strictement sur l'information diffusée si une exactitude supérieure à 100 m est souhaitée.

L'à-propos de l'utilisation d'un levé GPS semi-cinématique, statique rapide ou statique classique pour un projet exigeant un niveau d'exactitude entre le décimètre et le mètre dépend de la nature de l'emplacement et de l'espacement des points. Les levés semi-cinématiques posent le plus grand nombre de contraintes puisqu'ils exigent que les trajets suivis lors des déplacements d'un point à un autre soient libres de tout obstacle. Un levé semi-cinématique serait donc tout indiqué dans le cas où un grand nombre de points doivent être positionnés dans une zone dégagée comme un grand champ par exemple. Les levés statiques rapides doivent, en règle générale, être limités à de courts vecteurs, si une exactitude centimétrique est désirée. Pour des levés semi-cinématiques et statiques rapides, les chances de succès sont bien supérieures si au moins six satellites sont observés. Pour obtenir une grande exactitude sur de plus longues distances ou lorsque la géométrie des satellites est mauvaise, il peut être plus sage de recourir aux techniques GPS statiques classiques.

Noter que la figure 5.2 illustre les techniques à utiliser en fonction de l'exactitude planimétrique plutôt de l'exactitude altimétrique. Les exactitudes altimétriques correspondantes varient selon que l'on cherche à établir des altitudes au-dessus de l'ellipsoïde ou des altitudes orthométriques. Leur relation avec la figure 5.2 est exposée à la section 5.4.

Le coût du positionnement GPS est étroitement lié à la technique utilisée, qui dépend elle-même principalement du niveau d'exactitude exigé. Les deux principales variables qui influencent les coûts pour une même technique sont le temps d'observation nécessaire à chaque emplacement et le coût des récepteurs nécessaires. En règle générale, plus la période d'observation nécessaire à chaque point est brève, moins le levé sera coûteux. Le type et le coût du récepteur à retenir pour satisfaire aux exigences d'une technique de positionnement méritent un exposé.

Choix du type de récepteur

Les récepteurs GPS peuvent être loués ou achetés. Quel que soit le cas, il est recommandé de n'utiliser que des récepteurs d'une même marque pour le positionnement relatif, si on souhaite éviter des problèmes comme des erreurs systématiques, des complications dans le traitement des données et des incompatibilités dans la synchronisation de l'enregistrement des observations résultant souvent de l'utilisation de plusieurs types de récepteurs différents.

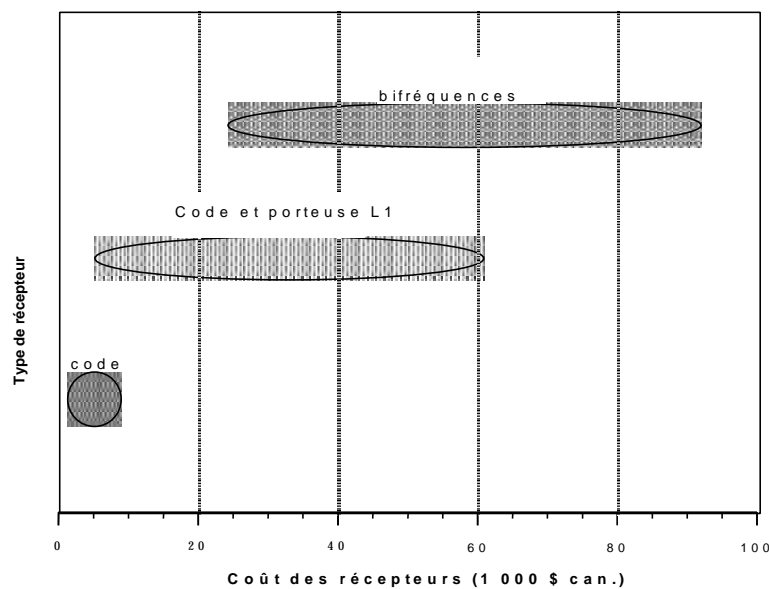
Le récepteur utilisé doit permettre de recueillir les observations qu'exige la technique de positionnement retenue. Un synopsis du type d'observation GPS nécessaire pour différentes techniques est présenté au tableau 5.1. En positionnement autonome, comme en positionnement différentiel basé sur les observations de pseudodistances, un récepteur n'effectuant que des observations à partir du code suffit (remarquer que certains récepteurs utilisent les observations de phase que pour lisser les observations issues du code et améliorer l'exactitude résultante).

Pour les levés GPS semi-cinématiques, statiques rapides et statiques classiques, on doit utiliser les pseudodistances et les observations de phase. Pour de courts vecteurs levés par des techniques classiques, des récepteurs monofréquence suffisent. En GPS statique classique et pour de longs vecteurs, lorsqu'une grande exactitude est recherchée, il est souhaitable d'utiliser des récepteurs bifréquences puisqu'ils permettent de corriger la plupart des erreurs ionosphériques. Pour des levés statiques rapides, il est fortement recommandé d'utiliser des récepteurs bifréquences puisqu'ils permettent d'appliquer des méthodes évoluées de traitement des données pour résoudre les ambiguïtés et offrent ainsi de bien meilleures chances de succès.

Tableau 5.1 Observations GPS nécessaires pour les différentes techniques de positionnement

Méthode	Observations GPS nécessaires
Positionnement autonome	Pseudodistances
Positionnement différentiel	Pseudodistances
Semi-cinématique	Pseudodistances et phase
Statique rapide	Pseudodistances et phase, de préférence bifréquences
Statique classique	Pseudodistances et phase, bifréquences pour de longs vecteurs

Des coûts représentatifs pour des récepteurs effectuant des observations sur le code, des récepteurs effectuant des observations sur le code et l'onde porteuse L1 et des récepteurs bifréquences sont indiqués à la figure 5.3. Les gammes étendues de prix pour les récepteurs peuvent souvent être attribuées à des caractéristiques des appareils autres que le type d'observations qu'ils permettent de recueillir.

**Figure 5.3 Coûts représentatifs pour différents types de récepteurs en janvier 1992**

Les coûts présentés à la figure 5.3 sont très généraux et fournis dans le but de montrer les écarts importants entre les coûts du positionnement de faible exactitude basée sur le code et ceux des levés plus exacts exigeant des observations de phase, voire des récepteurs bifréquences. Les données utilisées pour ce graphique sont tirées d'une étude sur les récepteurs publiée dans GPS World (Arradondo-Perry, 1992). Pour obtenir des renseignements détaillés sur les coûts de récepteurs particuliers, on peut consulter des enquêtes analogues sur les prix publiées à intervalles réguliers. Une tendance à la baisse des prix des récepteurs GPS se manifeste et on peut s'attendre à ce qu'elle se maintienne.

Le choix d'un récepteur peut se révéler un processus complexe en raison du grand nombre de types de récepteurs GPS maintenant disponibles, de la gamme étendue de possibilités offertes et des nombreuses applications auxquelles ils sont destinés. Un grand nombre d'éléments dont il faut tenir compte sont énumérés à la figure 5.4 et devraient faciliter le choix d'un récepteur. Cette liste n'est pas exhaustive et ne vise qu'à faciliter un choix éclairé. Pour chacun des aspects mentionnés les priorités varieront naturellement en fonction de l'application à laquelle le levé est destiné.

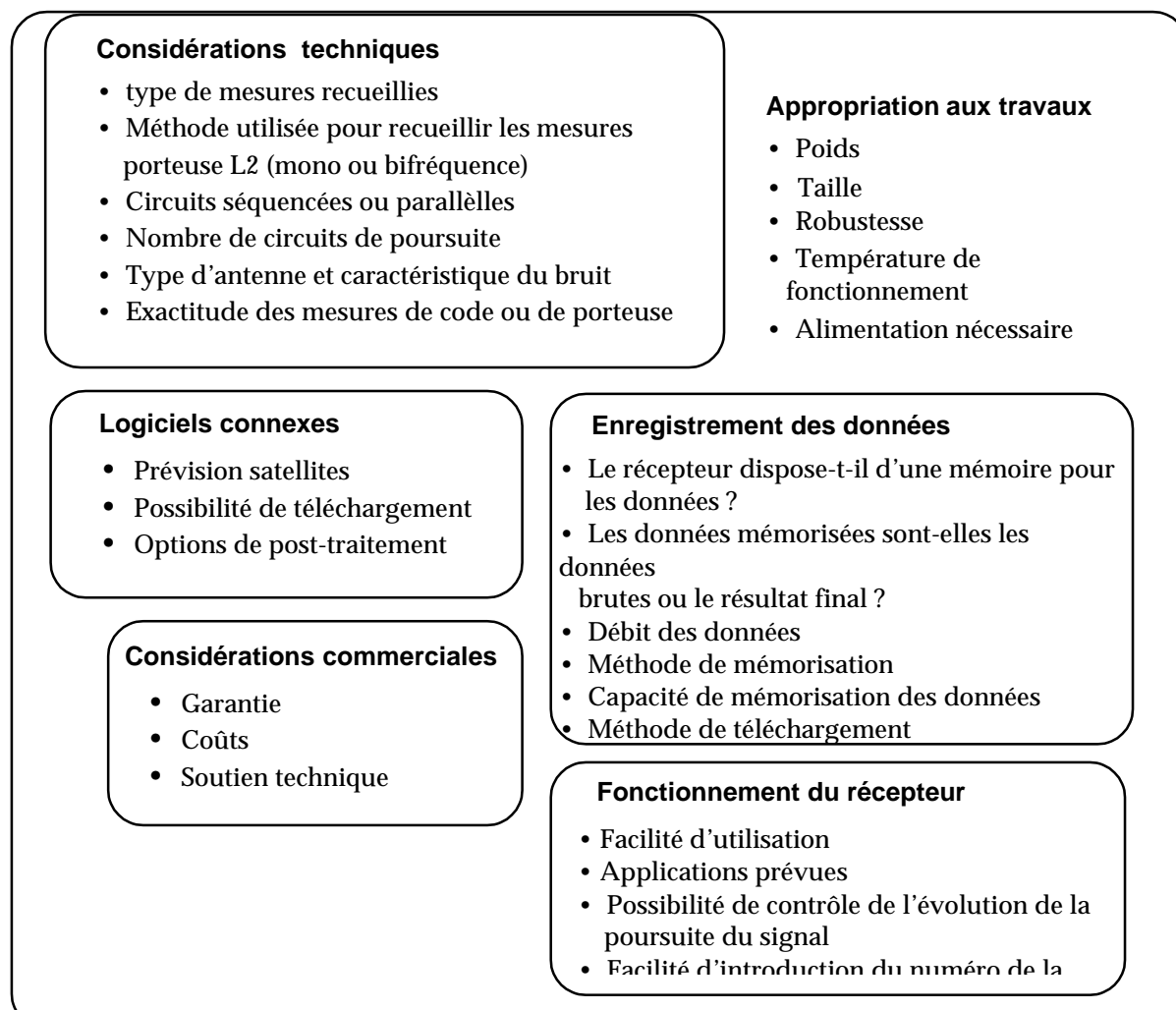


Figure 5.4 Facteurs à prendre en considération lors du choix d'un récepteur

Certaines des «considérations techniques» mentionnées à la figure 5.4 méritent une explication. Il s'agit des méthodes utilisées pour recueillir les observations de phase sur l'onde porteuse L2, du nombre de circuits de poursuite et de l'exactitude des observations.

Les différents types de récepteurs bifréquences se distinguent par la méthode utilisée pour recueillir les observations de phase sur la fréquence porteuse L2 et qui détermine la qualité des observations. On devrait investiguer ces techniques lors du choix d'un récepteur bifréquences.

La manière dont différents types de récepteurs suivent plusieurs satellites simultanément constitue un autre aspect technique important. Deux des techniques employées reposent respectivement sur l'utilisation de circuits de poursuite séquencés et de circuits de poursuite parallèles. Par la technique du séquençement, deux ou plusieurs satellites sont suivis successivement sur le même circuit. Un satellite est suivi durant un court intervalle, puis l'autre et ainsi de suite, jusqu'à ce que le premier satellite soit suivi à nouveau. Un des inconvénients des

récepteurs à séquençement est la difficulté de maintenir le verrouillage du signal d'un satellite tout au long du processus de séquençement, ce qui fournit un positionnement moins fiable. Par l'utilisation de circuits parallèles, un récepteur suit simultanément plusieurs satellites en permanence, un circuit étant assigné à chaque satellite. Les récepteurs à circuits parallèles assurent, en général, un meilleur verrouillage des signaux que ceux à circuits séquencés. Un récepteur monofréquence à circuits parallèles peut habituellement suivre un nombre de satellites égal au nombre de circuits. Comme nous l'avons souligné à la section 2.4 portant sur la géométrie des satellites, plus le nombre de satellites suivis simultanément est grand, meilleur est le résultat. L'idéal serait un récepteur doté d'un nombre suffisant de circuits (huit ou plus) pour suivre tous les satellites visibles.

La dernière considération technique que nous aborderons est l'exactitude des observations de pseudodistances et de phase. Les niveaux d'exactitude en positionnement GPS mentionnés aux tableaux 4.1 et 4.2 nous donnent une idée générale des exactitudes que permettent d'atteindre les différentes techniques, ce qui ne signifie pas que tous les récepteurs fonctionnant suivant la même méthode fournissent des résultats d'égale qualité. L'un des facteurs affectant l'exactitude du positionnement est l'exactitude avec laquelle un récepteur peut effectuer les observations sur le code et sur l'onde porteuse.

Les autres aspects dont il faut tenir compte dans le choix d'un récepteur sont plus évidents et ne sont pas traités. L'une des étapes très importantes de la planification est le processus de validation qui permet l'évaluation des différents types de récepteurs, des techniques de levé et des procédures de traitement des données.

Validation

La phase de planification d'un projet GPS devrait comporter des essais des procédures et de l'équipement qui seront utilisés, depuis la collecte des données jusqu'au résultat final, afin de s'assurer qu'ils permettent de satisfaire de manière fiable aux exigences en matière d'exactitude. C'est ce qu'on entend par l'expression «processus de validation». Toutefois, si un utilisateur a déjà utilisé avec succès les mêmes procédures et le même équipement GPS pour une application semblable, il peut ne pas être nécessaire d'effectuer une nouvelle validation.

Trois composantes principales sont éprouvées dans le cadre du processus de validation : la technique de positionnement adoptée, l'équipement à utiliser et la méthode de traitement retenue. La méthode de positionnement adoptée peut être l'une des techniques décrites au chapitre 4 ou encore une procédure plus récente. Quel que soit le cas, on devrait vérifier si la méthode permet de répondre de manière fiable aux besoins de l'utilisateur. L'équipement GPS varie grandement en complexité, en coût et en possibilités. On ne peut présumer que les niveaux d'exactitude avancés par les fabricants ou par tout autre utilisateur seront obtenus de façon constante dans toutes les conditions d'exploitation sur le terrain; il importe donc de soumettre l'équipement à des essais et de l'évaluer. Pour les mêmes raisons, il importe de mettre à l'essai et d'évaluer le logiciel et les méthodes de traitement.

Le processus de validation offre également l'avantage de permettre aux utilisateurs de détecter et de résoudre les problèmes avant d'entreprendre de coûteux levés, de rationaliser les opérations et de vérifier les exactitudes auxquelles on peut s'attendre avec les procédures mises à l'épreuve. Le concept de la validation est résumé à la figure 5.5.

