

LAURENT GEUZAINÉ

**CONCEPTION D'UN OUTIL UTILISANT LES TECHNOLOGIES SIG ET GPS
POUR LES MISSIONS DE RECHERCHE ET DE SAUVETAGE AERIENS**

Mémoire
présenté
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

Département de Sciences géomatiques
FACULTÉ DE FORESTERIE ET GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL

NOVEMBRE 1997

© Laurent Geuzaine, 1997

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-25590-5

RÉSUMÉ

Il existe, au Canada, des organismes spécialisés dont le mandat est de secourir des personnes lorsqu'un avion est porté disparu. Les recherches et les sauvetages des personnes portées disparues sont effectuées par les forces armées canadiennes et des organismes civils (ACRSA – Association Civile de Recherche et de Sauvetage Aériens). L'ACRSA est un organisme qui a recours à des volontaires civils, travaillant à bord d'avions légers, et venant renforcer les effectifs militaires. Actuellement, les équipements utilisés lors des recherches sont des cartes (1:250 000), des règles, des compas, des crayons, des ordinateurs et quelques récepteurs GPS bas de gamme. Cet organisme n'exploite aucun outil géomatique spécifique, et l'efficacité des missions de recherche est inférieure à 20 %.

Les moyens actuels ne permettent pas de dresser le bilan du territoire couvert lors d'une mission de recherche, car la trajectoire réellement suivie par l'avion n'est pas enregistrée. On considère que la mission s'est déroulée comme prévu lorsque toutes les lignes de vol ont été suivies et lorsque tout le territoire a été observé. Dans la réalité, certaines zones n'étaient pas visibles à cause du relief ou d'une trajectoire non conforme à celle planifiée. Le but de cette étude est de proposer une méthode qui permette d'identifier les zones non visibles lors d'une mission de recherche aérienne à l'aide de la combinaison des technologies du positionnement par satellites GPS (Global Positioning System) et des systèmes d'information géographique (SIG). Trois aspects doivent être considérés pour proposer une solution: 1) Il est nécessaire de choisir et de valider le mode de positionnement approprié à la saisie de la trajectoire des avions de recherche, 2) Il faut choisir le type et la résolution du modèle numérique pour identifier les zones qui ne peuvent être observées, 3) Il faut déterminer l'espacement optimal entre les points et les

autres paramètres qui conditionnent l'analyse de visibilité afin de réduire les temps de calculs lors de l'identification des zones non observables.

Les résultats obtenus à ce jour confirment l'intérêt d'utiliser les technologies géomatiques dans ce contexte et la pertinence de la solution envisagée.

Laurent Gèzaine
Étudiant

Dr Jean-Jacques Chevallier
Directeur

Dr Rock Santerre
Co-directeur

AVANT-PROPOS

Je voudrais remercier les personnes suivantes qui m'ont aidé de différentes façons. Mes directeurs de recherche : Dr Jean-Jacques Chevallier et Dr Rock Santerre, pour leur appui scientifique fourni tout au long de ce projet de recherche. Je remercie également les techniciens du laboratoire de métrologie-géodésie de l'Université Laval : Richard Gauthier, Jean-Arthur Fradette et Gaston Grenier pour leur aide lors de la collecte de données GPS, Yves van Chestein pour m'avoir permis d'utiliser ses équipements informatiques et pour ses conseils techniques, Roger Lamontagne (responsable de la formation de l'ACRSA-SÉRABEC) et Daniel Morissette (directeur régional l'ACRSA-SÉRABEC) pour leurs conseils en matière de recherche et de sauvetage, Luc Lamoureux pour sa participation lors de la collecte de données GPS, ainsi que mes confrères étudiants Jean-François Saulnier, Réjean Lebrun et Boussaad Akrou pour leur soutien moral. Je remercie également Travaux publics Canada, Aéro Photo (1961) Inc. et GéoLocation pour avoir fourni les équipements manquants.

