

TL
798
.N3
68514
1993

3020484E

Lignes directrices sur l'exécution de positionnements GPS

Document préparé pour la Direction générale des sciences et de
l'évaluation des écosystèmes, Environnement Canada

143620

Division des levés géodésiques
Centre canadien des levés
Secteur des levés, de la cartographie et de la télédétection

Juillet 1993

DÉNÉGATION DE RESPONSABILITÉ

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



Imprimé sur du papier contenant des rebuts récupérés

Publié avec l'autorisation
du ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1994
N° de cat. En 37-108/1994F
ISBN 0-662-98980-5

TABLE DES MATIÈRES

	Page
AVANT-PROPOS	vii
NOTATION ET ACRONYMES	viii
 CHAPITRE	
1 INTRODUCTION	1
2 NOTIONS DE BASE DU GPS	3
2.1 DESCRIPTION DU SYSTÈME	3
2.2 SIGNAUX GPS	5
Mesures des porteuses	5
Mesures des codes	7
Comparaison des mesures de code et de porteuse	8
Message satellite	9
2.3 TYPES DE POSITIONNEMENT GPS	9
Positionnement par point unique et positionnement relatif	9
Positionnement statique et positionnement cinématique	11
Traitement en temps réel et traitement après mission	11
2.4 VISIBILITÉ ET DISPONIBILITÉ DES SATELLITES	13
Géométrie des satellites	15
Disponibilité sélective et anti-brouillage	18
2.5 ERREURS	19
3 NOTIONS DE BASE DU POSITIONNEMENT	23
3.1 MESURES DE L'EXACTITUDE	23
Exactitude et précision	23
Exactitudes absolue et relative	27
3.2 HAUTEURS ET GÉOÏDE	29
Hauteurs orthométriques et hauteurs ellipsoïdales	29
Modèles du géoïde	31
3.3 SYSTÈMES DE COORDONNÉES ET SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE ..	32
Systèmes de coordonnées	33
Systèmes de référence verticaux	34
Systèmes de référence horizontaux et le NAD83	35

	Page
4 TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT GPS	39
4.1 TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT PAR CODE	40
Positionnement par point unique	40
Positionnement différentiel	42
4.2 TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT PAR PORTEUSE	44
Technique statique classique	45
Technique cinématique (fondée sur la porteuse)	45
Technique semi-cinématique	46
Technique pseudo-cinématique	46
Technique 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	53
Reconnaissance	55
Conception du levé	57
Préparations	60
5.2 OPÉRATIONS SUR LE TERRAIN	61
Tâches du chef d'équipe	62
Tâches de l'observateur	64
Tâches du responsable du traitement des données	66
5.3 TRAITEMENT DES DONNÉES ET RAPPORT FINAL	67
5.4 ÉTABLISSEMENT DES ÉLÉVATIONS DANS LE GPS	69
Hauteurs orthométriques de faible exactitude par GPS différentiel	71
Hauteurs orthométriques de grande exactitude obtenues grâce à des mesures de la phase de la porteuse	73
BIBLIOGRAPHIE .:	76
APPENDICES	79
A - LEXIQUE	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	95
E - SOURCES D'INFORMATION SUR LE GÉOÏDE	97
F - ÉCHANTILLONS DE RELEVÉS GPS	99
G - SYSTÈME DE CONTRÔLE ACTIF	105
H - BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE SUR LE GPS	109
I - COMPARAISON ENTRE LEVÉS GPS ET LEVÉS CLASSIQUES	111

LISTE DES TABLEAUX

	Page
2.1 — Fréquence et longueur des ondes porteuses	7
2.2 — Principaux avantages et inconvénients des observations de code et de porteuse	9
2.3 — Types de DOP	17
2.4 — Importance des erreurs	21
3.1 — Relation entre l'écart-type et la probabilité — Cas unidimensionnel	25
3.2 — Mesures courantes de l'exactitude employées dans le GPS	26
3.3 — Spécifications du modèle de géoïde en positionnement par point unique ou relatif	32
3.4 — Conversion au NAD83	36
3.5 — Incidence du NAD83 sur les paramètres locationnels	37
4.1 — Résumé des méthodes de positionnement GPS par code	40
4.2 — Résumé des méthodes de positionnement GPS par porteuse	41
5.1 — Mesures GPS nécessaires pour les différentes techniques de positionnement ...	51
5.2 — Reconnaissance du terrain	56
5.3 — Spécifications de contrôle et configuration du réseau	57
5.4 — Tâches à accomplir sur le terrain	63
5.5 — Apport de l'incertitude relative du géoïde dans l'établissement des hauteurs orthométriques par GPS	72
5.6 — Erreur approximative dans les hauteurs relatives établies par des levés GPS précis due à l'incertitude du géoïde	74
1.1 — Comparaison entre levés GPS et levés classiques	117

LISTE DES FIGURES

	Page
2.1 — Trois segments du GPS	3
2.2 — Constellation des satellites GPS	4
2.3 — Équipement GPS	5
2.4 — Onde porteuse	6
2.5 — Information modulée sur chaque porteuse	7
2.6 — Codes C/A et P	7
2.7 — Positionnement par point unique	10
2.8 — Positionnement relatif	11
2.9 — Positionnements statique et cinématique	12
2.10 — Traitements en temps réel et après mission	13
2.11 — Angles d'élévation et de masquage	14
2.12 — Azimut	14
2.13 — Disponibilité des satellites	15
2.14 — Carte du ciel	16
2.15 — GDOP défavorable et favorable	17
2.16 — Courbe PDOP	18
2.17 — Erreurs courantes	19
3.1 — Exactitude et précision	24
3.2 — Fonction de distribution normale des probabilités	24
3.3 — Exactitudes relatives GPS (ppm) : a) ppm b) constante + ppm	28
3.4 — Géoïde et ellipsoïde	30
3.5 — Relation entre les hauteurs orthométrique et ellipsoïdale	30
3.6 — Système classique de coordonnées géographiques	33
3.7 — Système de coordonnées géodésiques	34
5.1 — Phases d'un projet GPS	48
5.2 — Techniques GPS proposées en réponse à des spécifications d'exactitude horizontale	49
5.3 — Coûts représentatifs d'un récepteur en janvier 1992	51
5.4 — Facteurs à considérer dans le choix d'un récepteur	52
5.5 — Concept de validation	54
5.6 — Configuration d'un réseau radial	58
5.7 — Configuration GPS statique classique	60
5.8 — Mesure de la hauteur de l'antenne	65
5.9 — Établissement des hauteurs orthométriques par techniques différentielles	72
5.10 — Établissement des hauteurs orthométriques grâce à des techniques relatives à la porteuse	73
C.1 — Zones d'activité géomagnétique au Canada	94
I.1 — Coûts des récepteurs GPS	115
I.2 — Exactitude en fonction de la distance, méthodes classiques	116

AVANT-PROPOS

Le Système de positionnement global (GPS), qui devrait être pleinement opérationnel à la fin de l'année 1993, augmentera de façon marquée l'efficacité et l'efficience au moment d'établir la position correspondant à des données géographiques fournies en référence. La Division des levés géodésiques a participé depuis 1983 à des projets relatifs au 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 dans le but de positionner les puits d'eau et les lieux éventuels de pollution des eaux souterraines. Depuis ce temps, la municipalité régionale de Waterloo a fondé sa base de données en matière des eaux souterraines sur le GPS, ce qui met en lumière le succès d'application de cette technologie.

Dans le cadre de ce projet de démonstration, Alan Eaton de la Division des levés géodésiques a tenu un séminaire d'information sur la technologie GPS à l'intention d'un groupe de professionnels des eaux souterraines, notamment des représentants de l'industrie privée, des universités ainsi que des gouvernements fédéral, provinciaux et municipaux. À la suite de cette présentation, Environnement Canada a demandé à la Division des levés géodésiques de formuler des lignes directrices sur l'utilisation du GPS, d'où le présent document.

Les présentes lignes directrices s'appuient donc sur la présentation d'Alan Eaton et contiennent des illustrations tirées d'un grand nombre de *Viewgraph*. Elles fournissent un large éventail des méthodes de positionnement GPS et de l'exactitude de chacune. Nous espérons que ces lignes directrices favoriseront l'utilisation et l'adoption du GPS pour différents aspects de la gestion des eaux souterraines.

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. En particulier, il faut souligner le travail ardu et soigné de Caroline Erickson, qui a rédigé le document et veillé sur les différentes étapes de son élaboration.

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 GPS à l'analyse des eaux souterraines. Nous espérons que ces lignes directrices répondront entièrement à vos attentes et sommes à votre disposition pour une collaboration plus poussée.

J. David Boal
Géodésien fédéral et directeur
Division des levés géodésiques
Secteur des levés, de la cartographie et de la télédétection
Énergie, Mines et Ressources Canada

NOTATION ET ACRONYMES

1D	Unidimensionnel
2D	Bidimensionnel
2drms	Deux fois la moyenne quadratique de la distance
3D	Tridimensionnel
ACP	Point repère actif
ACS	Système de contrôle actif
AS	Anti-brouillage
Az.	Azimut
c	Vitesse de la lumière dans le vide
CCM	Centre canadien de cartographie, Énergie, Mines et Ressources Canada
CDU	Panneau de commande et d'affichage
ECP	Écart circulaire probable
CGD	Plan de référence géodésique du Canada de 1928
DoD	Département de la Défense des États-Unis
DOP	Diminution de la précision
DoT	Département des Transports des États-Unis
EDM	Mesure électronique des distances
Élev.	Angle d'élévation
EMR	Énergie, Mines et Ressources Canada
f	Fréquence
Φ	Phase mesurée de porteuse
GDOP	Diminution de la précision d'origine géométrique
SIG	Système d'information géographique
GPS	Système de positionnement global
GPSIC	Centre d'information GPS
DLG	Division des levés géodésiques, Énergie, Mines et Ressources Canada
DLG91	Modèle géoïde 1991 de la Division des levés géodésiques
h	Hauteur ellipsoïdale
H	Hauteur 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
ITRF91	Cadre de référence terrestre IERS
λ	Longueur d'onde
MHz	Mégahertz (voir Hz)
MSE	Erreur quadratique moyenne
N	Ambiguïté ou
N	Ondulation géoïde
NAD27	Système de référence nord-américain de 1927
NAD83	Système de référence nord-américain de 1983
BNDG	Base nationale de données géodésiques (tenue à jour par la DLG)
NGS	U.S. National Geodetic Survey
SNRC	Système national de référence cartographique
P	Mesure du code
PDOP	Diminution de la précision locationnelle
ppm	Parties par million
ρ	Distance

rcvr	Récepteur
R.F.	Radiofréquence
RINEX	Format d'échange indépendant du récepteur
rms	Moyenne quadratique
σ	Écart-type
SA	Disponibilité sélective
SEP	Écart sphérique probable
SLCT	Secteur des levés, de la cartographie et de la télédétection
t_r	Heure de réception
t_t	Heure de transmission
UERE	Erreur en distance équivalente de l'utilisateur
UTM	Projection de Mercator transverse
VDOP	Diminution de la précision verticale universelle
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 Système de positionnement global (GPS) 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 d'une communauté d'utilisateurs civils. La navigation, les levés et l'intégration avec le Système d'information géographique (SIG) ne sont que quelques-uns des domaines dans lesquels la technologie GPS a été appliquée avec succès.

Le GPS est un système complexe qui peut servir à établir une position moyennant une exactitude qui va de 100 m à quelques millimètres, selon l'équipement utilisé et la procédure suivie. En règle générale, plus l'exactitude 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 le coût et la complexité les moins grands possible. Les présentes lignes directrices visent à fournir aux hydrologues le bagage et les procédures nécessaires pour appliquer effectivement la technologie GPS de façon à améliorer la valeur des mesures sur le terrain et à accroître la productivité.

Ces lignes directrices comprennent 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 consulter n'importe quelle partie de ces lignes directrices séparément à partir de la table des matières.

Les principes fondamentaux du GPS exposés au chapitre 1 fournissent un point de départ à ceux qui cherchent à mieux comprendre ce qu'est le GPS. 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 1 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 2. Pour espérer comparer ce qui est réalisable grâce aux différentes techniques et aux différents équipements disponibles, vous devez être au courant des diverses mesures d'exactitude possibles dans le GPS. Une notion de positionnement particulièrement importante est la différence entre les systèmes de hauteur employés respectivement par les satellites GPS et par les hydrologues ainsi que la relation entre les deux systèmes. Ces notions ainsi qu'une description des systèmes de coordonnées et de référence figurent au chapitre 3.

Peut-être le domaine le plus intéressant pour ceux qui désirent appliquer le GPS est-il celui des techniques de positionnement résumées au chapitre 4. En début de chapitre, des tableaux illustrent les diverses exactitudes représentatives possibles grâce à chaque technique appliquée avec succès. Suit la description de chacune de celles-ci. Vous devez vous rappeler, en étudiant ces techniques, que de nouvelles méthodes sont constamment élaborées. Comprendre les principes généraux des méthodes exposées dans le chapitre devrait vous permettre d'assimiler plus facilement les nouvelles techniques, au fur et à mesure qu'elles sont disponibles.

Le dernier chapitre traite de la procédure 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 une procédure bien distincte, il serait impossible de traiter de toutes ces possibilités dans le chapitre. Celui-ci renferme plutôt des considérations et des procédures générales qui s'appliquent à presque tout projet de positionnement GPS. Pour obtenir des instructions détaillées, vous seriez bien avisé de consulter la documentation des fabricants. La dernière section du chapitre 5 renferme des considérations sur l'établissement des élévations dans le GPS.

Les appendices des présentes lignes directrices constituent également une mine de renseignements. Ils comportent un lexique des différentes expressions, en italique, figurant dans le corps du texte; les sources d'information qui peuvent être valables dans la réalisation d'un projet GPS; enfin, une bibliographie pour ceux qui veulent en apprendre davantage sur le GPS et sur ses utilisations.

Un ensemble de lignes directrices comme celui-ci ne saurait répondre à toutes les interrogations sur l'industrie du positionnement GPS, déjà immense et en croissance rapide. Il est à espérer que ces lignes directrices aideront les utilisateurs à apprécier les avantages incroyables du système et à mettre ceux-ci à profit pour répondre à leurs besoins de positionnement.

CHAPITRE 2

NOTIONS DE BASE DU GPS

Le présent chapitre expose les notions de base du Système de positionnement global. Le GPS peut fournir un vaste éventail d'exactitudes, compte tenu du type de mesures employées et des procédures suivies. En règle générale, plus l'exactitude doit être grande, plus le coût est élevé et plus le GPS est complexe à utiliser. Si les utilisateurs veulent comprendre quelles techniques répondent le mieux à leurs besoins et pourquoi, il est important qu'ils comprennent les concepts qui sous-tendent le GPS. Les éléments fondamentaux sont d'abord décrits; puis sont expliquées les composantes du signal des satellites GPS, les techniques générales de positionnement, la visibilité d'un satellite 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'une unité de contrôle terrestre 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 la Défense américaine (DoD) afin de répondre à des besoins de positionnement pour des raisons de défense et afin de servir la communauté civile.

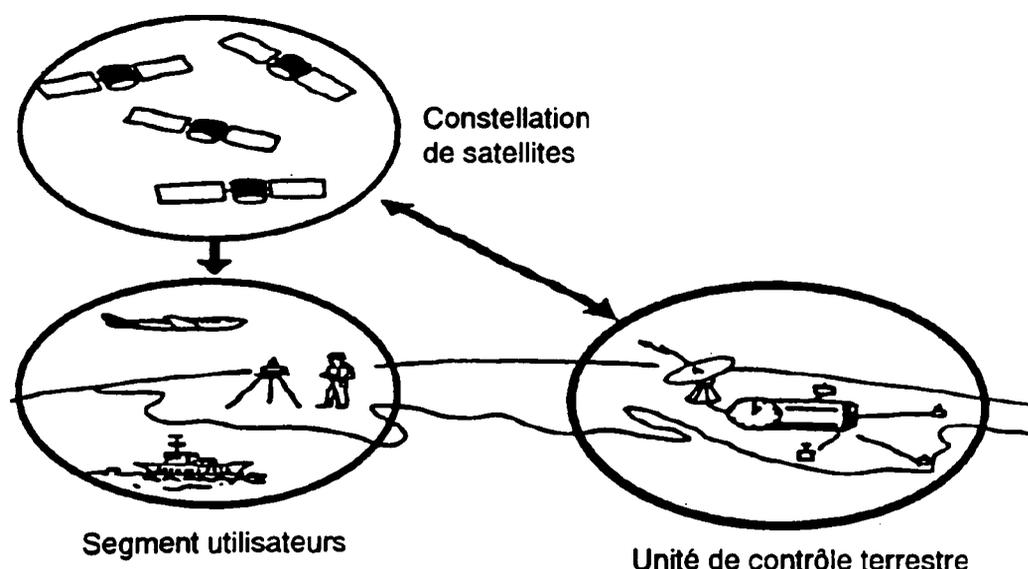


Figure 2.1 Trois segments du GPS

La *constellation de satellites*, qui devrait être pleinement opérationnelle à la fin de 1993, comprend 21 satellites, en plus de 3 satellites actifs de rechange, positionnés à 20 000 km

(environ trois fois le rayon de la terre) au-dessus de celle-ci. Les satellites seront répartis de telle manière qu'au moins quatre d'entre eux seront visibles presque n'importe où dans le monde à un moment donné (figure 2.2). Chaque satellite reçoit et stocke des données en provenance de l'unité de contrôle, tient l'heure avec grande exactitude grâce à des horloges données atomiques, précises et embarquées, et transmet des signaux à la terre.

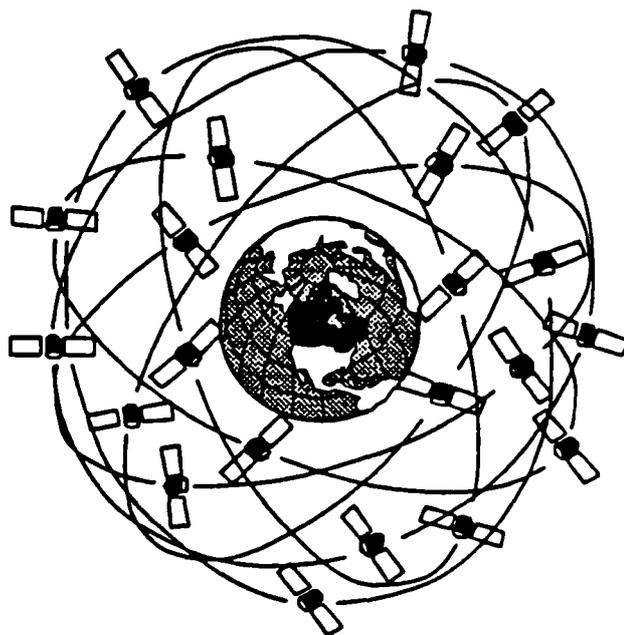


Figure 2.2 Constellation des satellites GPS

Le *segment unité de contrôle terrestre* (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. L'unité de contrôle suit tous les satellites, veille à ce qu'ils fonctionnent adéquatement et calcule leur position dans l'espace.

Si un satellite ne fonctionne pas correctement, l'unité de contrôle terrestre peut le déclarer «hors d'état de marche» et adopter les mesures nécessaires pour corriger le problème. Dans de tels cas, le satellite ne doit pas servir au positionnement avant d'être à nouveau en état de marche. Les positions calculées des satellites permettent de déduire les paramètres qui, à leur tour, servent à prévoir les positions futures de ces mêmes satellites. Ces paramètres sont chargés en amont depuis l'unité de contrôle jusqu'au satellite et sont appelés *éphémérides*.

Le *segment utilisateurs* intéresse tous ceux qui se servent de l'équipement de poursuite GPS pour obtenir les signaux du système en vue de répondre à des besoins particuliers de positionnement. Le marché offre toute une gamme d'équipements conçus pour recevoir les signaux GPS dans le but d'assurer un éventail toujours plus large d'applications pour les utilisateurs. Presque tous les équipements 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 composants peuvent constituer des unités distinctes, peuvent être intégrés en une seule unité ou partiellement intégrés (figure 2.3). Habituellement, tous les composants à l'exception de l'antenne sont regroupés en un récepteur. Aujourd'hui, certains récepteurs GPS du commerce sont réduits à une carte qui peut être montée sur un ordinateur portable ou intégrée à d'autres systèmes de navigation.

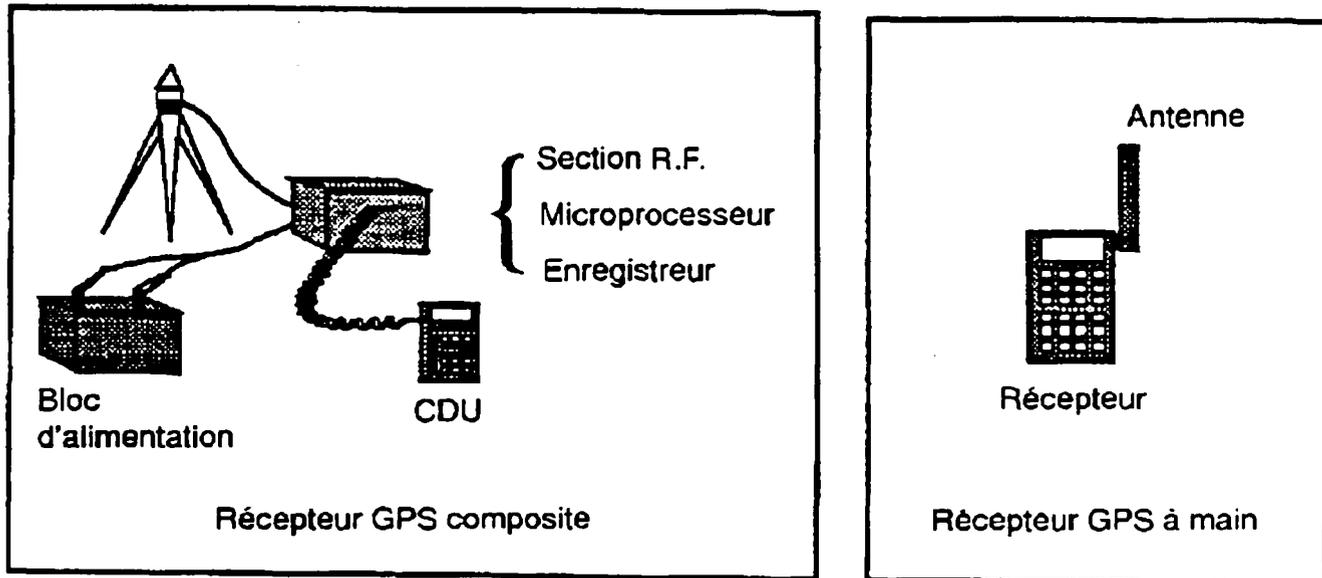


Figure 2.3 Équipement GPS

2.2 SIGNAUX GPS

Chaque satellite GPS émet continuellement des signaux qui renferment une multitude de renseignements. Compte tenu du type et de l'exactitude du positionnement effectué, un utilisateur peut n'être intéressé qu'à une partie des renseignements compris dans le signal GPS. De même, un récepteur GPS donné peut n'être capable d'utiliser qu'une seule partie des informations disponibles. Il importe donc que vous compreniez le contenu et l'utilisation des signaux GPS. Ces signaux contiennent les fréquences porteuses, le code C/A et le code P ainsi que le message satellite. Voici la description de chacune de ces composantes des signaux.

Mesures des porteuses

Les signaux des satellites GPS transmettent en permanence deux *fréquences porteuses*, 1575,42 et 1227,60 MHz, désignées respectivement L1 et L2. Étant donné que les ondes radio

se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière, la longueur des ondes 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 vue d'une section de l'onde porteuse transmise qui illustre la définition de la longueur d'onde et des cycles.

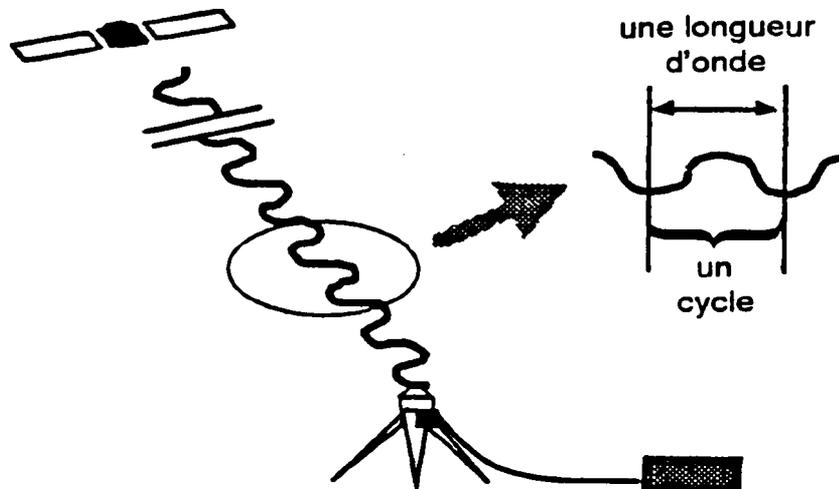


Figure 2.4 Onde porteuse

Le tableau 2.1 fournit la fréquence et la longueur des ondes porteuses L1 et L2 (calculées à partir de l'équation [2.1]).

Les récepteurs GPS, qui enregistrent la phase d'une porteuse, mesurent la fraction d'une longueur d'onde (c.-à-d. la fraction de 19 cm dans le cas de la porteuse L1) dès qu'ils se synchronisent avec un satellite et mesurent la phase de la porteuse régulièrement. Le nombre de cycles entre le satellite et le récepteur (appelé *ambiguïté*) au moment de la mise en route ainsi que la phase mesurée de la porteuse représentent ensemble la distance satellite-récepteur (c.-à-d. la distance entre un satellite et un récepteur). En d'autres mots,

$$\text{phase mesurée de porteuse} = \text{distance} + (\text{ambiguïté} \times \text{longueur}) + \text{erreurs}$$

ou

$$\Phi = \rho + N\lambda + \text{erreurs} \quad (2.2)$$

où Φ correspond à la phase mesurée de la porteuse en mètres, ρ , à la distance satellite-récepteur en mètres, N , à l'*ambiguïté* (c.-à-d. au nombre de cycles) et λ , à la longueur de l'onde 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 (λ)
L1	1575,42 MHz	19 cm
L2	1227,60 MHz	24 cm

Les codes et les messages satellite sont transportés sur le signal porteur par modulation. La 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 satellite*. La porteuse L2 est modulée par le code P et par le message satellite (figure 2.5).

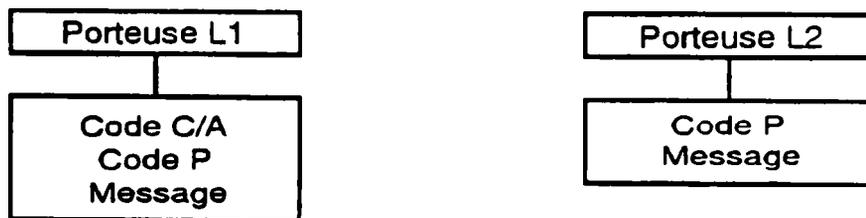


Figure 2.5 Information modulée sur chaque porteuse

Mesures des codes

Ce sont les mesures des codes (également désignées mesures de pseudo-distances) qui permettent d'établir instantanément une position grâce aux satellites GPS. Un code se compose d'une série de circuits intégrés de valeur 1 ou 0. Le code C/A possède une fréquence de 1,023 MHz (c.-à-d. 1,023 million de circuits par seconde) et le code P, une fréquence de 10,23 MHz. La figure 2.6 présente une partie des codes C/A et P.

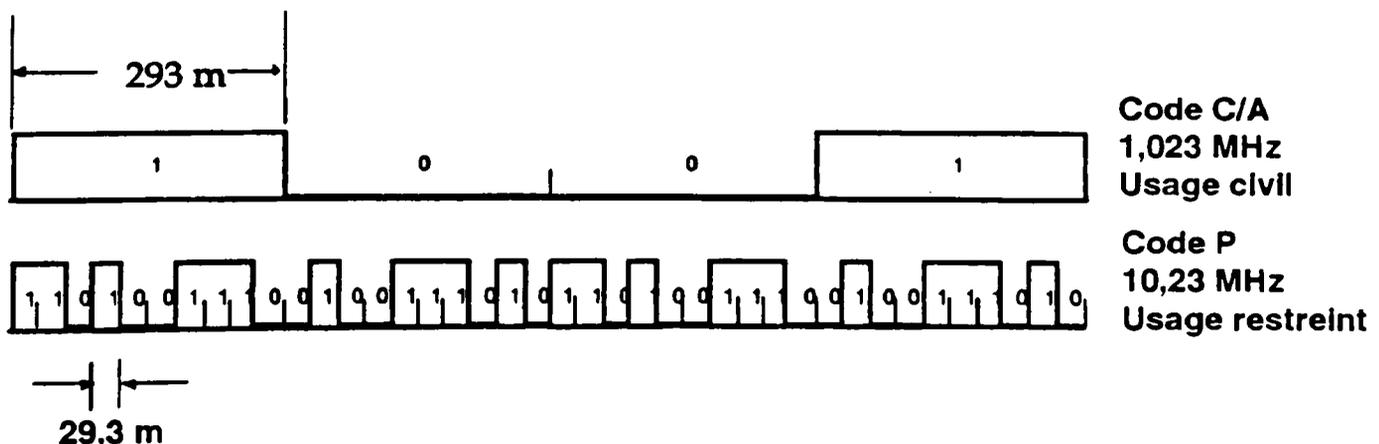


Figure 2.6 Codes C/A et P

La longueur respective des circuits de 293 m et de 29,3 m pour les codes C/A et P a été établie au moyen de l'équation 2.1, λ représentant cette longueur. Même si le code P est généralement dix fois plus précis que le code C/A, il est prévu qu'il ne soit pas disponible pour des fins civiles, en 1993, quand la constellation GPS sera complète (McNeff, 1991); seul le code C/A doit donc être envisagé en applications civiles.

Les mesures du code correspondent à la différence de temps entre le moment où le code est transmis à partir d'un satellite et celui où il atteint un récepteur GPS, multipliée par la vitesse de la lumière. Autrement dit,

$$\text{code mesuré} = \text{vitesse de la lumière} \times (\text{heure de réception} - \text{heure de transmission})$$

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

où P représente le code mesuré, c, la vitesse de la lumière, t_r , l'heure de réception du signal et t_t , l'heure de transmission du signal. Mesurer le code consiste, en réalité, à mesurer directement la distance satellite-récepteur (ρ), c.-à-d. :

$$\text{code mesuré} = \text{distance} + \text{erreurs}$$

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

Les erreurs sont décrites à la section 2.5.

Comparaison des mesures de code et de porteuse

À ce stade-ci, il est possible de comparer brièvement mesures de code et de porteuse. La longueur de l'onde porteuse (19 cm dans le cas de L1) est beaucoup moindre que la longueur des circuits du code C/A (293 m) et peut, donc, être mesurée plus exactement et utilisée dans le but de fournir une position beaucoup plus précise que ne le permettent les mesures de code. En effet, la meilleure exactitude relative fournie par des mesures de code sont habituellement de l'ordre de quelques mètres alors que les mesures de porteuse sont habituellement précises 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 porteuse plutôt que de code. Avec les observations de code, on mesure directement la distance satellite-récepteur. Avec les observations de porteuse, le terme d'ambiguïté (nombre de cycles entiers) doit être estimé avant que l'on puisse tirer avantage de l'exactitude de la porteuse. L'estimation de l'ambiguïté entraîne des complexités dans l'utilisation des observations de la phase de porteuse, inexistantes dans les observations de code. Le tableau 2.2 résume les avantages et les inconvénients des observations de code ou de porteuse.

Tableau 2.2 Principaux avantages et inconvénients des observations de code et de porteuse

	Code	Porteuse
Avantages	Non ambiguës Simples	Possibilité d'une grande exactitude
Inconvénients	Faible exactitude	Complexité plus grande

Message satellite

Le message satellite, modulé sur les deux fréquences L1 et L2, contient, entre autres renseignements, les éphémérides ainsi que l'état 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 du satellite, si celui-ci fonctionne. Presque tous les récepteurs utilisent les éphémérides conjointement avec les observations de code, de porteuse ou les deux pour établir la position d'un récepteur GPS dans l'espace.

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. Notez que le présent chapitre ne renferme qu'un exposé général de ces méthodes de positionnement GPS et qu'il faut chercher au chapitre 4 les détails de celles-ci.