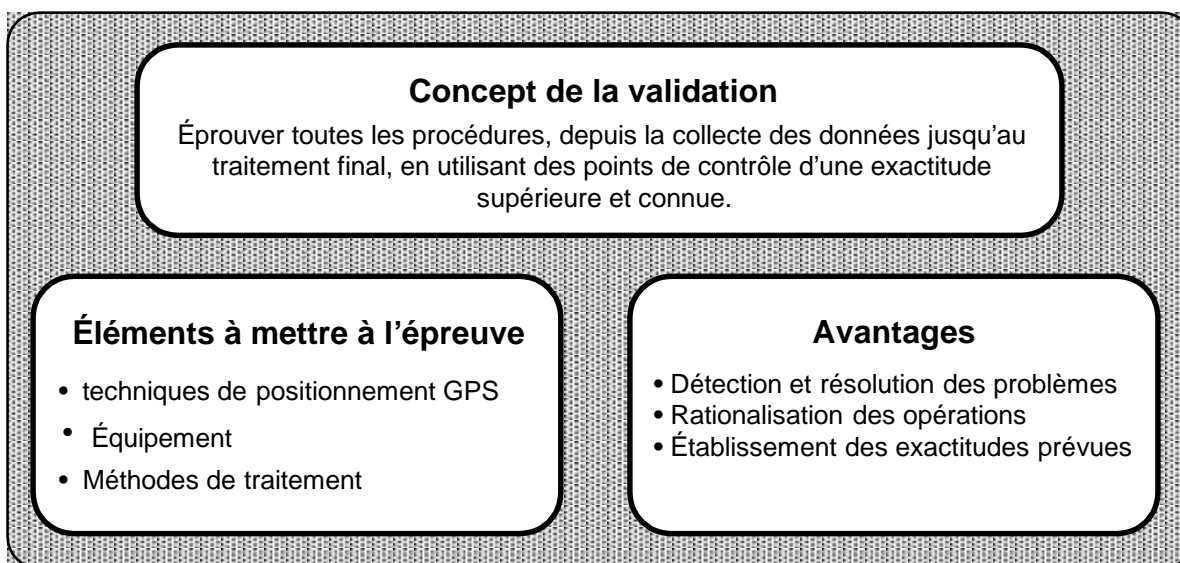


Figure 5.5 Concept de la validation

Les essais de validation devraient être effectués en des points dont les coordonnées sont connues avec une exactitude supérieure à celle que l'on souhaite pour le projet. La distance entre les points doit être représentative des distances prévues lors de l'exécution réelle du levé.

Dans le but d'instaurer une norme pour la validation des techniques de levé GPS (particulièrement pour les levés de grande exactitude), la Division des levés géodésiques, en collaboration avec des organismes provinciaux, a établi d'un bout à l'autre du pays plusieurs réseaux étalons GPS. Chacun de ces réseaux compte de six à huit stations marquées par des piliers à centrage forcé, éloignés de 2 à 50 km les uns des autres. Chaque réseau étalon comprend aussi une base d'étalonnage utilisée pour les appareils de mesure électronique des distances (MED), ce qui offre un éventail de vecteurs plus courts. Pour de plus amples renseignements sur les réseaux étalons canadiens, communiquer avec la Division des levés géodésiques.

D'autres solutions permettent de valider les techniques de levé, en particulier celles de faible exactitude. On peut ainsi utiliser les points géodésiques existants des réseaux de grande exactitude. On peut obtenir de la Division des levés géodésiques pour une région donnée les descriptions de ces points ainsi que les coordonnées et leur exactitude (voir l'appendice D).

La validation est une étape importante d'évaluation et de rétroaction dans l'établissement du plan d'un projet. Une autre étape, tout aussi importante assurant une rétroaction dans le cadre du processus de planification, est la reconnaissance du terrain.

Reconnaissance

La reconnaissance consiste à vérifier sur place les lieux d'un projet avant d'entreprendre des observations GPS. On devrait vérifier si les emplacements conviennent au GPS, l'existence de points géodésiques et quelles sont les exigences logistiques. On énumère au tableau 5.2 les composantes clés de la reconnaissance d'un terrain.

Un bon emplacement GPS doit être exempt de tout obstacle et de toute source d'interférence. Reconnaître le terrain permet de relever les sources d'interférence et les obstacles éventuels et de s'y soustraire en choisissant un autre emplacement ou encore en établissant des stations excentriques. Comme nous l'avons vu à la section 2.4, les obstacles entre un satellite et le récepteur empêchent la réception du signal. Pour éviter que soient bloqués les signaux des satellites, on devrait idéalement choisir un emplacement libre de tout obstacle au-dessus d'une hauteur de 15 degrés. Dans des conditions moins qu'idéales où des obstacles sont présents, un positionnement peut être réussi si un nombre suffisant de satellites offrant une géométrie adéquate peuvent néanmoins être suivis. Pour des levés basés sur des observations de phase ou pour des points de contrôle dans des levés différentiels exécutés d'après des observations issues du code, on devrait rechercher des emplacements libres de tout obstacle. Les techniques de positionnement basées sur le code s'accommodent en général plus facilement des obstacles que les techniques fondées sur les observations de phase, puisqu'elles ne sont pas sujettes aux sauts de cycles (section 2.5).

Tableau 5.2 Reconnaissance du terrain

Vérifier si les emplacements conviennent au GPS	<ul style="list-style-type: none"> - Absence d'obstacles? - Absence de sources d'interférence?
Vérifier l'existence de points géodésiques	<ul style="list-style-type: none"> - Les stations sont-elles localisées? - Les repères sont-ils stables?
Formuler les besoins logistiques	<ul style="list-style-type: none"> - Mode de transport? - Temps d'accès? - Procédures ou équipement spéciaux?
Mesures à adopter	<ul style="list-style-type: none"> - Choix d'autres emplacements, au besoin - Établissement, au besoin, de stations excentriques - Consignation des résultats - Mise à jour des descriptions, le cas échéant

Remarquer que la hauteur des obstacles doit être établie pour la hauteur au-dessus du sol à laquelle on se propose d'installer l'antenne. Habituellement, une antenne sur trépied est installée de 1 m à 1,5 m au-dessus du sol. Cependant, certains fabricants offrent des perches destinées à élever bien plus haut les antennes afin d'éviter les obstacles lors de levés de faible exactitude.

Dans le cas des signaux GPS, l'interférence peut prendre la forme d'une propagation par multitrajets ou d'une interférence électrique. La propagation par multitrajets dégrade l'exactitude possible du GPS (section 2.5). On peut réduire la possibilité d'importantes interférences de ce type en évitant les emplacements près de structures artificielles, en particulier d'objets métalliques. L'interférence électrique peut empêcher un récepteur GPS de suivre avec succès des signaux GPS. Parmi les sources possibles d'interférence électrique à éviter, mentionnons les stations de transmission par micro-ondes, les répéteurs radioélectriques et les lignes de transport d'énergie électrique sous haute tension.

Au cours de la reconnaissance du terrain, on devrait vérifier que les points géodésiques dont l'occupation est projetée peuvent être trouvés, s'ils sont stables et s'ils conviennent aux observations GPS. Si dans la zone d'intérêt aucun point géodésique où installer un récepteur de contrôle pour levé différentiel n'est disponible, il peut être souhaitable d'établir, par un levé GPS statique classique, un nouveau point rattaché au canevas existant dans la région avoisinante. Si un point géodésique altimétrique est disponible dans la zone d'intérêt, mais qu'il ne convient pas au GPS, il peut être souhaitable d'établir, par nivellement depuis ce point, un point excentrique qui convienne au GPS. Quel que soit le cas, il faut être conscient que l'exactitude d'un point de contrôle excentrique dépend de la méthode utilisée pour rattacher celui-ci au point d'origine.

La reconnaissance fournit également de précieux renseignements sur les besoins logistiques. Le mode de transport utilisé et le temps nécessaire pour les déplacements à pied jusqu'à chacun des points ont une incidence importante sur les coûts et la logistique d'un levé donné. Elle permet également de noter toute contrainte afin de faciliter la planification. Par exemple, elle permet d'évaluer les possibilités d'exécution de levés semi-cinématiques ou statiques rapides, la nécessité de l'utilisation de perches plus longues pour l'installation de l'antenne ou encore la nécessité de l'adoption de mesures de sécurité à certains emplacements situés près de routes.

La reconnaissance sur le terrain a pour résultat final l'obtention d'un ensemble de points prêts pour les observations GPS ainsi que d'une description à jour de chacun des emplacements, de l'information concernant l'accès à ces emplacements et d'une description des différentes mesures particulières à adopter à chaque endroit.

Conception du levé

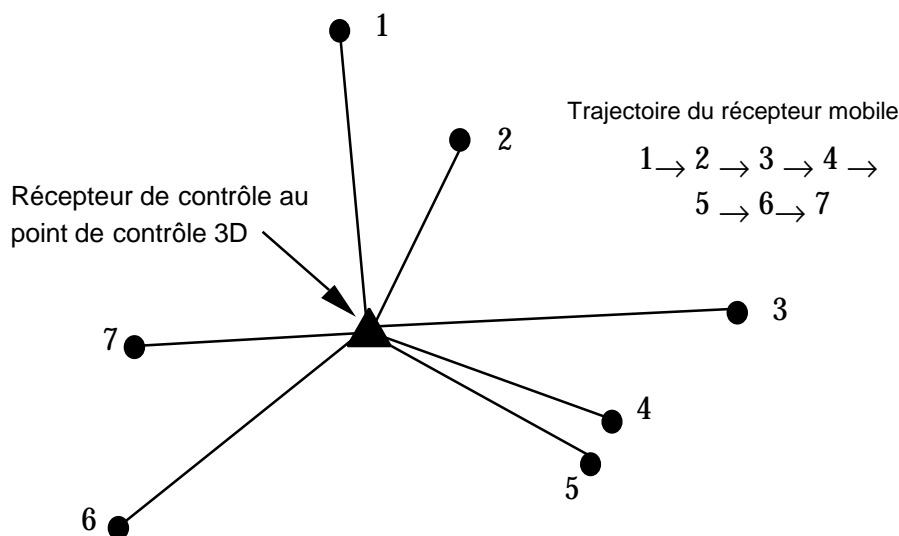
La conception du levé constitue une autre étape importante du processus de planification et de préparation. Il faut tenir compte des aspects suivants : le contrôle requis, configuration du réseau et redondance. De toute évidence, la conception du levé varie grandement selon l'exactitude recherchée et la technique de positionnement GPS utilisée. Les exigences en matière de contrôle et la configuration du réseau pour différents types de positionnement sont résumées au tableau 5.3.

Tableau 5.3 Spécifications de contrôle et configuration du réseau

Technique	Exigences quant au contrôle	Configuration du réseau
Positionnement autonome	Aucune	Sans objet
Différentiel	1 point 3D ou davantage	Radiale
Statique classique	3 points 3D ou davantage (ou l'équivalent)	Figure géométrique fermée
Statique rapide et semi-cinématique	Variable	Variable

En positionnement autonome, les stations de contrôle ne sont pas nécessaires (section 2.3). Étant donné que ce type de positionnement est absolu plutôt que relatif, il n'y a aucun réseau à concevoir et un seul récepteur est nécessaire.

Le positionnement différentiel exige au moins une station de contrôle tridimensionnelle. Il faut disposer pour ce point de coordonnées bien déterminées suivant le NAD83 (section 3.3) de même que l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde (section 3.2). C'est pourquoi le réseau des points occupés pendant les levés différentiels prend de manière caractéristique la forme radiale illustrée à la figure 5.6.

**Figure 5.6 Configuration d'un réseau radial**

Comme l'indique la figure, le récepteur de contrôle suit continuellement les satellites disponibles au point de contrôle tridimensionnel pendant que le récepteur mobile est déplacé d'un point à positionner à un autre (c.-à-d. du point 1 au point 2, puis au point 3, etc.). Des liens directs sont établis entre chacun des points et le point de contrôle plutôt qu'entre points. Il s'ensuit que l'exactitude relative entre des points adjacents non reliés est faible.

Cette notion peut être mieux expliquée en examinant la figure 5.6. On y constate que l'exactitude relative entre le point 4 et le point de contrôle ainsi qu'entre le point 5 et le point de contrôle serait bonne puisque ces points sont directement reliés, tandis qu'elle serait faible entre les points 4 et 5 puisque ceux-ci ne sont pas directement reliés. La faiblesse de la configuration d'un réseau radial n'est pas très problématique en positionnement différentiel en raison de la faible exactitude de cette technique.

Pour les levés GPS statiques classiques, on devrait utiliser au moins trois stations de contrôle dont la position tridimensionnelle est connue ou une combinaison équivalente de stations de contrôle planimétriques et altimétriques.

Pour des levés GPS statiques classiques, les réseaux de points devraient prendre la forme de figures géométriques fermées. Des lignes directrices sur la conception de tels réseaux pour les levés statiques sont fournies dans le document intitulé «Directives et spécifications concernant les levés avec le Système de positionnement global (GPS)» (Division des levés géodésiques, 1992) qui mentionne notamment que :

- 1) chacun des points doit être directement relié à au moins deux autres points du réseau;
- 2) des points adjacents devraient être directement reliés;
- 3) chaque séance d'observation doit avoir en commun au moins un vecteur avec une autre séance.

Un exemple de réseau conçu conformément à ces lignes directrices est présenté à la figure 5.7. Remarquer que les points à positionner (de 1 à 7) occupent les mêmes positions que dans le cas du réseau radial illustré à la figure 5.6. Deux stations de contrôle tridimensionnelles supplémentaires ont été ajoutées afin de disposer des trois nécessaires (c.-à-d. C1, C2 et C3).

Cet exemple suppose que quatre récepteurs (A, B, C et D) sont disponibles pour chaque séance d'observation. Les points où des observations doivent être effectuées simultanément pendant une même séance sont reliés par des traits de même type dans le croquis du réseau et sont également énumérés sur une même ligne dans le tableau adjacent. Pour la clarté de l'illustration, les traits ne représentent que quatre des six liens directs établis au cours de chacune des séances d'observation. Par exemple, pour la séance 1, les liens directs C1 à 2 et 1 à 7 ne sont pas représentés.

Également pour des raisons de clarté, les séances 6 et 7 figurant au tableau ne sont pas représentées sur le croquis de réseau de la figure 5.6. Ces séances pourraient être ou ne pas être exécutées selon la rigueur et la redondance souhaitées pour les observations. Ces deux dernières séances serviraient à deux fins. Premièrement, si elles étaient effectuées, des observations seraient exécutées au moins deux fois en chacun des points, ce qui fournirait des observations redondantes ainsi qu'un moyen de détecter les erreurs grossières. Deuxièmement, tous les points de contrôle planimétriques seraient reliés directement, ce qui est utile lors des levés de grande exactitude pour contrôler les erreurs pouvant résulter de l'utilisation d'un réseau géodésique d'appui d'une exactitude moindre que celle obtenue par le levé GPS.

Le réseau géométrique illustré à la figure 5.7 pourrait être conçu de plusieurs autres manières. Le but recherché ici est d'expliquer les principes sur lesquels se fonde la conception des réseaux plutôt que de formuler des règles rigides. Les contraintes logistiques relevées à la lecture d'une carte de la région et pendant la reconnaissance du terrain influencent grandement la configuration des séances d'observation, tout comme le nombre de récepteurs utilisés, le personnel disponible et d'autres facteurs.