Finalement, j'aimerais remercier particulièrement ma conjointe Mylène Latulippe, mes parents, ainsi que mes ami(e)s pour leur support moral et leur encouragement qui m'ont permis de mener à terme ce projet de maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	i
Avant-propos.....	iii
Table des matières	iv
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	x
CHAPITRE 1 : Problématique, objectifs et méthodologie.....	1
1.1 Contexte	1
1.1.1 Situation actuelle.....	2
1.1.2 Forces armées canadiennes	3
1.1.3 Organismes civils - ACRSA.....	5
1.1.3.1 Déclenchement d'une opération SAR	5
1.1.3.2 Méthode : phases d'une mission.....	7
1.1.3.3 Moyens : équipements utilisés.....	8
1.2 Problématique	9
1.3 Objectifs du projet de recherche	10
1.3.1 Objectif principal	10
1.3.2 Objectifs spécifiques.....	11
1.4 Méthodologie	11
1.5 Recherches antérieures	11
1.6 Contribution de la recherche.....	12
1.7 Contenu.....	13

CHAPITRE 2 : Positionnement par satellites GPS.....	14
2.1 Historique du positionnement par satellites GPS	14
2.2 Concept du positionnement par satellites	15
2.3 Composantes du système GPS.....	17
2.4 Types d'observations.....	18
2.4.1 Mesure de pseudodistance	18
2.4.2 Mesure de phase.....	19
2.5 Précision des mesures effectuées par un récepteur	20
2.6 Erreurs inhérentes au positionnement GPS	21
2.6.1 Erreurs d'horloge	21
2.6.2 Erreurs d'orbite.....	23
2.6.3 Erreurs dues à la troposphère.....	24
2.6.4 Erreurs dues à l'ionosphère	26
2.6.5 Multitrajets.....	29
2.7 Disponibilité sélective ou accès sélectif	30
2.8 Dispositif d'anti-leurrage.....	31
2.9 Type de positionnement.....	31
2.9.1 Positionnement statique	32
2.9.2 Positionnement cinématique	32
2.10 Techniques de positionnement.....	32
2.10.1 Positionnement absolu avec des mesures de pseudodistance	32
2.10.2 Positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance	34
2.10.3 Positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance filtrées	38
2.10.4 Positionnement relatif avec des mesures de phase	40
2.11 Ordre de grandeur des précisions du positionnement par satellites GPS	42
CHAPITRE 3 : Modèle numérique de terrain	43
3.1 Système d'information géographique.....	43
3.1.1 Historique.....	43
3.1.2 Définition	44
3.1.3 Description du SIG	44
3.1.4 Type de données SIG.....	44
3.1.5 Fonctionnalités des SIG.....	46
3.2 Modèle numérique de terrain.....	48
3.2.1 Types de modèle numérique de terrain.....	49
3.2.2 Génération du MNT.....	51
3.2.3 Manipulations du MNT	52
3.2.4 Traitements sur le MNT.....	54

3.2.5	Visualisation des MNT	55
3.2.6	Applications des MNT	57
3.3	Analyse de visibilité.....	58
3.3.1	Concept de zone non visible	58
3.3.2	Paramètres à considérer	59
3.3.3	Détection de zones non visibles.....	61

CHAPITRE 4 : Suivi des opérations de recherche et de sauvetage aériens....63

4.1	Introduction.....	63
4.2	Secteur test.....	64
4.3	Positionnement par satellites	65
4.3.1	Aspects techniques.....	65
4.3.2	Emplacement des stations de référence	66
4.3.3	Comparaison entre l'absolu et le relatif avec mesures de pseudodistance ...	68
4.3.4	Comparaison du positionnement relatif.....	70
4.3.5	Comparaison entre le positionnement relatif et l'OTF	73
4.3.6	Choix d'une technique de positionnement.....	76
4.4	Transformation de l'altitude géodésique	77
4.5	Trajectoire injectée dans le SIG	78
4.6	Analyse de visibilité.....	79
4.6.1	Aspects techniques.....	79
4.6.2	Paramètres à considérer lors de l'analyse de visibilité	79
4.6.2.1	Composante 'algorithme'	80
4.6.2.2	Composante 'position'.....	80
4.6.2.3	Composante 'modèle numérique de terrain'	81
4.6.3	Justification de l'hypothèse de solution.....	82
4.6.3.1	Pas de la radiale.....	82
4.6.3.2	Espacement des points d'analyse	83
4.6.3.3	Hauteur du point d'analyse.....	84
4.6.4	Analyse de visibilité avec TIN (secteur non rehaussé).....	86
4.6.5	Analyse de visibilité avec GRID (secteur rehaussé).....	88
4.6.5.1	Influence des peuplements forestiers.....	88
4.6.5.2	Influence de la résolution sur le relief	89
4.6.5.3	Choix de la résolution du MNT GRID	90
4.6.5.4	Rehaussement.....	91
4.7	Solution préconisée pour un outil opérationnel	93
4.8	Limites de l'outil (SORSA)	94