Positionnement par point unique et positionnement relatif

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

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

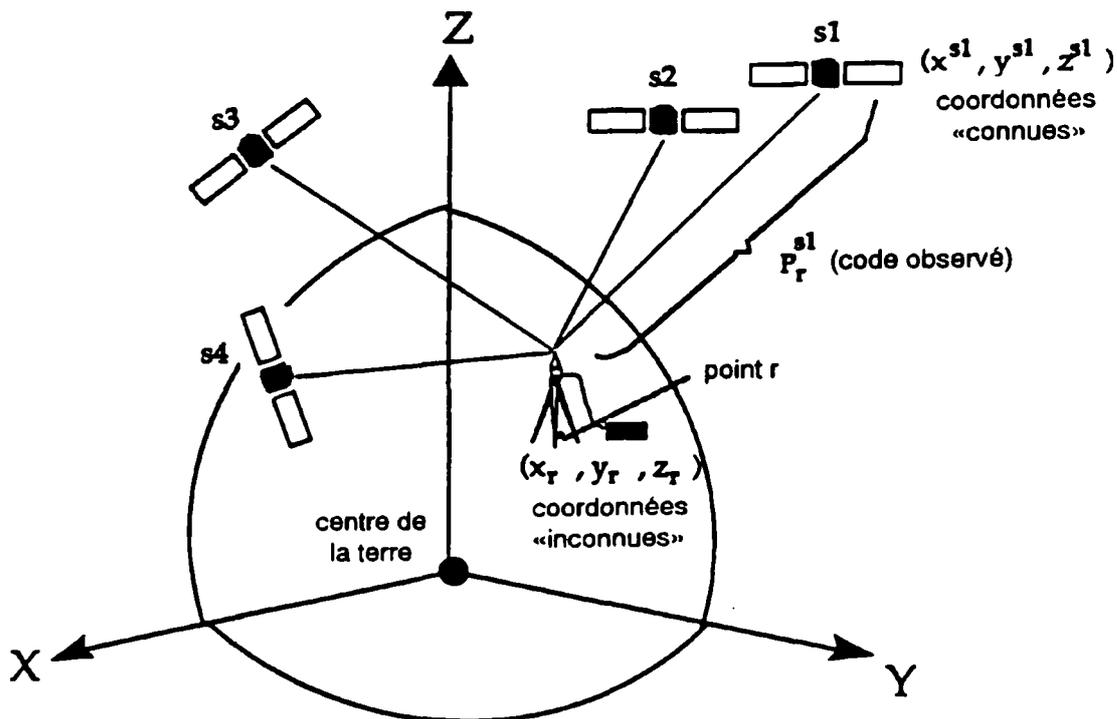


Figure 2.7 Positionnement par point unique

Dans la figure, s1, s2, s3 et s4 représentent quatre satellites différents qui sont suivis. La position de ceux-ci est donnée par référence au centre de la terre dans le cadre des coordonnées x , y et z . Les coordonnées relatives à 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) . Le code observé, P_r^{s1} , établit la relation entre les coordonnées connues du satellite 1 et les coordonnées inconnues du récepteur illustré à la figure 2.7, au moyen de l'équation d'une ligne dans l'espace tridimensionnel :

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

La même équation, indiquant 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 de synchronisation qui fait partie des erreurs) peuvent être calculées.

La notion de positionnement relatif est illustré à la figure 2.8. Au lieu que soit établie la position d'un point sur la terre relativement aux satellites (comme c'est le cas en positionnement par point unique), la position d'un point sur terre est établie relativement à un autre point connu. L'avantage du positionnement relatif sur celui par point unique réside dans l'exactitude beaucoup plus grande qu'il procure, étant donné que la plupart des erreurs dans les observations GPS sont communes aux emplacements connus et inconnus et sont corrigées par traitement informatique.

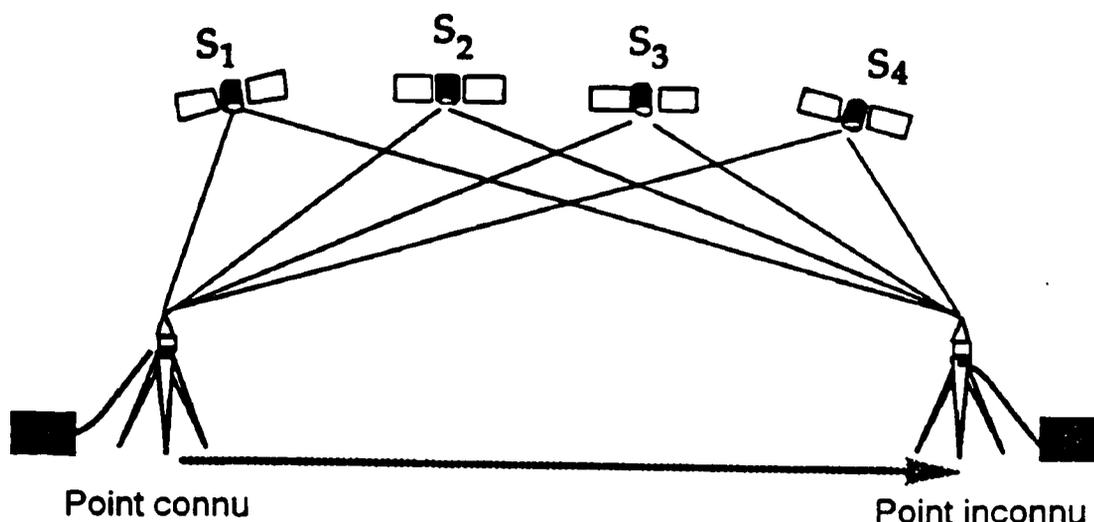


Figure 2.8 Positionnement relatif

Les expressions *positionnement différentiel* et *positionnement relatif* sont parfois employées indifféremment l'une pour l'autre. Toutefois, étant donné que le positionnement différentiel désigne plus souvent un type particulier de positionnement relatif, appliquant des corrections mesurées en un emplacement «connu» aux mesures d'un autre, «inconnu» (dont il a été question à la section 4.1), 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 doit être stationnaire alors que, 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 par point unique que relatif. Notez qu'en positionnement relatif cinématique, le récepteur, dit *de contrôle*, est stationnaire en un point connu alors qu'un second récepteur, dit *de liaison*, se déplace selon la trajectoire à positionner.

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, les données sont combinées et réduites une fois qu'elles ont toutes été recueillies. En *positionnement relatif en temps réel*, une liaison de données est indispensable pour transmettre les corrections d'un récepteur de contrôle en un point connu à un récepteur de liaison en un point inconnu (figure 2.10b). Le traitement après mission d'un positionnement relatif exige le rapprochement physique des données en

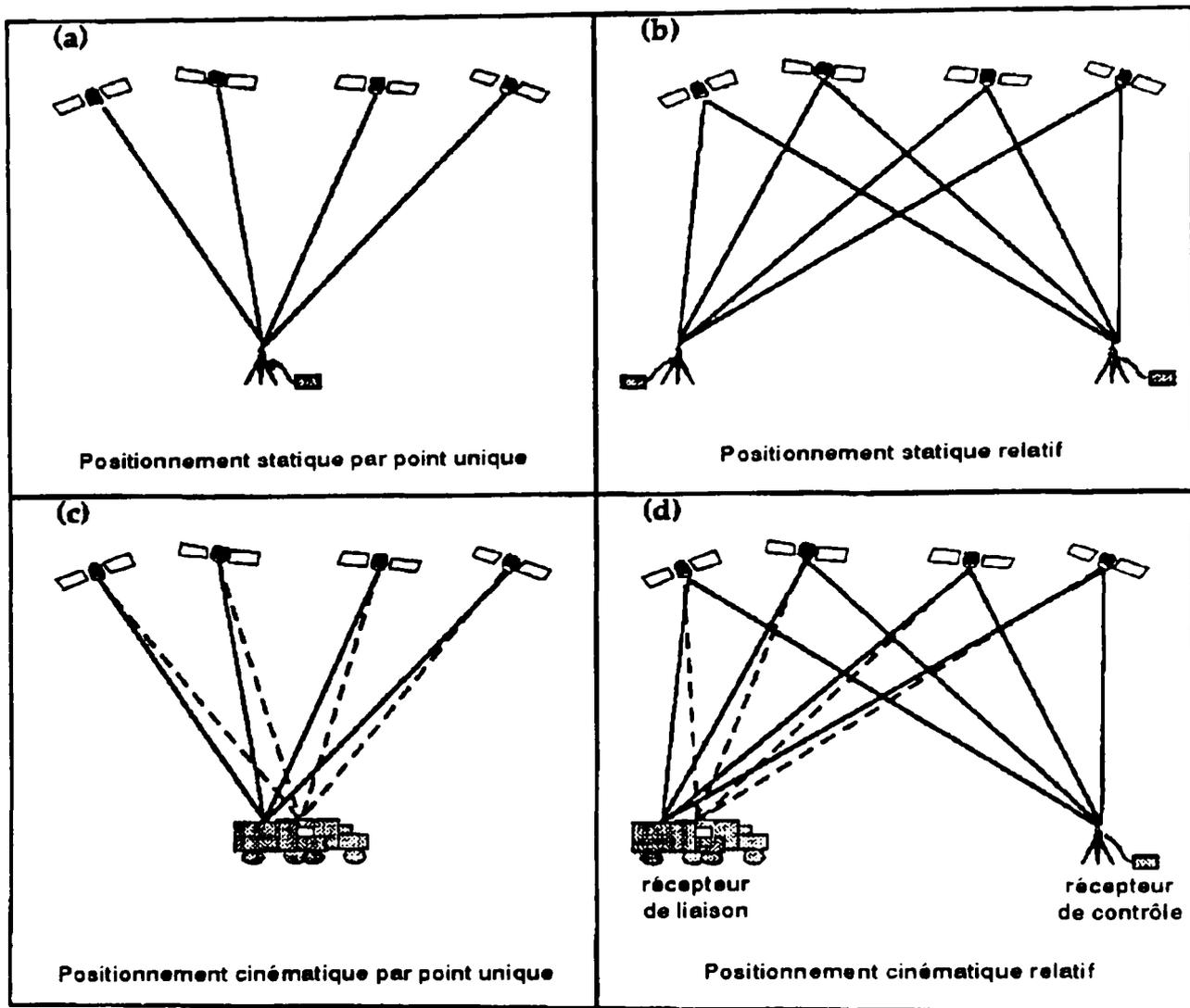


Figure 2.9 Positionnements statique et cinématique

provenance des différents récepteurs après une période d'observation (figure 2.10d). Même en positionnement par point unique en temps réel, pour beaucoup d'applications GPS, il reste nécessaire de télécharger les données en aval et de les verser dans une base de données propre à l'application de l'utilisateur (figure 2.10c).

Un positionnement de très faible exactitude par code et par point unique est habituellement calculé par les récepteurs GPS en temps réel, tandis qu'un positionnement relatif d'une très grande exactitude par porteuse est presque toujours le résultat d'un traitement après mission. Des options de traitement en temps réel et après mission sont prévues dans des méthodes qui permettent une exactitude se situant entre ces deux extrêmes.

Tout positionnement GPS peut être classifié comme étant statique ou cinématique, par point unique ou relatif, en temps réel ou après mission. Au chapitre 4, des types particuliers de méthodes en positionnement GPS sont exposés, mais chacune de celles-ci peut également être

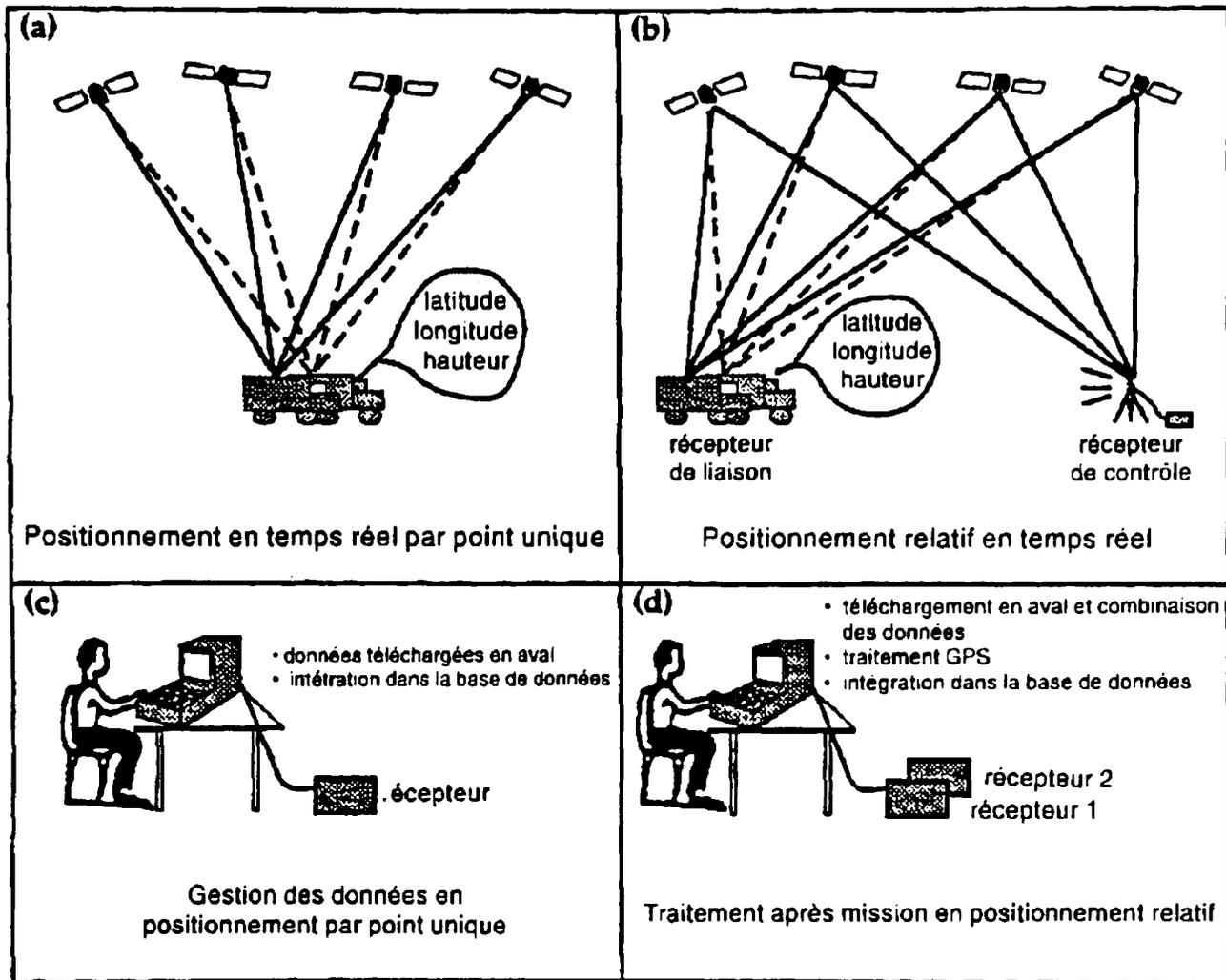


Figure 2.10 Traitements en temps réel et après mission

classifiée 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 à 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 un meilleur résultat. Suit la terminologie permettant de décrire la visibilité des satellites, puis un exposé sur leur géométrie, leur azimut et leur élévation, leur disponibilité sélective et l'anti-brouillage.

La position des satellites relativement à un point spécifique de la terre est établie selon un *angle d'élévation* et selon un *azimut*. L'angle d'élévation est celui que crée l'antenne entre l'horizontale et la ligne de visée du satellite (désigné «Élev.» à la figure 2.11).

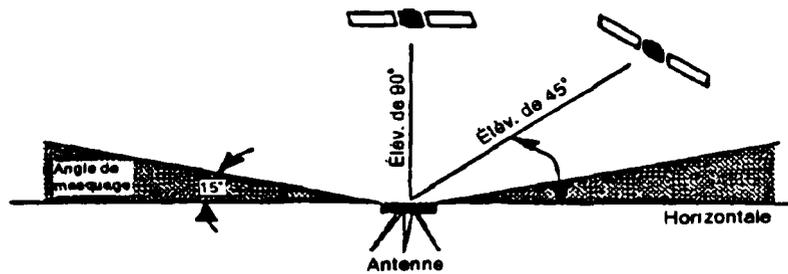


Figure 2.11 Angles d'élévation et de masquage

L'azimut correspond à l'angle créé dans le sens horaire entre le nord et la position du satellite dans le ciel (désigné «Az.» à la figure 2.12). Les récepteurs ou le logiciel de traitement GPS, ou les deux, peuvent comporter une option qui permet d'adopter un *angle de masquage* particulier (aussi appelé *angle de coupure*). L'angle de masquage correspond à celui de l'élévation sous lequel les signaux GPS ne sont pas enregistrés (figure 2.11). Un satellite est dit «visible» s'il se trouve au-dessus de l'angle de masquage adopté, au moment et à l'endroit concernés et en l'absence de tout *obstacle*.

Les obstacles sont des objets qui bloquent la trajectoire entre un satellite et un récepteur. Si, par exemple, le satellite désiré se trouve à une élévation de 20 degrés et à un azimut de 70 degrés et si un immeuble se trouve à la même élévation et au même azimut, le signal du satellite est bloqué. Il est très important d'éviter les obstacles pour réussir un positionnement GPS.

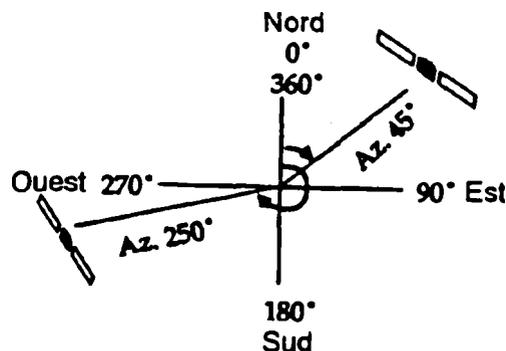


Figure 2.12 Azimut

En n'importe quel endroit sur terre et à n'importe quelle date et à n'importe quel moment, il est possible de prévoir les satellites qui seront disponibles ainsi que la position de ceux-ci dans le ciel. Cette opération est réalisée au moyen de *fichiers d'almanach* qui contiennent les paramètres des orbites des satellites et au moyen du logiciel conçu pour utiliser ces fichiers dans le but de calculer la visibilité des satellites. Les fichiers d'almanach existants sont disponibles au Centre d'information GPS ainsi qu'au babillard électronique GPS Hollman (voir l'appendice B pour les détails). Beaucoup de récepteurs affichent la disponibilité des satellites durant la poursuite de ceux-ci, fournissent ces fichiers d'almanach en vue du téléchargement en aval, ou les deux. Des progiciels servant à calculer la visibilité des satellites sont disponibles sur le

marché et accompagnent souvent le logiciel du récepteur commercial GPS. Au moment de calculer la disponibilité des satellites, l'utilisateur doit bien se rappeler d'employer uniquement un almanach récent, ne datant pas de plus d'un mois.

La figure 2.13 présente en courbe l'exemple de disponibilité des satellites pour une période de 12 heures le 1^{er} septembre 1992, à Waterloo (Ontario), moyennant un angle de masquage de 15 degrés. Le nombre de satellites disponibles est porté en regard de l'heure locale. Au cours de deux périodes seulement, trois satellites sont disponibles, ce qui est insuffisant pour un positionnement par point unique. Durant une courte période (de 7 à 8 heures), six satellites sont disponibles; c'est là une occasion favorable puisque, en règle générale, plus les satellites sont nombreux, meilleures sont les chances de réussir un positionnement GPS.

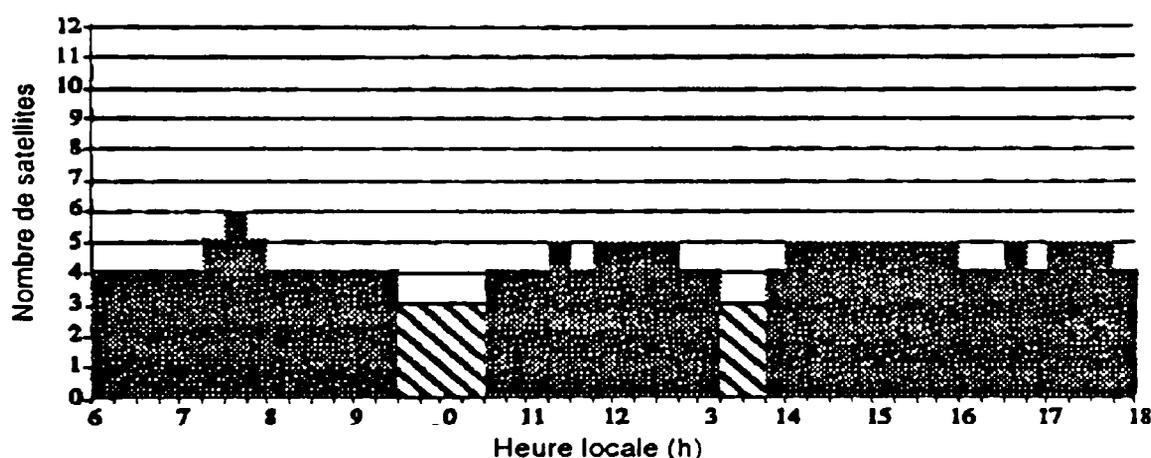


Figure 2.13 Disponibilité des satellites
Waterloo, le 1^{er} septembre 1992, angle de masquage de 15 degrés
 (selon le logiciel de planification de mission Ashtech)

La couverture des satellites se répète de jour en jour, mais survient quatre minutes plus tôt chaque jour. Cela signifie que la courbe de visibilité des satellites du 2 septembre serait identique à celle du 1^{er} septembre (figure 2.13), moyennant un décalage de quatre minutes vers la gauche. La courbe de la visibilité des satellites pour le 8 septembre (une semaine plus tard) serait décalée d'environ une demi-heure vers la gauche et celle 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 un angle d'élévation et chaque rayon, un azimut. Dans la figure, la zone ombrée sous l'élévation 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 à chaque ligne tracée sert à identifier le satellite. À titre d'exemple, le satellite 13

sur la carte trace une trajectoire allant d'une élévation de 40 degrés et d'un azimut de 270 degrés à une élévation approximative de 63 degrés et à un azimut de 10 degrés.

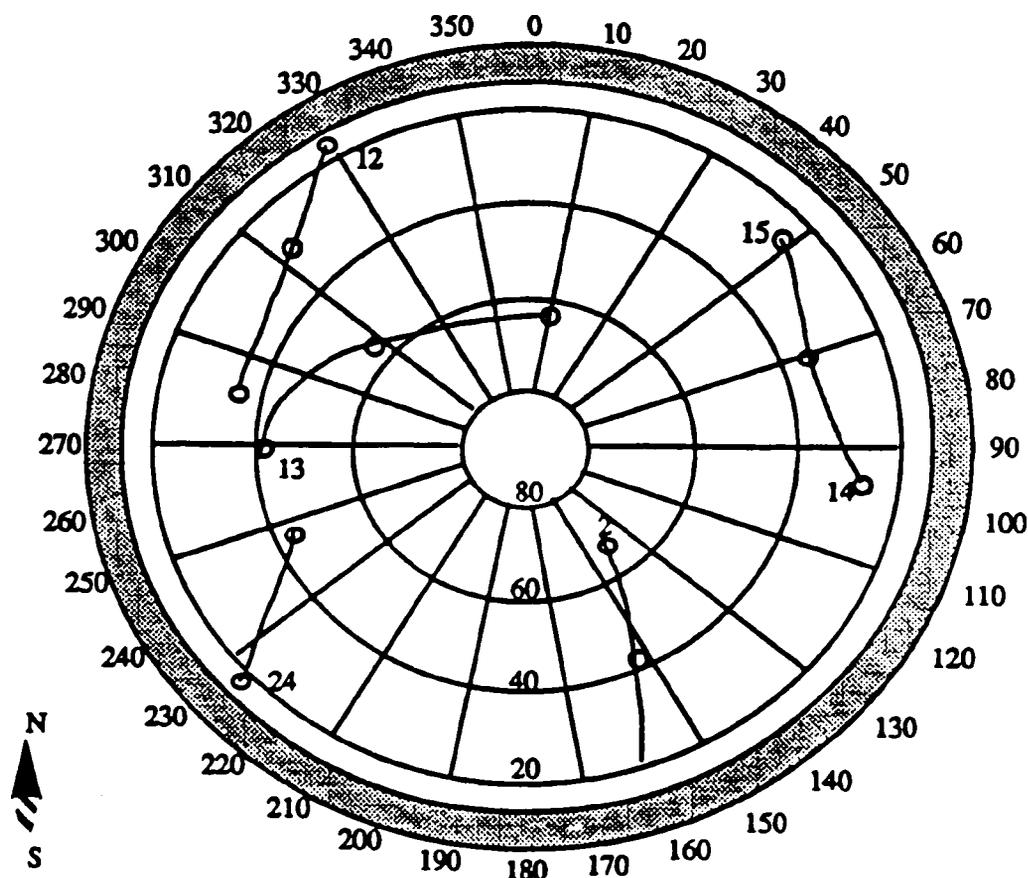


Figure 2.14 Carte du ciel

Waterloo, le 1^{er} septembre 1992, de 11 à 13 h, angle de masquage de 15 degrés
 Les rayons représentent les azimuts et les cercles concentriques, les élévations
 (selon le logiciel de planification des missions Ashtech)

La géométrie des satellites a une incidence directe sur l'exactitude d'un positionnement. Le positionnement par point unique le plus précis s'obtient lorsque les satellites sont bien distribués dans le ciel (p. ex. un satellite se trouvant au-dessus du point et les autres, également répartis à l'horizontale et à un angle approximatif d'élévation de 20 degrés). Les conditions géométriques ne sont plus optimales lorsque les satellites sont regroupés dans un seul quadrant du ciel. La géométrie des satellites, étant donné qu'elle contribue à l'exactitude du positionnement, est pondérée par la *diminution de la précision* d'origine géométrique (GDOP). La figure 2.15 fournit l'exemple d'une GDOP favorable et d'une autre, défavorable, selon la configuration des satellites.

En multipliant toutes les erreurs prévues en positionnement par point unique (ce que l'on nomme l'*erreur en distance équivalente de l'utilisateur* (UERE)) (voir la section 2.5) par la GDOP, l'utilisateur parvient à une estimation de l'exactitude combinée des quatre composantes obtenues

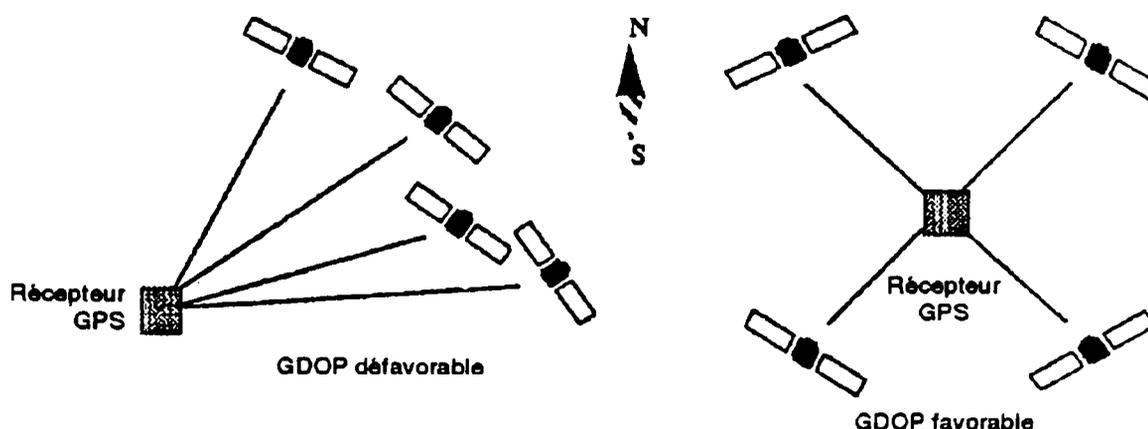


Figure 2.15 GDOP défavorable et favorable

en positionnement par point unique (trois coordonnées et l'heure). D'autres types de DOP (diminution de la précision), lorsque celles-ci sont multipliées par l'UERE, permettent d'obtenir l'exactitude indiquée au tableau 2.3 pour ce qui est des prévisions sur la position, l'horizontale et la hauteur.

La plupart des progiciels GPS sont capables de calculer les DOP avant une période d'observation. Les renseignements nécessaires pour calculer les DOP sont les mêmes que pour calculer la disponibilité des satellites et la carte du ciel des figures 2.13 et 2.14 (c.-à-d. un fichier d'almanach récent, la latitude et la longitude approximatives, la date et la période de temps). La figure 2.16 illustre les PDOP (diminutions de la précision locationnelle) qui correspondent à la même période et au même endroit que celles de la carte des satellites disponibles à la figure 2.13. Notez la tendance générale à l'affaiblissement des PDOP au fur et à mesure que s'accroît le nombre de satellites et vice versa.

Tableau 2.3 Types de DOP

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

Plus la PDOP est faible, meilleur est le positionnement GPS. Une PDOP de 5 ou de 6 est habituellement recommandée comme limite supérieure pour un positionnement, en particulier

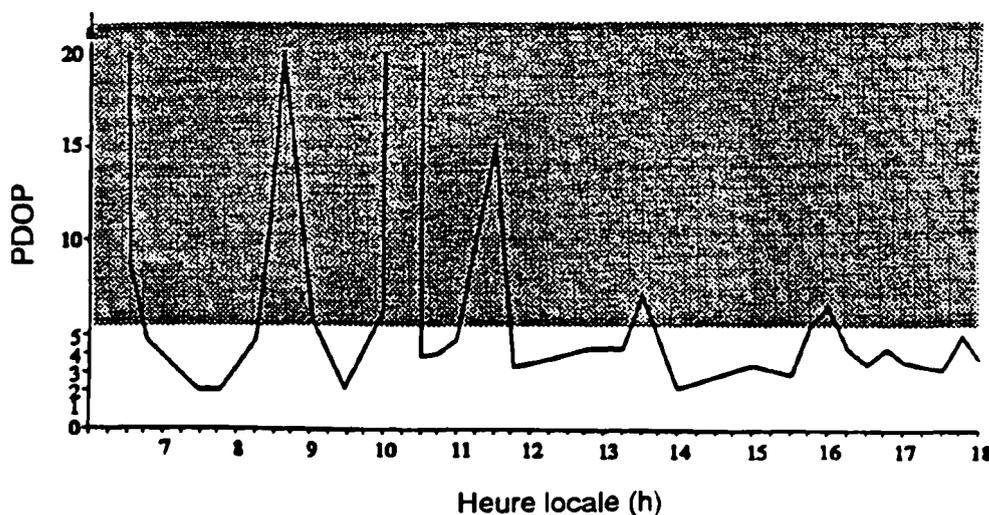


Figure 2.16 Courbe PDOP
 Waterloo, le 1^{er} septembre 1992, angle de masquage de 15 degrés
 (selon le logiciel de planification de mission Ashtech)

sur une courte période (p. ex. quelques minutes). Dans la figure 2.16, les PDOP supérieures à 6 sont ombrées; elles déterminent des périodes qui ne sont pas propices aux observations GPS. Ainsi, le jour et à l'endroit illustrés dans la figure, l'observation devrait être effectuée entre 7 h et 8 h plutôt qu'entre 8 h et 9 h, compte tenu de la PDOP favorable à la première des deux périodes. En positionnement relatif statique durant de longues périodes (p. ex. supérieures à une heure), la PDOP est moins importante étant donné que l'utilisateur tire alors profit non seulement de la configuration géométrique des satellites, mais également de la géométrie de la trajectoire de ceux-ci dans le ciel au cours du temps.

Disponibilité sélective et anti-brouillage

Deux expressions servent souvent à qualifier l'état du GPS : la *disponibilité sélective* (SA) et l'*anti-brouillage* (AS). Elles désignent toutes deux des techniques qui servent à limiter l'exactitude éventuelle procurée aux utilisateurs civils. La disponibilité sélective consiste en une dégradation de l'orbite de radiodiffusion (c.-à-d. de l'exactitude de la position « connue » des satellites dans l'espace) et en la juxtaposition des impulsions de synchronisation des satellites. La SA est actuellement mise en oeuvre. En raison de la SA, l'exactitude du positionnement par point unique est limitée à 100 m à l'horizontale et à 156 m, à la verticale, moyennant un taux de confiance de 95 % (DoD et DoT des États-Unis, 1986), alors qu'elle pourrait être respectivement de 20 à 30 m et de 30 à 45 m sans SA (Cannon, 1991).

L'anti-brouillage 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). Le début de la mise en oeuvre de l'AS est prévue pour le moment où la constellation complète GPS sera disponible, c'est-à-dire à la fin de l'année 1993 (McNeff, 1991), même si des essais intermittents à ce sujet ont été entrepris en août 1992. Une fois l'AS activé et dans le but de refuser l'accès

au code P, celui-ci doit être remplacé par un *code Y* dans les porteuses L1 et L2. Le code Y 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 erreurs de base auxquelles donnent lieu les observations GPS puisqu'elles ont une incidence directe sur les méthodes à adopter dans le but d'obtenir l'exactitude voulue. Des erreurs provoquent une divergence entre les distances satellite—récepteur mesurée et vraie; c'est pourquoi un terme d'erreur a été incorporé aux équations de base sur les mesures de porteuse et de code (2.2) et (2.4). Le détail des types d'erreurs survenant dans les observations GPS ainsi que la façon de corriger celles-ci figurent dans plusieurs publications (p. ex. Wells et al., 1986; Lachapelle, 1991) et abordés brièvement ci-après.