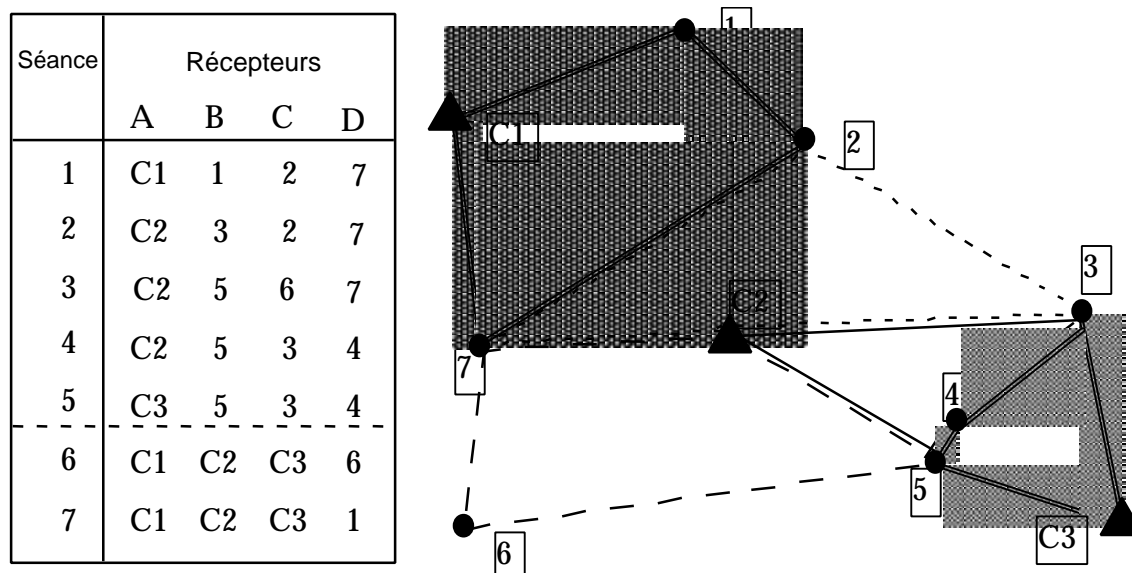


Figure 5.7 Configuration d'un réseau GPS statique classique

Les exigences nominales pour les levés semi-cinématiques et statiques rapides varient et, en général, ne sont pas aussi élaborées que celles pour les levés GPS différentiels et statiques classiques. C'est pourquoi les éléments de conception pour le contrôle et le réseau pourront prendre des formes intermédiaires entre celles retenues pour les levés différentiels et les levés GPS statiques classiques selon les exigences des projets.

Du point de vue opérationnel, la configuration radiale est la plus attrayante à donner aux réseaux puisqu'elle permet de déplacer rapidement et facilement le récepteur mobile entre des points adjacents pendant qu'un récepteur de contrôle est installé en un point d'appui fixe. Du point de vue de l'exactitude, la configuration radiale est moins souhaitable en raison de la possibilité d'une exactitude relative moindre entre des points adjacents non reliés. Un compromis entre ces deux méthodes de conception de réseaux, qui pourrait mieux convenir aux levés semi-cinématiques et statiques rapides, consisterait à utiliser deux stations de contrôle ou plus et un ou deux récepteurs mobiles.

Préparatifs

Jusqu'ici, la plupart des principaux aspects de la phase de planification et de préparation ont été exposés : le choix de la technique de positionnement et du type de récepteur, les processus

de validation et de reconnaissance et la conception des levés. Plusieurs aspects des préparatifs restent à traiter et ils sont énumérés ci-après :

Déterminer les meilleures périodes pour la collecte des données GPS en fonction de la disponibilité et de la géométrie des satellites (voir la section 2.4).

Déterminer le nombre optimal de récepteurs GPS et de préposés pour le projet et prendre les dispositions nécessaires.

Planifier la conception du levé, en tenant compte des exigences en matière de contrôle, de la configuration du réseau, du temps de déplacement entre les emplacements, des périodes de visibilité des satellites et des contraintes logistiques.

Établir un système non équivoque de numérotation ou de désignation qui permette d'identifier clairement tous les points positionnés sur le terrain et les fichiers informatiques, ainsi que les autres attributs connexes qui leurs sont rattachés.

Organiser le transport entre les emplacements (p. ex. en voiture, en hélicoptère, en bateau ou à pied).

Former le personnel au fonctionnement des récepteurs, aux procédures d'observation GPS et au traitement des données.

Organiser le logement sur le terrain, au besoin.

Préparer tout l'équipement et les fournitures nécessaires à l'appui des activités GPS sur le terrain.

On devrait consacrer une attention particulière à la formation nécessaire pour l'utilisation des récepteurs. Un grand nombre de récepteurs offrent des options superflues en regard de certaines applications. Puisque les manuels fournissent des instructions sur le fonctionnement de toutes les composantes des récepteurs plutôt qu'uniquement sur celles qui sont pertinentes, il est recommandé d'en extraire un ensemble condensé d'instructions pertinentes indiquant précisément comment utiliser le récepteur sur le terrain. Ainsi, chaque observateur devrait disposer de ce condensé d'instructions spécifiques en plus du manuel du récepteur (où il pourra trouver les réponses à ses questions et les renseignements de dépannage nécessaires ne figurant pas dans le condensé).

Une foule de renseignements peuvent être portés sur la carte du projet, pour en faire un document de référence précieux de préparation des travaux sur le terrain. La carte de base devrait montrer les points de contrôle et les points à positionner, adéquatement identifiés. Une couche de données peut présenter les contraintes logistiques relevées en reconnaissance et une autre un plan du réseau (inspiré de la figure 5.7) sur lequel chacune des séances peut être représentée au moyen d'une couleur différente; enfin, une dernière couche peut représenter les séances d'observation déjà effectuées sur le terrain.

La phase de planification et de préparation prend fin lorsque l'on est fin prêt à exécuter les travaux sur le terrain avec succès.

5.2 TRAVAUX SUR LE TERRAIN

Une bonne planification et une bonne préparation devraient permettre d'exécuter relativement sans problèmes les travaux sur le terrain. Habituellement, les responsabilités sur le terrain sont réparties entre un chef d'équipe, des observateurs et un responsable du traitement des données. Selon l'ampleur du projet et la méthode utilisée, ces responsabilités peuvent être assumées par une seule personne ou par une équipe nombreuse. On présente au tableau 5.4 un aperçu de certaines des principales tâches à exécuter sur le terrain; le tableau est suivi d'un exposé sur chacune des tâches.

Tableau 5.4 Tâches à accomplir sur le terrain

	Responsabilités
Chef d'équipe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dresser le programme des observations conformément au plan. ▪ Vérifier les avis concernant le fonctionnement des satellites et les prévisions d'orages géomagnétiques. ▪ Évaluer quotidiennement les résultats et modifier les plans, au besoin. ▪ Résoudre toutes les difficultés logistiques.
Observateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vérifier s'il possède tout l'équipement nécessaire. ▪ Vérifier si la pile du récepteur est chargée à fond. ▪ Prévoir suffisamment de temps pour se déplacer jusqu'à la station. ▪ Vérifier s'il occupe la bonne station. ▪ Mettre de niveau, centrer et orienter l'antenne GPS sur le repère. ▪ Mesurer la hauteur de l'antenne. ▪ Initialiser le récepteur. ▪ Surveiller le fonctionnement du récepteur et l'enregistrement des données. ▪ Remplir le rapport d'observation pour la station. ▪ Soumettre les données et le rapport d'observation au responsable du traitement à la fin de chaque jour.
Responsable du traitement des données	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vérifier le retour des données. ▪ Télécharger les données. ▪ Faire une copie de sécurité des données brutes. ▪ Structurer toutes les données (gestion des données). ▪ Traiter les données GPS. ▪ Effectuer les compensations pour l'ensemble des séances, le cas échéant. ▪ Vérifier les résultats et les communiquer au chef d'équipe.

Tâches du chef d'équipe

La responsabilité du chef d'équipe est de veiller à ce que tous ses équipiers possèdent la formation, l'équipement et l'information nécessaires pour effectuer leurs observations conformément au plan. Ses tâches quotidiennes sur le terrain consistent, entre autres, à : (1) prévoir quel observateur doit être en poste, à quelle station et à quel moment; (2) se tenir au courant de tout problème en rapport avec les satellites ou des orages géomagnétiques; (3) évaluer les résultats au jour le jour et modifier les plans, au besoin; (4) résoudre toutes les difficultés logistiques.

L'horaire, précisant qui doit faire les observations en chacune des stations et à quel moment, est très important dans le cadre de travaux avec le GPS puisque les observations doivent être effectuées pendant les périodes pour lesquelles la géométrie est optimale et en positionnement relatif, doivent être simultanées aux différents emplacements. L'horaire quotidien doit être rigoureusement conforme à la configuration du réseau qui a été établi lors de la conception du levé (p. ex. figure 5.6 ou 5.7). L'horaire doit indiquer pour chaque observateur à quel endroit il doit se trouver, à quelle heure et pendant combien de temps. Les descriptions de chaque station (établies en reconnaissance) doivent être fournies aux observateurs pour leur permettre de les localiser. Si plusieurs séances d'observation ont lieu le même jour, il faut prévoir le temps nécessaire pour des déplacements sécuritaires d'une station à l'autre entre les séances. Si la communication peut être maintenue entre les observateurs et le chef d'équipe sur le terrain (par exemple au moyen de téléphones cellulaires), il est possible d'y modifier les séances projetées selon l'évolution signalée.

De temps à autre, des problèmes de fonctionnement des satellites ou des orages géomagnétiques peuvent nuire au succès d'un positionnement GPS. L'information concernant l'état des satellites est disponible du U.S. Coast Guard Navigation Centre (NAVCEN), un centre d'information GPS (voir l'appendice B). Au besoin, cette information peut être utilisée pour modifier à l'avance les horaires d'observation. Par exemple si l'on a prévu utiliser un satellite déclaré hors d'état de fonctionner, on peut calculer de nouvelles tables de visibilité des satellites en omettant celui-ci et modifier en conséquence l'horaire des observations.

L'ionosphère peut également poser des problèmes pour les applications du GPS, particulièrement aux hautes latitudes dans la zone aurorale (voir l'appendice C) où l'activité géomagnétique peut être très intense. Il convient de rappeler (section 2.5) que l'ionosphère est une couche d'électrons libres qui engendre des erreurs dans les signaux GPS mesurés. Cette couche d'électrons est plus irrégulière dans les régions septentrionales. À l'occasion, des orages géomagnétiques, marqués par des niveaux beaucoup plus élevés d'irrégularités ionosphériques, s'étendent à des latitudes plus méridionales et bouleversent les observations GPS. Le chef d'équipe doit donc s'informer de la possibilité d'orages géomagnétiques et prévoir les mesures qui s'imposent. On peut obtenir des prévisions sur l'activité géomagnétique au Canada en s'adressant au Service des prévisions géomagnétiques de la Commission géologique à RNCAN (voir l'appendice C).

Les observations GPS devraient être téléchargées et traitées immédiatement après la séance d'observations afin de s'assurer que la collecte des données a été réussie. Si les données recueillies ne répondent pas aux normes, de nouvelles observations peuvent être nécessaires.

Le chef d'équipe doit prévoir des solutions pour toutes les contraintes logistiques susceptibles de se manifester au cours d'un projet sur le terrain, depuis la difficulté que peut poser l'accès à une station jusqu'à une panne de récepteur. Mieux le chef d'équipe et ses équipiers sont préparés en début de projet, plus il leur sera facile de s'adapter aux imprévus sur le terrain.

Tâches de l'observateur

Une fois que le chef d'équipe a dressé l'horaire d'observation, l'observateur devrait savoir à quel endroit, à quel moment et pendant combien de temps il doit recueillir des observations GPS. Les tâches de l'observateur sur le terrain peuvent être réparties en quatre étapes : préparation des observations, organisation sur le terrain, surveillance de l'état du récepteur et fin des observations.

Les préparatifs nécessaires avant le départ pour une journée d'observation sont assez simples, mais peuvent mener à l'échec s'ils ne sont pas exécutés avec soin. L'observateur devrait prévoir son trajet et estimer généreusement le temps nécessaire pour se déplacer jusqu'aux différents emplacements. Il doit réunir tout l'équipement nécessaire, les descriptions des emplacements et les formulaires de rapport d'observation. Les piles des récepteurs devraient être chargées à fond.

À chaque emplacement sur le terrain, l'observateur doit respecter un ensemble d'étapes pour se préparer aux observations GPS. Premièrement, il doit vérifier s'il se trouve au bon emplacement. Il peut préparer un croquis portant l'information textuelle et le numéro qui figurent sur le repère (le cas échéant) pour prouver, au bureau, qu'il a occupé le bon emplacement.

L'étape suivante consiste à installer l'antenne GPS sur le repère et à mesurer la hauteur de celle-ci, c'est-à-dire la distance verticale entre le centre électrique (ou centre de phase) de l'antenne et le repère. Le degré d'exactitude nécessaire pour le centrage de l'antenne sur un repère varie selon la méthode de positionnement GPS utilisée. De toute évidence, il n'est d'aucune utilité de centrer au millimètre près sur un repère l'antenne d'un récepteur mobile utilisé pour un levé différentiel si l'exactitude prévue n'est que de quelques mètres.

Pour des levés de grande exactitude, l'antenne GPS montée sur un trépied doit être centrée sur le repère au moyen d'une embase à vis calantes pourvue d'un fil à plomb optique. L'embase permet de mettre l'antenne de niveau et de la centrer avec exactitude sur le repère. Les embases utilisées devraient être vérifiées à intervalles réguliers pour s'assurer qu'elles sont bien étalonnées. La plupart des antennes conçues pour recueillir des observations de phase portent un indicateur Nord sur le boîtier. Cet indicateur doit être orienté vers le nord pour toutes les antennes avec lesquelles on recueille simultanément des données. Cette orientation physique commune de toutes les antennes permet de minimiser les erreurs systématiques qui peuvent résulter de variations du centre de phase sur des antennes de la même marque.

La mesure de la hauteur de l'antenne est une tâche à laquelle l'observateur doit apporter un soin particulier en raison de la possibilité d'erreurs grossières. La hauteur de l'antenne est la distance verticale entre le repère et le centre de la phase de l'antenne. La plupart des mesures de la hauteur d'antenne sont effectuées en deux étapes : on mesure d'abord la distance verticale entre le

repère et la base de l'antenne, puis on ajoute le décalage connu (fourni par le fabricant) entre la base de l'antenne et son centre de phase (voir la figure 5.8).

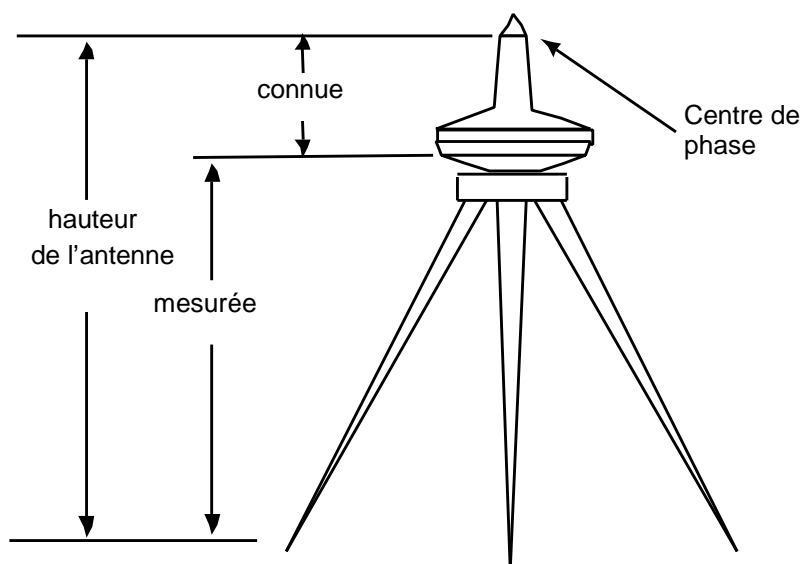


Figure 5.8 Mesure de la hauteur de l'antenne

Pour la plupart des récepteurs, il existe une méthode préétablie pour mesurer la hauteur de l'antenne. Lorsqu'il est impossible d'effectuer des mesures directes suivant la verticale, on peut effectuer des mesures de la hauteur suivant une oblique, puis calculer la distance verticale au moyen du théorème de Pythagore. Autrement dit,

$$\text{hauteur mesurée} = \sqrt{(\text{hauteur oblique})^2 - (\text{rayon à l'antenne})^2} \quad (5.2)$$

Dans tous les cas, on devrait effectuer des mesures redondantes de la hauteur de l'antenne. Si on établit des hauteurs obliques, elles devraient être mesurées de chaque côté de l'antenne. La hauteur de l'antenne devrait être mesurée au début mais également à la fin des périodes d'observation. Quelle que soit la manière dont on mesure la hauteur de l'antenne, la méthode devrait être clairement consignée dans le rapport d'observation pour éviter toute interprétation erronée de la part du responsable du traitement des données.