Conclusion	96
-------------------------	-----------

Références.....	100
Annexe A : Transformations de coordonnées.....	104
A.1 Transformation des coordonnées géodésiques en coordonnées terrestre moyen	104
A.2 Transformation des coordonnées terrestre moyen en coordonnées géodésiques	105
A.3 Transformation du système terrestre moyen au système géodésique local	107
A.4 Altitude géodésique et altitude orthométrique.....	108

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Localisation et répartition des CCOS canadiens.	3
Figure 1.2 : CC-155 Buffalo DHC-5.	4
Figure 1.3 : CC-138 Twin Otter DHC-6.	4
Figure 1.4 : CC-130 Hercules.	4
Figure 1.5 : CH-146 Griffon.	4
Figure 1.6 : CH-113 Labrador.	5
Figure 1.7 : Phases d'une mission de recherche aérienne.	7
Figure 1.8 : Exemple d'un avion de recherche utilisé par l'ACRSA (Cessna 172).	8
Figure 1.9 : Instruments de navigation utilisés (tableau de bord du Cessna 172).	9
Figure 2.1 : Principe du positionnement absolu (d'après Wells et al, 1986).	15
Figure 2.2 : Principe de la trilatération spatiale.	16
Figure 2.3 : Précision en fonction de la distance (d'après Enge et Parkinson, 1995).	23
Figure 2.4 : Milieu traversé par les ondes radioélectriques (d'après Forgues, 1996).	25
Figure 2.5 : Multitrajets (d'après Hofmann-Wellenhof et al, 1994).	29
Figure 3.1 : Opérations possibles sur un MNT (d'après Weibel et Heller, 1991).	49
Figure 3.2 : Comparaison d'un MNT TIN et d'un MNT GRID.	49
Figure 3.3 : Conversion d'un MNT TIN en GRID.	54
Figure 3.4 : Concept d'une zone non visible.	59
Figure 3.5 : Paramètres à considérer lors de l'analyse de visibilité.	60
Figure 3.6 : Profil et vue en plan d'une radiale.	61
Figure 3.7 : Type de relief générant des zones non visibles lors d'une mission.	62
Figure 4.1 : Vue d'ensemble du secteur sur lequel les tests ont été effectués.	64
Figure 4.2 : Avion utilisé lors de la collecte de données GPS.	65
Figure 4.3 : Antenne GPS aéroprofilée bifréquence.	66