Les erreurs qui ont une incidence sur la mesure de la distance GPS sont illustrées à la figure 2.17. L'*erreur d'orbite* a trait à la différence entre la position d'un satellite calculée au moyen des éphémérides de radiodiffusion et la «vraie» position du satellite dans l'espace. La valeur nominale de telles erreurs va de 5 à 25 m (Lachapelle, 1991), mais elle a été augmentée jusqu'à 100 m (Kremer et al., 1989) par le biais de la disponibilité sélective. Les erreurs de synchronisation des satellites sont de l'ordre de 10 m, si l'on suppose que les corrections disponibles à cet effet dans le message satellite sont apportées (Wells et al., 1986).

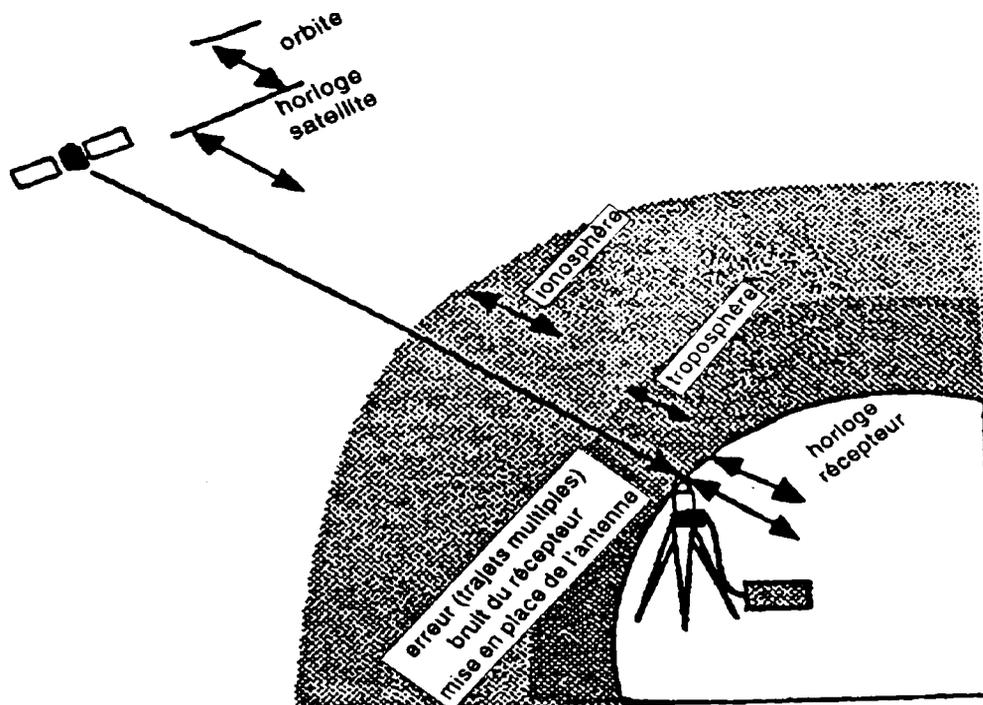


Figure 2.17 Erreurs courantes

Jusqu'à présent dans notre exposé, nous avons supposé que les signaux GPS se déplaçaient à la vitesse de la lumière. Deux couches de l'atmosphère ne sont pas conformes à cette hypothèse : 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 *erreurs ionosphériques* vont de 50 m au zénith (c.-à-d. à un angle d'élévation de 90 degrés) jusqu'à 150 m à l'horizon (c.-à-d. lorsque l'angle d'élévation est de 0 degré). Les *erreurs troposphériques* vont de 2 m au zénith jusqu'à environ 20 m à un angle d'élévation de 10 degrés (Wells et al., 1986). Les erreurs des satellites se trouvant à de faibles angles d'élévation sont supérieures en raison d'une trajectoire plus longue dans la troposphère et dans l'ionosphère.

Les *erreurs de synchronisation du récepteur* vont de 10 à 100 m selon la qualité de l'horloge (Wells et al., 1986). En positionnement, cette erreur de synchronisation est évaluée en même temps que les coordonnées et n'a donc pas une grande incidence sur l'exactitude obtenue.

Les *erreurs dues à la propagation par trajets multiples* se produisent lorsque des signaux reçus directement se combinent à d'autres, réfléchis par des objets voisins, de telle manière que le vrai signal est subit une interférence en provenance du signal réfléchi. Le *bruit du récepteur* est fonction de la façon dont un récepteur GPS peut mesurer les observations relatives au code ou à une porteuse. L'importance des erreurs, aussi bien dues à la propagation par trajets multiples qu'au bruit du récepteur, est proportionnelle à la longueur du circuit intégré et à celle de l'onde pour les mesures respectives du code et de la porteuse. Dans le cas des mesure du code C/A, l'erreur due à la propagation par trajets multiples peut s'élever à 20 m (Lachapelle et al., 1989), alors que, pour la porteuse L1, elle ne peut dépasser 5 cm (Georgiadou et Kleuseberg, 1988). Le bruit du récepteur, dans le cas des mesures de code et de porteuse, est habituellement et respectivement de quelques mètres et de quelques millimètres. La conception du récepteur aussi bien que de l'antenne peut influencer le bruit dû à la propagation par trajets multiples et le bruit d'une mesure (Van Dierendonck et al., 1992).

Le tableau 2.4 indique l'importance des erreurs sur chaque distance satellite—récepteur. Toutes les erreurs présentées au tableau 2.4, combinées selon les lois scientifiques de la propagation des erreurs, constituent *l'erreur en distance équivalente d'un utilisateur*. C'est cette valeur, multipliée par la DOP (diminution de la précision), qui fournit une estimation de l'exactitude possible en positionnement par point unique.

Une erreur propre aux observations de la phase de porteuse est le *glissement de cycle*. Si nous nous reportons à l'exposé ci-dessus sur l'équation de la porteuse (2.2), la phase de celle-ci est mesurée en permanence, mais compte un terme d'ambiguïté au moment de la synchronisation initiale avec un satellite. Le défaut d'assurer une synchronisation constante avec un satellite entraîne des glissements de cycle, au cours desquels un nombre entier de longueurs d'ondes peuvent être perdues. De tels glissements doivent être corrigés par informatique si les mesures de porteuse doivent contribuer à une exactitude inférieure au décimètre.

Tableau 2.4 Importance des erreurs

Erreur	Importance*
Synchronisation satellite	10 m (en supposant que les corrections de radiodiffusion ont été apportées)
Orbite	100 m (SA active) de 5 m à 25 m (SA inactive)
Ionosphère	50 m (au zénith)
Troposphère	2 m (au zénith)
Synchronisation récepteur	de 10 m à 100 m (selon le type d'oscillateur du récepteur)
Propagation par trajets multiples	
Code C/A	de 50 cm à 20 m (selon l'équipement et l'installation GPS)
Porteuse	jusqu'à quelques cm (selon l'équipement et l'installation GPS)
Bruit du récepteur	
Code C/A	de 10 cm à 2 ou 3 m (selon le type de récepteur)
Porteuse	de 0,5 à 5 mm (selon le type de récepteur)

* Références sur l'importance des erreurs mentionnées dans le texte

Le vaste éventail d'exactitudes et de techniques de positionnement relativement au GPS résultent du type d'observations effectuées (code, porteuse ou les deux) et du moyen utilisé pour corriger les erreurs mentionnées au tableau 2.4. Lorsqu'une exactitude supérieure à deux fois la moyenne quadratique de la distance de 100 m doit être obtenue en positionnement par point unique, un positionnement relatif doit être effectué. Dans un tel mode de positionnement, la plupart des erreurs d'orbite aussi bien que troposphériques et ionosphériques, tout comme les erreurs dues à la trajectoire satellite—récepteur, sont communes aux deux emplacements et, pour cette raison, n'ont qu'une faible incidence sur les positions relatives. Plus les récepteurs GPS sont rapprochés l'un de l'autre, plus les erreurs sont communes et plus grande est l'exactitude obtenue en positionnement relatif. Par conséquent, plus les récepteurs GPS sont éloignés, moins ces erreurs sont communes et moins grande est l'exactitude en positionnement relatif.

Pour un positionnement relatif et statique précis, des moyens sophistiqués servent à corriger les erreurs, notamment une combinaison des observations par des techniques de double différenciation de même qu'une modélisation et une estimation poussées. Deux récepteurs de fréquence peuvent supprimer presque entièrement les erreurs dues à l'ionosphère en positionnement relatif sur une longue ligne de base. Le détail sur les erreurs en levés statiques précis n'est pas présenté dans le présent document, mais il est bien documenté dans Wells et al. (1986) et dans Cannon (1991).

Dans le présent chapitre, nous avons exposé les principes du GPS, les composantes d'un signal, les types de positionnement, la visibilité d'un satellite ainsi que les sources d'erreur. Avant d'aborder la façon d'utiliser le GPS pour répondre aux besoins en matière de positionnement des ressources en eau, certaines notions de base sur la localisation à la surface de la terre sont indispensables. C'est pourquoi le chapitre suivant porte sur les fondements du positionnement.

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 hauteurs et le géoïde ainsi que les systèmes de coordonnées et les plans de référence. Les personnes intéressées aux élévations des eaux de surface, des eaux souterraines, etc., doivent particulièrement comprendre la distinction entre les hauteurs établies par le GPS et celles qui sont déterminées selon les techniques classiques de mise à niveau (abordées à la section 3.2).

3.1 MESURES DE L'EXACTITUDE

Lorsque vous procédez à une mesure quelconque, il est important de quantifier la «valeur» de celle-ci. Si, par exemple, un puits doit être positionné au moyen du GPS, nous aimerions savoir moyennant un coefficient quantifié de certitude, si sa position est précise 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 sur les mesures de l'exactitude.

Exactitude et précision

Il vaut la peine de clarifier le sens des mots «exactitude» et «précision». L'*exactitude* indique la proximité d'une valeur estimée (ou une mesure) avec la valeur véritable, mais inconnue, tandis que la *précision* indique la proximité d'une valeur estimée avec la valeur estimée moyenne. L'exactitude peut être grande, mais la précision, faible, et vice versa, comme vous pouvez le voir à la figure 3.1. Le centre des cercles y représente la «bonne» position et chaque point, une estimation différente.

Les erreurs qui limitent l'exactitude d'une mesure peuvent être classifiées en grossières, systématiques ou 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 la hauteur d'une antenne au-dessus d'une borne-signal de 0,5 m plutôt que la bonne hauteur, soit 1,5 m, on dit qu'il a commis une erreur grossière. De telles erreurs doivent être détectées et corrigées. Les *erreurs systématiques*, elles, résultent d'un modèle ou d'un comportement connu qui fausse les observations. L'idéal serait que de telles erreurs soient supprimées des observations par modélisation. Ainsi, une bonne

partie de l'erreur due au retard troposphérique, mentionné à la section 2.5, peut être supprimée grâce à un modèle mathématique qui représente les effets de la troposphère. Une fois supprimées des observations les erreurs grossières et les erreurs systématiques, seules restent les *erreurs aléatoires*. La précision (figure 3.1) tient aux effets aléatoires seulement, alors que l'exactitude tient aux effets aussi bien systématiques qu'aléatoires (Mikhail, 1976).

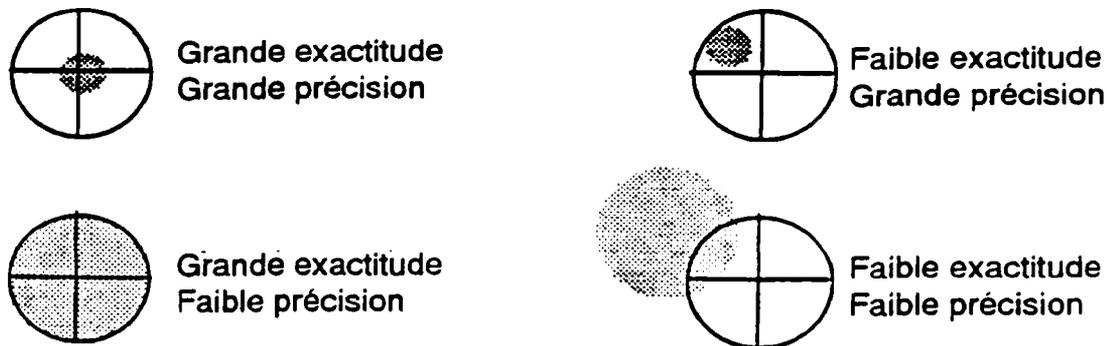


Figure 3.1 Exactitude et précision

Les erreurs aléatoires possèdent la propriété que, si un nombre suffisant d'observations a été effectué, il existe une probabilité égale d'erreurs négatives et positives, ce qui laisse une valeur moyenne nulle. Les erreurs aléatoires, selon la théorie statistique, 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.

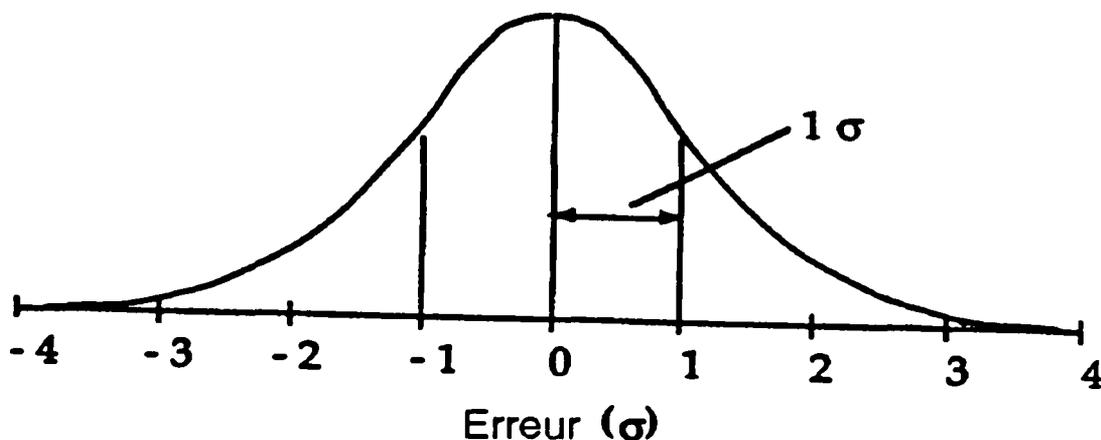


Figure 3.2 Fonction de distribution normale des probabilités

L'*écart-type*, représenté par le symbole σ , sert à quantifier la dispersion de part et d'autre de la moyenne et est illustré en même temps que 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 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	Probabilité	Multiples de σ
1σ	68,27 %	90 %	$1,645 \sigma$
2σ	95,45 %	95 %	$1,960 \sigma$
3σ	99,73 %	99 %	$2,576 \sigma$

* Mikhail (1976)

L'écart-type est la mesure d'exactitude la plus répandue en positionnement. Vous pouvez obtenir par approximation expérimentale, en prenant un nombre important, N , de mesures x , en faisant la somme du carré de la différence de chaque mesure avec la moyenne des x , que vous divisez par le nombre total de mesures moins une, extrayant ensuite la racine carrée comme à l'équation (3.1)

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

La valeur calculée à l'aide de l'équation (3.1) est dite *moyenne quadratique* (rms). Bien que rms 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 expression connexe est l'*erreur quadratique moyenne* (MSE), qui équivaut au carré de l'équation (3.1), c'est-à-dire à σ_x^2 .

Une autre expression moins courante servant à quantifier l'exactitude d'une mesure est l'*erreur probable*, qui correspond à une incertitude de 50 % et à $0,674 \sigma$ (National Geodetic Survey, 1986). Notez que l'écart-type, la rms et l'erreur probable représentent tous des mesures unidimensionnelles de l'exactitude et que, dans le GPS, des mesures bidimensionnelles et tridimensionnelles de l'exactitude sont également importantes.

Le tableau 3.2 illustre les mesures courantes d'exactitude GPS dans des cas unidimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel. Dans le tableau, la première colonne indique la dimension, la deuxième, l'acronyme (le cas échéant), la troisième, le nom, la quatrième, le taux de probabilité connexe, la cinquième, la relation avec l'écart-type, la sixième, une illustration et la septième, des expressions et des définitions connexes.

Tableau 3.2 Mesures courantes de l'exactitude employées dans le GPS

(1)	(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 CPE (écart circulaire probable)
	2drms	2 fois la moyenne quadratique de la distance	Variable de 95,4 à 98,2 %†	Rayon : 2σ $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$		Seconde définition moins employée : rms bidimensionnelle (rayon du cercle : 1 σ)
3D		Écart ellipsoïdal	19,9 %*	Définie : $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ et corrélations		
	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)

Notez que dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel, un écart d'ellipse et un écart ellipsoïdal sont inclus dans le tableau. De telles mesures d'exactitude rendent compte de la probabilité des erreurs qui varie selon la direction. Les écarts d'ellipse sont établis par les écarts-types des coordonnées et de leurs corrélations. Ces corrélations, rendant compte de l'incidence d'une erreur qu'une composante a sur une autre, entraînent l'orientation des axes ellipsoïdaux dans des directions différentes de celles des axes des coordonnées. Même si, dans la figure, les erreurs sont exprimées en fonction des x et des y , le même principe s'applique à la latitude et à la longitude. Les écarts ellipsoïdaux suivent le même principe que les écarts d'ellipse, dans un espace tridimensionnel.

Les autres expressions mentionnées au tableau 3.2 représentent des mesures d'exactitude pour un espace bidimensionnel ou tridimensionnel et sont définies par des valeurs uniques qui correspondent aux rayons plutôt qu'à des ellipses ou à des ellipsoïdes plus complexes. L'écart circulaire probable (ECP) et l'écart sphérique probable (SEP) portent une probabilité de 50 %, respectivement pour les cercles et pour les sphères. La colonne (5) du tableau 3.2 indique les relations approximatives de leur rayon avec un écart plus rigoureusement défini d'ellipse et d'ellipsoïde.

Une dernière mesure d'exactitude plus courante en espace bidimensionnel dans le GPS est «2drms». Elle se définit comme un cercle de rayon 2σ , où σ représente l'écart-type d'un vecteur en espace bidimensionnel. Le taux de probabilité de 2drms varie d'environ 95,5 à 98,2 % selon l'importance relative de σ_x et de σ_y (Langley, 1991).

Exactitudes absolue et relative

Tout comme le positionnement GPS, absolu (par point unique) ou relatif, décrit à la section 2.3, les mesures d'exactitude peuvent être considérées comme absolues ou relatives. Les *exactitudes absolues* sont des estimations de la mesure selon laquelle une position correspond à la vérité du cadre de référence terrestre et les *exactitudes relatives*, à la mesure selon laquelle un vecteur est mesuré entre deux points (p. ex. 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 horizontales déterminées en positionnement par point unique GPS, dans l'hypothèse où la géométrie des satellites soit favorable, sont exactes à 100 m près moyennant 2 fois la moyenne quadratique de la distance horizontale et à 156 m, moyennant 2σ en distance verticale (DoD et DoT des États-Unis, 1986). Les *exactitudes relatives* peuvent être représentées par des valeurs constantes, en partie par million (ppm), ou des deux façons. Les parties par million servent à établir le rapport entre l'importance d'une erreur et la longueur de la *ligne de base*. 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 les erreurs et la distance sur une ligne de base moyennant 2, 10 et 20 ppm.

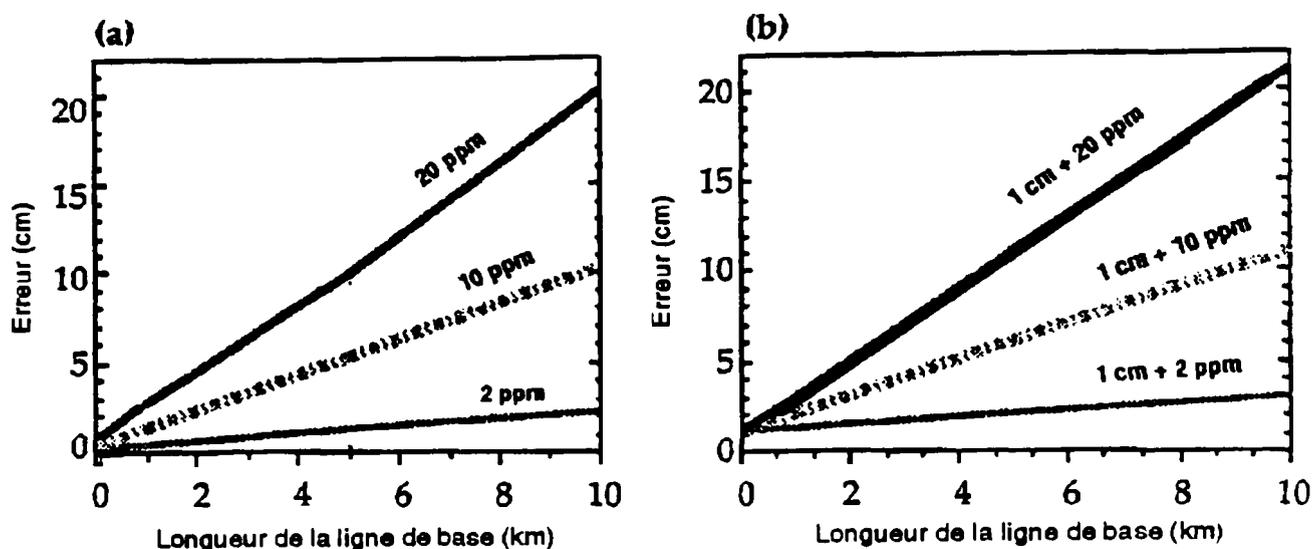


Figure 3.3 Exactitude relatives GPS (ppm) : a) ppm b) constante + ppm

Les exactitudes quant à la ligne de base dans l'utilisation du GPS sont souvent exprimées 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 :

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

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 de la ligne de base, par exemple dues à l'installation de l'antenne ou à la propagation par trajets multiples, tandis que le terme linéaire rend compte des erreurs de longueur telles que des erreurs résiduelles d'orbite, ou encore troposphériques et ionosphériques.

Si vous comparez les figures 3.3a et 3.3b, vous constatez que la constante de 1 cm, lorsqu'elle est appliquée au cas de 2 ppm, contribue à augmenter de 50 % l'importance de l'erreur sur une distance de 10 km, mais n'est pratiquement pas significative dans les cas de 10 et de 20 ppm. C'est la raison pour laquelle des mesures d'exactitude combinées, comme dans l'équation (3.2), servent seules dans les levés relatifs précis.

Exactitude, précision, écart-type, rms, ECP, SEP, 2drms et ppm sont des expressions que tout utilisateur du GPS ou tout lecteur de la documentation publiée à ce sujet est susceptible de voir. Les explications ci-dessus à leur sujet devraient rendre service aux utilisateurs qui envisagent une application. Tous les exposés sur l'exactitude dans le reste des présentes lignes directrices se fondent sur ces expressions.

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

3.2 HAUTEURS ET GÉOÏDE

Diverses hauteurs ainsi que des différences en hauteur, qui comptent pour beaucoup dans une analyse des eaux souterraines, peuvent être établies à l'aide du GPS, mais moyennant des exactitudes inférieures et de plus grandes complexités que les composantes horizontales correspondantes. La principale difficulté pour établir des hauteurs réside dans ce que le satellite GPS se fonde sur des hauteurs ellipsoïdales et que, la plupart du temps, l'utilisateur a besoin des hauteurs orthométriques. Par conséquent, il importe beaucoup, pour ceux qu'intéresse une application GPS afin d'établir une hauteur, de comprendre les caractéristiques propres à chaque système de hauteur et la façon de s'en accommoder. La présente section vise à vous initier à l'historique de la question.

Hauteurs orthométriques et hauteurs ellipsoïdales

De façon classique, les hauteurs sont établies par des techniques de mise à niveau, fondées sur le champ gravifique de la terre et par référence au niveau moyen de la mer. À chaque endroit de la terre, la gravité possède une certaine valeur et une certaine direction qui peuvent être représentées par un vecteur. Chaque fois qu'un instrument est mis à niveau, la ligne de visée est réglée de façon perpendiculaire au vecteur de gravité en ce point précis, et, chaque fois qu'une mire graduée est élevée en un point, elle se trouve alignée sur le vecteur de gravité. Les hauteurs établies par mise à niveau sont habituellement appelées «élevations au-dessus du niveau moyen de la mer». De telles élévations, dites *hauteurs orthométriques*, sont, en fait, établies par référence au *géoïde*. Les hauteurs orthométriques correspondent à des élévations d'usage courant, qu'on retrouve, par exemple, sur les cartes topographiques.

Le *géoïde* est la surface équipotentielle (autrement dit, dont le potentiel gravifique 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*, une sphère écrasée pour l'essentiel, est facile à représenter et à manipuler sur le plan mathématique. C'est pourquoi une ellipsoïde sert à établir la valeur approximative du géoïde, et que les hauteurs sont fondées sur l'ellipsoïde plutôt que sur le géoïde. Les élévations établies par satellites GPS se fondent sur la surface ellipsoïdale. La figure 3.4 illustre la relation entre l'ellipsoïde et le géoïde.

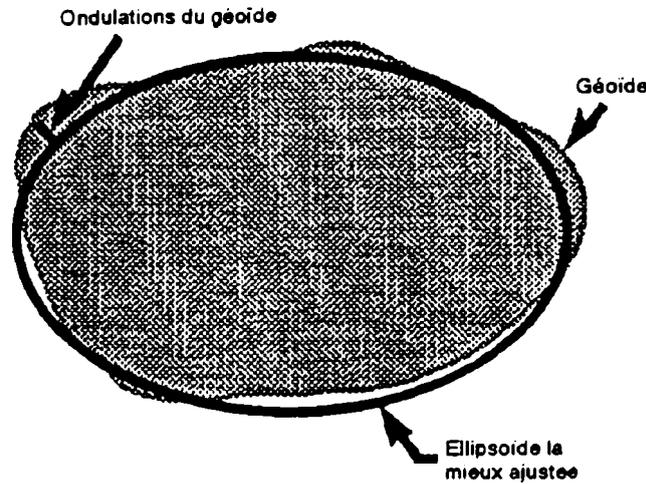


Figure 3.4 Géοide et ellipsoïde

La distance séparant le géοide de l'ellipsoïde est l'*ondulation du géοide* (également désignée en anglais «hauteur»). Cette ondulation peut être positive ou négative selon que le géοide se trouve au-dessus ou en dessous de l'ellipsoïde en un point donné (figure 3.4). Si l'ondulation du géοide, N , et si la hauteur de l'ellipsoïde, h , sont connues, la hauteur orthométrique peut être établie grâce à la relation illustrée à la figure 3.5. De façon précise, la hauteur orthométrique est égale à la hauteur ellipsoïdale, moins l'ondulation du géοide :

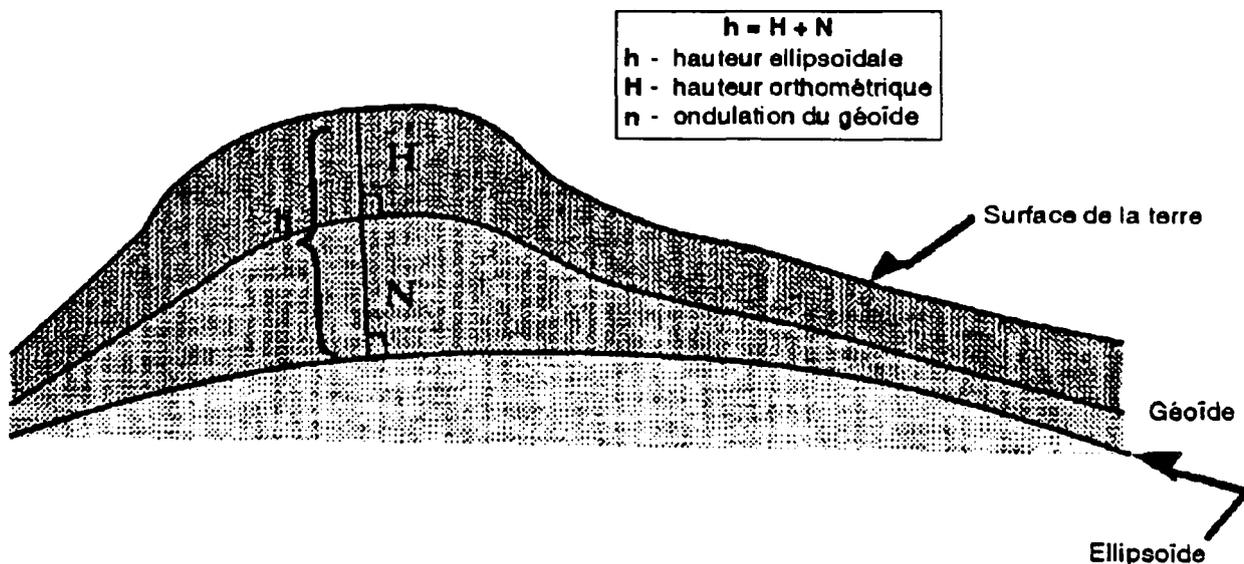


Figure 3.5 Relation entre les hauteurs orthométrique et ellipsoïdale

Il est évident que vous devez connaître les ondulations du géoïde pour calculer des hauteurs orthométriques grâce au GPS.

Modèles du géoïde

Les ondulations du géoïde varient jusqu'à concurrence de ± 100 m à la surface terrestre et de ± 50 m au Canada. Les *modèles du géoïde*, qui tracent le schéma des ondulations du géoïde sur la terre, établissent le lien entre hauteurs orthométriques et ellipsoïdales. Les géodésiens ont produit de nombreux modèles du géoïde en combinant la théorie scientifique et divers types de mesures de la gravité. Grâce à un modèle du géoïde, et étant donné une latitude et une longitude précises, vous pouvez obtenir l'ondulation du géoïde par consultation ou interpolation.

Les divers modèles du géoïde offrent un coefficient d'exactitude et une portée variables. En règle générale, plus un modèle est exact, plus il exige des calculs d'une grande ampleur et plus il exige de la mémoire. Certains modèles sont disponibles pour le monde entier et d'autres, pour certaines régions particulières. À titre d'exemple, la Division des levés géodésiques d'EMR a calculé un géoïde (DLG91) qui couvre seulement le Canada, mais dont le coefficient d'exactitude et le détail sont supérieurs à ceux de tout modèle global disponible et l'un des plus exacts pour le Canada. Vous pouvez vous le procurer auprès de la Division des levés géodésiques (DLG), sous forme de disque, de même qu'un logiciel servant à interpoler les ondulations du géoïde pour des endroits précis au Canada. La DLG fournit également des données sur le géoïde ailleurs dans le monde pour venir en aide aux Canadiens oeuvrant à l'étranger. (Voir l'appendice E pour de plus amples renseignements.)

Beaucoup de récepteurs ou de logiciels GPS, ou les deux, comportent des modèles du géoïde intégrés. Autrement dit, ces modèles sont dotés du moyen de corriger la séparation géoïde—ellipsoïde en toute position donnée et établie par le GPS. Ils offrent habituellement une faible exactitude, mais couvrent l'ensemble de la surface de la terre et possèdent des rms d'environ 1 m. Grâce à des récepteurs GPS tenus dans la main et de faible exactitude, les hauteurs ellipsoïdales peuvent être converties en hauteurs orthométriques de façon très compréhensible pour l'utilisateur.

L'exactitude et le coefficient nécessaires au modèle du géoïde varient selon qu'on emploie un positionnement par point unique ou relatif (tableau 3.3). En positionnement par point unique (figure 2.7), on doit toujours utiliser un modèle du géoïde pour obtenir des hauteurs orthométriques. Cependant, étant donné qu'un tel positionnement n'est exact qu'à 100 m près, à deux fois la moyenne quadratique d'une distance horizontale, et qu'à 156 m près, pour une distance verticale de 2σ (DoD et DoT des États-Unis, 1986), l'incidence des inexactitudes sur l'ondulation du géoïde pour une moyenne quadratique de 1 m est négligeable.

Tableau 3.3 Spécifications du modèle de géoïde en positionnement par point unique ou relatif

Type de positionnement GPS	Utilisation du modèle?	Grande exactitude exigée?	Pourquoi?
Par point unique	Oui	Non	<ul style="list-style-type: none"> • Une correction s'impose pour passer du géoïde à la hauteur orthométrique. • Étant donné la faible exactitude en positionnement par point unique, une grande exactitude quant au géoïde ne serait d'aucune utilité.
Relatif	Oui	Variable	<ul style="list-style-type: none"> • Selon la longueur des lignes de base, le gradient du géoïde et l'exactitude désirée.