Pour certains levés différentiels, semi-cinématiques et statiques rapides, les antennes aux stations de contrôle et celles des récepteurs mobiles peuvent être fixées sur des perches de même hauteur qui permettent un nivellement approximatif sur le point grâce à une nivelle sphérique. Dans ces cas, la hauteur de l'antenne n'a pas à être mesurée comme telle, puisqu'elle devrait être la même partout et, donc, s'annuler en calcul de différences.

Une fois l'antenne bien centrée et sa hauteur mesurée et consignée, le récepteur doit être initialisé en vue de la collecte des données suivant les instructions établies. La tâche suivante de l'observateur consiste à veiller à ce que le récepteur fonctionne bien. Cela peut comprendre de

vérifier au panneau d'affichage du récepteur si les satellites sont bien suivis et si les données sont bien enregistrées.

Il est très important que les observateurs compilent sur le terrain un rapport d'observation complet pour chaque point. C'est là le seul document où sont consignées les conditions relevées sur le terrain ou les difficultés rencontrées. Voici les renseignements à y inscrire :

- nom et identification du point pour le fichier de données du récepteur;
- nom de l'observateur;
- type et numéro de série du récepteur et de l'antenne;
- hauteur de l'antenne et explication de la façon dont elle a été mesurée;
- heures du début et de la fin de la collecte des données;
- satellites suivis;
- difficultés rencontrées et correctifs adoptés.

Un exemple de rapport d'observation GPS sur le terrain pour les levés GPS statiques classiques est fourni à l'appendice F. La forme du rapport, sur papier ou informatisé, peut varier selon les besoins.

Une fois les observations terminées, l'observateur devrait vérifier que les données soient enregistrées, vérifier à nouveau la hauteur et le centrage de l'antenne, mettre hors tension et ranger l'équipement conformément aux instructions qui accompagnent le récepteur avant de finir de compléter son rapport d'observation. Au retour d'une journée d'observation, chaque observateur devrait remettre au responsable du traitement son rapport et les données recueillies.

Tâches du responsable du traitement des données

Il importe de traiter les données GPS dès qu'elles ont été recueillies dans le but d'y détecter tout problème alors qu'il est facile d'y remédier. Ce traitement des données peut être effectué sur un ordinateur installé dans une chambre d'hôtel si les opérations sur le terrain s'effectuent en dehors de la ville, ou encore au bureau dans le cas de levés locaux.

La tâche du responsable du traitement sur le terrain commence dès que lui parviennent les données et les rapports d'une journée d'observation. Il devrait vérifier que les informations soumises sont claires, complètes et exactes. Il doit ensuite télécharger les observations depuis le récepteur ou le support de données de celui-ci sur l'ordinateur et doit faire des copies de sauvegarde de toutes les données brutes. Il doit établir et maintenir un mécanisme qui lui permet de gérer efficacement la grande quantité de données obtenues et les copies de sauvegarde.

Le responsable du traitement sur le terrain devrait à tout le moins effectuer un traitement suffisant pour juger si les observations recueillies sont d'une qualité suffisante pour les applications auxquelles elles sont destinées (le traitement est abordé à la section 5.3). Le responsable du traitement doit analyser les résultats de manière à évaluer la qualité des observations, comparer les mesures redondantes et ainsi de suite, puis communiquer les résultats au chef d'équipe afin que celui-ci décide de la nécessité ou non de procéder à de nouvelles observations ou de revoir les plans.

Le responsable du traitement doit également consigner les données traitées, les difficultés rencontrées et les mesures correctives adoptées. Ces notes constituent un journal du traitement subi par les observations, à quel moment et pour quelle raison. L'idéal serait de traiter toutes les données sur le terrain. Cela n'est malheureusement pas toujours possible en raison des contraintes de temps et de la nécessité d'un traitement plus rigoureux.

5.3 TRAITEMENT DES DONNÉES ET RAPPORT FINAL

À ce stade, les phases les plus critiques d'un projet GPS (figure 5.1) ont été expliquées. Le traitement final des données et la production du rapport final ne sont pas aussi critiques du point de vue temps que la planification, la préparation ou les opérations sur le terrain; il faut néanmoins leur accorder l'attention nécessaire pour assurer le succès global du projet. Le traitement des données est d'abord décrit ci-après, avant que soit abordé l'établissement du rapport final.

La complexité du traitement des données correspond à celle de la technique GPS utilisée. En ordre de complexité croissante, mentionnons le positionnement autonome, puis le positionnement différentiel et enfin les techniques fondées sur les observations de phase.

La plupart des récepteurs loués ou achetés sont accompagnés d'un logiciel de traitement GPS. D'autre part, plusieurs progiciels de traitement GPS sont disponibles sur le marché. Heureusement, presque tous ces progiciels sont considérablement automatisés. Il importe néanmoins que les utilisateurs possèdent une idée générale du traitement GPS.

En positionnement autonome, les solutions sont généralement calculées à l'intérieur du récepteur, puis affichées. Les seules opérations éventuelles après le traitement sont le téléchargement de ces résultats et leur intégration à une base de données ou dans un système d'information à références géographiques.

Dans le cas de solutions différentielles établies d'après des observations issues du code, les données provenant de la station de contrôle et des différents emplacements des récepteurs mobiles doivent être chargées dans un même ordinateur. Dès le lancement du programme de traitement, il faut introduire les coordonnées connues suivant le NAD83 du récepteur de contrôle. Le programme établit alors la concordance entre les temps des observations effectuées à chaque point occupé et à la station de contrôle. Grâce aux éphémérides des satellites, aux coordonnées connues des récepteurs et aux observations de pseudodistances, le programme calcule les coordonnées de chaque point occupé. Noter qu'à l'utilisation de la méthode différentielle pour un réseau de configuration radiale, la solution ne peut faire l'objet d'aucune vérification à moins que chaque point ne soit occupé deux fois par un récepteur mobile et que les différences dans les solutions soient comparées entre elles.

Traiter des levés GPS statiques classiques est plus complexe et peut exiger la combinaison de plusieurs séances d'observation. Toutes les observations d'une séance doivent être chargées dans un ordinateur. De même, des coordonnées tridimensionnelles NAD83 connues et convenables pour les points d'appui ou de contrôle devraient être introduites dans le programme de traitement. La plupart des logiciels exigent également que soient introduites des coordonnées approximatives pour tous les autres points occupés pendant une séance. Ces valeurs

approximatives peuvent être lues sur le récepteur utilisé sur le terrain ou encore relevées sur une carte.

Pour chaque séance traitée, la plupart des logiciels exigeront que les coordonnées d'un point soient maintenues fixes selon les trois dimensions; on choisira idéalement un point de contrôle dont les coordonnées NAD83 sont connues. Si une séance donnée ne comprend aucun point de contrôle, on devrait utiliser les coordonnées d'un point figurant également dans une séance adjacente rattaché à un point de contrôle.

L'algorithme de traitement GPS permet de recourir à des modèles pour corriger certaines des erreurs systématiques dans les observations. Toutes les observations, les éphémérides et les coordonnées connues sont ensuite combinées d'une manière optimale (dans un processus appelé «compensation») pour parvenir à une solution. Ce processus comprend une tentative visant à résoudre toutes les ambiguïtés de phase des porteuses. Si cela peut être effectué correctement, la solution résultante sera d'une plus grande exactitude. La solution consistera en différences de coordonnées entre chacun des points ayant fait l'objet d'observations avec l'information connexe concernant l'exactitude.

Une bonne partie des erreurs orbitales décrites à la section 2.5, y compris celles qui sont introduites par l'accès sélectif, peuvent être réduites de manière importante par l'utilisation d'éphémérides précises plutôt que des éphémérides diffusées. Comme nous l'avons expliqué à la section 2.1, les éphémérides diffusées sont basées sur des prévisions des positions des satellites dans le ciel à un moment donné. On obtient des déterminations plus précises des positions des satellites d'observations à des stations de poursuite dispersées autour du globe. Ces données sont combinées et les positions précises des satellites au moment des observations sont calculées. L'utilisation d'éphémérides précises calculées a posteriori permet d'accroître l'exactitude de manière importante pour les levés de précision. Des éphémérides précises sont disponibles à la Division des levés géodésiques, au National Geodetic Survey des États-Unis et du U. S. Coast Guard Navigation Centre (pour de plus amples renseignements, voir l'appendice B).

Pour combiner les résultats de plusieurs séances d'information de manière à parvenir à une solution unique, une compensation de réseau devrait être effectuée au moyen d'un logiciel conçu à cette fin. Une compensation de réseau combine de manière optimale les différences de coordonnées issues de toutes les séances d'observation. Quelques logiciels de fabricants d'équipement GPS offrent également des possibilités de compensation de réseau. De plus, plusieurs logiciels indépendants permettant la compensation de réseaux GPS sont disponibles dans le commerce. Noter que pour qu'une compensation de réseau soit efficace, les exigences de conception de réseaux formulées à la section 5.1 pour des levés GPS statiques classiques doivent être respectées. La compensation initiale du réseau devrait être une compensation sans contrainte (autrement dit un seul point de contrôle tridimensionnel devrait être maintenu fixe), dans le but de permettre l'examen des résultats GPS sans l'influence d'un canevas existant.

Les résultats du traitement d'un levé GPS statique classique peuvent être vérifiés par comparaison de vecteurs redondants et par des tests statistiques dans le processus de compensation.

Les techniques permettant de traiter des données semi-cinématiques et statiques rapides évoluent encore et présentent des similitudes avec celles du traitement aussi bien des données différentielles que des données statiques classiques.

Nous n'abordons pas ici en détail les logiciels de traitement puisqu'ils sont habituellement compris dans la location ou l'achat d'un récepteur et tendent à être très complexes. Mentionnons, cependant, que Hofmann-Wellenhof et al. (1992) offrent un excellent résumé des caractéristiques des progiciels de récepteurs.

Lorsque tous les travaux et toutes les observations sur le terrain sont terminés, on devrait rédiger un rapport final du projet, documentant les points occupés, les méthodes utilisées et les résultats obtenus. L'aspect le plus important d'un rapport final consiste peut-être à signaler toute amélioration possible des procédures, en vue du prochain projet de positionnement au moyen du GPS.

5.4 DÉTERMINATION DE L'ALTITUDE AU MOYEN DU GPS

Pour établir des altitudes orthométriques au moyen du GPS, il faut connaître l'ondulation du géoïde (voir la figure 3.5). Deux facteurs influent sur l'exactitude des altitudes orthométriques déterminées au moyen du GPS : l'exactitude de l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde établie directement par le GPS et l'exactitude de l'ondulation du géoïde dérivée des modèles du géoïde. On peut estimer l'exactitude prévue pour les altitudes orthométriques, σ_H , en calculant la racine carrée de la somme des carrés de l'exactitude de l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde, σ_h , et de l'exactitude de l'ondulation du géoïde, σ_N . Autrement dit,

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_N^2} \quad (5.2)$$

Les altitudes au-dessus de l'ellipsoïde établies au moyen du GPS sont, en général, moins exactes que les composantes planimétriques correspondantes en raison des limites de la géométrie des satellites. De plus, certaines des erreurs mentionnées au tableau 2.4 influencent beaucoup plus la composante altimétrique que la composante planimétrique. En règle générale, on peut s'attendre à ce que l'exactitude pour la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde, σ_h , soit 1,5 fois l'exactitude planimétrique (ce facteur varie selon la géométrie des satellites et les conditions d'observation). Des valeurs générales pour l'exactitude des hauteurs au-dessus de l'ellipsoïde sont fournies aux tableaux 4.1 et 4.2. De plus, la plupart des logiciels de compensation des observations GPS fournissent des estimations de l'écart-type pour les composantes altimétrique et planimétrique. Il est donc relativement simple d'établir l'exactitude de l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde σ_h .

À l'opposé, l'estimation de l'ondulation du géoïde, N , et de son exactitude, σ_N , est plus complexe. Entre autres facteurs ayant une incidence sur l'exactitude de l'ondulation du géoïde, mentionnons le type de positionnement (absolu ou relatif) exécuté, le modèle du géoïde utilisé, la topographie et la pente du géoïde dans la région ainsi que la longueur du vecteur. Chacun de ces facteurs influent sur les procédures à employer et sur l'exactitude possible lors de la détermination de l'altitude orthométrique au moyen du GPS et seront donc abordés ci-après.

Comme nous l'avons expliqué à la section 3.2, il est simple de déterminer l'altitude orthométrique en positionnement absolu (c.-à-d. autonome) au moyen du GPS. Cette technique permet d'établir l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde avec des niveaux d'exactitude variant de 2 à 150 m. Pour transformer cette altitude au-dessus de l'ellipsoïde en une altitude orthométrique, on n'a qu'à soustraire l'ondulation du géoïde (dérivée d'un modèle) de l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde. Les ondulations du géoïde peuvent atteindre ± 50 m au Canada et ± 100 m dans le monde; il est donc important d'en tenir compte pour obtenir les altitudes orthométriques, même en positionnement autonome de faible exactitude. Certains récepteurs tiennent compte de ces ondulations de façon interne, tout à fait invisible pour l'utilisateur.

En positionnement relatif, le traitement à donner aux ondulations du géoïde varie selon l'exactitude du levé effectué. À ces fins, on traitera le géoïde de manières différentes selon les deux types de cas ci-après : levés de positionnement relatif de faible exactitude, basés sur des observations de pseudodistances (c.-à-d. positionnement différentiel) et levés de positionnement relatif de grande exactitude, basés sur des observations de phase (c.-à-d. GPS statique classique, semi-cinématique et statique rapide). Dans le premier cas, une correction grossière pour le géoïde suffit et dans le second, il faut appliquer une procédure plus élaborée. Dans les deux cas, toutefois, on devrait utiliser un modèle précis et détaillé pour le Canada, tel que le modèle GSD95 ou encore le quadrillage de transformation HT97 mis au point spécialement pour les applications du GPS (voir appendice E).

En positionnement relatif, c'est la variation de l'ondulation du géoïde en fonction de la distance dont il faut se préoccuper plutôt que de sa valeur absolue. On appelle cette variation «pente du géoïde». Ces pentes présentent, en général, une corrélation avec les entités topographiques, les pentes les plus faibles correspondant aux régions planes telles les Prairies canadiennes et les pentes les plus élevées, aux régions montagneuses comme les montagnes Rocheuses au Canada. Il faut cependant garder à l'esprit que d'autres facteurs moins évidents influent sur la pente du géoïde. En général, plus la pente est faible, plus les altitudes orthométriques qui peuvent être déterminées au moyen du GPS sont exactes.