Figure 4.4 : Récepteur GPS (Ashtech Z-XII).	66
Figure 4.5 : Localisation des stations de référence GPS.....	67
Figure 4.6 : DN entre le positionnement absolu et le relatif (PEPS).	69
Figure 4.7 : DE entre le positionnement absolu et le relatif (PEPS).	69
Figure 4.8 : Dh entre le positionnement absolu et le relatif (PEPS).	69
Figure 4.9 : Distance entre l'avion et les deux stations de référence.....	71
Figure 4.10 : DN entre les coordonnées obtenues à partir de PEPS et FORET.	72
Figure 4.11 : DE entre les coordonnées obtenues à partir de PEPS et FORET.....	72
Figure 4.12 : Dh entre les coordonnées obtenues à partir de PEPS et FORET.	72
Figure 4.13 : DN entre le relatif par rapport à l'OTF à la station PEPS.....	74
Figure 4.14 : DE entre le relatif par rapport à l'OTF à la station PEPS.	74
Figure 4.15 : Dh entre le relatif par rapport à l'OTF à la station PEPS.....	74
Figure 4.16 : DN entre le relatif par rapport à l'OTF à la station FORET.	75
Figure 4.17 : DE entre le relatif par rapport à l'OTF à la station FORET.....	75
Figure 4.18 : Dh entre le relatif par rapport à l'OTF à la station FORET.	75
Figure 4.19 : Altitude géodésique de l'avion durant la mission.	77
Figure 4.20 : Vue perspective de la trajectoire de l'avion lors de la mission.	78
Figure 4.21 : Influence du pas de la radiale sur la détection des zones non visibles.	82
Figure 4.22 : Influence de l'espacement des points d'analyse sur la détection des zones....	83
Figure 4.23 : Influence de l'imprécision du positionnement absolu altimétrique.	85
Figure 4.24 : Lignes de vol suivies lors de la mission.	86
Figure 4.25 : Zones non observables lors de la mission.	87
Figure 4.26 : Influence du couvert forestier sur l'identification des zones non visibles.	88
Figure 4.27 : Influence de la résolution d'un MNT GRID sur le relief.	89
Figure 4.28 : Superficies des zones critiques en fonction de la résolution du MNT.	91
Figure 4.29 : Rehaussement du modèle avec une ligne à haute tension.	92
Figure 4.30 : Territoire avec ligne à haute tension.	92
Figure 4.31 : Zones non visibles sur le modèle rehaussé.....	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Nombre d'accidents aériens ayant requis une intervention SAR.	2
Tableau 2.1 : Précisions des observations GPS (d'après Santerre, 1995).	20
Tableau 2.2 : Sources d'erreurs du positionnement par satellites GPS.	21
Tableau 2.3 : Propagation des erreurs d'orbites sur une ligne de base.	24
Tableau 2.4 : Erreur maximale causée sur les observations par les multitrajets.	30
Tableau 2.5 : Ordre de grandeur des précisions du positionnement GPS.....	42
Tableau 4.1 : Sommaire entre l'absolu et le relatif (PEPS).	70
Tableau 4.2 : Sommaire entre le relatif (PEPS) et le relatif (FORET).	73
Tableau 4.3 : Sommaire entre le relatif et l'OTF.....	76

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

1.1 Contexte

Le Canada s'étend sur une superficie de 9 960 000 km² pour une population inférieure à 30 millions d'habitants. De grands territoires sont donc inoccupés. Certains territoires peuvent être inhospitaliers pour l'être humain de par le climat, le relief, la densité du couvert forestier et la faune qui y règnent. De nos jours, l'avion est un moyen couramment utilisé pour se déplacer, fournir l'approvisionnement aux régions éloignées, épandre des produits chimiques, photographier le territoire pour fins d'inventaires forestiers, etc. Lors de ces déplacements aériens, il peut arriver qu'un pilote ait des problèmes techniques, un imprévu ou un accident. Lorsque des avions ou des personnes sont portés disparus, il est pratiquement impossible de les retrouver ou de leur porter secours par les moyens terrestres traditionnels. Les recherches et les sauvetages sont conditionnés par la nature du territoire, son occupation, son relief et sa couverture. Un des moyens utilisés pour porter secours à ces personnes est l'utilisation d'aéronefs.

En 1947, la responsabilité des opérations de recherche et de sauvetage (SAR - *Search and Rescue*) menées à l'échelle nationale a été confiée aux forces armées canadiennes. De nos jours, cette responsabilité est partagée entre le ministère de la Défense nationale (MDN), Pêches et Océans (Garde côtière canadienne), le Secrétariat national Recherche et

sauvetage, d'autres ministères et organismes fédéraux, les services de police de l'ensemble du Canada, l'Association Civile de Recherche et de Sauvetage Aériens (ACRSA) et des centaines de bénévoles.

Le tableau 1.1 présente un sommaire hebdomadaire des opérations de recherche et de sauvetage aériens effectuées au Canada sur une période de huit semaines. Suite à l'analyse de ce tableau, il est possible d'affirmer qu'en moyenne 23 accidents par semaine se produisent sur notre territoire. Depuis le début de l'année, plus de 375 accidents ont été recensés et ont nécessité l'intervention d'organismes spécialisés [Secrétariat national Recherche et sauvetage, 1997]. On peut noter que 5 % des personnes portées disparues ne sont jamais retrouvées [Morissette, 1997].