En positionnement relatif, la situation est très différente. Vous inspirant de la figure 2.8, rappelez-vous que le positionnement relatif comporte toujours l'établissement d'un point relatif inconnu à partir d'un point connu. Par conséquent, l'ondulation absolue du géoïde n'est pas seule en cause, mais également la différence de celle-ci entre des points connus et d'autres, inconnus. L'emploi d'un modèle du géoïde est plus complexe et varie selon le coefficient d'exactitude nécessaire; cette question est donc abordée à la section 5.4, qui porte sur les méthodes de calcul des hauteurs relatives dans le GPS.

Jusqu'à présent, nous avons abordé deux surfaces différentes au chapitre des hauteurs : le géoïde et l'ellipsoïde. Ce dernier sert également de base pour les différentes mesures horizontales effectuées dans le GPS ainsi que pour le cadre canadien de points de contrôle. Ceci nous amène à aborder les systèmes de coordonnées, les systèmes géodésiques et les réseaux de contrôle ayant trait au GPS.

3.3 SYSTÈMES DE COORDONNÉES ET SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE

Étant donné que les mesures sur les ressources sont exprimées au moyen de paramètres locationnels horizontaux et verticaux, il importe de comprendre les systèmes de référence sur lesquels s'appuient ces paramètres et leur relation avec les systèmes de coordonnées GPS.

Systèmes de coordonnées

Dans les présentes lignes directrices, nous avons implicitement fait référence à deux types de systèmes de coordonnées : le système classique de coordonnées géographiques et le système de coordonnées géodésiques.

Le *système classique de coordonnées géographiques* utilise pour origine le centre de la terre, son axe Z étant orienté vers le pôle Nord, son axe X passant par le plan qui contient le méridien de Greenwich, et son axe Y étant perpendiculaire aux axes X et Z de façon à former un trièdre trirectangle direct. Les axes positifs du système classique de coordonnées géographiques sont illustrés à la figure 3.6. Les coordonnées géographiques classiques sont faciles à employer en mathématique, comme nous l'avons vu à l'équation de positionnement par point unique (2.5). Toutefois, ils ne sont pas très utiles à ceux qui s'intéressent aux paramètres locationnels des eaux, à moins d'être transformés en un système d'une portée physique plus significative pour la terre, comme le système de coordonnées géodésiques.

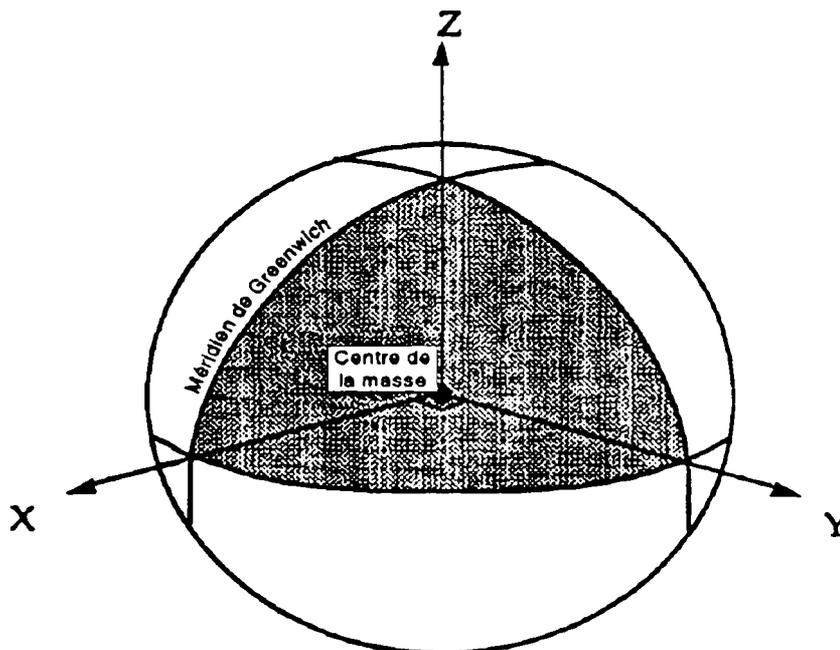


Figure 3.6 Système classique de coordonnées géographiques

Les *coordonnées géodésiques* comprennent les composantes habituelles que sont la latitude, la longitude et la hauteur et se fondent toutes sur l'ellipsoïde. La latitude est l'angle positif que forme l'axe élevé au centre de la terre vers le nord avec l'équateur; la longitude est l'angle positif formé à l'est du méridien de Greenwich; et la hauteur ellipsoïdale se mesure au-dessus de la surface de l'ellipsoïde dont nous avons déjà parlé. La figure 3.7 illustre la latitude et la longitude d'un point d'origine. (Dans cette figure, la longitude est négative.) La figure indique également l'azimut depuis l'origine jusqu'à un second point, B.

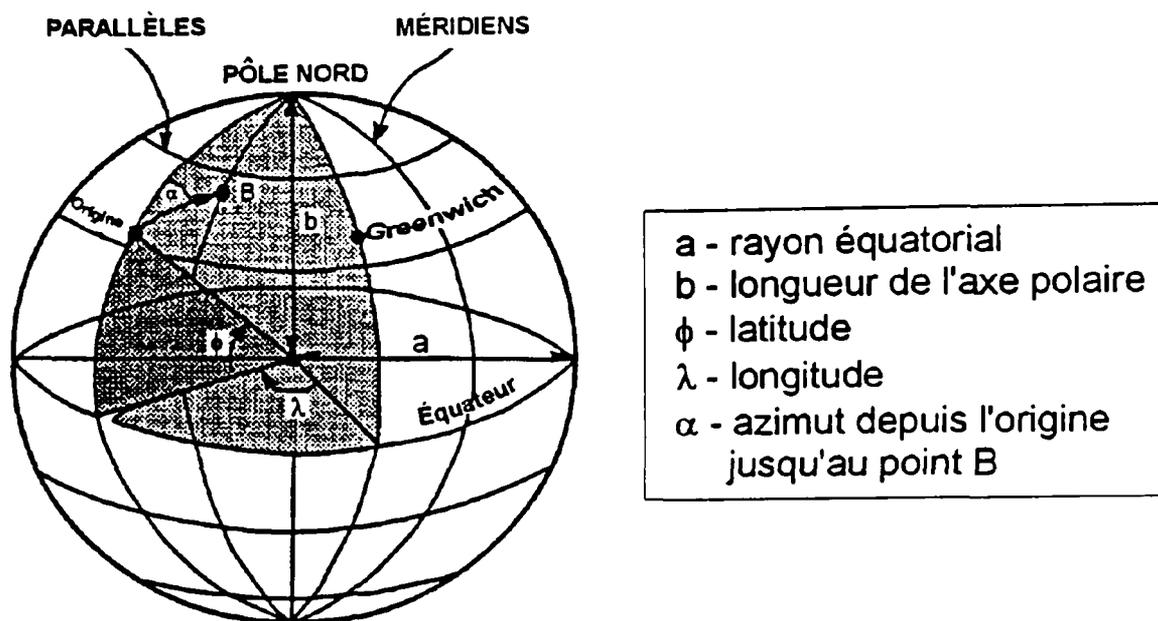


Figure 3.7 Système de coordonnées géodésiques

Souvent l'analyse se fonde sur les coordonnées UTM tirées des cartes topographiques. Les coordonnées géodésiques peuvent être transformées en ordonnées et en abscisses et vice versa. Les hauteurs indiquées sur les cartes UTM sont habituellement orthométriques.

Systèmes de référence verticaux

Jusqu'à présent, nous avons abordé les systèmes de coordonnées et la différence entre les hauteurs orthométriques et ellipsoïdales, mais pas encore les systèmes de référence sur lesquels s'appuient ces systèmes pour des applications réelles. Les *systèmes de référence* peuvent être définis comme des surfaces ou des ensembles de quantités sur lesquels s'appuient des mesures. En ce qui concerne les paramètres locationnels, deux types de systèmes de référence importent : verticaux et horizontaux.

Au Canada, les élévations au-dessus du niveau moyen de la mer se fondent sur le Plan de référence géodésique de 1928 (CGD28). Ce plan 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). Un réseau de quelque 70 000 repères géodésiques (bornes-signaux fixées au sol et portant une élévation exacte), mis en place au niveau à bulle d'air, est actuellement maintenu par la Division des levés géodésiques. Les hauteurs orthométriques de n'importe quel repère géodésique peuvent être obtenues auprès de la Division des levés géodésiques (voir l'appendice D). Dans notre pays, les élévations

aussi bien des repères géodésiques que des cartes topographiques sont presque toutes tirées du même système de référence. Des organismes provinciaux et beaucoup d'organismes municipaux maintiennent également des réseaux de repères géodésiques, moyennant une exactitude de deuxième ordre dans le premier cas et de troisième ordre, dans le second cas, habituellement. Vous trouverez le détail des ordres d'exactitude pour les levés de contrôle dans le document intitulé «Spécifications pour levés de contrôle et conseils concernant la construction des repères» (Direction des levés et de la cartographie, 1978).

Au Canada, dans le but de faciliter les échanges de données, on doit établir les élévations des ressources en eau par référence au système de référence vertical national. Dans le cas des projets à l'étranger, si on peut se servir d'un système de repères géodésiques établi en fonction d'un système de référence commun, on doit le faire. Le système de référence sur lequel se fondent les élévations doit être clairement spécifié.

Systèmes de référence horizontaux et le NAD83

Le système de référence horizontal, au Canada, qui fournit les références de latitude et de longitude, se fonde sur une ellipsoïde définie mathématiquement plutôt que sur un géoïde défini physiquement. Le système de référence lui-même comprend un grand nombre de repères (c.-à-d. des bornes–signaux dans le sol dont la latitude et la longitude sont exactes), qui ont été levés avec exactitude et ajustés les uns en fonction des autres de manière à former un réseau uniforme de contrôle horizontal sur lequel peuvent s'appuyer toutes les autres mesures horizontales.

Les utilisateurs canadiens de paramètres locationnels doivent être familiers avec deux systèmes de référence horizontaux : le Système de référence nord-américain de 1927 (NAD27) et le Système de référence nord-américain de 1983 (NAD83), qui remplace le précédent. Le NAD27 a été calculé entre les années 1927 et 1932 en fonction des observations d'arpentage effectuées à partir des réseaux de bornes–signaux au Canada, au Mexique et aux États-Unis. Toutes les nouvelles bornes–signaux d'arpentage, lorsqu'elles sont créées et intégrées au cadre de référence existant par des mesures appropriées, font l'objet des contraintes nécessaires pour s'inscrire dans le cadre actuel ou pour s'étendre au-delà de celui-ci.

Grâce aux progrès techniques et à l'arrivée de l'arpentage par satellite, les mesures relatives aux nouvelles bornes–signaux sont devenues plus exactes que celles du NAD27 et ont été dégradées lors de leur intégration au NAD27. Les organismes géodésiques nationaux du Canada, du Mexique et des États-Unis ont reconnu qu'un nouveau calcul s'imposait, puisque les coordonnées du NAD27 n'étaient plus assez exactes pour répondre aux exigences modernes. On a donc entrepris de réaliser un nouveau système de référence et de rajuster les réseaux nord-américains de levés des positions de contrôle; ce qui a mené à l'adoption officielle du NAD83, en 1990.

Dans la transition du NAD27 au NAD83, les coordonnées géodésiques ont été déplacées de 120 mètres vers l'ouest sur la côte ouest, jusqu'à 70 mètres vers l'est à Terre-Neuve, et de 100 mètres vers le nord dans l'Extrême Arctique. Les coordonnées correspondantes dans la projection de Mercator transverse (UTM) ont été décalées vers le nord sur une distance de 200 à 250 mètres (Pinch, 1990). Ces décalages résultent de la distorsion dans les coordonnées NAD27 qui ont été supprimées lors du rajustement ainsi que de l'emploi d'une ellipsoïde mieux adaptée à la forme de la terre.

L'un des principaux avantages du NAD83, c'est sa conformité avec le cadre de référence des satellites GPS. Autrement dit, en positionnement par point unique, les coordonnées communiquées en sortie par un récepteur relèvent du NAD83. Si vous devez utiliser un autre système de référence, par exemple le NAD27, vous aurez à transformer vos données d'un système de coordonnées à l'autre.

Les coordonnées relatives aux bornes—signaux de contrôle d'arpentage, aux cartes, aux bases de données ainsi qu'au Système d'information géographique (SIG) sont touchées par ce nouveau système de référence. EMR se charge de convertir les éléments géodésiques du contrôle d'arpentage et les documents cartographiques, depuis les coordonnées NAD27 jusqu'à celles du NAD83; cette opération est en bonne voie. Le tableau 3.4 présente un certain nombre de politiques d'EMR sur le NAD83. (Voir SLCT [1990] pour de plus amples renseignements.)

Tableau 3.4 Conversion au NAD83

	Politiques* et situation
Réseau national de contrôle	<ul style="list-style-type: none"> • Le NAD83 a été officiellement adopté par EMR en 1990. • Les coordonnées NAD83 ont été calculées pour environ 105 000 points de contrôle d'arpentage au Canada. • La DLG offre l'accès aux coordonnées de transformation du NAD27 au NAD83 et fournit des conseils à ce sujet. • La DLG contribue à mettre au point des conversions au NAD83 à partir d'autres grands systèmes de références géodésiques employés au Canada.
Cartes produites par EMR	<ul style="list-style-type: none"> • Le NAD83 servira de système 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, les notes en marge qui permettent de convertir les coordonnées au NAD83 seront surimprimées sur les cartes existantes. • Le CCM publiera des explications sur la conversion et énumérera les décalages UTM pour chaque carte de la série NTS à l'échelle 1/50 000 et 1/250 000.

*SLCT (1990)

Les conséquences du NAD83 pour les personnes intéressées à des données avec références géographiques, par exemple sur les ressources en eau, sont très nombreuses. En outre, nous recommandons que les bases de données et les SIG employés pour les eaux fassent référence au NAD83. Le nouveau système de référence offre l'avantage d'être exempt des principales distorsions dont était affligé le NAD27 et il est directement compatible avec les positions établies dans le GPS. De plus, au fur et à mesure que la décennie progresse, de plus en plus de données géographiques fondamentales font référence aux coordonnées NAD83, entre autres la série des cartes topographiques nationales.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le système de référence GPS est compatible avec le NAD83. Par conséquent, en positionnement relatif, les points connus doivent toujours être fournis en coordonnées NAD83. Si, par la suite, les coordonnées doivent être fournies dans un système de référence différent, les transformations peuvent être effectuées après résolution des coordonnées NAD83 du GPS. Le tableau 3.5 résume les aspects dont il faut tenir compte en gestion de base de données ou de SIG ainsi qu'en positionnement GPS en raison du NAD83.

Tableau 3.5 — Incidence du NAD83 sur les paramètres locationnels

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

De façon classique, des réseaux de contrôle horizontal et vertical ont existé séparément parce qu'ils dépendaient de techniques d'arpentage différentes. Dans le GPS, les coordonnées horizontales et verticales sont établies simultanément et indépendamment, même si les hauteurs calculées sont toujours ellipsoïdales, à moins qu'elles aient été corrigées en fonction d'une ondulation du géoïde. Par conséquent, les points connus en positionnement relatif doivent l'être aussi bien horizontalement que verticalement. Cette question est expliquée plus en détail dans la description des procédures de la section 5.1.

Les notions de base sur l'exactitude, sur le géoïde et sur les systèmes de référence, exposées dans le présent chapitre, sont susceptibles d'être abordées par quiconque utilise le GPS de façon experte en vue de répondre à des besoins spécifiques de positionnement. Le chapitre qui suit fait appel aux principes fondamentaux du GPS et du positionnement pour exposer les diverses méthodes possibles de positionnement dans le cadre du GPS.

CHAPITRE 4

TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT GPS

Le présent chapitre vise à familiariser d'une façon générale ceux qu'une application GPS intéresse à la vaste gamme des techniques existantes ainsi qu'à leur exactitude, leur degré de complexité et leurs coûts respectifs. Ces renseignements fournissent une base à partir de laquelle il est possible de juger de la meilleure technique à employer pour une application donnée.

Les renseignements du présent chapitre sont limités de deux façons. Premièrement, l'exactitude signalée ne fournit qu'une idée générale du coefficient d'exactitude que vous pouvez espérer grâce à une technique donnée. Beaucoup de variables influencent l'exactitude, par exemple la longueur de la ligne de base, les conditions ionosphériques, le coefficient de disponibilité sélective, les types de récepteurs employés et les stratégies de traitement adoptées. Deuxièmement, bien que les techniques actuellement disponibles soient exposées, d'autres peuvent devenir bientôt disponibles, vu les progrès rapides en technologie GPS. Cependant, à partir de l'historique fourni aux chapitres 1 et 2 sur le GPS et sur le positionnement et grâce à la description des techniques actuelles dans le présent chapitre, vous devriez être en mesure d'évaluer sur-le-champ les nouvelles techniques au fur et à mesure qu'elles apparaissent.

Les techniques de positionnement GPS peuvent être classifiées selon qu'elles produisent des mesures à partir d'un code ou d'une porteuse. Les techniques fondées sur un code sont, en général, plus simples et procurent de faibles exactitudes, tandis que les techniques fondées sur une porteuse sont plus complexes et procurent de grandes exactitudes (tableau 2.2). Pour des mesures aussi bien par code que par porteuse, il existe une gamme de méthodes de positionnement. L'adéquation de chaque méthode et d'une application particulière dépend du coefficient d'exactitude désiré, des contraintes logistiques et des coûts.

Des exactitudes et des degrés de complexité représentatifs des différentes méthodes sont présentés au tableau 4.1 pour les techniques par code et, au tableau 4.2 pour les techniques par porteuse. Chaque tableau énumère les méthodes, les principes de base qui les sous-tendent, le nombre minimum de récepteurs nécessaire (Min. de réc.), la durée de l'observation nécessaire (Durée de l'obs.), l'exactitude et les commentaires. Les exactitudes sont présentées au tableau 4.1, selon un coefficient de probabilité de 95 %, et au tableau 4.2, selon la moyenne quadratique. Veuillez noter que les exactitudes verticales relèvent des hauteurs ellipsoïdales plutôt qu'orthométriques. Si vous souhaitez des hauteurs orthométriques, vous devez également tenir compte des variations 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 décrites, respectivement, aux sections 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1 Résumé des méthodes de positionnement GPS par code

Méthode	Notions de base	Min. de réc.	Durée de l'obs.	Exactitude (prob. de 95 %)	Commentaires
Par point unique (statique ou cinématique)	<ul style="list-style-type: none"> Minimum de 4 satellites Position instantanée 	1	1-10 s	100 m à l'horizontale 156 m à la verticale	La plus simple, la moins coûteuse
Différentielle (statique ou cinématique)	<ul style="list-style-type: none"> Minimum de 4 satellites Les corrections calculées au récepteur de contrôle sont apportées au récepteur de liaison 	2	1-50 s	De 3 à 12 m† à l'horizontale et à la verticale	Simple, peu coûteuse

* Par hypothèse, un code C/A est utilisé

† (Lachapelle et al., 1991)

4.1 TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT PAR CODE

Les techniques par code peuvent être regroupées selon qu'elles fonctionnent en positionnement par point unique ou en positionnement différentiel (tableau 4.1). Les deux techniques se prêtent à des applications susceptibles de fournir des paramètres locationnels pour des données sur les eaux. Seules les observations de code C/A sont étudiées dans le cadre des techniques par code, puisqu'il est prévu que le code P ne sera plus accessible à des fins civiles d'ici la fin de 1993, au moment où toute la constellation GPS sera opérationnelle (McNeff, 1991).

Positionnement par point unique

Le *positionnement par point unique* (figure 2.7) s'obtient à la rencontre de mesures en provenance de quatre satellites ou plus en un seul récepteur, à la surface de la terre (voir le détail à la section 2.3). Cette méthode permet d'obtenir une exactitude à 100 m près moyennant deux fois la moyenne quadratique de la distance horizontale et de 156 m, moyennant une distance verticale de 2σ (DoD et DoT des États-Unis, 1986), dans l'hypothèse d'une géométrie favorable (p. ex. PDOP < 6). De telles exactitudes s'appliquent en positionnement aussi bien statique que cinématique. Des solutions peuvent être obtenues

presque instantanément grâce à un récepteur GPS manuel et peu coûteux. Le récepteur n'a qu'à recueillir les mesures du code C/A pour bénéficier de l'exactitude nominale en positionnement par point unique.

Tableau 4.2 Résumé des méthodes de positionnement GPS par porteuse

Méthode	Notions de base	Min. de réc.	Durée de l'obs.	Exactitude (rms 3D)	Commentaires
Statique	Occupation simultanée d'emplacements.	2	≥ 1 h	1 cm + (de 1 à 10 ppm)	De complexité variable.
Cinématique (fondée sur une porteuse)	Récepteur de liaison mobile en fonction du récepteur de contrôle statique. Nécessité de résoudre une ambiguïté initiale.	2	—	de 10 cm à 1 m	Difficulté logistique de maintenir la synchronisation pendant le déplacement.
Semi-cinématique (également appelée marche—arrêt)	Immobilisation provisoire du récepteur de liaison aux points à positionner en fonction du récepteur de contrôle.	2	~1 min par point	quelques cm	Méthode limitée à des lignes de base inférieures à ~10 km. La synchronisation doit être maintenue pendant le déplacement entre les points.
Pseudo-cinématique	Dans le but de tirer profit de la géométrie des satellites, chaque emplacement d'un récepteur de liaison doit être occupé deux fois, à au moins une heure d'intervalle.	2	1-3 min	quelques ppm	La double occupation d'un emplacement est essentielle. Méthode lourde du point de vue logistique.
Statique et rapide	Résolution des ambiguïtés grâce à des techniques sophistiquées et à des données supplémentaires.	2	de 3 à 5 min	quelques cm	S'applique habituellement à des lignes de base inférieures à 10 km. Des mesures supplémentaires sont nécessaires.

Nota : Toutes les exactitudes verticales se fondent sur des hauteurs ellipsoïdales.

L'application réussie d'un positionnement par point unique exige que le récepteur suive au moins quatre satellites (et davantage de préférence) disposés selon une bonne géométrie ainsi que la possibilité de gérer l'abondance des données de positionnement qui peuvent être recueillies en peu de temps. La plupart des récepteurs GPS offrent la fonction standard d'un positionnement en temps réel par point unique.

Cependant, cette fonction n'empêche pas, toutefois, la nécessité éventuelle de télécharger des données dans un ordinateur à partir d'un récepteur dans le but de gérer des données ou d'intégrer celles-ci à une base de données (figure 2.10c).

Les erreurs qui influent sur le positionnement par point unique peuvent être réduites de façon importante grâce au *positionnement relatif*. La forme la plus simple d'un tel positionnement est réalisée lorsque des corrections aux mesures de code relevées en un emplacement *de contrôle* connu sont apportées aux mesures d'un emplacement *de liaison* inconnu. Ce type de positionnement est appelé *positionnement différentiel*.

Positionnement différentiel

Un *positionnement différentiel* peut être réalisé en traitement après mission ou en temps réel. Le premier traitement est plus simple et moins coûteux, tandis que le second est compliqué en ce qu'il exige une liaison de transmission de données. Les corrections différentielles peuvent s'appliquer aux mesures ou 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. Selon l'une ou l'autre méthode, les coordonnées d'un point utilisé comme station *de contrôle* doivent être connues.

Selon la *méthode par mesures*, la distance «vraie», ρ , entre un satellite et une station de contrôle se calcule comme suit :

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

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

$$\text{erreurs} = P_{rk}^s - \rho_{rk}^s \quad (4.2)$$

où P_{rk}^s représente la distance observée satellite—récepteur et ρ_{rk}^s la «vraie» distance. Étant donné que les principales erreurs relatives aux observations GPS (d'orbite et atmosphériques) influent sur les points situés près de la station de contrôle à peu près dans la même mesure, l'équation (4.1) peut servir à corriger les

observations effectuées à des emplacements voisins. Par conséquent, les erreurs calculées à l'emplacement de contrôle donnent lieu à des corrections différentielles apportées à l'emplacement *de liaison* (aussi appelé emplacement *distant*). C'est là le principe fondamental du positionnement différentiel qu'utilise la méthode par mesures.

Selon la *méthode par position*, la vraie position du récepteur de surveillance (x_{rk}, y_{rk}, z_{rk}) est comparée avec la position calculée en positionnement par point unique (x_r, y_r, z_r). Les erreurs de positionnement qui en résultent (c.-à-d. les différences $x_r - x_{rk}, y_r - y_{rk}, z_r - z_{rk}$) à l'emplacement de contrôle donnent lieu à des corrections différentielles apportées à l'emplacement de liaison. Selon cette méthode, les mêmes satellites exactement doivent être employés aux emplacements aussi bien de contrôle que de liaison. Cette contrainte a pour effet que la non-visibilité d'un satellite en un emplacement peut empêcher l'application réussie de la méthode. En positionnement différentiel, la méthode par mesures est préférable à celle par position.

Plus un emplacement de contrôle est éloigné de celui de liaison, plus les erreurs aux deux emplacements diffèrent et moins est exact le positionnement selon des techniques différentielles. Ainsi, Lachapelle et al. (1991) signalent des exactitudes horizontale et verticale, selon des techniques différentielles et cinématiques par code, d'au-delà de 50 km sur une distance horizontale de 4 m à 9 m et verticale, de 5 m à 11 m (moyennant un coefficient de probabilité de 95 %, une PDOP < 3,0), et de plus de 500 km pour les mêmes composantes respectives de 6-11 m et de 7-12 m.

Pour un positionnement différentiel en *traitement après mission*, un récepteur doit être placé en un point connu et un second, déplacé jusqu'à chaque point. Une fois les données recueillies, elles doivent être combinées sur un ordinateur en vue d'un traitement postérieur (figure 2.10d). L'un des aspects très importants des algorithmes de post-traitement est la synchronisation exacte des observations du récepteur de contrôle avec celles du récepteur de liaison, de manière à calculer et à effectuer les corrections différentielles appropriées. Un autre aspect important en positionnement différentiel est la gestion des données. Jusqu'à des centaines de points peuvent être positionnés en une journée. Il est essentiel que vous disposiez d'une base vous permettant d'étiqueter et d'intégrer toutes ces données.

Comme nous l'avons déjà mentionné, pour effectuer un positionnement différentiel par *traitement en temps réel*, une liaison est indispensable afin de transmettre les données depuis l'emplacement de contrôle jusqu'à celui de liaison (figure 2.10b). Un inconvénient de ce traitement est le délai entre le moment où une mesure GPS est effectuée à l'emplacement de contrôle et celui où elle est envoyée et donne lieu à une correction à l'emplacement de liaison. Le délai peut dégrader l'exactitude légèrement davantage qu'il est possible en traitement après mission. Même s'il est prévu que le positionnement différentiel en temps réel devienne plus plausible au cours des prochaines années en raison des progrès rapides en matière de GPS, la simplicité et le faible coût des techniques post-traitement rendent à l'heure actuelle cette méthode mieux indiquée pour les applications d'analyse des eaux.

4.2 TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT PAR PORTEUSE

Au cours de la dernière décennie, plusieurs techniques ont été élaborées en vue d'utiliser dans le cadre du GPS les observations des phases de la porteuse. Les techniques susceptibles d'être utilisées en analyse des eaux sont la statique, la semi-cinématique et la statique rapide. D'autres techniques utilisant les observations des phases d'une porteuse, notamment la cinématique et la pseudo-cinématique, sont expliquées pour fournir un complément d'information et permettre aux utilisateurs de comprendre ces expressions et de les distinguer d'autres mentionnées dans la documentation.

Avant de nous plonger dans les techniques de porteuse, résumées au tableau 4.2, il est nécessaire de revoir certains éléments sur l'emploi des observations sur la porteuse. Rappelez-vous qu'à la section 2.2 nous avons affirmé que les observations de porteuse permettent une bien plus grande exactitude que celles de code. Par contre, les observations de la porteuse sont compliquées par un nombre inconnu de cycles (ambiguïtés) communiqués au moment où un satellite est pris en poursuite (équation (2.2)). La diversité des techniques portant sur des mesures de la porteuse répond aux façons dont ces ambiguïtés sont traitées.

Notez que toutes les méthodes de positionnement GPS par porteuse illustrées au tableau 4.2 relèvent d'un positionnement relatif et non par point unique (c.-à-d. qu'elles exigent au moins deux récepteurs). Étant donné que les erreurs en positionnement par point unique sont d'une exactitude de loin supérieure à celles des mesures de codes, il n'y a aucun avantage à utiliser en positionnement par point unique les observations plus exactes, mais plus complexes sur la porteuse.

En positionnement relatif à partir d'observations de la porteuse, les ambiguïtés de chaque satellite sont évaluées en même temps que les coordonnées d'une station inconnue relativement à celles d'une autre, connue. En théorie, ces ambiguïtés devraient correspondre à des nombres entiers, puisque, physiquement, elles représentent le nombre entier de cycles entre le satellite et le récepteur dès la synchronisation de celui-ci avec un satellite. Cependant, étant donné les erreurs, les ambiguïtés estimées ne sont habituellement pas exprimées en nombres entiers. Plus les erreurs sont importantes dans les données (p. ex. en raison des différences relatives de l'ionosphère sur de longues distances), plus les ambiguïtés estimées sont susceptibles de s'éloigner de nombres entiers.

Sur de courtes lignes de base (supposons de 10 à 15 km), il peut être possible de décider quels nombres entiers d'ambiguïté sont valides, de maintenir ces ambiguïtés constantes et de résoudre les coordonnées (x, y et z) uniquement pour le point inconnu. Dans de tels cas, où les ambiguïtés peuvent être ramenées à un nombre entier juste, l'exactitude obtenue est beaucoup plus grande. C'est pourquoi les différentes méthodes figurant au tableau 4.2 ont été conçues dans le but d'optimiser la possibilité de réduire les ambiguïtés au bon nombre entier. Nous pouvons maintenant aborder les cinq méthodes mentionnées au tableau 4.2 : statique, cinématique, semi-cinématique, pseudo-cinématique et statique rapide.

Technique statique classique

L'utilisation des observations des phases de la porteuse durant l'occupation simultanée d'emplacements pendant une heure ou plus est parfois désignée comme relevant de la *méthode GPS statique classique*, puisqu'elle correspond à la technique originale utilisée en arpentage GPS. Selon cette technique, les récepteurs suivent les mêmes satellites simultanément pendant au moins une heure. L'une des principales raisons pour occuper les emplacements pendant plus d'une heure (parfois plusieurs heures) est la volonté de tirer profit du changement de géométrie au fur et à mesure que les satellites poursuivent leur trajectoire dans le ciel. C'est ce changement de géométrie qui contribue à résoudre les ambiguïtés et à améliorer la puissance de résolution.

L'exactitude que procure le GPS statique classique varie selon les procédures suivies en observation et en traitement ainsi que la longueur des lignes de base mesurées, entre autres variables. Dans des applications très précises (p. ex. pour les études du déplacement de la croûte terrestre, en levés géodésiques, etc.), des techniques sophistiquées servent à traiter les erreurs de façon particulière (tableau 2.4).

Technique cinématique (fondée sur la porteuse)

Les techniques *cinématiques* (figure 2.9d) utilisant les observations des phases de la porteuse diffèrent de celles qui utilisent les observations de codes en ce qu'elles exigent l'expression des ambiguïtés par des nombres entiers avant de produire des exactitudes de l'ordre du décimètre. Les premières techniques cinématiques GPS exigeaient la résolution de l'ambiguïté avant le déplacement, bien que des moyens de lever ces ambiguïtés en cours de déplacement (dites «à la volée») aient été récemment élaborées (p. ex. Hatch [1991a et 1991b], Remondi [1991]).

Les techniques cinématiques sont parfois qualifiées de *dynamiques* (Kleusberg, 1990) ou de *pures*. Voilà qui distingue les techniques cinématiques des autres, semi-cinématiques qui exigent des arrêts aux divers points à positionner.

Le GPS cinématique utilisant les observations des phases de la porteuse est habituellement appliqué aux endroits où l'on recherche la relation entre des éléments physiques et les données recueillies à bord d'un véhicule en mouvement. Par exemple, le GPS cinématique portant sur les phases de la porteuse a été mis en oeuvre, à bord d'un aéronef, dans le but de fournir les coordonnées de photographies aériennes (Merrell et al. 1990) et, à bord de véhicules routiers, dans le but d'étiqueter et de relever les caractéristiques d'une autoroute (Lapucha et al., 1990).