Altitudes orthométriques de faible exactitude par GPS différentiel

En positionnement différentiel, le récepteur de contrôle est habituellement placé en un point de contrôle dont on connaît les coordonnées suivant les trois axes, à savoir latitude, longitude et altitude orthométrique (H_c). L'ondulation du géoïde à la station de contrôle (N_c) est ajoutée à l'altitude orthométrique de façon à obtenir l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde du point (h_c), qui est maintenue constante lors du traitement GPS. En GPS différentiel, l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde de chaque emplacement du récepteur mobile (h_m) est calculée. L'altitude

orthométrique souhaitée à l'emplacement d'un récepteur mobile (H_m) est ensuite obtenue en soustrayant l'ondulation du géoïde à cet endroit (N_m) de l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde (h_m). Cette notion est illustrée à la figure 5.9.

L'incertitude associée à la hauteur relative du géoïde, σ_N , obtenue par l'application d'une correction grossière pour le géoïde, conformément aux procédures décrites à la figure 5.9, varie en fonction de la longueur du vecteur entre les stations et de l'ordre de grandeur de la pente du géoïde. On présente des plages caractéristiques de valeurs de cette incertitude au tableau 5.5. Remarque que pour des vecteurs d'une longueur de 2 à 3 km et de 1 km dans des régions à forte pente du géoïde, l'exactitude est qualifiée d'inconnue dans le tableau parce qu'elle est en fait inconnue pour des distances inférieures à 3 km. Il est donc avisé dans de tels cas d'utiliser la valeur pessimiste de 25 cm pour σ_N .

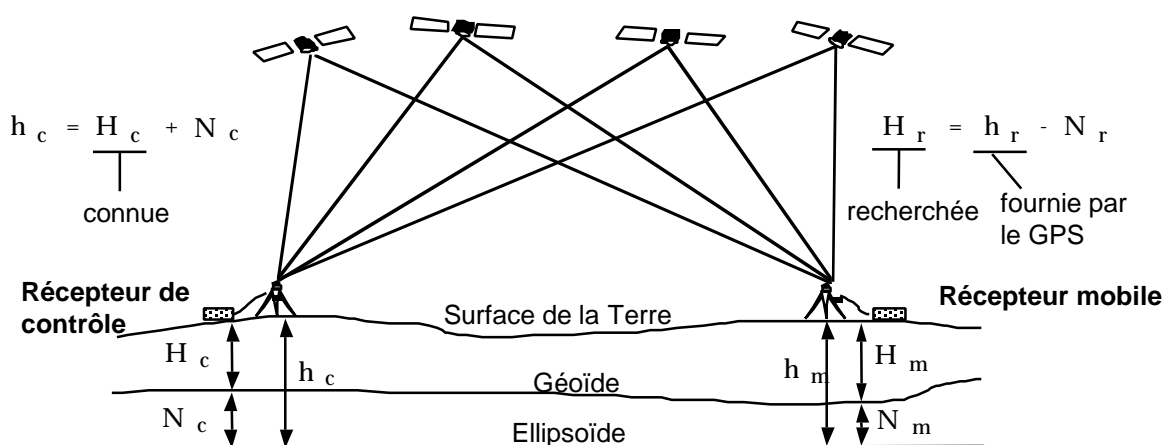


Figure 5.9 Détermination de l'altitude orthométrique par les techniques GPS différentielles

Longueur du vecteur	Partie de l'erreur sur l'altitude relative attribuable au géoïde (σ_N) (à l'utilisation d'une correction grossière pour le géoïde et du modèle GSD95 du géoïde)	
	Terrain plat ou faible pente du géoïde	Terrain montagneux ou forte pente du géoïde
30 à 500 km	max. ± 25 cm	max. ± 1 m
5 à 10 km	max. ± 10 cm	max. ± 25 cm
2 à 3 km	max. ± 5 cm	inconnue
1 km	max. ± 5 cm	inconnue

Cette procédure proposée pour l'obtention de l'altitude orthométrique à l'utilisation du GPS en mode différentiel est relativement simple. En fait, un grand nombre de progiciels conçus pour l'utilisation du GPS différentiel appliquent d'une manière tout à fait invisible pour l'utilisateur la différence entre l'altitude orthométrique et l'altitude au-dessus de l'ellipsoïde. Il importe néanmoins, que les utilisateurs du GPS comprennent ce qui se passe et pourquoi. L'erreur introduite par un modèle commercial du géoïde serait vraisemblablement supérieure à celles indiquées au tableau 5.5, si un modèle autre que le GSD95 était utilisé.

Pour parvenir à des altitudes orthométriques de grande exactitude et tirer avantage de la plus grande exactitude inhérente qu'offrent les techniques de positionnement relatif par observations de phase de la porteuse, les procédures à appliquer sont beaucoup plus complexes.

Altitudes orthométriques de grande exactitude obtenues grâce à des observations de phase

L'obtention d'altitudes orthométriques de grande exactitude d'après des observations de phase est beaucoup plus complexe que dans le cas des levés différentiels de faible exactitude dont il a été question ci-haut. Nous expliquerons d'abord la notion et l'importance de l'«élimination» de la pente du géoïde, puis nous décrirons les étapes fondamentales du calcul des altitudes orthométriques de grande exactitude.

La détermination de l'altitude orthométrique par les techniques différentielles, telle qu'illustrée à la figure 5.9, ne fait intervenir qu'une seule altitude orthométrique connue (c.-à-d. H_c à la station de contrôle). Pour établir des altitudes orthométriques plus exactes, il faut connaître l'altitude orthométrique de deux points ou davantage en périphérie de la zone levée. Les ondulations du géoïde nécessaires au calcul des altitudes orthométriques des nouveaux points sont ensuite essentiellement interpolées entre ces points connus. Cela a pour effet de supprimer la plus grande partie de la pente du géoïde et d'accroître les exactitudes qui peuvent être obtenues.

Cette notion peut être explicitée à l'aide de la figure 5.10. Aux deux points de contrôle, 1 et 2, les cotes orthométriques H_1 et H_2 ont été déterminées par nivellement de premier ordre. On souhaite déterminer l'altitude orthométrique d'un nouveau point, H_n . On peut obtenir d'un modèle exact du géoïde, comme le GSD95, une estimation des ondulations du géoïde N_1 , N_2 et N_n .

L'altitude au-dessus de l'ellipsoïde en chacun des trois points (h_1 , h_2 et h_n) est mesurée d'après des observations GPS.

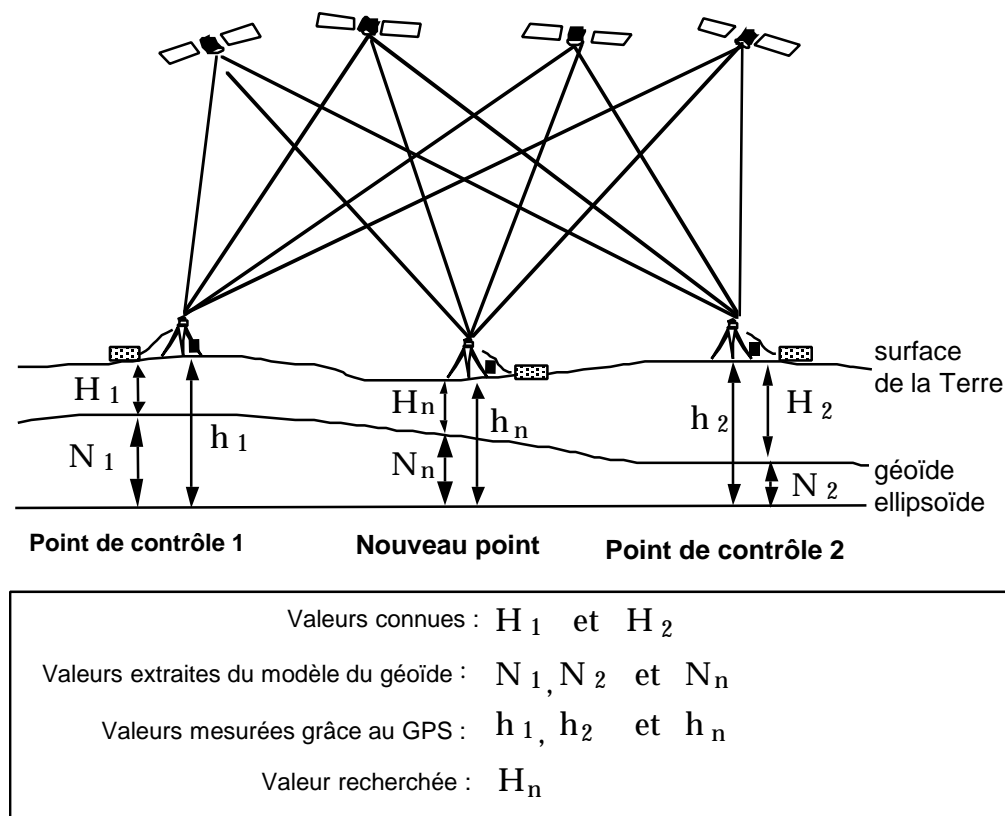


Figure 5.10 Détermination de l'altitude orthométrique par des techniques de mesures de porteuse

Remarquez qu'aux points de contrôle 1 et 2 les altitudes au-dessus de l'ellipsoïde h_1 et h_2 peuvent être établies de deux manières : directement d'après les observations GPS ou en faisant la somme de l'altitude orthométrique connue et de l'ondulation du géoïde tirée du modèle (autrement dit, $h_1 = H_1 + N_1$ et $h_2 = H_2 + N_2$). Les altitudes au-dessus de l'ellipsoïde déterminées par ces deux méthodes ne seront pas identiques, principalement en raison de l'inexactitude du modèle du géoïde. En fait, l'exécution d'observations GPS sur des repères altimétriques permet de mesurer l'inexactitude du modèle du géoïde en ces points.

Pour déterminer l'altitude orthométrique, H_n , il faut connaître l'ondulation du géoïde N_n (autrement dit $H_n = h_n - N_n$). En utilisant les inexactitudes du modèle du géoïde mesurées aux points de contrôle 1 et 2, on peut parvenir par interpolation à une valeur N_n plus exacte au point intermédiaire. Voilà le principe qui permet d'obtenir des altitudes orthométriques d'une grande exactitude au moyen du GPS; on peut considérer que cela revient à utiliser des points d'appui altimétriques pour appliquer une correction tenant compte de la pente du géoïde.

Bien que le concept illustré à la figure 5.10 puisse paraître complexe, il est, en réalité, mis en oeuvre par l'application d'une compensation par les moindres carrés, en maintenant fixes les points dont l'altitude orthométrique est connue. De plus, on peut utiliser davantage de points de contrôle que les deux seulement illustrés à la figure 5.10. Il serait en fait préférable d'utiliser trois points pour tenir compte de la pente du géoïde suivant un plan, et non seulement suivant une ligne.

L'exactitude résultante pour l'ondulation du géoïde, σ_N dans l'équation 5.2, lorsque sont utilisés deux repères altimétriques ou plus pour tenir compte de la pente du géoïde et le GSD95 pour obtenir l'ondulation du géoïde est indiquée au tableau 5.6. Ce tableau fournit des valeurs représentatives de σ_N pour des pentes faibles et fortes. Sur de courtes distances (c.-à-d. inférieures à quelques kilomètres), le modèle du géoïde n'est pas assez détaillé pour permettre l'utilisation de valeurs différentes en chaque point et les mêmes valeurs peuvent être utilisées pour l'ondulation.

Tableau 5.6 Erreur approximative attribuable à l'incertitude associée au géoïde pour des altitudes relatives déterminées d'après des levés GPS précis

Longueur du vecteur	Partie de l'erreur sur l'altitude relative attribuable au géoïde (σ_N) (à l'utilisation du GSD95)	
	Terrain plat ou faible pente du géoïde	Terrain montagneux ou forte pente du géoïde
30 à 500 km	$\sigma \pm 10$ cm max. ± 20 cm	$\sigma \pm 20$ max. ± 50 cm
5 à 10 km	$\sigma \pm 5$ max. ± 10 cm	$\sigma \pm 10$ cm max. ± 20 cm
2 à 3 km	$\sigma \pm 2$ max. ± 5 cm	Valeur inconnue
1 km	max. ± 2 cm	Valeur inconnue

Dans tous les cas, au moins deux repères altimétriques sur la périphérie de la zone du levé devraient faire l'objet d'observations GPS pour comparer les différences d'altitude au-dessus de l'ellipsoïde (Δh) et les différences d'altitude orthométrique (ΔH). La pente du géoïde, évidente d'après $\Delta h - \Delta H$, indiquera si les exactitudes relatives du géoïde fournies dans le tableau ci-haut sont raisonnables pour la région des environs immédiats.

La Division des levés géodésiques a récemment mis au point un quadrillage de transformation HT97 spécialement pour les applications du GPS. Le HT97 et son logiciel d'interpolation GPS-HT permettent aux utilisateurs d'obtenir des altitudes orthométriques dérivées du GPS qui sont compatibles avec le canevas altimétrique CGVD28 environnant sans qu'il soit nécessaire d'occuper des repères altimétriques d'appui lors des travaux sur le terrain.

Dans l'ensemble, l'exactitude du quadrillage HT97 est estimée à ± 5 cm (à un niveau de confiance de 95 %) dans les régions méridionales du Canada, mais peut n'être que de l'ordre de quelques décimètres dans les régions éloignées ou septentrionales où il n'y a que peu d'altitudes exactes au-dessus du CGVD28 desquelles dérive une transformation fiable (voir appendice D).

Pour les déterminations de l'altitude avec une grande exactitude au moyen du GPS, il faut accorder le plus grand soin aux observations et bien comprendre le traitement des données afin de minimiser les erreurs et tenir compte de l'incertitude associée au géoïde. Bien que nous ayons abordé dans la présente section les principes fondamentaux de la détermination avec grande exactitude de l'altitude au moyen du GPS, il est fortement recommandé de retenir les services d'une personne possédant de l'expérience en géodésie et en positionnement GPS dans le cadre de tels projets. Il existe un risque important d'obtenir sans le savoir des exactitudes inférieures aux exactitudes souhaitées si des procédures spéciales, se situant au-delà de la portée du présent document, ne sont pas respectées.

BIBLIOGRAPHIE

- Arradondo-Perry, J. 1992. «GPS World Receiver Survey». *GPS World*, vol. 3, n° 1, p. 46-58.
- Cannon, M.E. 1991. «Airborne GPS/INS with an Application to Aerotriangulation». Thèse de MSc, publication 20040, département de *Surveying Engineering*, Université de Calgary.
- Département de la Défense et département des Transports des États-Unis. 1986. *Federal Radionavigation Plan*. National Technical Information Service, Springfield, Virginia.
- Direction des levés et de la cartographie. 1978. «Spécifications pour levés de contrôle et conseils concernant la construction des repères». Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa (Ontario).
- Division des levés géodésiques. 1992. «Directives et spécifications concernant les levés avec le système de positionnement global (GPS)». Centre canadien des levés, Secteur des levés, de la cartographie et de la télédétection, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa.
- Georgiadou, Y. et A. Kleusberg. 1988. c. *Manuscript geodaetica*, vol. 13, n° 3, p. 172-179.
- Hatch, R. 1991a. «Instantaneous Ambiguity Resolution». *Proceedings of IAG International Symposium 107 on Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing*, symposium tenu du 10 au 13 sept. 1990, Springer Verlag, New York, p. 299-308.
- Hatch, R. 1991b. «Ambiguity Resolution While Moving - Experimental Results». *Proceedings of ION GPS'91*, Albuquerque, NM., réunion tenue du 10 au 13 sept., The Institute of Navigation, Washington, D.C., p. 707-713.
- Héroux, P. et J. Kouba. 1995. «GPS Precise Point Positioning with a Difference». Actes de la Conférence canadienne sur la géomatique 1995 (CD-ROM), Ottawa, 13-15 juin.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger et J. Collins. 1992. *GPS: Theory and Practice*. Springer-Verlag, New York.
- Kleusberg, A. 1990. «A Review of Static and Kinematic GPS Surveying Procedures». *Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*, Ottawa, symposium tenu du 3 au 7 sept., Association canadienne des sciences géodésiques et cartographiques, p. 1102-1114.
- Kremer, G.T., R.M. Kalafus, P.V.W. Loomis et J.O. Reynolds. 1989. «The effect of Selective Availability on Differential Corrections». *Proceedings of the Second International Technical Meeting of the Satellite Division of the ION, GPS-89*, Colorado Springs, réunion tenue du 27 au 29 sept.