Tableau 1.1 : Nombre d'accidents aériens ayant requis une intervention SAR.

Période	Nombre d'accidents
02/06/97 au 08/06/97	22
09/06/97 au 15/06/97	24
16/06/97 au 22/06/97	16
23/06/97 au 29/06/97	29
30/06/97 au 06/07/97	20
07/07/97 au 13/07/97	27

1.1.1 Situation actuelle

Au Canada, la recherche de personnes portées disparues en territoire inhospitalier est dirigée par les Centres de Coordination des Opérations de Sauvetage (CCOS). La coordination des ressources et la rapidité d'intervention sont les facteurs clés d'un sauvetage réussi. Les CCOS contrôlent, coordonnent et dirigent les opérations de recherche et de sauvetage. Le territoire canadien est subdivisé en trois régions pour réduire et uniformiser les temps de réponse lors d'un accident nécessitant l'intervention des organismes de recherche et de sauvetage. Ces centres sont localisés à Trenton, Halifax et Victoria

(figure 1.1). La province du Québec est sous la juridiction des CCOS de Halifax et de Trenton.

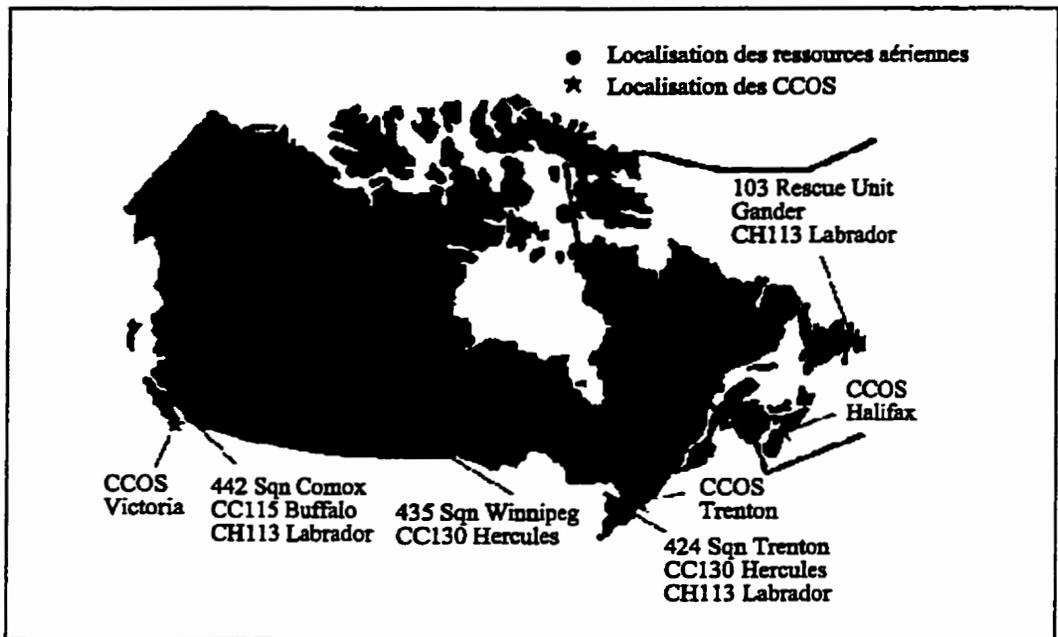


Figure 1.1 : Localisation et répartition des CCOS canadiens.

Les CCOS sont dirigés conjointement par le personnel des forces armées canadiennes et de la Garde côtière. Les forces armées supervisent les interventions terrestres, tandis que la garde côtière s'occupe des interventions maritimes. Les CCOS supervisent l'intervention requise en recueillant l'information disponible, en contactant l'organisme d'intervention (forces armées canadiennes ou organismes civils) et en fournissant les instructions à suivre.