Technique semi-cinématique

Le GPS *semi-cinématique* est également appelé «marche—arrêt» et a d'abord été mis au point par Remondi (1985). Ce nom révèle peut-être davantage l'aspect physique de cette méthode de positionnement GPS par porteuse, puisque le récepteur de liaison s'immobilise en un point, puis se rend au point suivant et ainsi de suite. L'agencement physique nécessaire au GPS semi-cinématique est identique à celui du GPS cinématique; en effet, un récepteur reste stationné en un point connu pour assurer le *contrôle*, tandis qu'un second assurant la *liaison* se déplace d'un point à l'autre à positionner. Avant que le récepteur de liaison ne commence à se déplacer, les ambiguïtés exprimées par des nombres entiers pour tous les satellites doivent être établies et le récepteur de liaison doit maintenir la synchronisation avec au moins quatre satellites tout en se déplaçant. Le récepteur de liaison se déplace d'un point à l'autre, reste stationnaire jusqu'à 10 secondes au point à positionner, puis passe au point suivant à positionner.

Plusieurs techniques permettent d'établir les ambiguïtés initiales, notamment occuper une ligne de base connue, et une procédure de permutation d'antennes ou une séance d'observation statique classique. Elles sont documentées à l'occasion de la plupart des progiciels de récepteur disponibles sur le marché qui peuvent servir au GPS semi-cinématique.

Les techniques semi-cinématiques comportent pour principale contrainte la nécessité de maintenir la synchronisation avec les satellites pendant le déplacement. Si la synchronisation est interrompue, l'observateur peut avoir à retourner au dernier emplacement connu, où les ambiguïtés peuvent devoir être établies à nouveau. Des obstacles dans la zone de travail tels que des arbres, des ponts ou des immeubles, peuvent empêcher l'application réussie du GPS semi-cinématique. Cependant, dans des zones ouvertes où l'on recherche des paramètres locationnels exacts pour de nombreux points, le GPS semi-cinématique peut se révéler une solution praticable.

Technique 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 emplacements de contrôle et de liaison servent de la même façon qu'en GPS cinématique et semi-cinématique. Cependant, le récepteur de liaison occupe chaque point deux fois pendant quelques minutes, à intervalle minimum d'une heure. Le récepteur n'a pas à suivre les satellites en se déplaçant d'un point à un autre et peut en fait être mis hors fonction.

Le GPS pseudo-cinématique se fonde sur la notion de la résolution des ambiguïtés. Comme nous l'avons déjà mentionné, c'est le changement de géométrie des satellites avec le temps plutôt que le nombre de mesures effectuées qui permet vraiment de résoudre les ambiguïtés. Par conséquent, si l'on combine

deux ensembles de données, chacun d'une durée de quelques minutes pour le même point, mais obtenus à une heure d'intervalle, un nombre suffisant de renseignements demeurent valides pour résoudre les ambiguïtés quant aux nombres entiers et procurer une solution valable quant au 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 beaucoup de cas, le positionnement statique classique ou rapide se sont révélés les meilleurs choix.

Technique statique rapide

L'expression *technique statique rapide* a été forgée dans le but de décrire les procédures de positionnement statique du GPS qui exigent des minutes plutôt que des heures d'observation. Cette technique se fonde sur la résolution réussie des ambiguïtés quant aux nombres entiers de la porteuse sur une très courte période de temps. Une telle résolution des ambiguïtés, qui est faite en si peu de temps et qui ne tire pas profit de la géométrie changeante des satellites au cours de cette période, s'appuie sur des renseignements additionnels et sur des méthodes de traitement sophistiquées. Ces renseignements additionnels peuvent prendre la forme d'observations du code P ou de satellites redondants (p. ex. sept ou huit satellites plutôt que le minimum de quatre).

Les levés statiques rapides peuvent être effectués sur de courtes lignes de base (p. ex. moins de 10 km). Leurs exactitudes sont habituellement de l'ordre de quelques centimètres (rms). La plupart des systèmes statiques rapides disponibles sur le marché s'appuient actuellement sur des observations du code P. Cela est regrettable puisque les récepteurs qui recueillent les observations du code P sont, en général, plus coûteux que ceux qui recueillent le code C/A; de plus, le code P ne doit plus être disponible, est-il prévu, pour des usages civils à la fin de 1993. Les fabricants cherchent maintenant à mettre au point des techniques qui ne dépendraient plus d'observations du code P.

Le positionnement GPS statique rapide est semblable au positionnement semi-cinématique en ce que des récepteurs de contrôle et de liaison y sont employés; toutefois, il n'est pas grevé par la nécessité logistique de suivre des satellites en cours de déplacement entre les divers points à positionner. Espérons que les futurs progrès technologiques offriront une solution durable en GPS statique rapide en vue de l'analyse des eaux.

CHAPITRE 5

PROCÉDURES GPS

Même si les techniques de positionnement GPS varient de façon importante, comme nous l'avons vu au chapitre 4, leurs procédures peuvent être regroupées en quatre phases communes : planification et préparation; opérations 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.

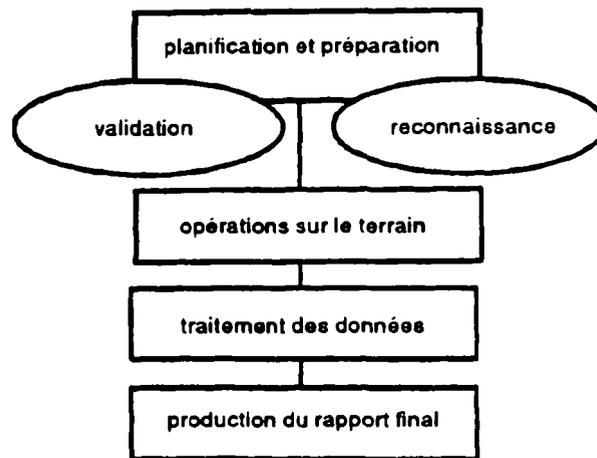


Figure 5.1 Phases d'un projet GPS

Le présent chapitre expose les différentes composantes de chacune de ces phases, puis traite de considérations particulières pour l'emploi du GPS aux fins d'établir des hauteurs 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 lorsque vous êtes entièrement prêt à réussir les opérations sur le terrain. Les différentes étapes intermédiaires varient grandement en importance selon l'ampleur, l'exactitude et le lieu du projet.

Au cours d'une étape préliminaire, les points à positionner et les coefficients d'exactitude nécessaires doivent être formulés. Ensuite, les emplacements à positionner et le canevas d'arpentage disponible doivent être tracés sur une carte. Les cartes topographiques d'EMR aux échelles 1/50 000 et 1/250 000 conviennent bien à cette tâche. Les cartes routières des provinces et des municipalités peuvent également se révéler très utiles. Elles indiquent les distances approximatives entre les points, les données d'accès aux emplacements ainsi que les interférences et les obstacles éventuels et servent de référence tout au long des phases de la planification, de l'exécution du projet ainsi que de la production du rapport final.

Parmi les étapes importantes comprises dans la phase de la planification et de la préparation qui suit, mentionnons le choix de la technique de positionnement, le choix du type de récepteur, la validation, la reconnaissance, la conception de l'arpentage et la préparation. Comme nous le verrons, un bon nombre de ces étapes de planification sont passablement interdépendantes.

Choix d'une technique de positionnement

Beaucoup d'aspects influent sur le choix d'une technique de positionnement, principalement l'exactitude nécessaire, le milieu géographique, la distance entre les points à positionner et les coûts. À partir des tableaux 4.1 et 4.2, la figure 5.2 propose des techniques de positionnement GPS qui permettent de répondre à des spécifications données d'exactitude horizontale.

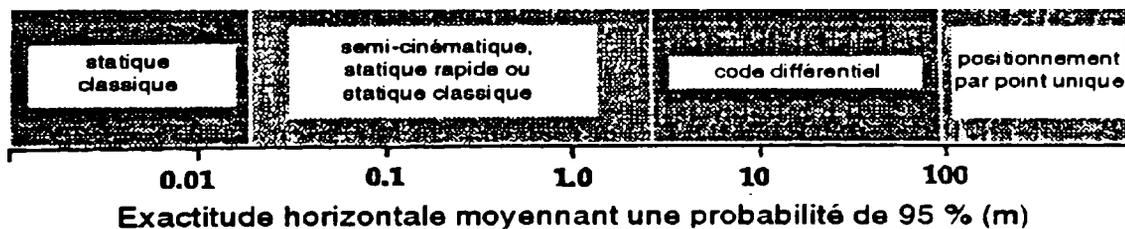


Figure 5.2 Techniques GPS proposées en réponse à des spécifications d'exactitude horizontale

Notez que la figure indique la technique à employer pour atteindre une exactitude donnée plutôt que la fourchette d'exactitude d'une technique. Par exemple, malgré qu'une solution par code différentiel puisse être exacte, soit entre 3 m et 12 m selon la longueur de la ligne de base, on devrait adopter cette solution plutôt que celle par point unique si on désire une exactitude tant soit peu supérieure à 100 m.

La compatibilité des levés GPS semi-cinématiques, statiques rapides ou statiques classiques avec un projet exigeant une exactitude inférieure au décimètre ou au mètre dépend de la nature de l'emplacement observé et de l'espacement des stations. Les levés semi-cinématiques posent le plus grand nombre de contraintes puisqu'ils exigent l'absence de tout obstacle en vue du déplacement d'un point à un autre. Les levés semi-cinématiques conviendraient donc dans le cas où un grand nombre de points doivent être

positionnés dans une zone ouverte, par exemple un grand champ. Les levés statiques rapides doivent, en règle générale, être limités à de courtes lignes de base, si une exactitude du niveau du centimètre 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 longues distances ou moyennant une faible géométrie des satellites, il peut être plus sage de recourir aux techniques GPS statiques classiques.

Notez que la figure 5.2 illustre les techniques relatives à des exactitudes horizontales plutôt que verticales. Les exactitudes verticales correspondantes varient selon que vous recherchez des hauteurs ellipsoïdales ou orthométriques. Leur relation avec la figure 5.2 est exposée à la section 5.4.

Le coût d'un positionnement GPS dépend étroitement de la technique employée, elle-même résultant principalement de l'exactitude exigée. Les deux principales variables dans le coût d'une technique sont le temps nécessaire à chaque emplacement et le coût des récepteurs requis. Règle générale, plus le temps nécessaire à son remplacement est bref, plus le coût d'arpentage est faible. Le type et les coûts du récepteur choisi pour pratiquer la technique de positionnement nécessaire mérite un exposé.

Choix du type de récepteur

Les récepteurs GPS peuvent être loués ou achetés. Quel que soit le cas, nous recommandons que tous les récepteurs employés en positionnement relatif soient de la même marque, si vous voulez éviter des problèmes résultant souvent d'un mélange de types de récepteurs, par exemple des erreurs systématiques, des complications dans le traitement des données et des incompatibilités de débit.

Le récepteur employé doit être capable de recueillir les mesures nécessaires à la technique de positionnement adoptée. Le tableau 5.1 présente un synopsis de la partie du signal GPS nécessaire aux différentes techniques. En positionnement aussi bien par point unique que par code différentiel, un récepteur qui utilise des mesures de code suffit. (Notez que certains récepteurs utilisent des mesures de porteuse dans le but d'atténuer les mesures de code et d'améliorer l'exactitude résultante. Cette technique sert avant tout en levés cinématiques.)

En levés GPS semi-cinématiques, statiques rapides et statiques classiques, on doit utiliser les mesures par code et par porteuse. Pour des lignes de base courtes et moyennant des techniques classiques, des récepteurs à fréquence unique suffisent. En GPS statique classique et pour de longues lignes de base pour lesquelles vous recherchez une grande exactitude, il est souhaitable d'utiliser des récepteurs à double fréquence puisqu'ils permettent de corriger la plupart des erreurs ionosphériques. Pour des levés statiques rapides, il est fortement recommandé d'utiliser des récepteurs à double fréquence puisqu'ils permettent d'utiliser des méthodes de traitement des données sophistiquées en vue de résoudre des ambiguïtés et offrent donc de biens meilleures chances de succès.

Tableau 5.1 Mesures GPS nécessaires pour les différentes techniques de positionnement

Méthode	Mesures GPS nécessaires
Positionnement par point unique	Code
Code différentiel	Code
Semi-cinématique	Code et porteuse
Statique rapide	Code et porteuse, de préférence en double fréquence
Statique classique	Code et porteuse, en double fréquence pour de longues lignes de base

La figure 5.3 indique des coûts représentatifs pour récepteurs avec code de collecte des données, code L1 et porteuse ainsi que mesures en double fréquence. La vaste gamme des prix pour des récepteurs à code L1 et à porteuse ou encore à double fréquence peut être principalement attribuée à d'autres caractéristiques que le type de mesures recueillies par ces appareils.

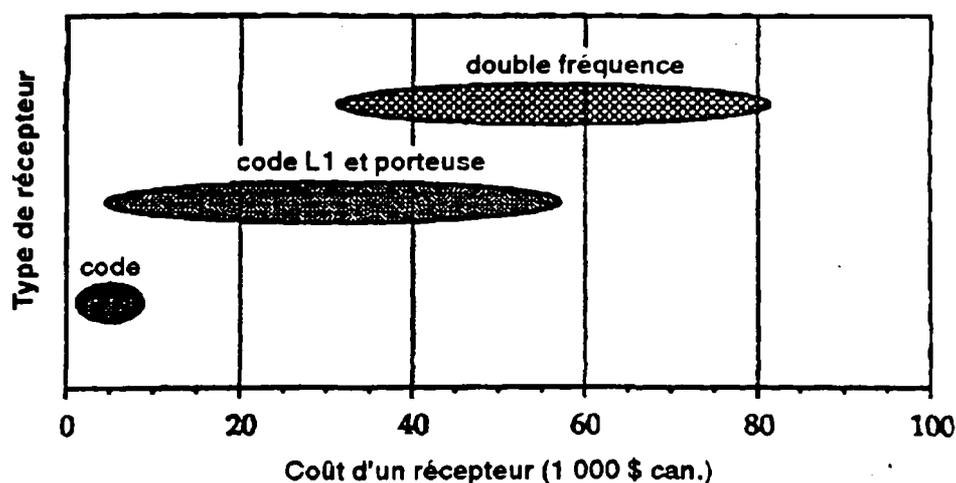


Figure 5.3 Coûts représentatifs d'un récepteur en janvier 1992

Les coûts représentés à la figure 5.3 sont très généraux et fournis dans le but de montrer l'écart important entre les coûts, si vous passez du positionnement à faible exactitude par des mesures de codes à des levés plus exacts qui exigent des mesures de porteuse, voire des récepteurs à double fréquence. Les données de ce graphique ont été extraites d'une étude sur les récepteurs publiée dans *GPS World* (Arradondo-Perry, 1992). Pour obtenir des renseignements détaillés sur les coûts d'un récepteur, vous

pouvez consulter des études de prix semblables à la suivante, publiées de façon régulière. Une tendance à une diminution des prix pour les récepteurs GPS a été enregistrée et nous prévoyons qu'elle se maintiendra.

Le choix d'un récepteur peut se révéler un processus complexe en raison du grand nombre de récepteurs GPS maintenant disponibles et de toute la gamme de leurs possibilités ainsi que des applications auxquelles ceux-ci sont destinés. La figure 5.4, qui énumère un grand nombre d'éléments dont il faut tenir compte, devrait vous faciliter ce choix. Cette liste est incomplète et ne vise qu'à vous orienter. Évidemment, la priorité accordée à chaque aspect dépend de l'application recherchée.

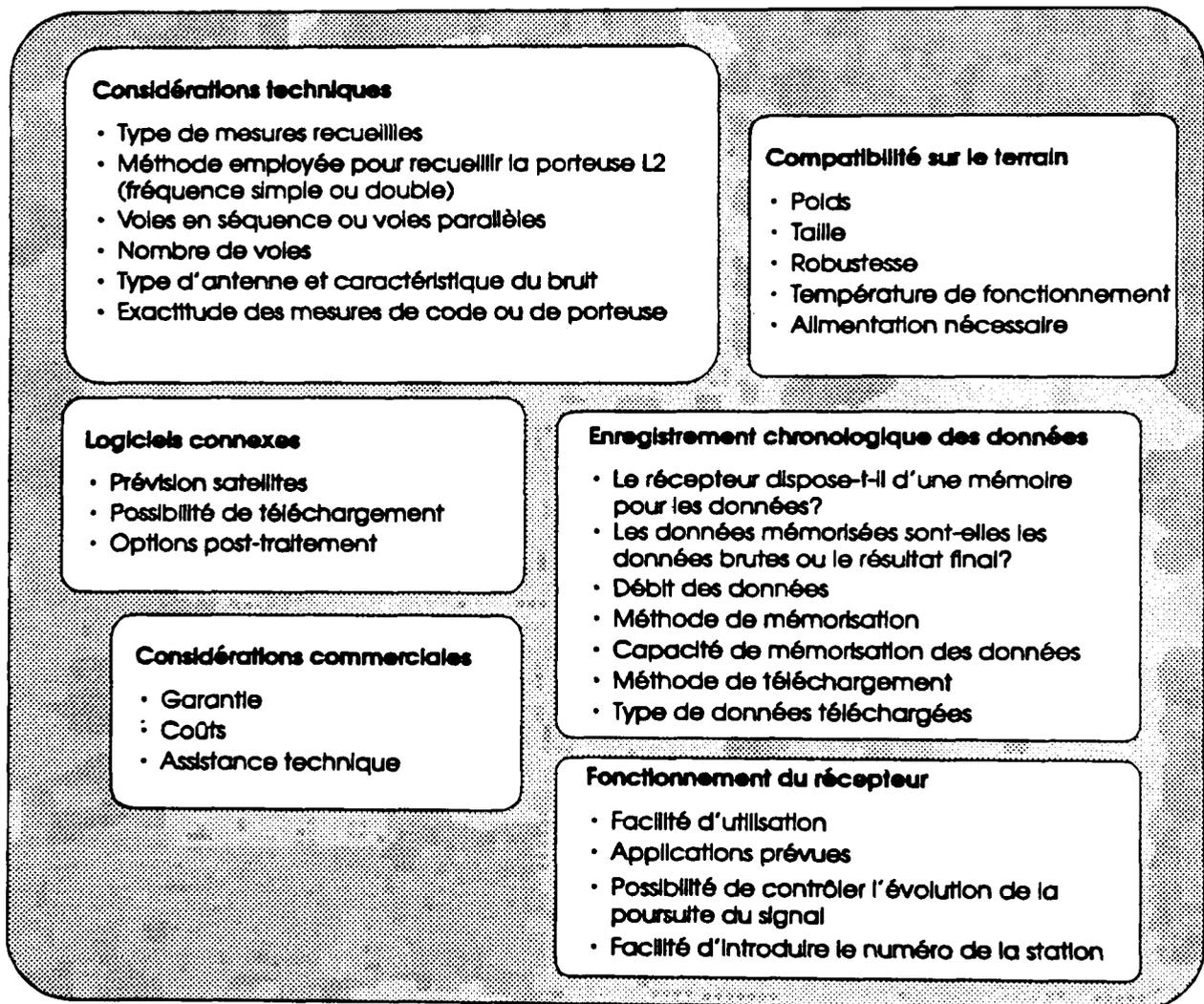


Figure 5.4 Facteurs à considérer dans le choix d'un récepteur

Certains facteurs des «considérations techniques» mentionnées à la figure 5.4 méritent une explication. Il s'agit des méthodes servant à recevoir la porteuse L2, du nombre de voies et de l'exactitude des mesures.

Les différents types de récepteurs à double fréquence se distinguent par la méthode qu'ils emploient pour recevoir la porteuse L2, celle-ci déterminant la qualité des mesures résultantes du signal. Les mesures de la meilleure qualité sont recueillies par des récepteurs qui perçoivent également le code P. Étant donné que ce code ne sera plus disponible à des fins civiles, plusieurs fabricants sont à élaborer des techniques de remplacement en vue d'une réception de grande qualité des données de la porteuse L2. Vous devriez vous enquérir de ces techniques au moment de choisir un récepteur à double fréquence.

Un autre aspect technique important qui distingue les récepteurs est la façon dont ceux-ci suivent plusieurs satellites en même temps. Deux des techniques employées reposent respectivement sur des voies en séquence et des voies parallèles. Grâce à des techniques de mise en séquence, deux ou plusieurs satellites sont suivis à la suite sur la même voie. Un satellite est suivi durant une courte période, puis l'autre, et ainsi de suite jusqu'à ce que le premier satellite soit suivi à nouveau. Un inconvénient des récepteurs de mise en séquence est la difficulté de maintenir la synchronisation avec un satellite tout au long du processus de mise en séquence, ce qui donne un positionnement moins fiable. Par des voies parallèles, le récepteur suit simultanément plusieurs satellites en permanence, une voie étant assignée à chaque satellite. Les récepteurs à voies parallèles assurent, en général, une meilleure synchronisation que ceux à voies en séquence. Un récepteur à fréquence unique et à voies parallèles peut habituellement suivre un nombre de satellites égal au nombre de voies. Comme nous l'avons souligné à la section 2.4 portant sur la géométrie des satellites, plus les satellites suivis en même temps sont nombreux, meilleur est le résultat. L'idéal serait un récepteur doté d'un nombre suffisant de voies (huit ou plus) pour suivre tous les satellites visibles.

La dernière considération technique que nous allons aborder est l'exactitude des mesures de code et de porteuse. Les différentes exactitudes mentionnées aux tableaux 4.1 et 4.2 constituent des objectifs généraux qui peuvent être atteints moyennant différentes techniques. Cela ne veut pas dire que tous les récepteurs fonctionnant selon la même méthode produisent des résultats d'égale qualité. L'un des facteurs de variation des exactitudes possibles est l'exactitude avec laquelle un récepteur peut mesurer un code et une porteuse.

Les autres aspects dont il faut tenir compte dans le choix d'un récepteur sont plus évidents et ne sont pas abordés. Cependant, l'une des étapes très importantes au moment d'évaluer les différents types de récepteurs aussi bien que leur méthode de fonctionnement et leur traitement est le processus de validation.

Validation

Au moment de planifier un projet GPS, vous devez tester les procédures et l'équipement à employer, depuis la collecte des données jusqu'au résultat final, afin de vérifier si ceux-ci peuvent vous fournir de façon

fiable les coefficients d'exactitude voulus. Nous appelons ces tests «processus de validation». Toutefois, si un utilisateur a déjà employé avec succès les mêmes procédures et le même équipement GPS pour une application semblable, vous n'avez peut être pas à effectuer une nouvelle validation.

Trois composantes principales servent à tester le processus de validation : la technique de positionnement adoptée, l'équipement à employer 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 récemment élaborée. Quel que soit le cas, vous devez vérifier si la méthode peut répondre de façon fiable à vos besoins d'utilisateur. L'équipement GPS varie grandement en complexité, en coût et en possibilités. Nul ne peut supposer que tous les coefficients d'exactitude mis de l'avant par les fabricants d'un équipement ou par tout autre utilisateur seront obtenus de façon constante dans toutes les conditions d'exploitation sur le terrain; il importe donc de mettre à l'essai et d'évaluer l'équipement. Pour les mêmes raisons, il importe de tester et d'évaluer le logiciel de traitement et les techniques GPS.

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 en exploitation, de rationaliser les opérations et de vérifier les coefficients d'exactitude que vous pouvez espérer grâce aux procédures testées. Le concept de validation est résumé à la figure 5.5.

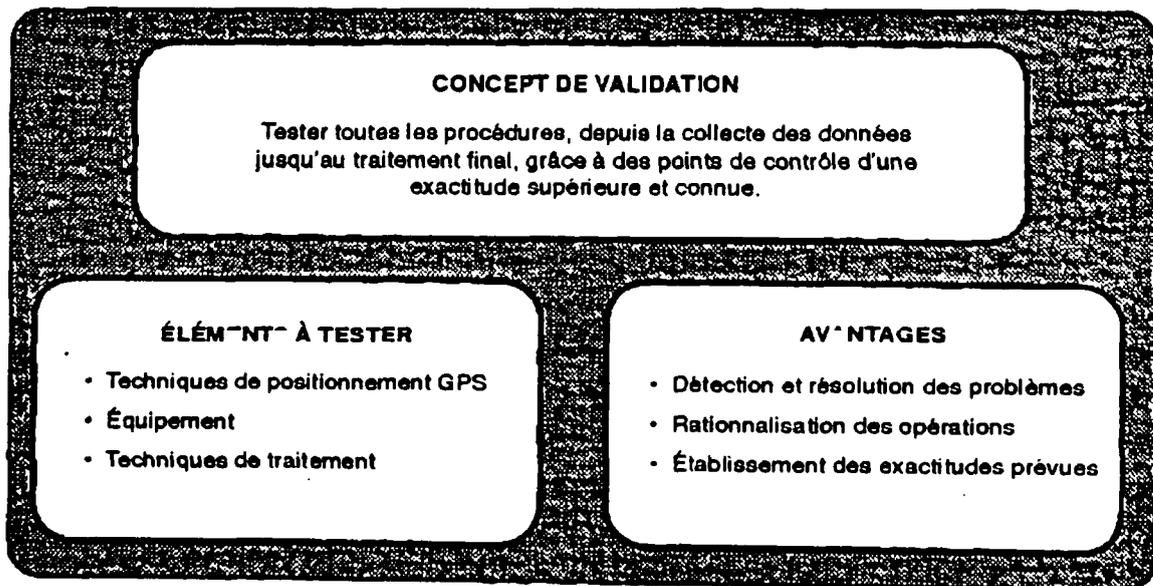


Figure 5.5 Concept de validation

La validation doit être effectuée à l'aide de points dont les coordonnées connues sont d'une exactitude supérieure à celle que vous souhaitez pour le projet. La distance entre les points doit être représentative de la distance prévue dans l'exécution réelle des levés.

Dans le but d'instaurer une norme d'essai pour les levés GPS (particulièrement ceux à haute précision), la Division des levés géodésiques, en collaboration avec des organismes provinciaux, a créé plusieurs réseaux de base GPS à travers le pays. Chacun de ces réseaux compte de six à huit points de repère marqués et dotés d'un montant à centrage forcé, distants entre eux de 2 à 50 km dans la plupart des endroits. De plus, chaque réseau de base comprend une ligne de base qui permet de calibrer un dispositif électronique de mesure des distances (EDM) et qui permet de choisir des lignes de base plus courtes. Pour de plus amples renseignements sur les réseaux de base canadiens, vous pouvez communiquer avec la Division des levés géodésiques.

D'autres solutions permettent de valider des levés, en particulier ceux de faible exactitude. Ainsi, les bornes–signaux existantes servant au contrôle de grande exactitude peuvent être utilisées. Vous pouvez vous procurer, auprès de la Division des levés géodésiques les descriptions, les coordonnées et l'exactitude des diverses bornes–signaux de contrôle dans une zone donnée (voir l'appendice D).

La validation est une étape importante pour l'évaluation et l'information obtenue en retour dans la planification d'un projet. Une autre étape aussi importante, qui apporte beaucoup d'information en retour au 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. Vous devez vérifier si les emplacements conviennent au GPS, si un canevas est disponible ainsi que les exigences logistiques qu'ils posent. Le tableau 5.2 énumère les composantes clés de la reconnaissance d'un terrain.

Un bon emplacement GPS doit être exempt de tout obstacle et de toute interférence. Reconnaître un terrain peut vous permettre de relever les interférences et les obstacles éventuels et d'y échapper en choisissant un autre emplacement ou encore en établissant des points de repère excentriques. Comme nous l'avons vu à la section 2.4, les obstacles obstruent la ligne de visée entre un satellite et un récepteur et empêchent, ainsi, la bonne réception du signal. Si vous voulez éviter que la visibilité d'un satellite ne soit obstruée, vous devriez, dans l'idéal, choisir un emplacement exempt de tout obstacle dans toutes les directions au-dessus d'une élévation de 15 degrés. Dans des conditions imparfaites où se trouvent quelques obstacles, un positionnement peut être réussi si un nombre suffisant de satellites disposés selon une géométrie adéquate peuvent être suivis. Pour des levés à base d'observations de la porteuse ou pour des points de repère de base dans des levés différentiels à base d'observations de code, vous devez rechercher des emplacements exempts de tout obstacle. Les techniques de positionnement par code s'accommodent plus facilement, en général, des obstacles que les techniques fondées sur une porteuse, puisqu'elles sont exemptes de *glissements de cycles* (section 2.5).

Tableau 5.2 Reconnaissance du terrain

Vérifier si l'emplacement convient au GPS	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'obstacles? - Présence d'interférences?
Vérifier les éléments de contrôle	<ul style="list-style-type: none"> - Les points de repère sont-ils localisés? - Les bornes-signaux sont-elles 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'un autre emplacement, au besoin - Établissement, au besoin, des points de repère excentriques - Consignation des résultats - Mise à jour des descriptions, le cas échéant

Notez que l'angle d'élévation des obstacles doit être établi en fonction de la hauteur de l'antenne envisagée plutôt que du niveau du sol. Habituellement, une antenne sur trépied possède une hauteur de 1 m à 1,5 m. Cependant, certains fabricants offrent des perches destinées à élever les antennes à des hauteurs bien supérieures afin de limiter les obstacles en levés à faible exactitude.

L'interférence des signaux GPS peut prendre la forme d'une *propagation par trajets multiples* ou d'une interférence électrique. Une propagation par trajets multiples dégrade l'exactitude possible dans le GPS (section 2.5). Vous pouvez réduire la possibilité d'interférence importante 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 faisceaux hertziens, les répéteurs radio et les lignes électriques haute tension.

Au cours de la reconnaissance du terrain, vous devez vérifier si les points de repère de contrôle dont l'utilisation est prévue peuvent être trouvés, s'ils sont stables et s'ils conviennent aux observations GPS. Si aucun contrôle n'est disponible dans la zone visée de manière à assurer, par exemple un point de repère de contrôle en levé différentiel, vous pouvez souhaiter établir un nouveau point par levé GPS statique classique grâce au canevas offert dans le voisinage. Si un canevas altimétrique est disponible dans la zone visée, mais que celui-ci ne convienne pas au GPS, vous pouvez vouloir établir un point de contrôle excentrique qui convienne au GPS par une mise à niveau entre des points existants et de nouveaux. Quel que soit le cas, vous devez vous rappeler que l'exactitude d'un point de contrôle excentrique ne possède pas une valeur supérieure à celle du mode de liaison depuis le point de repère excentrique jusqu'au point de départ.

Une telle reconnaissance fournit également de précieux renseignements sur les besoins logistiques. Le mode de transport et le temps nécessaire pour marcher d'un point à un autre influent beaucoup sur le coût et la logistique d'un levé donné. De même, vous devez noter toutes les contraintes afin de réussir la planification. Par exemple, vous pouvez évaluer la possibilité de procéder à des levés semi-cinématiques ou statiques rapides, la nécessité d'utiliser des perches extra-grandes pour y monter l'antenne ou encore la nécessité de prendre des mesures de sécurité pour certains emplacements situés près des routes.

La reconnaissance sur le terrain a pour résultat final un ensemble de points prêts en vue d'observations GPS de même qu'une description à jour de chaque emplacement, les données pour y accéder et une description des différentes mesures particulières à adopter.

Conception du levé

Une autre étape importante dans le processus de planification et de préparation est la conception du levé. Vous devez y tenir compte des aspects suivants : spécifications de contrôle, configuration du réseau et redondance. Évidemment, la conception du levé varie grandement selon l'exactitude recherchée et la technique de positionnement GPS employée. Le tableau 5.3 résume les spécifications de contrôle et la configuration du réseau pour différents types de positionnement.

Tableau 5.3 Spécifications de contrôle et configuration du réseau

Technique	Spécifications de contrôle	Configuration du réseau
Point unique	Aucune	Sans objet
Code 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 par point unique, les points de contrôle ne sont pas nécessaires (section 2.3). Étant donné que ce type de positionnement est absolu plutôt que relatif, la configuration du réseau ne s'applique pas et seul un récepteur est indispensable.

Le positionnement différentiel nécessite au moins un point de repère de contrôle tridimensionnel. Ce point doit posséder des coordonnées NAD83 bien établies (section 3.3) de même qu'une hauteur

ellipsoïdale (section 3.2). C'est pourquoi les levés différentiels prennent habituellement la forme du réseau radial illustré à la figure 5.6.