- Lachapelle, G., W. Falkenberg, D. Neufeldt et P. Kielland. 1989. «Marine DGPS Using Code and Carrier in A Multipath Environment». *Proceedings of ION GPS-89*, The Institute of Navigation, Washington, D.C., p. 343-347.
- Lachapelle, G. 1991. «GPS Observables and Error Sources For Kinematic Positioning». *Proceedings of IAG International Symposium 107 on Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing*, symposium tenu du 10 au 13 sept. 1990, Springer Verlag, New York, p. 17-26.
- Lachapelle, G., P. Kielland et M. Casey. 1991. «GPS for Marine Navigation and Hydrography». *Proceedings of the Fourth Biennial Canadian Conference*, Rimouski, tenue du 15 au 19 avril.
- Langley, R. 1991. «The Mathematics of GPS». *GPS World*, vol. 2, n° 7, p. 45-50.
- Lapucha, D., K.P. Schwarz, M.E. Cannon et H. Martell. 1990. «The Use of INS/GPS in a Highway Inventory System». *Proceedings of IEEE PLAN'S 90*, Las Vegas, réunion tenue du 20 au 23 mars.
- Leick, A. 1994. *GPS Satellite Surveying*, Wiley-Interscience, New York.
- McNeff, J.G. 1991. «GPS Signal Policy». *Proceedings of ION GPS'91*, Albuquerque, NM., réunion du 10 au 13 sept., The Institute of Navigation, Washington, D.C., p. 33-37.
- Merrell, R.L., H.S. Bains, M.P. Leach, D.J. Kurtin et J.R. Lucas. 1990. «Refinements of the GPS/Photogrammetric Surveying Capability in the Texas State Department of Highways and Public Transportation». *Proceedings of the Third International Technical Meeting of the Satellite Division of the ION, GPS-90*, Colorado Springs, réunion tenue en septembre, p. 19-21.
- Mikhail, E.M. 1976. *Observations and Least Squares*, Harper & Row, New York.
- National Geodetic Survey. 1986. «Geodetic Glossary». Département du Commerce des États-Unis, NOAA, Charting and Geodetic Services, Rockville, Maryland, États-Unis.
- Pinch, M.C. 1990. «Differences Between NAD27 and NAD83». *Moving to NAD'83 the new address for georeferenced data in Canada*. Association canadienne des sciences géodésiques et cartographiques, Ottawa (Ontario) p. 1-15.
- Remondi, B. 1985. «Performing Centimeter Accuracy Relative Surveys in Seconds Using GPS Carrier Phase». *Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*, Rockville, Maryland, symposium tenu du 15 au 19 avril, p. 789-797.
- Remondi, B. 1991. «Kinematic GPS Results Without Static Initialization». *NOAA Technical Memorandum NOS NGS-52*, Rockville, MD.
- Seeber, G. 1993. *Satellite Geodesy: Foundation, methods, and applications*, Walter de Gruyter, Berlin.

- SLCT. 1990. «Policies of the Surveys, Mapping and Remote Sensing Sector Relating to North American Datum, NAD83». Centre canadien des levés, Secteur des levés, de la cartographie et de la télédétection, Énergie, Mines et Ressources Canada.
- Wells, D.E., N. Beck, D. Delikaraoglou, A. Kleusberg, E.J. Krakiwsky, G. Lachapelle, R.B. Langley, M. Nakiboglu, K.P. Schwarz, J.M. Tranquilla et P. Vanicek. 1986. *Guide to GPS Positioning*, Canadian GPS Associates, Fredericton (Nouveau-Brunswick).
- Van Dierendonck, A.J., P. Fenton et T. Ford. 1992. «Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver». *Proceedings of the National Technical Meeting U.S. Institute of Navigation*, San Diego, réunion tenue du 27 au 29 janv., p. 115-224.
- Véronneau, M. (1997). «The GSD95 Geoid Model for Canada». *Gravity, Geoid and Marine Geodesy, International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 117, Springer, Berlin, p. 573-580.
- Young, F.W. et J. Murakami. 1989. «The North American Vertical Datum of 1988 (NAVD'88)». *The Canadian Institute of Surveying and Mapping Journal*, vol. 43, n° 4, p. 387-393.

APPENDICE A

GLOSSAIRE

GLOSSAIRE

Accès sélectif (SA) Technique servant à limiter l'exactitude offerte en temps réel aux utilisateurs civils du GPS et consiste en une dégradation des orbites diffusées (c.-à-d. de l'exactitude de la position «connue» des satellites dans l'espace) et l'introduction d'erreurs dans l'information diffusée quant à la synchronisation des horloges des satellites (également appelé «disponibilité sélective»).

Altitude orthométrique Altitude au-dessus du géoïde, classiquement établie par nivellement géométrique.

Ambiguïté Nombre inconnu de cycles de l'onde porteuse présent entre un satellite et un récepteur au moment de l'acquisition initiale du signal.

Angle de coupure Hauteur sous laquelle les signaux GPS ne sont pas enregistrés en raison d'une option réglée dans le récepteur ou dans le logiciel de traitement GPS (également appelé angle de masquage).

Angle de masquage Hauteur sous laquelle les signaux GPS ne sont pas enregistrés en raison d'une option réglée dans le récepteur ou dans le logiciel de traitement GPS (également appelé angle de coupure).

Antileurrage (AS) Interdiction d'accès au code P pour les utilisateurs civils.

Arrêts-déplacements Méthode de positionnement relatif dans laquelle un récepteur mobile est maintenu stationnaire en chaque point à positionner pendant plusieurs secondes tout en maintenant le verrouillage des signaux des satellites pendant les déplacements entre des points (également appelé semi-cinématique).

Alert Tableau indiquant la position des satellites visibles par un observateur en un endroit sur la surface de la Terre et à un moment spécifiés.

Azimut Angle horizontal mesuré dans le sens horaire entre le nord et la position d'un satellite dans le ciel.

Bruit du récepteur Quantification de la capacité d'un récepteur GPS à bien effectuer des observations exactes de pseudodistances ou de phase.

Cinématique Type de positionnement GPS dans lequel un récepteur est déplacé pendant la collecte des données.

Cinématique continue Type de positionnement GPS dans lequel au moins un récepteur GPS suit de façon continue des satellites GPS tout en étant déplacé dans le but d'établir la position de sa trajectoire (également appelée cinématique pure).

Cinématique pure Type de positionnement GPS dans lequel au moins un récepteur GPS suit continuellement des satellites GPS tout en étant déplacé afin d'établir la position de sa trajectoire (également appelée cinématique continue).

Chip Élément binaire de valeur 0 ou 1 dont sont composés les codes C/A et P.

Code C/A Code GPS mis à la disposition des utilisateurs civils sans restrictions que l'on appelle le code d'accès libre et qui est modulé sur la porteuse L1 à la fréquence de 1,023 MHz.

Code P Code GPS précis qui par antileurrage n'est plus mis à la disposition des utilisateurs civils; il est modulé à la fois sur les porteuses L1 et L2 à une fréquence de 10,23 MHz.

Code Y Code GPS secret qui remplace le code P quand l'antileurrage est mis en oeuvre.

Constellation de satellites Ensemble des satellites et leur configuration dans l'espace.

Datum Point, ligne, surface ou ensemble de quantités servant de référence pour des mesures.

Diminution de la précision (DOP) Indicateur numérique de la valeur géométrique de la constellation des satellites pour le positionnement à un endroit et à un moment donnés.

Écart moyen quadratique (emq) Mesure de la dispersion des observations autour de la valeur vraie (correspond à l'anglais «Root Mean Square» ou «rms»).

Écart-type Mesure de la dispersion des observations de part et d'autre de la moyenne, d'application quelquefois limitée aux distributions normales, mais le plus souvent appliquée à toute distribution, auquel cas elle équivaut à l'écart quadratique moyen.

Ellipsoïde Surface mathématique uniforme ressemblant à celle d'une sphère écrasée et servant à représenter la surface de la Terre.

Emplacement Terme souvent employé pour désigner un point à la surface terrestre où des observations GPS sont effectuées (également appelé station ou point).

Éphémérides diffusées Ensemble de paramètres décrivant la position des satellites en fonction du temps qui sont émis (diffusés) par les satellites.

Éphémérides précises Ensemble de paramètres décrivant avec exactitude la position des satellites en fonction du temps qui sont calculés d'après les données recueillies à des stations de poursuite GPS dispersées dans le monde.

Erreur aléatoire Erreur persistant une fois que toutes les erreurs grossières et systématiques ont été supprimées; les erreurs aléatoires ont tendance à se distribuer autour de la moyenne selon la fonction de distribution normale des probabilités (également appelée erreur accidentelle).

Erreur d'orbite Différence entre la position d'un satellite calculée selon les éphémérides qu'il diffuse et sa position «vraie» dans l'espace.

Erreur de l'horloge du récepteur Erreur due à l'inexactitude de la mesure du temps de réception d'un signal par l'horloge du récepteur.

Erreur équivalente sur la distance pour l'utilisateur (UERE) Combinaison de l'ensemble des différentes erreurs affectant les observations de pseudodistances (de l'anglais «user equivalent range error»).

Erreur grossière Erreur résultant d'une panne quelconque d'équipement ou d'une faute de l'observateur (également appelée faute d'inattention).

Erreur ionosphérique Retard dans la transmission des signaux GPS attribuable à leur passage à travers l'ionosphère.

Erreur probable Valeur de l'erreur correspondant à une incertitude de 50 %.

Erreur systématique Erreur qui fausse les observations suivant un modèle ou un comportement répété et prévisible.

Erreur troposphérique Retard dans la transmission des signaux GPS attribuable à leur passage à travers la troposphère.

Exactitude Écart entre une estimation (ou une mesure) et la valeur vraie (mais inconnue).

Exactitude relative Exactitude d'une mesure entre deux points (c.-à-d. l'exactitude d'un point par rapport à un autre).

Faute d'inattention Erreur résultant d'une panne quelconque d'équipement ou d'une faute de l'observateur (également appelée erreur grossière).

Fichier d'almanach Fichier de données qui contient des paramètres tronqués décrivant la position des satellites GPS en fonction du temps utilisés pour calculer des prévisions en matière de disponibilité, de visibilité et de géométrie des satellites.

Fréquence porteuse Rayonnement électromagnétique continu d'une amplitude et d'une fréquence constantes émis par un émetteur radio. Les satellites GPS émettent sur deux fréquences porteuses : L1 à 1575,42 MHz et L2 à 1227,60 MHz, sur lesquelles les codes et les messages des satellites sont modulés par déplacement de phase.

Géoïde Surface équipotentielle (c.-à-d. d'un potentiel gravitationnel constant) qui correspond le mieux au niveau moyen de la mer.

Hauteur Angle formé à l'antenne du récepteur GPS entre l'horizontale et la ligne de visée du satellite (également appelée angle de site).

Hauteur du géoïde Différence de hauteur entre le géoïde et l'ellipsoïde en un point donné de la surface de la Terre (également appelée ondulation du géoïde).

Ionosphère Couche d'électrons libres se trouvant entre 50 et 1000 km au-dessus de la Terre.

Message du satellite Bloc d'information modulée sur les deux fréquences porteuses L1 et L2 et comprenant, entre autres, les éphémérides diffusées et l'état du satellite.

Modèle du géoïde Modèle des ondulations du géoïde à la surface de la Terre en fonction de la latitude et de la longitude.

Multitrajets S'applique à un signal réfléchi qui se combine à un signal vrai et produit de ce fait un positionnement moins exact (également appelés trajets multiples).

Obstacle Objet obstruant la ligne de visée entre l'antenne du récepteur et un satellite GPS.

Ondulation du géoïde Différence de hauteur entre le géoïde et l'ellipsoïde en un point donné de la surface de la Terre (également appelée hauteur du géoïde).

Orage géomagnétique Phénomène engendré lorsque des irrptions solaires provoquent une ionisation irrégulière de l'ionosphère, qui à son tour engendre par réfraction des retards irréguliers dans la transmission des ondes radio traversant le milieu non homogène.

Positionnement absolu Méthode la plus simple de positionnement GPS par laquelle les coordonnées sont déterminées dans le cadre de référence des satellites d'après les observations d'un seul récepteur et les positions «connues» des satellites GPS suivis (également appelé positionnement autonome).

Positionnement différentiel Type de positionnement relatif par lequel les observations effectuées par un récepteur de contrôle à un point de position connue servent à corriger les observations d'un récepteur mobile de position inconnue (à l'occasion dans la documentation, l'expression «positionnement différentiel» est utilisée au sens plus général de positionnement relatif).

Positionnement GPS statique classique Méthode de positionnement relatif par laquelle deux récepteurs GPS ou plus, installés chacun en une station, recueillent simultanément les données des mêmes satellites pendant au moins une demi-heure et, plus couramment, au moins une heure; c'est ce type de positionnement relatif avec des observations de phase qui permet d'obtenir les meilleures exactitudes possibles en positionnement GPS.

Positionnement autonome Méthode la plus simple de positionnement GPS par laquelle les coordonnées sont déterminées dans le cadre de référence des satellites d'après les observations d'un seul récepteur et les positions «connues» des satellites GPS suivis (également appelé positionnement absolu).

Positionnement relatif Détermination de la position d'un point par rapport à celle d'un autre point dont les coordonnées sont connues.

Précision Écart entre une estimation et l'estimation moyenne.

Récepteur bifréquences Récepteur permettant de capter à la fois les fréquences porteuses L1 et L2 du GPS.

Récepteur de contrôle Récepteur GPS stationnaire installé en un point dont les coordonnées sont connues et servant de référence pour les observations d'un récepteur mobile.

Récepteur mobile Récepteur GPS déplacé soit le long d'une trajectoire à positionner (p. ex. en positionnement cinématique), soit d'un point à positionner à un autre (p. ex. en positionnement semi-cinématique ou statique rapide), et dont les observations sont combinées à celles d'un récepteur de contrôle en positionnement relatif (également appelé récepteur distant).

Récepteur distant Récepteur GPS déplacé soit le long d'une trajectoire à positionner (p. ex. en positionnement cinématique), soit d'un point à positionner à un autre (p. ex. en positionnement semi-cinématique ou statique rapide), et dont les observations sont combinées à celles d'un récepteur de contrôle en positionnement relatif (également appelé récepteur mobile).

Saut de cycle Saut d'un nombre inconnu de cycles de la porteuse par suite d'une interruption du verrouillage d'un récepteur sur le signal d'un satellite.

Séance d'observation Période pendant laquelle des observations GPS sont faites simultanément.

Segment de contrôle au sol Réseau de stations de poursuite et centres de contrôle qui assure le fonctionnement continu de l'ensemble des satellites GPS.

Segment utilisateurs Ensemble des personnes qui utilisent de l'équipement de poursuite GPS pour recevoir les signaux du système afin de satisfaire des besoins spécifiques en positionnement.

Semi-cinématique Méthode de positionnement relatif par laquelle le récepteur mobile est maintenu stationnaire pendant plusieurs secondes en chaque point et reste verrouillé sur des satellites pendant les déplacements entre les points (également appelée arrêts-déplacements).

Statique Type de positionnement dans lequel un récepteur GPS est stationnaire pendant la collecte des données.

Station Terme souvent utilisé pour désigner un point à la surface de la Terre où des observations GPS sont effectuées (également appelée emplacement ou point).