1.1.2 Forces armées canadiennes

Lorsqu'un accident survient, l'armée est la première unité d'intervention, car elle est la plus apte à satisfaire les exigences d'une intervention rapide et efficace. Les forces armées canadiennes sont chargées, selon la directive 18 du Cabinet fédéral datée du 18 juin 1947, de fournir des ressources aériennes en appui aux opérations de recherche et sauvetage à l'intérieur du Canada et sur ses voies maritimes. Pour ce faire, plusieurs escadrons spécialisés sont chargés des opérations SAR. Ces escadrons sont disponibles et opérationnels en tout temps. Plus de 700 membres des forces armées canadiennes sont

directement affectés aux opérations SAR [Secrétariat National Recherche et Sauvetage, 1997]. Pour effectuer une mission de recherche et de sauvetage, les forces armées disposent de gros moyens. Les équipements utilisés pour survoler un secteur sont des hélicoptères (CH-113 Labrador et CH-146 Griffon), des avions de transport à décollage court et à grande manœuvrabilité (CC-130 Hercules, CC-155 Buffalo DHC-5 et CC-138 Twin Otter) (figures 1.2 à 1.6). De plus, les forces armées canadiennes disposent de technologies géomatiques tel que le projet PASSPORT (section 1.5). Par comparaison, la figure 1.8 présente les moyens, beaucoup plus légers, qu'utilisent les organismes civils pour effectuer des missions de recherche aériennes équivalentes.

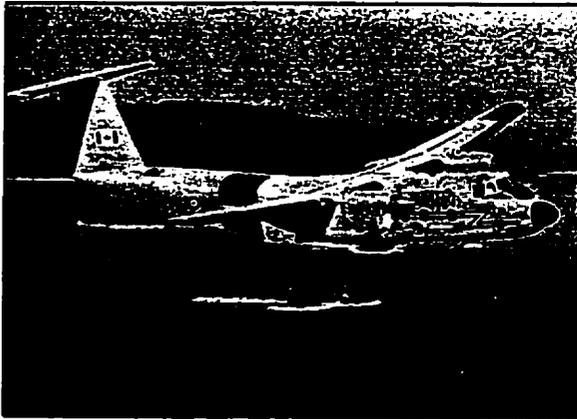


Figure 1.2 : CC-155 Buffalo DHC-5.



Figure 1.3 : CC-138 Twin Otter DHC-6.

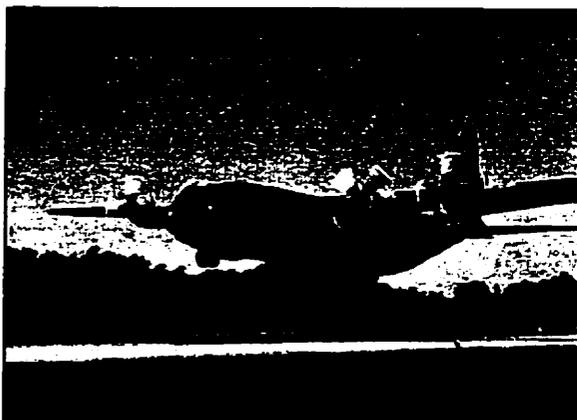


Figure 1.4 : CC-130 Hercules.

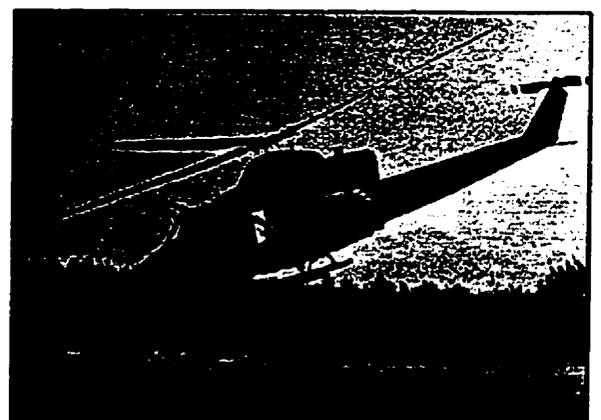


Figure 1.5 : CH-146 Griffon.



Figure 1.6 : CH-113 Labrador.