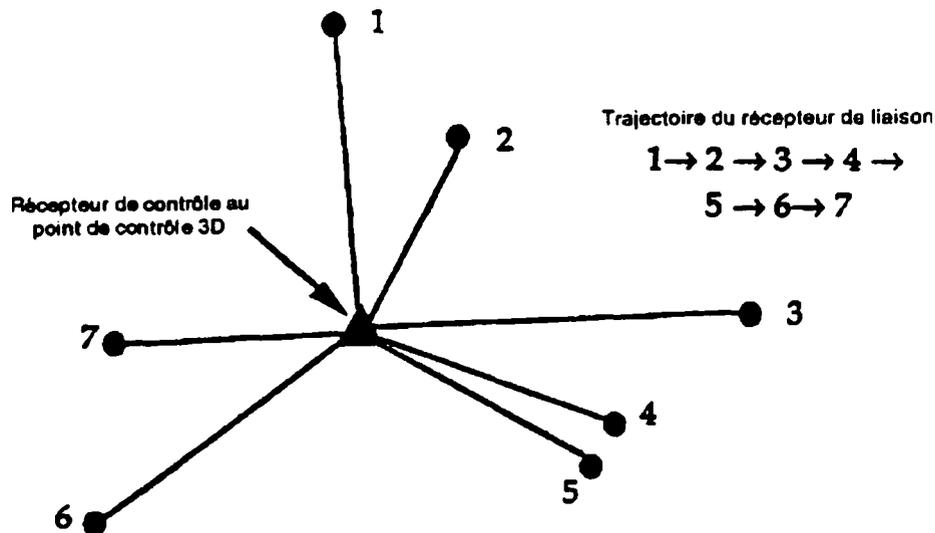


Figure 5.6 Configuration d'un réseau radial

Comme l'indique la figure, le récepteur de contrôle suit continuellement le point de contrôle tridimensionnel au fur et à mesure que le récepteur de liaison se déplace d'un point à positionner à un autre (c.-à-d. du point 1 au 2, puis au 3, etc.). Des liaisons directes sont établies entre chaque point et le point de contrôle plutôt qu'entre points adjacents. (Deux points sont directement reliés si les observations GPS sont recueillies simultanément à chaque point et traitées ensemble.) Il s'ensuit que l'exactitude relative entre des points adjacents non reliés est très faible.

Cette notion peut être mieux expliquée par consultation directe de la figure 5.6. Dans cette figure, les exactitudes relatives entre le point 4 et le point de contrôle, puis entre le point 5 et le point de contrôle seraient bonnes puisque chaque point est directement relié, tandis qu'elles seraient faibles entre les points 4 et 5 puisque ceux-ci ne sont pas directement reliés. La faiblesse de la configuration d'un réseau radial ne constitue pas un très gros problème en positionnement différentiel, étant donné la faible exactitude obtenue par cette technique.

En levés GPS statiques classiques, au moins trois points de repère de contrôle connus et tridimensionnels ou une combinaison équivalente de points de contrôle horizontaux et verticaux devraient être employés.

Des figures géométriques fermées doivent être utilisées en configuration de réseau pour des levés GPS statiques classiques. Les lignes directrices sur la conception de tels réseaux pour des levés statiques figurent dans le document intitulé «Directives et spécifications concernant les levés avec le Système

de positionnement global (GPS)» (Division des levés géodésiques, 1992) et comprennent entre autres les suivantes :

- 1) Chaque point de repère doit être lié directement à au moins deux autres dans le réseau.
- 2) Les points de repère adjacents doivent être liés directement.
- 3) Chaque séance d'observation doit avoir en commun au moins une ligne de base avec une autre séance.

La figure 5.7 fournit l'exemple de la conception d'un réseau selon ces lignes directrices. Notez que les points à y positionner (de 1 à 7) sont identiques à ceux de la configuration en réseau radial fournie comme exemple à la figure 5.6. Deux points de repère de contrôle tridimensionnels et additionnels ont été inscrits, ce qui donne le total des trois nécessaires (c.-à-d. C1, C2 et C3).

L'exemple suppose que quatre récepteurs (A, B, C et D) sont disponibles pour chaque *séance d'observation*. Les emplacements observés ensemble en une même séance sont reliés par le même type de lignes dans le schéma du réseau et sont également énumérés dans le tableau adjacent. Pour la clarté de l'illustration, les lignes de liaison ne montrent qu'entre quatre et six connexions directes effectuées au cours de chaque séance d'observation. Par exemple, à la séance 1, les liaisons directes C1 à 2 et 1 à 7 ne figurent pas.

Pour des raisons de clarté encore, les séances 6 et 7 du tableau ne sont pas représentées sur le schéma du réseau à la figure 5.6. Ces séances peuvent ou non être employées selon la profondeur et la redondance souhaitées dans les observations. Ces deux dernières séances servent deux fins. Premièrement, en incluant ces dernières séances, chaque point de contrôle est observé au moins deux fois, ce qui procure de la redondance ainsi qu'un moyen de détecter les erreurs d'inattention. Deuxièmement, tous les points de contrôle horizontaux sont reliés directement. Cet aspect est utile en levés de grande exactitude pour contrôler les erreurs qui peuvent résulter d'un contrôle horizontal moins exact que le levé GPS.

Il existe de nombreuses autres manières de concevoir le réseau géométrique illustré à la figure 5.7. Le but recherché est d'expliquer le principe sur lequel se fonde la conception d'un réseau plutôt que de formuler des règles rigides. Les contraintes logistiques relevées à partir de la carte et à l'occasion de la reconnaissance d'un terrain influent grandement sur le schéma des séances conçues, tout comme le nombre de récepteurs à employer, le personnel disponible et le reste.

Les spécifications nominales pour les levés semi-cinématiques et rapides varient et, en général, ne sont pas aussi élaborées que celles des levés GPS différentiels et statiques classiques. Pour cette raison et selon les spécifications d'un projet, les éléments de conception, de contrôle et du réseau peuvent différer de d'autres, employés pour des levés différentiels et des levés GPS statiques classiques.

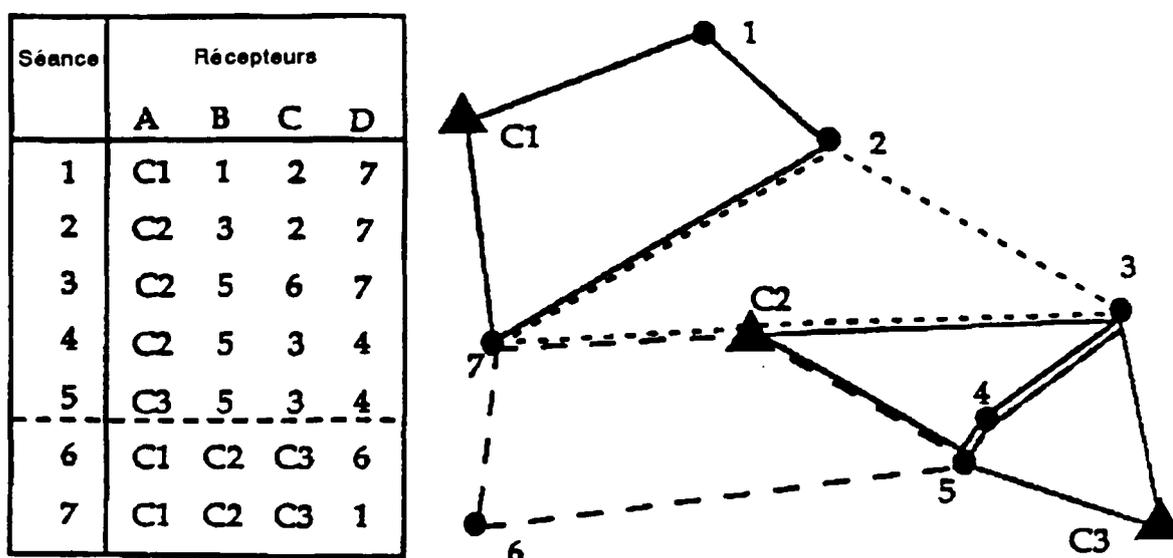


Figure 5.7 Configuration GPS statique classique

Du point de vue opérationnel, la configuration en réseau radial est la plus attrayante puisqu'elle permet au récepteur de liaison de se déplacer rapidement et facilement entre des points adjacents pendant qu'un récepteur de contrôle est mis en place au point de contrôle. Du point de vue exactitude, la configuration radiale est moins souhaitable parce qu'elle renferme la possibilité d'une réduction des exactitudes relatives entre des points de repère adjacents non reliés. Un compromis entre ces deux techniques de réseau, peut-être mieux adapté aux levés semi-cinématiques et statiques rapides, consisterait à prévoir deux points de repère de contrôle ou davantage et un ou deux récepteurs de liaison. Il reste encore du travail à effectuer au sujet de cette zone.

Préparations

Jusqu'à présent, 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 du levé. Plusieurs aspects de la préparation restent à mentionner, et c'est pourquoi ils sont énumérés ci-dessous :

- Établir les meilleurs *créneaux* disponibles pour recueillir des données GPS, compte tenu de la disponibilité et de la géométrie des satellites (voir la section 2.4).
- Décider du nombre optimal de récepteurs et de préposés GPS pour le projet et prendre les arrangements nécessaires.

- Planifier la conception du levé, en tenant compte des spécifications 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 unique de numérotation ou de désignation qui permette d'identifier clairement les différents cycles positionnés sur le terrain et qui contienne les fichiers informatiques de ceux-ci, leurs positions et leurs caractéristiques connexes.
- Prévoir 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.
- Prévoir le logement sur le terrain, au besoin.
- Préparer tout l'équipement et toutes les fournitures nécessaires à l'appui des activités GPS sur le terrain.

Vous devez apporter une attention particulière au fonctionnement des récepteurs. Beaucoup de récepteurs possèdent des options dont vous n'avez pas besoin pour une application particulière. Étant donné que les manuels fournissent les instructions sur le fonctionnement des différents composants d'un récepteur plutôt que seulement sur ceux qui vous intéressent, nous vous recommandons d'en extraire un ensemble d'instructions adaptées et condensées qui indiquent la façon exacte dont le récepteur doit être utilisé sur le terrain. De cette manière, chaque observateur disposera des feuilles d'instructions précises et des manuels du récepteur (où il pourra trouver les renseignements et les données de dépannage qui ne figurent pas sur les feuilles d'instructions).

Une foule de renseignements peuvent être consignés sur la carte du projet, ce qui en fait une source de référence précieuse pour la préparation en vue du terrain. La carte de base doit porter les points de contrôle et les points de repère à positionner, adéquatement identifiés. Une couche de données peut contenir les contraintes logistiques relevées en reconnaissance. La couche suivante peut illustrer la conception du réseau, notée à l'aide d'une couleur différente pour chaque séance (comme à la figure 5.7), et la dernière couche peut révéler les séances d'observation déjà effectuées sur le terrain.

À la fin de la planification et de la préparation, vous devriez être entièrement prêt pour des opérations réussies sur le terrain.

5.2 OPÉRATIONS SUR LE TERRAIN

Grâce à une bonne planification et à une bonne préparation, les opérations sur le terrain devraient se dérouler relativement bien. Habituellement, les tâches sur le terrain sont réparties entre un chef d'équipe,

des observateurs et un responsable du traitement des données. Selon l'ampleur et les techniques du projet, ces groupes de tâches peuvent être assumés par une seule personne ou répartis entre un grand nombre de personnes. Le tableau 5.4 présente un aperçu de certaines des principales tâches à réaliser sur le terrain, puis suit l'exposé de chacune d'entre elles.

Tâches du chef d'équipe

La responsabilité du chef de l'équipe est de veiller à ce que tous ses équipiers possèdent la formation, l'équipement et les renseignements 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 quel point de repère et à quel moment; (2) se tenir au courant de toute difficulté relative aux 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 observer à quel point de repère et à quel moment, est très important dans le GPS puisque les observations doivent y être effectuées au cours des créneaux de géométrie optimale des satellites et que les observations simultanées à différents emplacements sont essentielles en positionnement relatif. L'horaire quotidien doit être exactement conforme à la conception antérieure du levé (p. ex. figure 5.6 ou 5.7). L'horaire doit indiquer à chaque observateur à quel endroit il doit se trouver, à quelle heure et pendant combien de temps. La description de chaque point de repère établi en reconnaissance doit être communiquée aux observateurs. Si plusieurs séances d'observation ont lieu le même jour, il faut prévoir le temps nécessaire pour un déplacement sûr d'un point de repère à un autre entre les séances. Si les communications sont assurées entre les observateurs et le chef d'équipe sur le terrain (peut-être grâce à des postes téléphoniques cellulaires), il est possible d'y modifier les plans selon l'évolution signalée.

De temps à autre, des difficultés relatives aux satellites ou des orages géomagnétiques peuvent influencer sur le succès d'un positionnement GPS. Vous pouvez obtenir l'état d'un satellite auprès du Centre d'information GPS (voir l'appendice B). Au besoin, vous pouvez utiliser ces renseignements pour modifier à l'avance les horaires d'observation. Si, par exemple, le satellite que vous avez prévu utiliser n'est pas en état de marche, vous pouvez calculer de nouvelles prédictions relatives aux satellites mais en omettant celui-ci et l'horaire des observations peut être modifié en conséquence.

L'ionosphère peut également poser des difficultés en applications GPS, particulièrement aux latitudes élevées dans la zone aurorale (voir l'appendice C) où l'activité géomagnétique est très intense. Rappelez-vous (section 2.5) que l'ionosphère est une couche d'électrons libres qui provoque des erreurs dans la mesure des signaux GPS. Cette couche d'électrons est plus irrégulière en régions septentrionales. À l'occasion, des orages géomagnétiques, marqués d'un niveau plus élevé d'irrégularités ionosphériques, s'étendent aux latitudes plus méridionales et bouleversent les observations GPS. Le chef d'équipe doit donc

Tableau 5.4 Tâches à accomplir sur le terrain

	Tâches
Chef d'équipe	<ul style="list-style-type: none"> • Ordonnancer les observations conformément au plan. • Vérifier si l'observation des satellites ne pose aucun problème, s'il n'y a pas d'orages géomagnétiques. • Évaluer les résultats quotidiens et modifier les plans, au besoin. • Résoudre toutes les difficultés logistiques.
Observateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Vérifier s'il possède tout l'équipement nécessaire. • Vérifier si la batterie du récepteur est chargée à fond. • Prévoir suffisamment de temps pour se déplacer jusqu'à un emplacement. • Vérifier s'il occupe le bon point repère. • Mettre à niveau, centrer et orienter l'antenne GPS en fonction du jalon. • Mesurer la hauteur de l'antenne. • Initialiser le récepteur. • Surveiller le fonctionnement du récepteur et l'enregistrement des données. • Établir le relevé des observations au point de repère. • Soumettre les données et les relevés au responsable du traitement à la fin de chaque jour.
Responsable du traitement des données	<ul style="list-style-type: none"> • Vérifier les données soumises. • Télécharger des données. • Réaliser une copie de secours des données brutes. • Organiser toutes les données (gérer celles-ci). • Traiter les données GPS. • Effectuer les ajustements nécessaires aux différentes séances, le cas échéant. • Vérifier les résultats et les communiquer au chef d'équipe.

être au courant de tout orage géomagnétique et prévoir les mesures nécessaires. Vous pouvez obtenir les prédictions d'activité géomagnétique au Canada auprès du Service des prévisions géomagnétiques, Division de la géophysique, EMR (voir l'appendice C).

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

Le chef d'équipe doit prévoir une solution pour toute contrainte logistique susceptible de se manifester au cours d'un projet sur le terrain, depuis la difficulté d'avoir accès à un point de repère 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.

La préparation nécessaire avant le départ pour une journée d'observation est assez simple, mais peut conduire à l'échec si elle n'est pas effectuée avec soin. L'observateur doit prévoir son trajet et estimer généreusement le temps nécessaire pour se déplacer jusqu'aux différents emplacements. Il doit réunir tout l'équipement nécessaire, la description des emplacements et les relevés d'observation. Les batteries de récepteurs doivent être chargées à fond.

À chaque emplacement sur le terrain, l'observateur doit réaliser une série d'étapes pour se préparer aux observations GPS. Premièrement, il doit vérifier s'il se trouve au bon emplacement. Il peut esquisser la formulation et la numérotation qui figurent sur une borne-signal (le cas échéant) pour prouver, au bureau, qu'il s'est trouvé au bon emplacement.

L'étape suivante consiste à régler l'antenne GPS sur le jalon et à mesurer la hauteur de celle-ci depuis le centre de la phase de l'antenne jusqu'au jalon. Le degré d'exactitude nécessaire pour centrer une antenne sur le jalon d'arpentage varie selon la méthode de positionnement GPS employée. Évidemment, il n'est d'aucune utilité de centrer l'antenne d'un récepteur de liaison en levé différentiel sur un jalon au millimètre près si une exactitude de quelques mètres seulement est prévisible.

Pour des levés de grande exactitude, l'antenne GPS doit être centrée sur le jalon au moyen d'un triangle à vis calantes sur trépied. Le triangle permet de mettre à niveau l'antenne et de centrer celle-ci avec exactitude sur le jalon d'arpentage. Vous devez vérifier régulièrement si les triangles à vis calantes sont bien calibrés. La plupart des antennes conçues pour recueillir des observations de phase de porteuse possèdent un indicateur Nord sur leur boîtier. Cet indicateur doit être orienté vers le nord sur toutes les antennes qui recueillent simultanément des données. Cette orientation physique commune de toutes les antennes permet de réduire le plus possible les erreurs systématiques qui peuvent résulter d'une variation du centre de phase sur des antennes de la même marque. (Cependant, elle ne peut servir à corriger les erreurs systématiques provenant d'une combinaison de plusieurs types d'antennes utilisées au cours d'une même séance d'observation.)

Mesurer la hauteur de l'antenne est la tâche à laquelle l'observateur doit apporter un soin particulier étant donné la possibilité d'erreurs d'inattention. La hauteur de l'antenne est la distance verticale entre le jalon et le centre de la phase de l'antenne. La plupart des mesures de hauteurs d'antennes sont effectuées en deux étapes : la distance verticale depuis le jalon d'arpentage jusqu'à la base de l'antenne est mesurée, puis la hauteur connue (fournie par le fabricant) entre la base de l'antenne et le centre de phase de celle-ci est ajoutée (voir la figure 5.8).

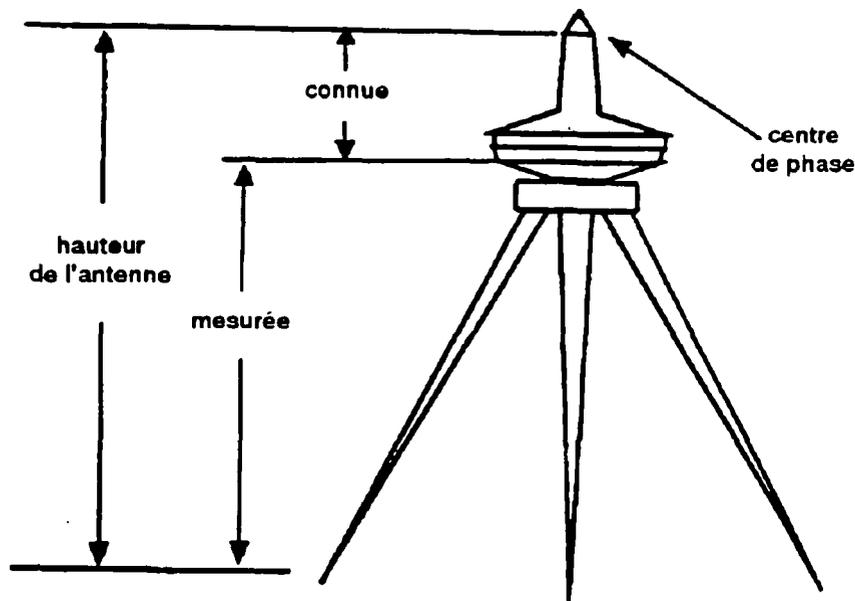


Figure 5.8 Mesure de la hauteur de l'antenne

Pour la plupart des récepteurs, une méthode est prévue pour mesurer la hauteur de l'antenne. Lorsqu'il est impossible d'effectuer des mesures verticales directes, vous pouvez prendre des mesures des hauteurs obliques, puis calculer la distance verticale au moyen du théorème de Pythagore. Autrement dit,

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

Dans tous les cas, vous devez effectuer des mesures redondantes de la hauteur de l'antenne. Si vous établissez des hauteurs obliques, vous devez mesurer celles-ci de chaque côté de l'antenne. La hauteur de l'antenne doit être mesurée au début, mais également à la fin des périodes d'observation. Quelle que soit la méthode employée pour mesurer la hauteur de l'antenne, cette méthode doit être clairement consignée pour éviter toute interprétation erronée de la part du responsable du traitement des données.

Pour certains levés différentiels, semi-cinématiques et statiques rapides, l'antenne aux emplacements de contrôle et de liaison doit être fixe sur une perche de hauteur constante qui permet la mise à niveau approximative sur place grâce à une bulle à point de référence. Dans de tels cas, la hauteur de l'antenne

n'a pas à être mesurée comme tel, puisqu'elle devrait être identique à tous les points et devrait, donc, s'annuler en calcul de différences.

Une fois l'antenne bien centrée et la hauteur de celle-ci 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 sans difficulté. 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 tiennent un relevé complet sur le terrain de chaque emplacement. C'est là le seul journal où sont consignées les conditions relevées sur le terrain ou les difficultés rencontrées. Voici les renseignements à y inscrire :

- nom et identification de l'emplacement pour le fichier des données du récepteur;
- nom de l'observateur;
- type et matricule 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 mesures adoptées.

L'appendice F fournit un échantillon d'un relevé GPS sur le terrain en levés GPS statiques classiques. La présentation de ce relevé, sur papier ou sous forme de données informatisées, peut varier selon les besoins.

Une fois les observations terminées, l'observateur doit veiller à ce 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 et mettre fin à son relevé sur le terrain. Au retour d'une journée d'observation, chaque observateur doit remettre au responsable du traitement son relevé effectué sur le terrain 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 sur-le-champ toute difficulté 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 relevés d'une journée d'observation. Il doit vérifier si les données soumises sont claires, complètes et exactes. Il doit ensuite télécharger ces données depuis le récepteur ou le support de mémoire de celui-ci jusqu'à l'ordinateur et doit réaliser 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 de celles-ci.

Le responsable du traitement sur le terrain doit, au minimum, effectuer un traitement suffisant pour juger si les données recueillies sont de qualité suffisante pour les applications prévues. (Le traitement lui-même est abordé à la section 5.3.) Le responsable du traitement doit analyser les résultats de celui-ci de manière à évaluer la valeur des données, comparer les mesures redondantes et ainsi de suite, puis communiquer les résultats au chef de l'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 adoptées. Ces notes constituent un journal du traitement subi par les données, 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; vous devez néanmoins leur accorder l'attention nécessaire pour assurer le succès général du projet. Le traitement des données est d'abord décrit ci-dessous suivi de l'établissement du rapport final.

La complexité du traitement des données correspond à celle de la technique GPS employée. Le positionnement par point unique est le plus simple, ensuite le positionnement différentiel et, enfin, les techniques fondées sur la porteuse.

La plupart des récepteurs loués ou achetés sont accompagnés du logiciel de traitement GPS. Par ailleurs, plusieurs progiciels de traitement GPS sont disponibles sur le marché. Heureusement, presque tous ces progiciels sont passablement automatisés. Néanmoins, il importe que les utilisateurs possèdent une idée générale du traitement GPS.

La majorité des solutions en positionnement par point unique sont calculées à l'intérieur du récepteur, puis affichées. Les seules opérations éventuelles après le traitement sont le téléchargement de ces données

et leur combinaison dans une base de données ou dans un système d'information géographique à références.

Dans le cas de solutions différentielles qui résultent d'observations par code, les données provenant de l'emplacement de contrôle et des différents emplacements de liaison doivent être chargées dans un même ordinateur. Dès le lancement du programme de traitement, vous devez entrer les coordonnées connues NAD83 du récepteur de contrôle. Le programme établit alors la concordance entre les temps d'observations par code effectuées à chaque emplacement distant et ceux de l'emplacement de contrôle. Grâce aux éphémérides des satellites, aux coordonnées connues des récepteurs et aux mesures de codes, le programme calcule les coordonnées de chaque emplacement distant. Notez qu'en utilisation de la méthode différentielle, pour une configuration de réseau radiale, la solution ne fait l'objet d'aucune vérification à moins que l'emplacement de liaison ne soit occupé deux fois et les différences dans les solutions sont comparées entre elles.

Traiter des levés GPS statiques classiques est plus complexe et peut obliger à combiner plusieurs séances d'observation. Toutes les données d'une séance doivent être chargées dans un ordinateur. De même, les coordonnées tridimensionnelles connues et appropriées NAD83 des points de contrôle doivent être introduites dans le programme de traitement. La plupart des logiciels nécessitent aussi que soient introduites les coordonnées approximatives de tous les autres emplacements occupés durant une séance. Ces valeurs appropriées peuvent être lues au récepteur utilisé sur le terrain ou encore tirées d'une carte par mise à l'échelle.

Pour chaque séance traitée, la plupart des logiciels nécessitent qu'un point soit maintenu fixe selon les trois dimensions. L'idéal est de choisir à cet effet un point de contrôle dont les coordonnées NAD83 sont connues. Si aucun point de contrôle ne figure dans une séance donnée, vous devez employer les coordonnées d'un emplacement qui sont communes avec celles d'une séance connexe traitée en fonction d'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 alors formulées de façon optimale (appelée «ajustement») jusqu'à une solution. Dans le processus, une tentative vise à résoudre toutes les ambiguïtés liées au nombre entier de phases de la porteuse. Si ce processus peut être réalisé correctement, la solution résultante offre une exactitude supérieure. La solution réside dans les différences de coordonnées entre chaque point de repère inclus dans la séance et les coefficients d'exactitude connexes.

Une bonne partie des erreurs d'orbite décrites à la section 2.5, y compris celles qui sont introduites par disponibilité sélective, peuvent être corrigées dans une large mesure si une *éphéméride précise* est utilisée plutôt qu'une *éphéméride de radiodiffusion*. Comme nous l'avons expliqué à la section 2.1, les éphémérides de radiodiffusion s'appuient sur des prédictions relatives à la position d'un satellite dans le ciel

à un moment donné. Vous obtenez une localisation plus précise du satellite en suivant les satellites stationnés autour du globe, en combinant les données de ceux-ci et en calculant la position qu'occupaient les satellites dans le ciel. En levés précis, vous pouvez accroître substantiellement l'exactitude grâce à des éphémérides précises calculées après coup. Vous pouvez obtenir des éphémérides précises auprès de la Division des levés géodésiques et du *National Geodetic Information Center* des États-Unis (pour de plus amples renseignements, voir l'appendice B).

Pour combiner plusieurs séances d'information de manière à parvenir à une solution unique, vous devez rajuster le réseau au moyen d'un logiciel conçu à cette fin. Un rajustement de réseau combine les différences de coordonnées en provenance de toutes les séances d'observation de façon optimale. Quelques progiciels de fabricants GPS sont également capables d'un rajustement de réseau. Également, plusieurs progiciels indépendants qui peuvent rajuster un réseau GPS sont disponibles dans le commerce. Notez que, pour qu'un rajustement de réseau soit efficace, les spécifications nominales formulées à la section 5.1 pour des levés GPS statiques classiques doivent être respectées. Le rajustement initial du réseau doit être effectué moyennant le moins de contraintes possible (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 contrôle existant.

Les résultats du traitement d'un GPS statique classique peuvent être vérifiés par comparaison des lignes de base redondantes et par des tests statistiques dans le processus d'ajustement.

Les techniques permettant de traiter des données semi-cinématiques et statiques rapides évoluent encore et présentent des similitudes avec celles d'un traitement aussi bien différentiel que statique classique.

Nous n'abordons pas en détail le logiciel de traitement puisque celui-ci est habituellement compris dans la location ou l'achat d'un récepteur et tend à être passablement compliqué. Mentionnons, cependant, que Hofmann-Wellenhof et al. (1992) offrent un excellent résumé des caractéristiques du progiciel d'un récepteur.

Une fois terminées les différentes opérations et observations sur le terrain, vous devez rédiger un rapport final du projet, documenter les points de repère occupés, les méthodes employées et les résultats obtenus. Peut-être l'aspect le plus important d'un rapport final consiste à signaler toute amélioration qui peut être apportée aux procédures, en vue du prochain projet de positionnement GPS.

5.4 ÉTABLISSEMENT DES ÉLÉVATIONS DANS LE GPS

Pour établir au moyen du GPS les *hauteurs orthométriques* qui intéressent les hydrologues, vous devez connaître l'ondulation du géoïde (voir la figure 3.5). Deux facteurs influent sur l'exactitude des élévations orthométriques du GPS : l'exactitude de la *hauteur ellipsoïdale* établie directement par le GPS et

l'exactitude de l'ondulation du géoïde dérivée des modèles de celui-ci. Vous pouvez estimer l'exactitude prévue pour les hauteurs orthométriques, σ_H , grâce à la racine carrée de la somme des carrés de l'exactitude en hauteur ellipsoïdale, σ_h , et à l'ondulation du géoïde, σ_N . Autrement dit,

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

Les hauteurs ellipsoïdales établies au moyen du GPS sont, en général, moins exactes que leurs composantes horizontales correspondantes en raison des limites de la géométrie des satellites en positionnement vertical. De plus, certaines des erreurs mentionnées au tableau 2.4 influencent la composante verticale beaucoup plus que l'horizontale. En gros, vous pouvez vous attendre à ce que l'exactitude pour la hauteur ellipsoïdale, σ_h , soit 1,5 fois l'exactitude horizontale. (Ce facteur varie selon la géométrie des satellites et les conditions d'observation.) Les tableaux 4.1 et 4.2 fournissent les chiffres généraux d'exactitude pour les hauteurs ellipsoïdales. De même, la plupart des solutions d'ajustement des observations GPS évaluent l'écart-type séparément pour les composantes verticale et horizontale. Il est donc relativement simple d'établir l'exactitude de la hauteur ellipsoïdale σ_h .

Au contraire, l'estimation de l'ondulation du géoïde, N , et 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) réalisé, le modèle du géoïde employé, la topographie et le gradient du géoïde dans la région ainsi que la longueur de la ligne de base. Chacun de ces éléments influe sur les procédures à employer et sur l'exactitude que vous pouvez obtenir en établissant des hauteurs orthométriques avec le GPS et va donc être traité en conséquence.

Comme nous l'avons expliqué à la section 3.2, il est simple d'établir des hauteurs orthométriques dans le GPS par positionnement absolu (c.-à-d. par point unique). Cette technique vous permet d'établir une hauteur ellipsoïdale moyennant une exactitude verticale de 156 m et un coefficient de 95 %. Pour transformer cette hauteur ellipsoïdale en une hauteur orthométrique, vous n'avez qu'à soustraire l'ondulation du géoïde (dérivée d'un modèle de celui-ci) de la hauteur ellipsoïdale. Ces ondulations du géoïde peuvent atteindre ± 50 m au Canada et ± 100 m dans le monde; il est donc important que vous en teniez compte pour obtenir des hauteurs orthométriques, même en positionnement par point unique de faible exactitude. Certains récepteurs tiennent compte de façon interne de ces ondulations en toute transparence pour l'utilisateur.

En positionnement relatif, le traitement nécessaire pour les ondulations du géoïde varie selon l'exactitude du levé effectué. À ces fins, vous devez considérer le géoïde selon les deux groupes suivants : levés de positionnement relatif à faible exactitude, fondés sur des mesures de codes (c.-à-d. positionnement différentiel) et levés de positionnement relatif à grande exactitude, fondés sur des mesures de la porteuse (c.-à-d. GPS statique classique, semi-cinématique et statique rapide). Dans le premier groupe, une correction

brute du géoïde suffit et dans le second, vous devez employer une procédure plus élaborée. Dans les deux cas, toutefois, vous devez recourir à un modèle précis et détaillé, tel que DLG91 pour le Canada.

En positionnement relatif, c'est une modification dans l'ondulation du géoïde sur une distance spatiale dont vous devez vous soucier plutôt que de la valeur absolue de celui-ci. On appelle cette modification «gradient du géoïde». Ces gradients présentent, en général, une corrélation avec les caractéristiques topographiques, les gradients les plus faibles correspondant aux régions planes telles les Prairies canadiennes et les gradients les plus élevés, aux régions montagneuses telles les Rocheuses canadiennes. Vous devez, cependant, savoir que d'autres facteurs moins évidents influent sur le gradient du géoïde. En général, plus ce gradient est faible, plus sont exactes les hauteurs orthométriques qui peuvent être établies grâce au GPS.

Hauteurs orthométriques de faible exactitude par GPS différentiel

En positionnement différentiel, le récepteur de contrôle est habituellement placé en un point de contrôle qui possède des coordonnées tridimensionnelles connues, à savoir latitude, longitude et hauteur orthométrique (H_m). L'ondulation du géoïde à l'emplacement de contrôle (N_m) est ajoutée à la hauteur orthométrique de façon à obtenir la hauteur ellipsoïdale du point (h_m), maintenue constante en traitement GPS. En GPS différentiel, la hauteur ellipsoïdale de chaque emplacement de liaison (h_i) est calculée. La hauteur orthométrique désirée à l'emplacement de liaison (H_i) est alors obtenue par soustraction de l'ondulation du géoïde à l'emplacement de liaison (N_i) de la hauteur ellipsoïdale (h_i). Cette notion est illustrée à la figure 5.9.