Statique rapide Type de positionnement GPS statique exigeant seulement des minutes plutôt que des heures d'observation grâce à l'application de techniques spéciales de résolution de l'ambiguïté, faisant intervenir de l'information supplémentaire, par exemple des observations issues du code P, ou des satellites redondants.

Système terrestre conventionnel (de coordonnées) Système cartésien de coordonnées géocentriques dont l'axe des Z est dirigé vers le pôle Nord, l'axe des X passe par le plan qui contient le méridien de Greenwich et l'axe des Y est perpendiculaire aux axes des X et

des Z pour définir un système de la main droite; ce système permet d'indiquer la position de points sur la Terre ou de satellites dans l'espace.

Système géodésique (de coordonnées) Système de coordonnées géocentriques dans lequel la latitude est l'angle de valeur positive vers le nord formé au centre de la Terre entre l'équateur et un point quelconque, et la longitude, l'angle de valeur positive vers l'est formé au centre de la Terre entre le méridien de Greenwich et un point quelconque.

Traitement après mission Traitement des données visant à calculer des positions qui est effectué après la séance d'observation (également appelé post-traitement).

Traitement en temps réel Traitement dans lequel les positions sont calculées dès que les données sont recueillies.

Troposphère Couche de l'atmosphère s'élevant jusqu'à 80 km au-dessus de la Terre.

Vecteur Segment entre deux stations où des observations GPS ont été recueillies simultanément.

APPENDICE B

SOURCES D'INFORMATION SUR LES SATELLITES GPS

APPENDICE B

SOURCES D'INFORMATION SUR LES SATELLITES GPS

CENTRE D'INFORMATION SUR LE GPS

Le U.S. Coast Guard Navigation Centre (NAVCEN) exploité par la garde côtière des États-Unis maintient un site Internet (<http://www.navcen.uscg.mil/GPS/>) qui fournit une foule d'informations utiles aux utilisateurs du GPS.

Parmi les renseignements disponibles, notons les suivants : état actuel de la constellation (satellites en état de marche ou non), pannes récentes, pannes prévues, description des orbites (fichiers d'almanach) permettant d'établir des prévisions sur la couverture GPS et la visibilité des satellites et, enfin, éphémérides précises des orbites, calculées par le National Geodetic Survey (NGS) des États-Unis.

Un bref résumé de l'état de la constellation est aussi disponible sur enregistrement vocal au (703) 313-5907.

Pour obtenir de plus amples renseignements, on peut consulter :

Commanding Officer
USCG NAVCEN
7323 Telegraph Rd.
Alexandria, VA 22315
USA

ÉPHÉMÉRIDES PRÉCISES

La Division des levés géodésiques calcule et archive les éphémérides précises pour la constellation des satellites GPS dans le cadre de son Système actif de contrôle (ACS) (voir l'appendice G). Ces éphémérides sont calculées d'après des données recueillies par des stations canadiennes ainsi qu'un réseau de stations réparties dans le monde sous les auspices du Service international de GPS pour la géodynamique (IGS). Les fichiers d'éphémérides sont disponibles suivant le Cadre de référence NAD83 et le Cadre international de référence terrestre (ITRF).

Les demandes de renseignements devraient être adressées à :

Division des levés géodésiques
Services d'information
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
Tél. : (613) 995-4410 ou (613) 992-2061
Télec. : (613) 995-3215
Courriel : information@geod.nrcan.gc.ca
Page Web : <http://www.geod.nrcan.gc.ca>

APPENDICE C

**ZONES D'ACTIVITÉ GÉOMAGNÉTIQUE ET
SOURCES D'INFORMATION**

APPENDICE C

ZONES D'ACTIVITÉ GÉOMAGNÉTIQUE ET SOURCES D'INFORMATION

ZONES D'ACTIVITÉ GÉOMAGNÉTIQUE

Le comportement de l'ionosphère dépend d'un grand nombre de variables reliées entre elles, notamment le cycle solaire, la période de l'année, l'heure, la situation géographique et l'activité géomagnétique.

Le Programme national de géomagnétisme de la Commission géologique du Canada (CGC) a pour mission de surveiller et de prédire les fluctuations constantes du champ magnétique terrestre partout au Canada, sur des périodes allant de quelques secondes à des dizaines d'années. À cette fin, trois zones ont été établies pour le Canada selon le niveau moyen d'activité (voir la figure C.1). Dans la zone sub-aurorale (latitudes méridionales du Canada), le flux magnétique est habituellement faible et constant, ce qui produit, en général, une ionosphère homogène et prévisible. Dans les zones aurorale et polaire (latitudes de $\approx 55^\circ$ et plus), le flux magnétique est fort et irrégulier, ce qui produit, en général, une ionosphère perturbée. Les limites des zones ne sont pas absolues et varient selon les saisons, les cycles solaires, les taches solaires, etc. Il faut également garder à l'esprit, pour toutes les latitudes au Canada, la possibilité de perturbations soudaines du champ magnétique terrestre (orages magnétiques) qui engendrent d'importants bouleversements de l'ionosphère.

PRÉVISION DE L'ACTIVITÉ GÉOMAGNÉTIQUE

La Commission géologique du Canada offre au public un service de prévision de l'activité géomagnétique accessible par Internet. Une prévision à long terme, valable pour une période de 28 jours (un cycle solaire) et des prévisions à court terme couvrant une période de 48 heures et mises à jour à toutes les heures sont disponibles. Un court résumé des plus récentes prévisions, révisé chaque heure, est aussi disponible par téléphone. Les utilisateurs du GPS sont invités à consulter ces prévisions avant et pendant leurs campagnes d'observation.

Accès par Internet : <http://www.geolab.nrcan.gc.ca>

Résumé par téléphone : (613) 992-1299

Les demandes de renseignements devraient être adressées à :
Commission géologique du Canada
Programme national géomagnétisme du Canada
1, Place de l'Observatoire
Ottawa (Ontario) K1A 0Y3
Télec. : (613) 824-9803

Figure C.1 Zones d'activité géomagnétique au Canada

Zone polaire		Zone aurorale		Zone subaurorale	
ALE	Alert	CBB	Cambridge Bay	MEA	Meanook
RES	Resolute Bay	BLC	Baker Lake	GLN	Glenlea
MDV	Mould Bay	YKC	Yellowknife	STJ	St. John's
		FCC	Fort Churchill	VIC	Victoria
		PBQ	Poste-de-la-Baleine	OTT	Ottawa

APPENDICE D

**SOURCES D'INFORMATION SUR LES CANEVAS
PLANIMÉTRIQUE ET ALTIMÉTRIQUE**

APPENDICE D**SOURCES D'INFORMATION SUR LES CANEVAS
PLANIMÉTRIQUE ET ALTIMÉTRIQUE**

La Division des levés géodésiques maintient la Base nationale de données géodésiques (BNDG) qui renferme la description et les coordonnées de tous les points des canevas planimétrique et altimétrique relevant de sa compétence dans l'ensemble du pays. L'information de la BNDG est diffusée moyennant recouvrement des coûts.

Pour plus de renseignements, communiquer avec la :

Division des levés géodésiques
Services d'information
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
Tél. : (613) 995-4410 ou (613) 992-2061
Télec. : (613) 995-3215
Courriel : information@geod.nrcan.gc.ca
Page Web : <http://www.geod.nrcan.gc.ca>

APPENDICE E

SOURCES D'INFORMATION SUR LE GÉOÏDE

APPENDICE E

SOURCES D'INFORMATION SUR LE GÉOÏDE

LE MODÈLE DU GÉOÏDE CANADIEN GSD95

Depuis le mois d'août 1995, la Division des levés géodésiques (DLG) a adopté le modèle du géoïde GSD95 qui permet aux usagers d'obtenir des ondulations précises à travers le Canada. De plus, le logiciel "QUAD" en permet l'interpolation quadratique. Le modèle GSD95 constitue une amélioration par rapport au modèle GSD91 par ses avancements théoriques et ses données additionnelles.

L'addition de nouvelles mesures de la pesanteur en Colombie-Britannique et au Territoire du Yukon a apporté une amélioration importante au modèle du géoïde. Pour ces deux régions, le changement absolu des ondulations entre GSD91 et GSD95 peut atteindre 10 mètres. Une autre amélioration au GSD95 est attribuée au Modèle Numérique d'Élévations (MNE), appelé DTED, qui couvre en grande partie les régions méridionales du Canada. L'amélioration produite par le DTED n'est pas aussi significative que les nouvelles mesures de la pesanteur, mais il a permis de nettoyer plusieurs imprécisions existant dans le MNE antérieur. Le modèle du géoïde est plus précis au-dessus des océans (incluant la Baie d'Ungava) parce que des valeurs de la pesanteur obtenues par altimétrie par satellites ont été ajoutées aux mesures de la pesanteur à bord de navires. Finalement, le GSD95 est amélioré dans la partie ouest de Terre-Neuve par le calcul des corrections topographiques aux valeurs de la pesanteur.

La précision absolue du modèle GSD95 est approximativement un mètre (1 sigma) à travers le Canada. Par contre la précision relative, c.-à-d. la précision de la différence entre deux ondulations du géoïde, est beaucoup mieux, mais elle varie selon la topographie et la longueur des vecteurs. Dans les régions planes et peu montagneuses, la précision varie entre 1 et 4 mm/km et se stabilise entre 5 et 10 cm (1 sigma) pour les longs vecteurs. Dans les régions montagneuses (cordillère de l'Ouest), la précision est de l'ordre de 3 à 10 mm/km, mais ne dépasse pas 15 cm (1 sigma) (Véronneau, 1995). Ces résultats sont obtenus à l'intérieur de la couverture DTED.

LE QUADRILLAGE DE TRANSFORMATION HT97 POUR LES APPLICATIONS DU GPS

Les altitudes orthométriques dérivées des ondulations du géoïde GSD95 (obtenues sans l'utilisation de repères altimétriques) et des altitudes ellipsoïdales fournies par le GPS ne sont pas équivalentes aux altitudes orthométriques par rapport au CGVD28 en raison d'erreurs d'établissement du canevas altimétrique CGVD28 et du modèle du géoïde GSD95. Une transformation, la HT97, a été mise au point d'après des résultats obtenus au moyen du GPS et d'observations de nivellement en 1483 stations de levés dispersées

d'un bout à l'autre du Canada. Les altitudes ellipsoïdales suivant le NAD83 (CSRS) dérivées du GPS et les altitudes orthométriques dérivées d'observations de nivellement ainsi que les ondulations du géoïde GSD95 sont les valeurs sur lesquelles la Division s'est basée pour établir cette transformation des altitudes.

La HT97 et son logiciel d'interpolation GPS-HT permettent aux utilisateurs d'obtenir des altitudes orthométriques dérivées du GPS qui sont compatibles avec le canevas altimétrique CGVD28 environnant sans qu'il soit nécessaire d'occuper des repères altimétriques lors des travaux sur le terrain. Dans l'ensemble, l'exactitude du quadrillage HT97 est estimée à ± 5 cm (à un niveau de confiance de 95 %) dans les régions méridionales du Canada, mais peut n'être que de l'ordre de quelques décimètres dans les régions éloignées ou septentrionales où il n'y a que peu d'altitudes exactes au-dessus du CGVD28 desquelles dérive une transformation fiable.

Pour tout autre renseignement concernant le GSD95, la HT97 et la transformation des altitudes, communiquer avec la :

Division des levés géodésiques
Services d'information
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
Tél. : (613) 995-4410 ou (613) 992-2061
Télec. : (613) 995-3215
Courriel : information@geod.nrcan.gc.ca
Page Web : <http://www.geod.nrcan.gc.ca>

APPENDICE F

**EXEMPLES DE FORMULAIRES RAPPORT
D'OBSERVATIONS GPS
SUR LE TERRAIN**

Page 2 de ____

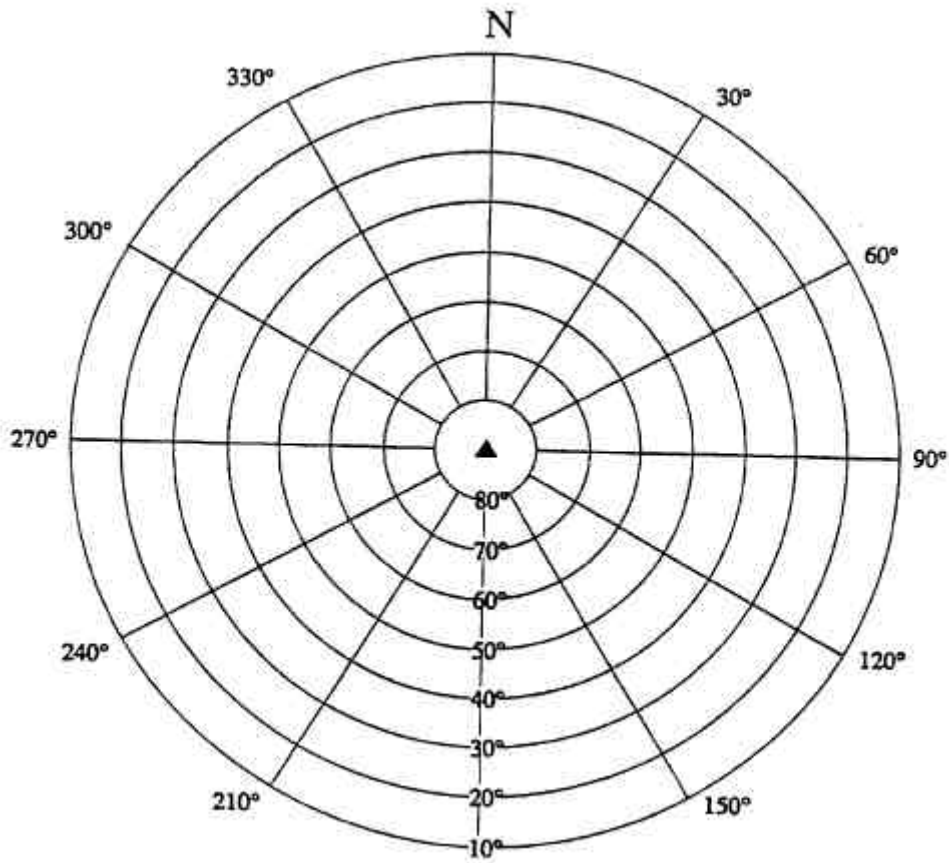
Nom de la station _____ Numéro de la station _____

Date _____

Données météorologiques								
N° du capteur météo				N° du baromètre				
Humidité relative signalée plutôt que la température au thermomètre mouillé ()								
Heure								
Température au thermomètre sec (°C)								
Température au thermomètre mouillé (°C) ou H.R. (%)								
Lecture barométrique (mb)								
Correction barométrique								
Pression (mb)								

Observations générales		
Jour	Heure	Commentaires

DIAGRAMME DES OBSTACLES RELEVÉS À UNE STATION GPS



Indiquer les obstacles et leur hauteur telle que relevée au repère de la station.

Déclinaison magnétique

Ce diagramme tient-il compte de cette déclinaison? oui ()

non ()

Indiquer la distance à toute structure métallique ou surface réfléchissante.