L'incertitude entourant la hauteur relative du géoïde σ_N obtenue par correction brute du géoïde, conformément aux procédures décrites à la figure 5.9, varie selon la longueur de la ligne de base et la régularité du gradient du géoïde. Le tableau 5.5 présente l'ordre habituel de telles incertitudes. Au tableau, notez que, pour les lignes de base d'une distance de 1 ou 2 km et de 1 km dans des régions à gradient élevé du géoïde, l'exactitude sur des distances inférieures à 3 km, en somme, est indiquée «inconnue» précisément par qu'elle l'est. Dans ce cas, vous seriez donc bien avisé d'employer la valeur pessimiste de 25 cm pour σ_N .

La procédure exposée et visant à obtenir des hauteurs orthométriques par GPS différentiel est relativement simple. En fait, beaucoup de progiciels de récepteur conçus en vue du GPS différentiel tiennent compte de la différence de hauteur orthométrique-ellipsoïdale de façon transparente pour l'utilisateur. Néanmoins, il importe que les utilisateurs du GPS comprennent ce qui se passe et pourquoi. L'erreur véhiculée par un modèle commercial du géoïde serait vraisemblablement supérieure à celles du tableau 5.5, si un modèle autre que DLG91 était employé.

Pour parvenir à des hauteurs orthométriques de grande exactitude et tirer parti de l'exactitude implicite plus grande qu'offrent les techniques de positionnement relatif par phase de la porteuse, vous devez suivre des procédures beaucoup plus complexes.

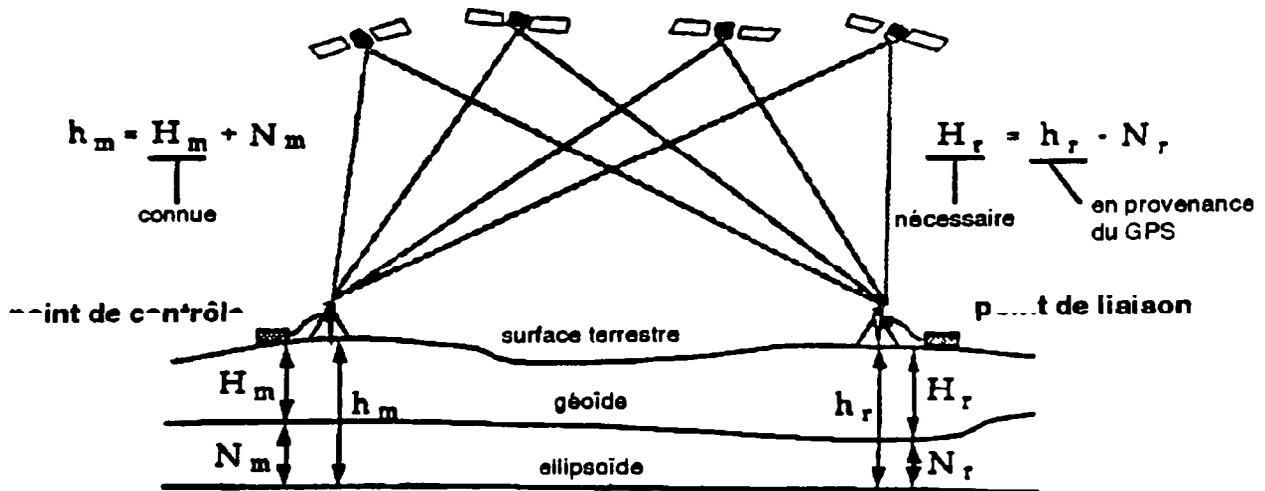


Figure 5.9 Établissement des hauteurs orthométriques par techniques différentielles

Tableau 5.5 Apport de l'incertitude relative du géoïde dans l'établissement des hauteurs orthométriques par GPS

Longueur de la ligne de base	Apport du géoïde dans les erreurs relatives de hauteur (σ_N) (moyennant une correction brute du géoïde et un modèle DLG91 de celui-ci)	
	Gradient plat ou faible du géoïde	Gradient irrégulier ou élevé du géoïde
30-500 km	max. ± 25 cm	max. ± 1 m
5-10 km	max. ± 10 cm	max. ± 25 cm
2-3 km	max. ± 5 cm	inconnu
1 km	max. ± 5 cm	inconnu

Hauteurs orthométriques de grande exactitude obtenues grâce à des mesures de la phase de la porteuse

Obtenir des hauteurs orthométriques de grande exactitude par observations GPS de phase de la porteuse est beaucoup plus complexe que dans les levés différentiels de faible exactitude dont il a été question ci-dessus. Nous expliquerons d'abord la notion et l'importance de l'«enlèvement» du gradient du géoïde, puis nous décrivons les étapes clés dans le calcul des hauteurs orthométriques de grande exactitude.

L'établissement des hauteurs orthométriques par techniques différentielles, telles qu'illustrées à la figure 5.9, se fonde sur une seule hauteur orthométrique connue (c.-à-d. H_m à l'emplacement de contrôle). Pour établir des hauteurs orthométriques plus exactes, vous devez connaître deux hauteurs orthométriques ou davantage en périphérie de la zone levée. Les hauteurs orthométriques des nouveaux points entre elles doivent être, pour l'essentiel, interpolées. Cette méthode a pour effet de supprimer la plus grande partie de la pente du géoïde et d'accroître les exactitudes qui peuvent être obtenues.

La figure 5.10 explique davantage cette notion. Deux points de contrôle, 1 et 2, possèdent des hauteurs orthométriques respectives H_1 et H_2 , établies par mise à niveau du premier degré. Vous souhaitez connaître la hauteur orthométrique d'un nouveau point, H_n . Grâce à un modèle exact du géoïde tel que DLG91, vous pouvez obtenir une estimation des ondulations du géoïde N_1 , N_2 et N_n . À partir des observations GPS, la hauteur de l'ellipsoïde des trois points est mesurée (h_1 , h_2 et h_n).

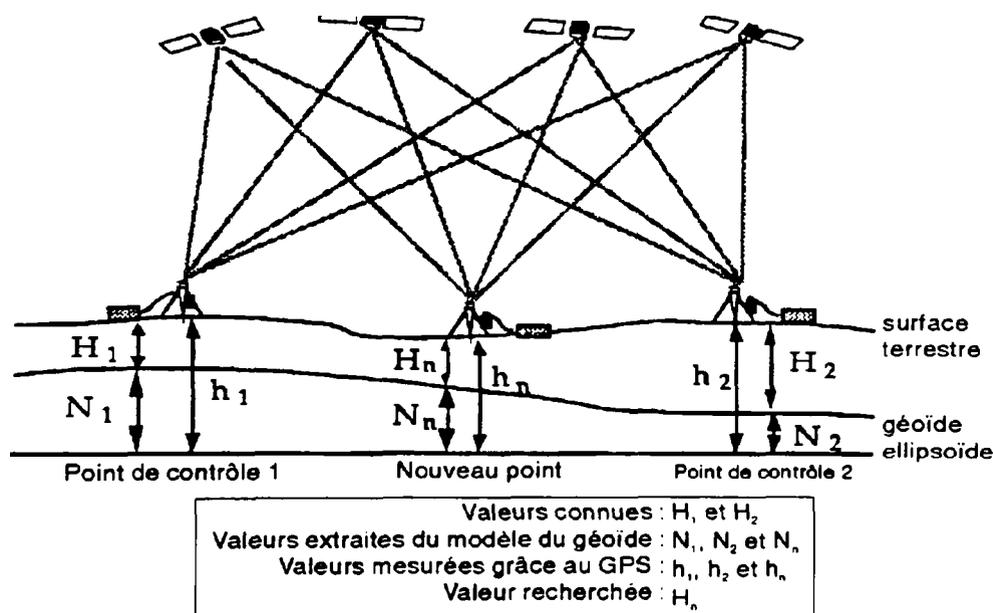


Figure 5.10 Établissement des hauteurs orthométriques grâce à des techniques relatives à la porteuse

Notez qu'aux points de contrôle 1 et 2 la hauteur ellipsoïdale h_1 et h_2 peut être établie de deux manières : directement au moyen des observations GPS ou par sommation des hauteurs orthométriques et des ondulations du géoïde connues (autrement dit, $h_1 = H_1 + N_1$ et $h_2 = H_2 + N_2$). Les hauteurs ellipsoïdales établies au moyen des différentes méthodes ne sont pas identiques, principalement en raison de l'exactitude limitée du modèle du géoïde. En fait, occuper des repères géodésiques dans le GPS procure un moyen de mesurer l'inexactitude de l'ondulation du géoïde à ce point.

Pour établir la hauteur orthométrique, H_n , vous avez besoin de l'ondulation du géoïde N_n (autrement dit $H_n = h_n - N_n$). En utilisant les inexactitudes mesurées de l'ondulation du géoïde aux points de contrôle 1 et 2, vous pouvez procéder par interpolation entre ceux-ci et parvenir à une valeur N_n plus exacte au point intermédiaire. Voilà le principe qui permet d'obtenir des élévations orthométriques d'une grande exactitude dans le GPS; il équivaut, si vous voulez, à utiliser des points de repère pour corriger la pente du géoïde.

Bien que le concept illustré à la figure 5.10 puisse sembler complexe, il est, en réalité, mis en oeuvre dans l'application d'un ajustement par la méthode de compensation des moindres carrés, en maintenant fixes les points dont l'élévation est connue au moyen d'une mise à niveau. Par ailleurs, plus de deux points de contrôle, illustrés à la figure 5.10, peuvent être utilisés. En fait, trois points seraient préférables pour tenir compte de la pente du géoïde sur un plan, et non pas seulement sur une ligne.

Le tableau 5.6 présente l'exactitude résultante que vous pouvez obtenir pour le géoïde, σ_N , grâce à l'équation 5.2, lorsque deux points de repère ou davantage servent à tenir compte de la pente du géoïde et lorsque DLG91 est utilisé pour obtenir les ondulations du géoïde. Ce tableau présente des valeurs représentatives pour σ_N relativement à des gradients faibles et élevés. 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 à chaque point et les mêmes valeurs d'ondulation doivent donc être employées.

Tableau 5.6 Erreur approximative dans les hauteurs relatives établies par des levés GPS précis due à l'incertitude du géoïde

Longueur de la ligne de base	Apport du géoïde dans les erreurs de hauteurs relatives (σ_N) (moyennant DLG91)	
	Gradient plat ou faible du géoïde	Gradient irrégulier ou élevé du géoïde
30-500 km	$\sigma \pm 10$ cm max. ± 20 cm	$\sigma \pm 20$ max. ± 50 m
5-10 km	$\sigma \pm 5$ max. ± 10 cm	$\sigma \pm 10$ cm max. ± 20 cm
2-3 km	$\sigma \pm 2$ max. ± 5 cm	Valeur inconnue
1 km	max. ± 2 cm	Valeur inconnue

Dans tous les cas, au moins deux points de repère doivent être occupés sur le périmètre de la zone levée dans le GPS, si vous voulez comparer les différences des hauteurs respectivement ellipsoïdales (Δh) et orthométriques (ΔH). Le gradient du géoïde, mis en évidence dans l'expression $\Delta h - \Delta H$, indique si les coefficients d'exactitude relative du géoïde, mentionnés dans le tableau ci-dessus, sont raisonnables pour la zone immédiate considérée.

Vous devez toujours tenir compte des ondulations du géoïde au moment d'établir des élévations orthométriques à l'aide du GPS. Pour obtenir dans celui-ci des élévations de grande exactitude, vous devez manipuler avec grand soin et bien comprendre les observations et le traitement des données afin de réduire le plus possible les erreurs et la portée des incertitudes relatives au géoïde. Même si la présente section vous a fourni les notions fondamentales sur l'établissement d'élévations de grande exactitude au moyen du GPS, nous vous recommandons fortement de retenir les services d'un expert en géodésie et en positionnement GPS pour de tels projets. Il existe un risque élevé que vous obteniez sans le savoir des exactitudes inférieures à celles que vous recherchez, si vous ne suivez pas certaines procédures spéciales qui ne sont pas traitées dans le présent document.

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. «On Carrier Signal Multipath Effects in Relative GPS Positioning». *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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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

LEXIQUE

LEXIQUE

Ambiguïté Nombre entier de cycles de la porteuse échangés entre un satellite et un récepteur.

Angle d'élévation Angle formé par l'antenne du récepteur GPS entre l'horizontale et la ligne de visée du satellite.

Angle de coupure *Angle d'élévation* sous lequel les signaux GPS ne sont pas enregistrés en raison d'une option mise en place dans le récepteur ou dans le logiciel de traitement GPS (également appelé *angle de masquage*).

Angle de masquage *Angle d'élévation* sous lequel les signaux GPS ne sont pas enregistrés en raison d'une option mise en place dans le récepteur ou dans le logiciel de traitement GPS (également appelé *angle de coupure*).

Anti-brouillage (AS) Interdiction d'accès au code P pour les utilisateurs civils.

Arrêt-marche Méthode de positionnement relative selon laquelle un récepteur de liaison reste stationnaire à chaque point durant plusieurs secondes et maintient sa synchronisation avec des satellites tout en se déplaçant entre des points (également appelée *semi-cinématique*).

Avertissements Tableau indiquant la position des satellites visibles par un observateur qui se trouve en un endroit et à un moment spécifiés sur la surface de la terre.

Azimut Angle horizontal dans le sens horaire borné depuis le nord jusqu'à la position d'un satellite dans le ciel.

Bruit du récepteur Quantification de la capacité d'un récepteur GPS à bien mesurer des observations par code ou par porteuse.

Cinématique Type de positionnement GPS dans lequel un récepteur se déplace pendant la collecte des données.

Cinématique continu Type de positionnement GPS dans lequel au moins un récepteur GPS suit de façon continue des satellites GPS tout en se déplaçant dans le but d'établir la position de sa propre trajectoire (également appelé *cinématique pur*).

Cinématique pur Type de positionnement GPS dans lequel au moins un récepteur GPS suit continuellement des satellites GPS tout en se déplaçant afin d'établir la position de sa propre trajectoire (également appelé *cinématique continue*).

Code C/A Code GPS mis gratuitement à la disposition des utilisateurs civils 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 précis GPS qui par *anti-brouillage* ne sera plus mis à la disposition des utilisateurs civils; il est modulé à la fois sur la porteuse L1 et L2 à une fréquence de 10,23 MHz.

Code Y Code GPS chiffré qui remplace le code P quand l'anti-brouillage est à l'oeuvre.

Constellation de satellites Ensemble des satellites et configuration de ceux-ci dans l'espace.

Créneau Périodes au cours d'une journée de 24 heures durant lesquelles un nombre suffisant de satellites sont visibles pour répondre aux besoins de positionnement.

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

Disponibilité sélective (SA) Technique servant à limiter l'exactitude offerte en temps réel aux utilisateurs civils et consistant à dégrader l'orbite de radiodiffusion (c.-à-d. la position «connue» des satellites dans l'espace) et une juxtaposition des impulsions de synchronisation des satellites.

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

Ellipsoïde Surface mathématique lisse ressemblant à une sphère écrasée et servant à représenter la surface terrestre.

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

Éphémérides de radiodiffusion Ensemble des paramètres indiquant la position des satellites dans le temps et transmis (radiodiffusés) à partir des satellites.

Éphémérides précises Ensemble de paramètres indiquant avec exactitude la position des satellites dans le temps établis par calculs sur les données recueillies dans les stations de poursuite GPS à travers le monde.

Erreur aléatoire Erreur restant 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.

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

Erreur de synchronisation du récepteur Erreur due à l'inexactitude de l'horloge du récepteur lorsque celle-ci mesure l'heure de réception d'un signal.

Erreur en distance équivalente de l'utilisateur (UERE) Apport des différentes erreurs dans l'exactitude en *positionnement par point unique*.

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 des signaux GPS transmis à travers l'ionosphère.

Erreur probable Importance d'une erreur qui correspond à une incertitude de 50 %.

Erreur systématique Erreur dont le modèle ou le comportement connu fausse les observations.

Erreur troposphérique Retard des signaux GPS dû à la transmission de ceux-ci à travers la *troposphère*.

Exactitude Proximité d'une estimation (ou d'une mesure) par rapport à la valeur vraie (mais inconnue).

Exactitude absolue Proximité d'une estimation (ou d'une mesure) par rapport à la vérité dans le cadre de référence terrestre.

Exactitude relative Exactitude d'une mesure entre deux points (c.-à-d. d'un point relativement 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*).

Fichiers d'almanach Fichiers de données qui contiennent les paramètres sur la position des satellites GPS en fonction du temps et qui sont indispensables pour calculer les 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 deux fréquences porteuses : L1 à 1575,42 MHz et L2 à 1227,60 MHz, qui sont transmis par déplacement de phase en fonction de codes et des messages satellite.

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

Glissement de cycle Saut d'un nombre inconnu de cycles de la porteuse par suite d'une interruption dans la synchronisation continue avec un satellite.

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

Hauteur orthométrique Hauteur au-dessus du *géoïde* établie habituellement dans le passé par mise à niveau.

Ionosphère Couche d'électrons libres se trouvant entre 50 et 1 000 km au-dessus de la terre.

Ligne de base Paire de *points de repère* pour lesquels des données simultanées GPS ont été recueillies.

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

Méthode de mesure Méthode de *positionnement différentiel* selon laquelle les mesures prises à un emplacement de *contrôle* servent à corriger celles qui sont prises à l'emplacement de *liaison* (voir *méthode de positionnement*).

Méthode de positionnement Méthode de *positionnement différentiel* selon laquelle les mesures prises à un emplacement de *contrôle* servent à calculer une position qui, à son tour, permet de corriger la position calculée à un emplacement *distant* (voir *méthode de mesure*).

Modèle du géoïde Schéma des ondulations du géoïde le long de la surface terrestre en fonction de la latitude et de la longitude.

Moyenne quadratique (rms) Mesure de la dispersion des observations de part et d'autre d'une moyenne.

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 terrestre (également appelée *hauteur du géoïde*).

Orage géomagnétique Orage survenant lorsque des irrptions solaires provoquent une ionisation irrégulière de l'ionosphère, qui à son tour retarde par réfraction irrégulière les ondes radio réfléchies dans le milieu non homogène.

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

Point de repère Terme désignant souvent un point à la surface terrestre où des observations GPS sont effectuées (également appelé *emplacement*).

Positionnement absolu Établissement des coordonnées d'un récepteur dans le cadre de référence terrestre par l'intersection des signaux en provenance de quatre satellites GPS ou davantage (également désigné *positionnement par point unique* ou, tout simplement, *positionnement par point*).

Positionnement différentiel Type de *positionnement relatif* dans lequel les mesures effectuées en un point de *contrôle* servent à corriger des mesures en un point inconnu de *liaison* (dans la documentation, le *positionnement différentiel* est employé occasionnellement dans le sens plus général de *positionnement relatif*).

Positionnement GPS statique classique Méthode de positionnement relatif selon laquelle deux récepteurs GPS ou plus, installés chacun au-dessus d'un *point de repère*, recueillent simultanément les données des mêmes satellites durant au moins une demi-heure et, plus couramment, au moins une heure; c'est grâce à ce type de positionnement relatif au moyen de mesures de porteuse que le positionnement GPS offre les meilleures possibilités d'exactitude.

Positionnement par point Établissement des coordonnées d'un récepteur dans le cadre de référence terrestre par l'intersection des signaux en provenance de quatre satellites ou davantage (également appelé *positionnement absolu* ou *positionnement par point unique*).

Positionnement par point unique Établissement des coordonnées d'un récepteur dans le cadre de référence terrestre par l'intersection des signaux en provenance de quatre satellites ou davantage (également appelé *positionnement absolu* ou tout simplement *positionnement par point*).

Positionnement relatif Établissement de la position d'un point relativement à un autre point dont les coordonnées sont connues.

Précision Proximité d'une estimation par rapport à l'estimation moyenne.

Récepteur à double fréquence Récepteur capable de suivre à la fois les fréquences de porteuses L1 et L2 GPS.

Récepteur de contrôle Récepteur GPS stationnaire mis en place en un point dont les coordonnées sont connues et servant de référence aux mesures d'un récepteur de *liaison*.

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

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

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

Segment de contrôle au sol Système terrestre servant à exploiter des satellites sur une base continue.

Segments utilisateurs Ensemble des personnes qui utilisent de l'équipement de poursuite GPS pour recevoir les signaux du système afin d'assurer des besoins spécifiques de positionnement.

Semi-cinématique Méthode de *positionnement relatif* selon laquelle le récepteur de *liaison* reste stationnaire à chaque point durant plusieurs secondes et maintient sa synchronisation avec des satellites tout en se déplaçant entre des points (également appelée *arrêt-marche*).

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

Statique rapide Type de positionnement statique GPS exigeant seulement des minutes et non plus des heures d'observation grâce à des techniques spéciales de résolution de l'*ambiguïté*, qui utilisent des informations supplémentaires, par exemple des mesures du *code P* ou des satellites redondants.

Système classique de coordonnées terrestres Système de coordonnées établi à partir du centre de la terre 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 de manière à former un trièdre trirectangle direct; ce système permet d'indiquer la position de points sur la terre ou de satellites dans l'espace.

Système de coordonnées géodésiques Système de coordonnées établi en fonction du centre de la terre dans lequel la latitude est l'angle positif formé à partir du centre de la terre vers le nord depuis l'équateur et la longitude est l'angle positif formé depuis le centre de la terre vers l'est à partir du méridien de Greenwich.

Traitement après mission Traitement des données visant à calculer des positions effectué après que la *séance d'observation* est terminée.

Traitement en temps réel Traitement dans lequel les positions sont calculées dès qu'elles sont recueillies.

Trajets multiples S'applique à un signal réfléchi qui se juxtapose à un signal vrai et produit de ce fait un positionnement moins exact.

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

APPENDICE B

SOURCES D'INFORMATION SUR LES SATELLITES GPS

SOURCES D'INFORMATION SUR LES SATELLITES GPS

(i) Centre d'information GPS

Le Centre d'information sur le Système de positionnement global (GPSIC) informe les utilisateurs civils de l'état du GPS NAVSTAR et leur fournit d'autres renseignements. Le GPSIC est exploité par la garde côtière des États-Unis. Il reçoit des messages d'état GPS en provenance des forces aériennes des États-Unis, elles qui assurent le contrôle opérationnel du système de même que la large diffusion de ces renseignements. Bien que les données n'en soient mises à jour qu'au cours des heures de bureau du GPSIC, les services de consultation, eux, sont accessibles jour et nuit, sept jours par semaine.

Les renseignements disponibles sont les suivants : état actuel de la constellation (satellites en état de marche ou non), pannes récentes, pannes prévues, description des orbites actuelles (données de l'almanach) qui se prêtent à une couverture GPS et à des prévisions sur 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 disponible par enregistrement vocal au (703) 313-5907. Pour obtenir de plus amples renseignements, vous pouvez consulter un babillard électronique mis gratuitement à la disposition de tous. Vous pouvez vous y inscrire en direct à l'occasion de la première séance de consultation. Vous y avez accès par modem au (703) 313-5910 moyennant un débit de 300 à 14 400 bits/seconde et les paramètres de communication suivants : 8 bits de données, 1 bit d'arrêt et aucun bit de parité.

Pour obtenir de plus amples renseignements sur le Centre ou sur le babillard, écrivez au Commandant, *U.S. Coast Guard, Omega Navigation System Center, 7323 Telegraph Road, Alexandria, VA 22310-3398*, États-Unis, ou composez le (703) 313-5900.

(ii) Babillard GPS de l'observatoire naval

Ce babillard, assuré par l'*Air Force Naval Observatory* des États-Unis, à Washington, D.C., fournit les données de synchronisation et les renseignements généraux sur le GPS, notamment l'état de la constellation, le courrier électronique, les fichiers téléchargeables et les avis aux utilisateurs.

Vous pouvez avoir accès au babillard en composant le (202) 653-0155 ou le (202) 653-0068. Les paramètres de communication sont les suivants : aucun bit de parité, 8 bits de données et 1 bit d'arrêt. Pour

avoir accès au système, vous devez composer le mot de passe CESIUM133 et poursuivre l'inscription en direct. Pour obtenir de plus amples renseignements ou de l'assistance, composez le (202) 653-1525 ou le (202) 653-1034.

(iii) Babillard GPS Holloman

Ce babillard, assuré par les forces aériennes des États-Unis à leur base de Holloman, au Nouveau-Mexique, fournit des renseignements sur le GPS, entre autres : l'état de la constellation, les données d'almanach, le courrier électronique, les fichiers téléchargeables et les avis aux utilisateurs.

Vous pouvez avoir accès au babillard en composant le (505) 679-1525. Le système utilise un modem intelligent et s'adapte automatiquement aux divers protocoles. Pour obtenir de plus amples renseignements ou de l'assistance, composez le (505) 679-1657 ou le (505) 679-1787.

ÉPHÉMÉRIDES CALCULÉES APRÈS COUP

La Division des levés géodésiques calcule et archive les éphémérides précises sur la constellation des satellites GPS dans le cadre de son Système de contrôle actif (ACS). (Voir l'appendice G.) Ces éphémérides sont calculées à partir des données recueillies par sept stations canadiennes ainsi que par jusqu'à douze stations centrales, réparties dans le monde et gérées par l'*International GPS Geodynamics Service (IGS)*. Les données des éphémérides sont calculées dans le cadre de référence terrestre de 1991 (ITRF91) du Service international sur la rotation de la terre (IERS), qui concorde à 0,2 partie par million près avec le NAD83 (ou le WGS84).

Les éphémérides précises sont fournies sous forme de fichiers journaliers (de 0 h à 23 h 45, heure GPS) et sont habituellement disponibles dans la semaine suivant les observations. Moyennant certains droits, vous pouvez obtenir les éphémérides précises des satellites GPS auprès de la Division des levés géodésiques comme suit :

- 1) par voie électronique moyennant le protocole anonyme de transfert de fichiers (ftp) de l'INTERNET ou
- 2) sur disquettes de 3½ po (1,44 mégaoctet) compatibles OP.

Adressez vos demandes de renseignements au :

Centre canadien des levés
Division des levés géodésiques
Services d'information
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
N° de tél. : (613) 995-4410 ou (613) 992-2061
N° de téléc. : (613) 995-3215

Vous pouvez également obtenir les éphémérides précises des orbites auprès du *National Geodetic Survey* des États-Unis. Elles proviennent de calculs effectués sur les données de poursuite recueillies par des stations du réseau CIGNET (*Cooperative International GPS Tracking Network*). Les orbites des satellites sont disponibles deux semaines après que les données de poursuite ont été recueillies au babillard du Centre d'information GPS (dont les procédures d'accès ont été décrites dans le présent appendice).

Si vous souhaitez obtenir des orbites pour des semaines qui ne sont plus affichées au babillard du GPSIC, vous pouvez les obtenir sur disquettes haute densité moyennant un droit auprès du centre d'information du NGS à l'adresse suivante :

National Geodetic Information Center
N/CG174, Rockwall Building, Room 24
National Geodetic Survey, NOAA
Rockville, MD 20852, États-Unis
N° de tél. : (301) 443-8631

APPENDICE C

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

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.

La Division de la géophysique de la Commission géologique du Canada (EMR) surveille les activités géomagnétiques à l'échelle du pays et a établi trois zones selon le niveau moyen d'activité (voir la figure C.1). Dans la zone sub-aurorale (latitudes méridionales du Canada), l'induction magnétique est habituellement faible et constante, ce qui produit, en général, une ionosphère homogène et prévisible. Dans les zones aurorale et polaire (latitudes de ≈ 55 degrés et plus), l'induction magnétique est forte et irrégulière, 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. Vous devez également garder à l'esprit, pour toutes les latitudes canadiennes, la possibilité de perturbations soudaines du champ magnétique terrestre (orages magnétiques) qui provoquent d'importants bouleversements de l'ionosphère.

PRÉVISION DE L'ACTIVITÉ GÉOMAGNÉTIQUE

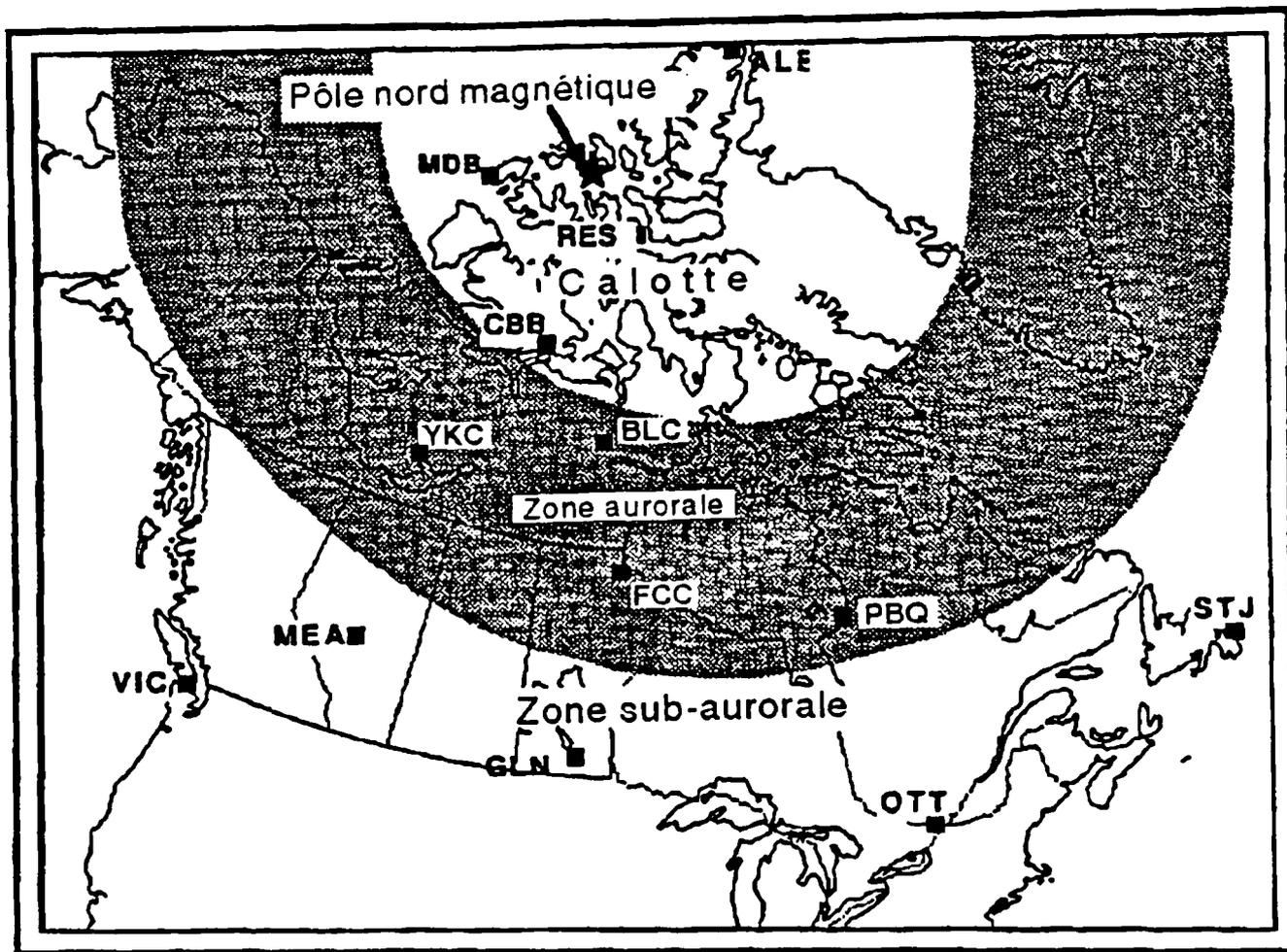
La Division de la géophysique d'Énergie, Mines et Ressources Canada offre au public un service de prévision portant sur le niveau de l'activité géomagnétique. Une prévision à long terme, mise à jour toutes les trois semaines et valable pour une période de 28 jours (un cycle solaire) est envoyée par la poste sur une base régulière à ceux qui en font la demande, tout comme des prévisions à court terme couvrant une période de 72 heures, mises à jour quotidiennement et disponibles en détail par liaison informatique ou résumées dans un message vocal enregistré. Les utilisateurs GPS sont invités à consulter ces prévisions avant et durant leurs campagnes d'observation.

Vous pouvez obtenir la prévision vocale enregistrée (72 heures) au (613) 992-1299.