Hauteur au-dessus du repère à laquelle l'horizon a été relevé

Nom de la station _____

Date _____

Numéro de la station _____

Observateur _____

APPENDICE G

LE SYSTÈME CANADIEN DE CONTRÔLE LE ACTIF

APPENDICE G

LE SYSTÈME CANADIEN DE CONTRÔLE ACTIF

La Division des levés géodésiques (DLG), de Géomatique Canada, en partenariat avec la Commission géologique du Canada, opère actuellement le Système canadien de contrôle actif (CACS). Celui-ci permet aux utilisateurs canadiens du système de positionnement global (GPS) oeuvrant dans les disciplines telles que l'arpentage et la géophysique ou autres, requérant des références spatiales, d'améliorer leur capacité de positionnement. Le CACS fournit un accès direct et facile aux cadres de référence spatiale modernes (NAD83, ITRF, etc.) et améliore l'efficacité ainsi que la précision des applications du GPS. Cela est accompli en contrôlant et en vérifiant l'intégrité et le rendement du GPS par l'analyse des données obtenues par la poursuite continue des satellites; en calculant et en rendant disponibles les éphémérides précises des satellites (orbites des satellites GPS) ainsi que des corrections précises pour la synchronisation de leur horloge; et en supportant le développement du GPS différentiel de grande portée (WADGPS) ainsi que d'autres applications (géodynamique, transfert du temps, etc.).

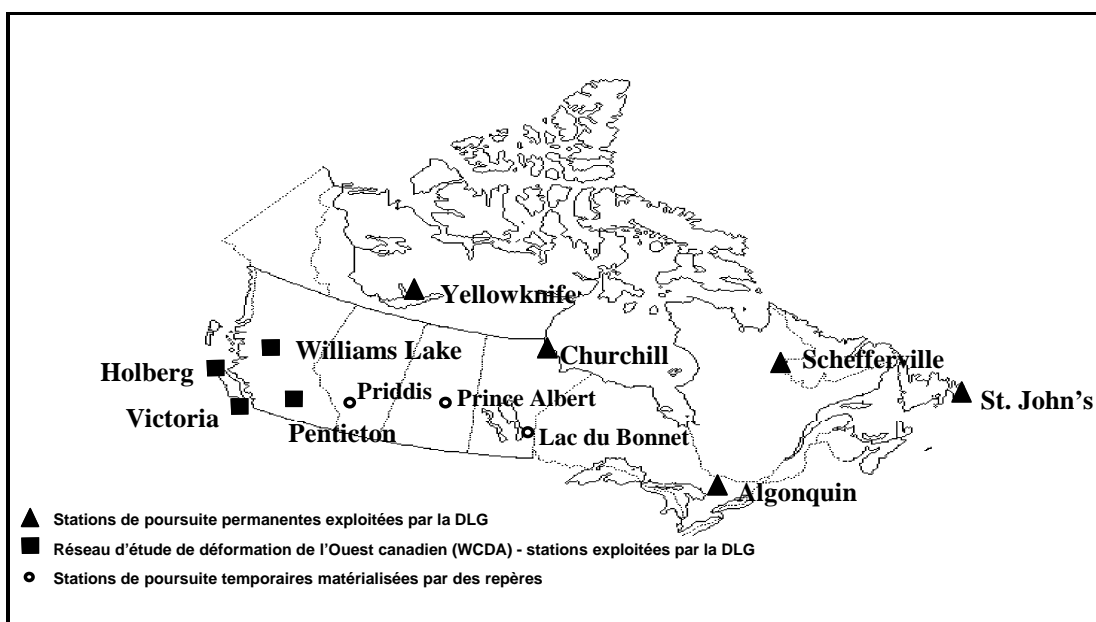


Figure G.1 Réseau des stations du Système canadien de contrôle actif

Le système est supporté par des stations de poursuite autonomes, appelées points de contrôle actifs (ACP), qui enregistrent continuellement les données observées de tous les satellites du GPS à leur portée. Il y a actuellement des ACP aux endroits suivants : Parc Algonquin (Ontario), Yellowknife (Territoires du Nord-Ouest), Penticton, Victoria, Williams Lake et Holberg (Colombie-Britannique), St. John's (Terre-Neuve), Schefferville (Québec) et Churchill (Manitoba). Chacun des ACP est doté d'un récepteur bifréquences de précision et d'une horloge atomique. Des observations météorologiques comprenant la température, la pression

atmosphérique et l'humidité relative, sont aussi enregistrées à certains sites. Les données recueillies par chaque ACP sont extraites chaque jour par un centre de traitement situé dans les locaux de la DLG à Ottawa.

Les éphémérides précises, les corrections d'horloges et les données d'observation provenant des stations de poursuite permanentes sont fort avantageuses pour les utilisateurs canadiens chargés d'effectuer des levés par GPS. Ces produits du CACS permettent en effet de déterminer la position de tout point au Canada, par rapport au cadre de référence spatiale national, avec une précision allant du centimètre à quelques mètres, sans devoir occuper un repère géodésique ou une station de base.

Établir la position avec une précision au niveau du mètre à partir des observations de pseudodistances (code) et ce, sans l'occupation d'une station de base, est rendu possible en utilisant les corrections précises provenant du CACS pour la synchronisation des horloges des satellites. Ces corrections compensent pour la dégradation des horloges introduite par la disponibilité sélective (SA) qui est la source principale d'erreur quand les observations du code GPS sont utilisées. Les corrections pour la synchronisation des horloges peuvent être appliquées à la grandeur du pays pour corriger les observations recueillies par l'utilisateur et lorsqu'utilisées de concert avec les éphémérides précises, permettent une précision variant de 1 à 10 mètres (1σ) selon la qualité de résolution du récepteur utilisé et l'effet de multitrajets présent au site. L'avantage de cette approche est que les erreurs spécifiques à un site peuvent mieux être identifiées plutôt que d'assumer que toutes les erreurs introduites sont communes au récepteur de la station de base et au récepteur mobile comme il est fait avec le GPS différentiel local (LDGPS). Puisque les corrections sont basées sur les observations provenant d'un réseau de stations de référence précisément connues, l'incertitude associée à l'utilisation des données d'une seule station de base est réduite. La distribution des stations de référence du CACS assure aussi une couverture de tout le territoire canadien pour toute heure du jour, ce qui élimine les problèmes associés à la synchronisation des observations avec la station de base rencontrés parfois avec le LDGPS.

Pour les travaux de levés utilisant les observations de phase du GPS et demandant la plus grande précision, l'introduction des éphémérides précises dans le traitement des données permet de réduire les erreurs dans la détermination des vecteurs de position dues à l'imprécision orbitale à un niveau inférieur à 0,1 partie par million (ppm). Ces erreurs peuvent atteindre un niveau de 3 ppm et plus quand les éphémérides radiodiffusées sont utilisées. De plus, en incorporant des données d'observation provenant de stations ACP lors du traitement des données, un lien direct au cadre de référence spatiale national est établi. L'orientation et l'échelle pour les levés étant fournies par les éphémérides précises sans la nécessité d'occuper aucun point d'appui, l'efficacité des opérations sur le terrain et du traitement des données se voit grandement accrue. Selon le logiciel de traitement des données utilisé, des avantages additionnels peuvent être réalisés par l'utilisation des éphémérides précises tels qu'une capacité accrue d'identification et de réparation des sauts de cycle, une meilleure estimation des erreurs a posteriori ainsi qu'une capacité accrue de résolution des ambiguïtés de phase de l'onde porteuse. Des travaux récents ont démontré la possibilité de positionnement avec une précision au niveau du centimètre dans chacune des composantes tridimensionnelles pour des distances

de plus de 1 000 km quand les données du CACS, les éphémérides précises et des procédures adéquates sont utilisées.

La Division des levés géodésiques fournit également des données du CACS au Service international de GPS pour la géodynamique (IGS) et contribue à titre de centre d'analyse. Cette collaboration permet d'accéder aux données provenant de sites de référence répartis à la grandeur du globe qui sont utilisées pour le calcul des éphémérides précises. Via l'IGS, les données et produits du CACS sont mis à la disposition des organismes internationaux comme le Service international d'information sur la rotation terrestre (IERS), le NASA Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS), le US National Geodetic Survey (USNGS), le US Naval Observatory (USNO) et d'autres, intéressés à la dynamique de la Terre. Les observations précises des satellites à partir des stations de référence servent à établir les paramètres d'orientation de la Terre (abrégiés EOP) et à calculer les vecteurs géodésiques entre des stations régionales de poursuite. Les variations temporelles des composantes de ces vecteurs géodésiques constituent des données quantitatives pour l'étude de la géodynamique, des risques de séismes naturels et des changements à l'échelle de la planète.

Sept centres internationaux d'analyse collaborent présentement avec l'IGS. La Division des levés géodésiques, depuis quatre ans, coordonne les activités de ces centres d'analyse à la demande du conseil d'administration de l'IGS. La responsabilité de la DLG inclut la compilation d'éphémérides précises combinées ainsi que d'autres produits à partir des données fournies par les sept centres.

PRODUITS DISPONIBLES

Les données brutes observées aux ACP, les éphémérides précises pour les satellites du GPS ainsi que les corrections précises pour la synchronisation de leur horloge peuvent être obtenues de la Division des levés géodésiques sur disquettes de 3½ po (1,44 Mo) ou de façon électronique en s'abonnant à son service télématique accessible via modem, Internet et Datapac.

Données observées aux ACP

Ces données brutes consistent en observations continues du code et de phase de l'onde porteuse sur les deux fréquences des satellites à des intervalles de 30 secondes. Les données sont archivées quotidiennement dans le format RINEX (version 2). Chaque fichier couvrant une période de 24 heures (de 0 h 00 min 00 s à 23 h 59 min 30 s, heure GPS) contient environ deux Mégaoctets de données dans ce format.

Les données pour les stations principales du CACS ci-dessous sont généralement disponibles en ligne six heures après minuit (TU) et elles sont conservées en ligne pendant une période de quatre mois. Les données moins récentes seront mises en ligne sur demande.

Nom du site	ID du site	Lat. (° min.)	Long. (° min.)
Parc Algonquin (Ont.)	algo	N. 45 57	O. 78 04
St. John's (T.-N.)	stjo	N. 47 35	O. 52 41
Yellowknife (T.N.-O.)	yell	N. 62 29	O. 114 29
Albert Head (Victoria, C.-B.)	albh	N. 48 23	O. 123 29
Penticton (C.-B.)	drao	N. 49 19	O. 119 37
Churchill (Man.)	chur	N. 58 45	O. 94 05
Holberg (C.-B.)	holb	N. 50 38	O. 128 08
Williams Lake (C.-B.)	will	N. 52 14	O. 122 10
Schefferville (QC)	sche	N. 54 48	O. 66 48

Éphémérides précises

Les éphémérides précises sont calculées des données observées aux ACP canadiens et à une trentaine de stations principales du IGS réparties dans le monde. Elles sont générées dans le Cadre de référence terrestre (ITRF) du Service international de rotation de la terre (IERS) et sont aussi disponibles suivant le Cadre de référence NAD83. Selon des comparaisons effectuées par l'IGS, les éphémérides calculées par la Division des levés géodésiques ont une précision supérieure à 10 cm (1σ) pour chacune des coordonnées.

Les éphémérides sont archivées en fichiers quotidiens (de 0 h 00 à 23 h 45, heure GPS) selon le format NGS-SP3 qui est accepté mondialement et comprend les positions X, Y, Z des satellites ainsi que les corrections aux horloges à des intervalles de 15 minutes.

Corrections précises pour la synchronisation des horloges des satellites

Les écarts précis entre les horloges de chacun des satellites visibles au Canada et le temps de référence du CACS sont calculés à partir des éphémérides précises et des observations aux ACP. Ces écarts comprennent l'effet de la dégradation introduite par la disponibilité sélective (SA) qui est la cause principale d'erreur en positionnement GPS utilisant le code. Les corrections sont archivées à des intervalles de 30 secondes. Aucune dégradation dans la précision du positionnement n'est apparente lorsque les corrections sont interpolées à des intervalles plus petits (p. ex. 1 s). Le logiciel GPSPACE (décrit ci-dessous) peut être utilisé pour appliquer ces corrections et obtenir une plus grande précision dans le positionnement GPS. Des corrections d'horloges pour les satellites visibles à la grandeur du globe sont aussi calculées.

Les corrections précises aux horloges des satellites sont archivées dans un format ASCII. Chaque fichier de 24 heures (de 0 h 00 min 00 s à 23 h 59 min 30 s, heure GPS) inclut les corrections pour chacun des satellites à des intervalles de 30 secondes pour les périodes de visibilité au-dessus du territoire canadien. Les fichiers sont généralement disponibles en ligne dans les 24 heures suivant les observations.

Logiciel utilitaire

GPSPACE : Le logiciel GPSPACE (GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides) pour le PC est utilisé pour le traitement des observations GPS de pseudodistances (observations du code) en mode statique ou cinétique. Il est utilisé en post-traitement pour appliquer aux observations d'un récepteur itinérant, les corrections précises pour la synchronisation des horloges des satellites et les éphémérides précises calculées par la Division des levés géodésiques afin d'améliorer la précision du positionnement autonome. Les corrections pour la synchronisation des horloges peuvent être appliquées à la grandeur du pays ou n'importe où dans le monde selon le fichier utilisé et permettent une précision variant de 1 à 10 mètres (1σ) selon la qualité de résolution du récepteur de l'utilisateur et l'effet de multitrajets présent au site. GPSPACE requiert des fichiers d'observations dans le format RINEX et traite les données de façon séquentielle, estimant une position indépendante pour chacune des époques où un minimum de quatre satellites sont visibles.

Pour obtenir des renseignements ou des produits des levés géodésiques, s'adresser à :

Division des levés géodésiques
Services d'information
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
Tél. : (613) 995-4410 ou (613) 992-2061
Télec. : (613) 995-3215
Courriel : information@geod.nrcan.gc.ca
Page Web : <http://www.geod.nrcan.gc.ca>

AVERTISSEMENT : Les données ou les logiciels distribués sont soumis aux modalités suivantes.

1. L'Utilisateur reconnaît que les Données et Logiciels qui ont été préparés ou publiés par Sa Majesté, représentée par le ministère des Ressources Naturelles du Canada (RNCAN), sont protégées en vertu de la Loi sur le droit d'auteur et appartiennent à Sa Majesté.
2. L'Utilisateur ne doit pas vendre, prêter ou transférer les Données ou Logiciels, ni concéder une licence permettant de les utiliser, ni autrement céder à un tiers quelque droit que ce soit conféré par la présente Entente sans en obtenir au préalable la permission écrite de RNCAN.
3. Si l'Utilisateur désire faire usage des Données ou Logiciels de Sa Majesté pour produire un produit aux fins de vente au détail, il devra obtenir un contrat de licence, qu'il pourra négocier avec Nacra pour obtenir l'autorisation de produire et de vendre le produit en question.
4. Les Données ou Logiciels sont fournies «telles quelles» à l'Utilisateur et Sa Majesté ne fait à leur sujet aucune représentation ou garantie, expresse ou tacite, découlant de la loi ou d'autres sources, en ce qui concerne, entre autres, leur efficacité, leur intégralité, leur exactitude ou leur adaptation à un usage particulier.
5. Sa Majesté ne pourra être tenue responsable en ce qui a trait à toute réclamation, revendication ou action en justice que ce soit, quelle qu'en soit la cause, concernant toute perte ou tout préjudice ou dommage, direct ou indirect, pouvant résulter de l'utilisation des Données ou Logiciels par l'Utilisateur ou autrement découler de la présente Entente. Sa Majesté ne peut aucunement être tenue responsable de la perte de profits ou de contrats, ou de toute autre perte incidente, de quelque nature que ce soit, résultant d'un défaut quelconque des Données ou Logiciels.
6. L'Utilisateur tiendra Sa Majesté, ses ministres, ses agents et ses employés indemnes et à couvert à l'égard de toute réclamation, demande ou poursuite, quelle qu'en soit la cause, alléguant toute perte, tous frais, toute dépense, toute blessure, tout dommage (y compris toute blessure mortelle), direct ou indirect, pouvant résulter de l'utilisation des Données ou Logiciels par l'Utilisateur ou autrement découler de la présente Entente.