Pour vous inscrire sur la liste d'envoi de la prévision à long terme ou pour avoir accès à la prévision détaillée à court terme, consultez le chef de la Section du géomagnétisme au (613) 837-3527 ou par écrit à l'adresse suivante :

Prévisions géomagnétiques
Division de la géophysique
1, Place de l'Observatoire
Ottawa (Ontario)
K1A 0Y3

Il est également possible de recevoir des données géomagnétiques réelles recueillies aux différents emplacements de contrôle. De tels renseignements sont parfois utiles pour faire la preuve que des problèmes de données résultent d'une activité ionosphérique intense. Vous pouvez obtenir des directives sur la façon d'avoir accès à ces données à l'adresse mentionnée ci-dessus.



Réseau d'observatoires magnétiques canadiens					
Zone polaire		Zone aurorale		Zone sub-aurorale	
ALE	Alert	CBB	Cambridge Bay	MEA	Meanook
RES	Resolute Bay	BLC	Lac Baker	GLN	Glenlea
MDV	Mould Bay	YKC	Yellowknife	STJ	St. John's
		FCC	Fort Churchill	VIC	Victoria
		PBO	Poste-de-la-Baleine	OTT	Ottawa

Figure C.1 Zones d'activité géomagnétique au Canada

APPENDICE D

SOURCES D'INFORMATION SUR LES CANEVAS PLANIMÉTRIQUE ET ALTIMÉTRIQUE

SOURCES D'INFORMATION SUR LES CANEVAS PLANIMÉTRIQUE ET ALTIMÉTRIQUE

La Division des levés géodésiques du Centre canadien des levés maintient la Base nationale de données géodésiques (BNDG) qui contient la description et les coordonnées de tous les canevas relevant de sa compétence dans l'ensemble du pays. La BNDG rend disponibles ces informations moyennant recouvrement des coûts.

Pour obtenir de plus amples renseignements, communiquez avec le :

Centre canadien des levés
Division des levés géodésiques
Services d'information
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
N° de tél. : (613) 995-4410 ou (613) 992-2061
N° de téléc. : (613) 995-3215

APPENDICE E

SOURCES D'INFORMATION SUR LE GÉOÏDE

SOURCES D'INFORMATION SUR LE GÉOÏDE

La Division des levés géodésiques a établi trois tableaux qui représentent les valeurs d'ondulation du géoïde (N) ainsi que la déflexion des composantes nord-sud (ξ) et est-ouest (η) pour le Canada. Ces tableaux sont tirés du modèle canadien du géoïde DLG91 (Véronneau et Mainville, 1992). L'utilisation du tableau de l'ondulation du géoïde est recommandée pour les valeurs des coordonnées dérivées des données satellites GPS et, également, pour celles du NAD83.

Les trois tableaux (N, ξ et η) couvrent la plus grande partie du territoire canadien, soit les zones extracôtières entre le 46° et le 142° de longitude ouest et le 41° et le 72° de latitude nord. Les valeurs sont fournies à intervalles de cinq minutes d'arc en latitude et en longitude. Pour extraire des données des tableaux, vous devez recourir à une méthode d'interpolation quadratique. Les fichiers des hauteurs du géoïde (N) et des déflexions du canevas altimétrique (ξ , η) de même que le logiciel d'interpolation quadratique sont disponibles pour ordinateur compatible IBM, Macintosh, VAX et UNIX. Ces produits sont distribués par la Division des levés géodésiques moyennant recouvrement des coûts. Pour obtenir un complément d'information, communiquez avec le :

Centre canadien des levés
Division des levés géodésiques
Services d'information
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
N° de tél. : (613) 995-4410 ou (613) 992-2061
N° de téléc. : (613) 995-3215

Pour obtenir de plus amples renseignements sur l'exactitude des modèles du géoïde ou les valeurs de celui-ci à l'extérieur du Canada ou tout autre renseignement additionnel, veuillez consulter Marc Véronneau au (613) 995-4345 ou André Mainville, au (613) 995-4504.

Ouvrage de référence

Véronneau, M. et A. Mainville. 1992. «Computation of a Canadian Geoid Model Using FFT Technique to Evaluate Stokes' and Vening-Meinesz' Formulas in a Planar Approximation Internal Report», Division des levés géodésiques, Centre canadien des levés, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa.

APPENDICE F

ÉCHANTILLONS DE RELEVÉS D'OBSERVATIONS GPS

RELEVÉ D'OBSERVATION GPS SUR LE TERRAIN

Page 1 de __

Nom du projet _____

N° du projet _____

Modèle/n° de récepteur _____	Nom du point de repère _____
Version du logiciel de récepteur _____	Numéro du point de repère _____
Type/n° d'enregistreur automatique _____	Identification à 4 caractères _____
Modèle/n° d'antenne _____	Date _____
Longueur du câble _____	Séance d'observation _____
Extensions du plan de sol Oui () Non ()	Opérateur _____

<i>Collecte de données</i>	<i>Position du récepteur</i>
Débit de collecte _____	Latitude _____
Jour/heure du début _____	Longitude _____
Jour/heure de la fin _____	Hauteur _____

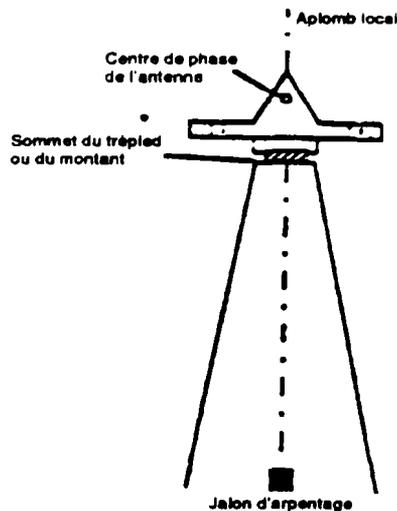
Obstacles ou sources d'interférence éventuelle _____

Conditions météorologiques générales _____

Observations météorologiques détaillées consignées : Oui () Non ()

Mesure de la hauteur de l'antenne

Indiquez sur le schéma les mesures prises pour obtenir la hauteur de l'antenne. Si des mesures obliques sont prises, indiquez celles-ci sur les deux côtés opposés de l'antenne. Effectuez des mesures avant et après chaque séance d'observation.



Mesures verticales ()

Mesures obliques () : rayon ____ m

	AVANT		APRÈS
_____ m	_____ po	_____ m	_____ po
_____ m	_____ po	_____ m	_____ po

Moyenne _____ m

Hauteur verticale après corrections dans le cas de mesures obliques _____ m

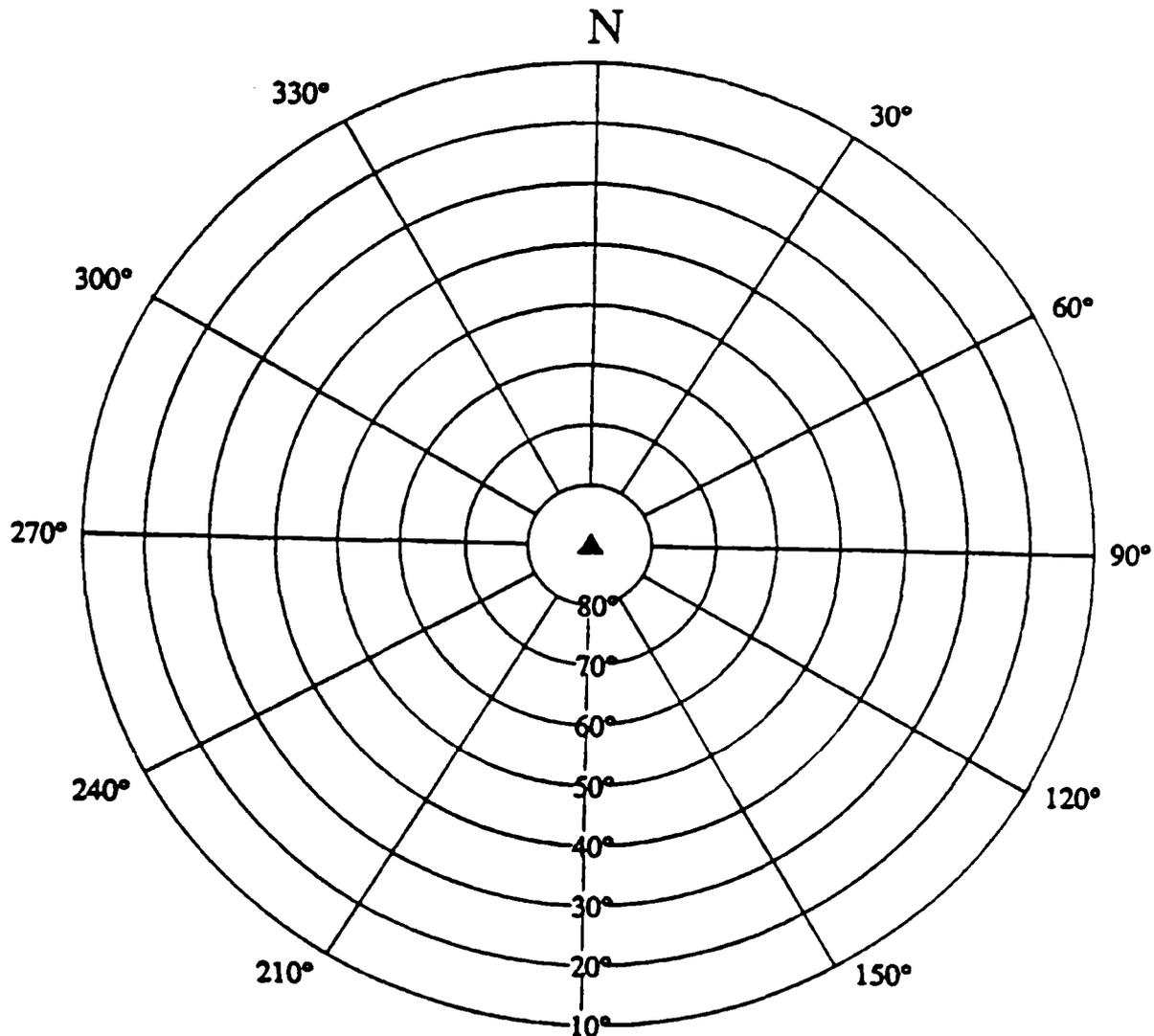
Décalage vertical jusqu'au centre de phase _____ m

Autre décalage (à indiquer sur le schéma) _____ m

HAUTEUR TOTALE _____ m

Vérfié par : _____

DIAGRAMME DES OBSTACLES RELEVÉS À UN POINT DE REPÈRE GPS



Indiquez les obstacles et l'angle d'élévation à partir du point de repère.

Déclinaison magnétique _____

Le diagramme ci-dessus tient-il compte de cette déclinaison? Oui ()
 Non ()

Indiquez la distance de toute structure métallique ou de toute surface réfléchissante.

Hauteur au-dessus du jalon à laquelle l'horizon a été relevé : _____

Nom du point de repère _____ Date _____

Numéro du point de repère _____ Opérateur _____

APPENDICE G
SYSTÈME DE CONTRÔLE ACTIF

SYSTÈME DE CONTRÔLE ACTIF

La Division des levés géodésiques du Secteur des levés, de la cartographie et de la télédétection, en collaboration avec la Commission géologique du Canada, met actuellement à l'épreuve un prototype du Système de contrôle actif (ACS), en appui au nombre grandissant d'utilisateurs GPS au pays. Le système se compose d'un certain nombre de stations automatisées de poursuite GPS, appelées ACP (points de contrôle actif), qui enregistrent en continu les mesures relatives aux phases de porteuses et à la pseudo-distance dans le cas de tous les satellites GPS visibles. Les données recueillies à chaque ACP sont transmises quotidiennement à un centre principal de traitement à Ottawa. Les ACP devraient accroître substantiellement l'efficacité des applications GPS. Ils visent quatre objectifs principaux : (1) surveiller et vérifier l'intégrité et le rendement du GPS en analysant les données recueillies en poursuite continue; (2) calculer les éphémérides précises des orbites en positionnement géodésique grâce aux données en provenance des ACP canadiens et de quelques stations internationales de poursuite; (3) servir d'emplacements de contrôle et d'étalonnage pour les utilisateurs GPS; (4) évaluer et diffuser les corrections différentielles GPS.

Les prototypes actuels d'ACP sont situés à St. John's (T.-N.), au parc Algonquin (Ontario), à Churchill (Manitoba), Yellowknife (T.N.-O.), Penticton (C.-B.), Victoria (C.-B.) et Holberg (C.-B.). Chaque ACP est doté d'un récepteur GPS à double fréquence et à haute précision ainsi que d'un étalon de fréquence atomique. La température, la pression et l'humidité sont également recueillies à Churchill, au parc Algonquin et à Yellowknife. La validation des données est effectuée à chaque ACP dans le but de mesurer le rendement du GPS et l'état de la disponibilité sélective (Héroux et Caissy, 1992).

Disposer des orbites précises à partir de données de poursuite GPS devrait permettre aux arpenteurs d'améliorer l'exactitude de leurs travaux de même que la productivité et l'efficacité des opérations d'arpentage. Pour obtenir de plus amples renseignements sur les orbites canadiennes du GPS, voyez l'appendice B.

En ce moment, l'ACS offre aux utilisateurs canadiens du GPS des données recueillies en poursuite continue au moyen de ces ACP. Les données brutes de ceux-ci contiennent le code satellite étalonné en double fréquence et les observations sur les porteuses, obtenues en poursuite continue d'au maximum huit satellites visibles et moyennant un échantillonnage à intervalle de 30 secondes. Les données ACS sont archivées quotidiennement dans le format RINEX (version 1). Les fichiers des points de repère contiennent des données recueillies sur une période de 24 heures (de 0 h à 23 h 59 min 30 s, heure GPS). En règle générale, les données sont disponibles en direct quatre heures après minuit (heure GPS). Chaque fichier (1 journée) contient environ 2 mégaoctets de données en format RINEX décomprimé.

Toute demande de renseignement, en particulier sur les produits ACS, doit être adressée au :

Centre canadien des levés
Division des levés géodésiques
Services d'information
615, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E9
N° de tél. : (613) 995-4410 ou (613) 992-2061
N° de téléc. : (613) 995-3215

Ouvrage de référence

Héroux, P. et M. Caissy. 1992. «*Canada's Active Control System Data Acquisition and Validation*». Document présenté à la 85^e séance annuelle de l'Assemblée canadienne des sciences géodésiques et cartographiques, à Whitehorse (Yukon), tenue du 23 au 26 juin.

APPENDICE H

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE SUR LE GPS

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE SUR LE GPS

Document	Disponible à l'adresse suivante :
<i>GPS World</i> (revue)	<i>GPS World</i> Box 1965 Marion, OH 43305-2064 États-Unis N° de tél. : (614) 382-0886
<i>Directives et spécifications concernant les levés avec le Système de positionnement global (GPS)</i> (1992)	Centre canadien des levés Division des levés géodésiques Services d'information 615, rue Booth Ottawa (Ontario) K1A 0E9 N° de tél. : (613) 995-4410 ou (613) 992-2061 N° de téléc. : (613) 995-3215
<i>Guide to GPS Positioning</i> (1987) par D. Wells et al.	Association canadienne des sciences géomatiques C.P. 5378 Succursale F Ottawa (Ontario) K2C 3J1 N° de tél. : (613) 224-9851
<i>Getting Started With GPS Surveying</i> (1992) par S. McElroy, publié par <i>The Global Positioning System Consortium</i>	GPSCO À l'attention du <i>GPSCO Steering Committee</i> <i>Secretariat</i> <i>Land Information Centre</i> Box 143 Bathurst NSW 2795 Australie N° de tél. : (063) 328-200 N° de téléc. : (063) 318-095

APPENDICE I

**COMPARAISON ENTRE LEVÉS GPS
ET LEVÉS CLASSIQUES**

COMPARAISON ENTRE LEVÉS GPS ET LEVÉS CLASSIQUES

Le Système de positionnement global (GPS) est utilisé en arpentage depuis le milieu des années 1980, mais ce n'est que récemment qu'il est devenu pleinement opérationnel. La constellation complète de satellites est maintenant en place avec au moins 24 satellites GPS sur leur orbite désignée, fournissant en continu des données de navigation et de positionnement bidimensionnelles et tridimensionnelles à l'échelle planétaire. Il est prévu que la mise en Service opérationnel intermédiaire (SOI), ou la reconnaissance officielle du Système à des fins civiles, sera déclarée à la fin de 1993.

De nombreux arpenteurs, comme d'autres personnes appelées à établir des positions par des moyens classiques, ont pu hésiter à adopter la nouvelle technologie pour diverses raisons : coût; crainte de ne pas pouvoir accéder au Système; crainte que le GPS ne soit pas adapté à leurs besoins particuliers; ou appréhension générale face à la nécessité d'assimiler une nouvelle technologie. Toutefois, même si le GPS ne remplacera jamais les méthodes classiques dans certaines applications, il ne faudrait pas ignorer ses avantages dans une grande variété de tâches.

La présente appendice porte sur une comparaison entre le GPS et les techniques de levé classiques.

Levés classiques

Plusieurs techniques classiques allant de mesures statiques à des nivellements précis peuvent être utilisées pour établir la position et (ou) l'altitude d'une caractéristique de terrain. L'outil d'arpentage classique de loin le plus efficace pour une vaste gamme d'applications est la station totalisatrice. Mise au point dans les années 1970, elle comprend un théodolite numérique, un appareil de mesure électronique de la distance et une unité de collecte de données.

Le théodolite numérique fait intervenir des codeurs optiques pour déterminer le déplacement de la ligne de visée du télescope par rapport aux plans vertical et horizontal. La précision angulaire du théodolite varie entre 0,1 et 10 secondes d'arc, selon la marque et le modèle.

La mesure électronique des distances (MED) consiste à mesurer la distance d'un réflecteur éloigné à l'aide d'une source de lumière infrarouge. L'exactitude des mesures est de l'ordre de $5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$, et la portée optique, par temps clair, varie entre un et trois km pour un réflecteur unique.

Les mesures numériques de pente, de distance et d'angle dans les plans horizontal et vertical peuvent être enregistrées sur une carte de stockage intégrée ou dans une unité externe de collecte de données. Cette information peut ensuite être chargée dans un ordinateur et utilisée pour établir la position et l'altitude de caractéristiques de plans d'arpentage, de travaux de génie, de systèmes d'information géographique, etc.

Les stations totalisatrices sont très utilisées par les arpenteurs, et leurs prix actuels varient entre 10 000 et 30 000 \$.

GPS

Le Système de positionnement global permet d'obtenir des exactitudes de l'ordre du centimètre en mesurant et en traitant les signaux de phase de porteuses qui sont émis par chacun des satellites GPS. L'approche statique traditionnelle consiste à utiliser simultanément des récepteurs GPS dans deux stations ou plus pendant au moins une heure et à combiner les données des récepteurs à l'aide d'un logiciel de post-traitement pour obtenir les positions relatives des stations. Même si cette approche convient aux levés de grandes régions, les levés statiques ou cinématiques «rapides» qui exigent l'occupation de stations pendant quelques minutes, voire quelques secondes, seulement ont fait du GPS un outil valable et économique pour les levés locaux. D'autres techniques d'utilisation du GPS comme le positionnement par point unique et le positionnement par code différentiel sont aussi utiles dans une vaste gamme d'applications et ont été décrites dans des chapitres antérieurs du présent manuel.

Pour plus de simplicité, seules les méthodes de levé GPS et classiques les plus précises comme celle de la station totalisatrice seront comparées. En général, les comparaisons vaudront aussi pour le matériel moins évolué.

Levés régionaux

En général, les levés peuvent se diviser en deux grandes classes : levés régionaux et levés locaux. Les levés régionaux peuvent être définis comme ceux qui couvrent de grandes régions où les stations sont en général espacées de 10 à 100 km. Par exemple, les levés géodésiques qui définissent les dimensions et la forme de la terre constituent un canevas géodésique de référence sur lequel tous les autres levés sont basés.

Il existe des canevas géodésiques nationaux comportant environ 300 000 points, établis aux échelles tant fédérale que municipale. Les méthodes traditionnelles de levé servant à établir ces points à l'aide de théodolites et de matériel de mesure des distances exigent beaucoup de main-d'oeuvre et de temps. Aux échelles fédérale et provinciale, les stations sont en général situées sur des hauteurs où la visibilité est bonne, mais qui ne sont souvent accessibles que par hélicoptère.

Avec le GPS, ces stations peuvent être aménagées dans des endroits facilement accessibles par les arpenteurs. Le coût des levés a été réduit de jusqu'à 70 %, et les exactitudes ont été grandement améliorées.

Compte tenu de ces avantages, le GPS a presque remplacé les méthodes de levé classiques pour l'établissement du canevas planimétrique à l'échelle fédérale, et la plupart des provinces l'ont adopté. L'utilisation à l'échelle locale ou municipale est de plus en plus fréquente, mais vaut en général pour des applications spéciales limitées.

Levés locaux

Les levés locaux, qui comprennent la plupart des levés officiels et GPS et des levés d'ingénierie, représentent le gros du marché des levés. Même si le matériel GPS convient à la plupart de ces levés, la station totalisatrice est encore la plus répandue.

Pour les levés locaux types, les comparaisons indiquent que le GPS est aussi rapide opérationnellement, aussi précis et pas plus coûteux que les stations totalisatrices (Townsend, S., 1991; Gerdan, G.P., 1991). Ces essais sont en général menés à l'aide du GPS dans le mode «cinématique» où il faut toutefois maintenir en tout temps la liaison avec quatre satellites au moins, même entre les points. En d'autres termes, tout obstacle aérien pourrait interrompre la liaison et obliger à reprendre le levé.

D'autres techniques sont ou ont été mises au point pour éliminer cette contrainte. Par exemple, les techniques «statiques rapides» (voir la section 4.2) ont des précisions de l'ordre du cm après quelques minutes de collecte de données à chaque point. En outre, des méthodes en temps réel, où les données sont transmises entre les récepteurs, sont mises au point en vue d'obtenir des exactitudes de l'ordre du cm sur les lieux (Talbot, N.C., 1993). Ainsi, ce type de levé conviendrait parfaitement aux opérations de jalonnement.

En général, les levés classiques et le GPS peuvent être considérés comme complémentaires pour les levés locaux. Par exemple, le GPS n'exige pas une ligne de visée directe d'un point à l'autre et il pourrait donc servir à établir des rattachements aux points de canevas. Par ailleurs, les méthodes de levé classiques peuvent servir à situer des éléments comme des bâtiments qui pourraient empêcher le signal satellite d'atteindre le récepteur GPS.

Avantages du GPS

Le GPS offre plusieurs avantages sur les méthodes de levé classiques pour une vaste gamme d'applications :

La visibilité réciproque des stations n'est pas nécessaire : Comme il a été mentionné, il n'est pas nécessaire que les stations soient visibles l'une de l'autre dans le GPS. Les notions de ligne de visée et de

nécessité d'accès aux caractéristiques en jeu peuvent donc être mises de côté. La seule condition se rapportant à la notion de ligne de visée est qu'aucun obstacle aérien ne doit empêcher le récepteur GPS de capter les signaux des satellites.

Rattachements plus faciles à établir avec le canevas existant : En général, un levé doit comporter des rattachements aux stations existantes du canevas permettant de définir un point de référence pour le calcul des positions. Selon où se trouve la région à l'étude, les points de canevas peuvent être distants de plusieurs kilomètres. Le GPS permet d'établir très facilement des rattachements sur de très grandes distances, sans perte importante d'exactitude dans les résultats.

Capacité quelles que soient les intempéries : Les levés GPS peuvent être effectués en présence de pluie, de neige ou de brouillard, ce qui rendrait impossibles les levés classiques.

Coût d'exploitation réduit : En général, des équipes plus petites peuvent établir plus de points par jour avec le GPS qu'avec les méthodes classiques. Cela s'applique en particulier aux levés de grandes régions, car, comme il a été mentionné, la visibilité réciproque des stations n'est pas essentielle.

Coût d'immobilisation comparable : Le coût du matériel GPS a chuté considérablement depuis une décennie comme l'indique la figure I.1 de Prushan, V.H., et al., 1991. Le prix courant des récepteurs GPS varie de 1 000 à 40 000 \$ environ selon les modèles et les applications. Ces prix sont comparables à ceux du matériel de levé classique offrant des caractéristiques et des exactitudes semblables.

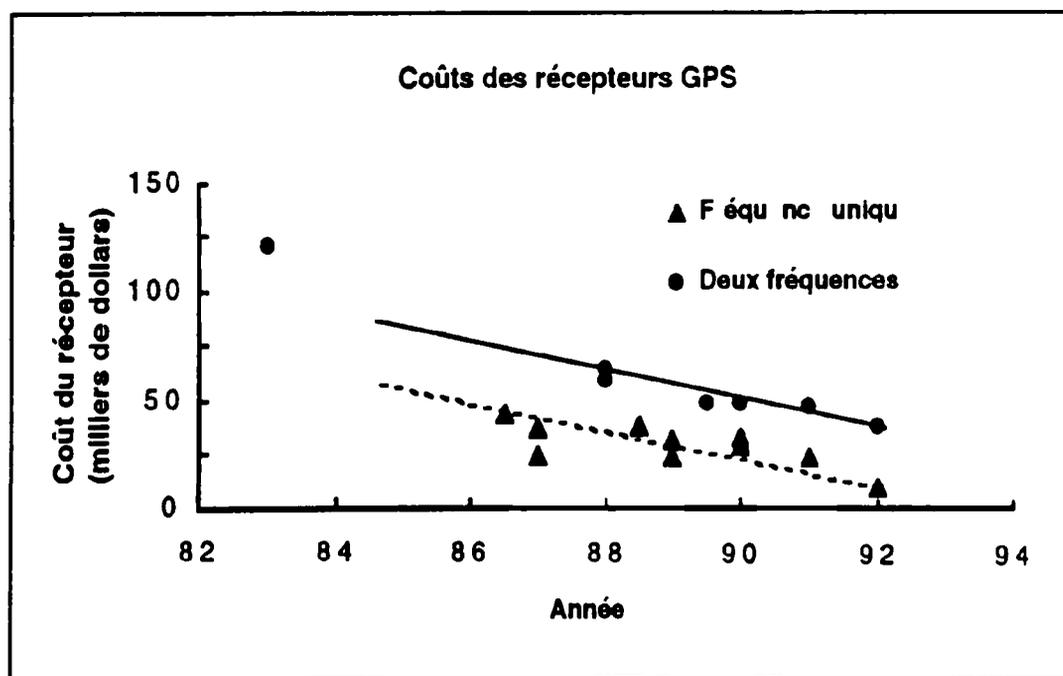


Figure I.1 Coûts des récepteurs GPS

Exactitude accrue : Le GPS permet un niveau d'exactitude jamais atteint auparavant dans les levés régionaux et comparable à celui des systèmes classiques dans les levés locaux. La figure I.2 de Wells et al., 1986, permet de comparer avec d'autres méthodes de levé.

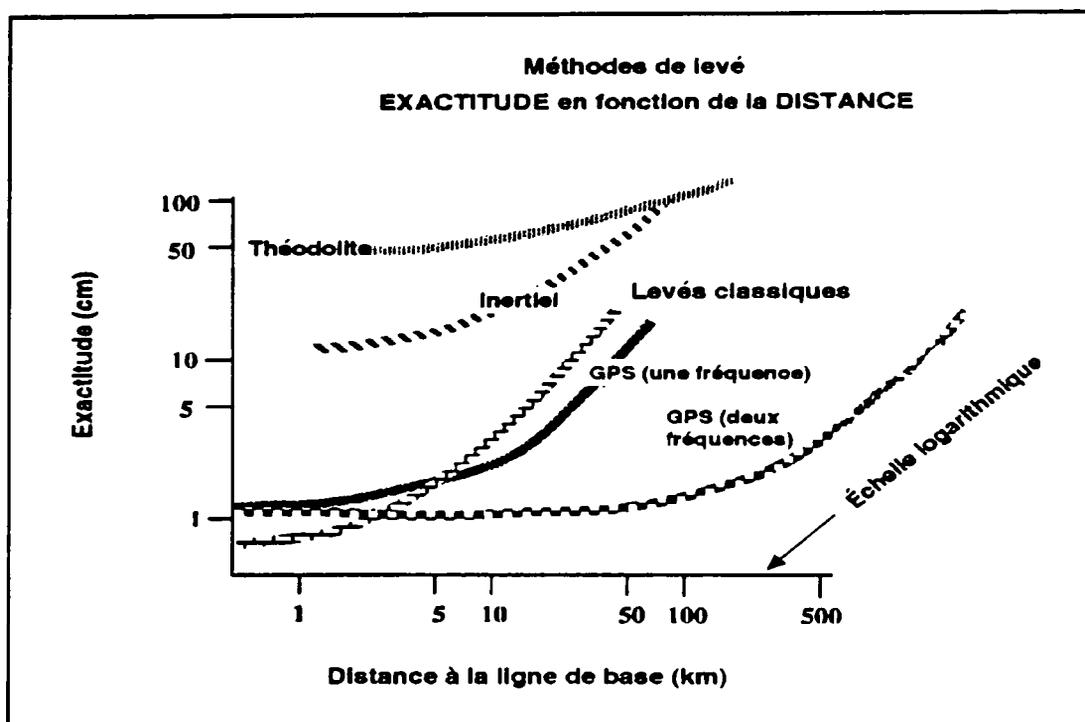


Figure I.2 Exactitude en fonction de la distance, méthodes classiques

En outre, les exactitudes ont été constamment améliorées grâce au perfectionnement des logiciels de traitement, du matériel et des procédures. Même si de telles exactitudes ne sont pas requises par l'utilisateur moyen, elles illustrent les possibilités du Système.

Avantages des levés classiques

Le GPS a pénétré profondément le marché des levés; toutefois, les méthodes de levé classiques offrent encore des avantages pour certaines applications.

Technologie éprouvée : La très grande majorité des arpenteurs connaissent bien les méthodes de levé classiques et la plupart ne sont pas portés à adopter le GPS. En outre, le GPS représente pour l'arpenteur moyen un changement radical de technologie et de procédures, et certains hésitent à faire la transition.

Les obstacles aériens ne constituent pas une contrainte : Il faudra toujours recourir aux méthodes de levés classiques pour situer les endroits et les éléments qui sont difficiles à voir du haut des airs. Par exemple, dans les régions urbaines denses, les immeubles en hauteur peuvent bloquer le signal satellite GPS. Dans les régions boisées, le feuillage des arbres peut aussi bloquer le signal satellite, mais, en général, les méthodes classiques sont moins efficaces que le GPS car il est habituellement plus facile d'établir une ligne de visée vers les satellites que vers d'autres points de levé.

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients de chaque système :

Tableau I.1 Comparaison entre levés GPS et levés classiques

	GPS	Classiques
Visibilité réciproque	· non requis	· requis
Rattachements aux canevas existants	· rattachements directs aux canevas éloignés · capacité quelles que soient les intempéries	· canevas éloignés doivent être rattachés par levé · limitées par la visibilité
Coût d'exploitation	· en général moindre	
Coût d'immobilisation	· coûts comparables, prix à la baisse	· prix généralement stables
Exactitude	· accrue pour les levés régionaux	· accrue pour les levés locaux
Technologie	· nouvelle pour la plupart des usagers	· éprouvée
Contraintes d'emplacement	· satellites doivent être visibles	· insensibles aux obstacles aériens

Conclusion

Le GPS offre plusieurs avantages sur les levés classiques pour une vaste gamme d'applications et il devrait devenir le plus répandu de tous les systèmes de positionnement et de navigation disponibles (Pruston, V.H., et al., 1991). En termes de cycle de vie du produit et du marché, le GPS approche du stade de la maturité. La technologie est accessible et facile à maîtriser, même par l'utilisateur non technique, pour une vaste gamme d'applications. Tant que les fabricants de matériel GPS continueront d'améliorer le produit et qu'un nombre croissant d'utilisateurs adopteront la technologie, les coûts continueront de diminuer, quoique plus progressivement.

Par ailleurs, les méthodes de levé classiques continueront d'être abondamment utilisées pour les levés locaux car elles aussi offrent des avantages dans une vaste gamme de circonstances. En dernière analyse, il faut évaluer chaque projet indépendamment et choisir le matériel en fonction des exigences particulières.

1

.

BIBLIOGRAPHIE

- Gerdan, G.P. 1991. *Rural Cadastral Surveying with the Global Positioning System*. The Australian Surveyor, vol. 36, n° 3, p. 184–194.
- Prushan, V.H., K.D. McDonald, M.D. Beatty, et C.P. McDonald. 1991. *The Global Positioning System: Civil Markets in the 1990's*. Navtech Seminars Inc.
- Talbot, N.C. 1993. *Centimeters in the Fields: A Users Perspective of Real-Time Kinematic Positioning in a Production Environment*. Présenté à l'ION GPS 1993, Salt Lake City (Utah), réunion tenue du 22 au 24 septembre 1993.
- Townsend, S. 1991. *GPS and the Total Station Go Head-to-Head*. Professional Surveyor, vol. III, n° 4, p. 49–51.
- 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).