1.1.3 Organismes civils - ACRSA

Le deuxième palier d'intervention est constitué de l'ACRSA, fondée en 1983 en attente d'un programme fédéral de recherche et de sauvetage. Cet organisme regroupe des volontaires civils à travers tout le Canada et met à la disposition des forces armées canadiennes 450 avions privés [National Defence, 1997]. Ces volontaires ont suivi une formation pour les opérations de recherche et de sauvetage. L'ACRSA a pour mandat d'effectuer des missions de recherche aériennes lorsque des personnes sont en détresse sur le territoire canadien. L'ACRSA poursuit deux principaux objectifs : le premier est d'organiser et d'entraîner des groupes de pilotes d'avions privés, de navigateurs et d'observateurs afin d'assister les forces armées canadiennes dans la recherche aérienne ; le second est de promouvoir la sécurité aérienne par des cours de formations théoriques et pratiques.

1.1.3.1 Déclenchement d'une opération SAR

Plusieurs conditions peuvent déclencher le processus de recherche et de sauvetage : la détection d'un ELT (*Electronic Localisation Transmitter*), le non respect d'un plan de vol déposé auprès d'un organe du contrôle aérien, un appel de détresse ou une annonce de personne disparue.

Une recherche est déclenchée lorsque le signal d'un ELT est détecté. Tous les avions doivent être munis d'une telle radiobalise de détresse lorsque les déplacements sont à l'extérieur d'un rayon de 25 milles nautiques (environ 45 km) de l'aéroport, afin d'être localisés lors d'un éventuel accident. Un ELT est une radiobalise qui émet un signal sur des fréquences d'urgence, qu'elle soit activée manuellement par une personne ou automatiquement lors d'un impact. Ce signal peut être détecté et localisé par le système international COSPAR/SARSART. Il comprend six satellites, trois russes et trois américains. Les satellites russes se déplacent sur une orbite polaire à 1 000 km d'altitude et leur période de révolution est de 110 minutes. Les satellites américains sont situés à 850 km d'altitude et leur période de révolution est 100 minutes. Tous ces satellites sont équipés d'un système de localisation basé sur le principe Doppler (la fréquence du signal émis par le ELT diffère de celle qui est captée par les satellites).

Une recherche est aussi déclenchée lorsqu'une tour de contrôle reçoit un appel de détresse émis par un pilote d'avion. Lorsqu'un pilote est en danger (ennuis techniques, mauvaises conditions de vol, etc.), celui-ci peut appeler la tour de contrôle la plus proche et demander de l'assistance ou des secours.

Une recherche est déclenchée lorsqu'un pilote ne respecte pas le plan de vol déposé auprès d'une personne de confiance ou d'un organe du contrôle aérien. Avant de partir, un pilote est obligé de déposer un plan de vol pour tout vol aux instruments ou pour un vol à vue à plus de 25 milles nautiques de l'aéroport. Sur un plan de vol, on retrouve principalement les lieux du départ et de l'arrivée, le nombre d'occupants à bord de l'avion, le type d'avion utilisé, l'heure du départ et de l'arrivée prévue, la durée prévue du vol, l'itinéraire. Ces informations ne sont qu'une mesure de sécurité et facilitent le processus de recherche. Lorsqu'un pilote ne communique aucun changement à son horaire et qu'il n'est pas arrivé dans les délais (60 minutes après l'heure d'arrivée ou à l'heure déterminée par le pilote) la tour de contrôle lance automatiquement les recherches.

1.1.3.2 Méthode : phases d'une mission

Les opérations de recherche et sauvetage aériens effectuées par les organismes civils peuvent se décomposer en trois phases : la planification, l'exécution et le suivi (figure 1.7).

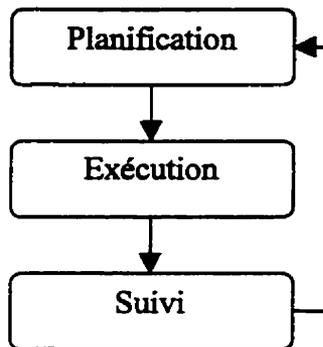


Figure 1.7 : Phases d'une mission de recherche aérienne.

La planification consiste à préparer les missions de recherche. Le responsable des recherches doit identifier, à partir des informations que le CCOS lui a transmises, la zone sur laquelle les opérations de sauvetage seront effectuées. La superficie du territoire à couvrir est fonction de plusieurs facteurs tels que le plan de vol, la dernière position connue, le type et l'autonomie de l'avion recherché, le nombre de passagers, les dernières conditions météorologiques, etc. Le responsable des recherches mobilise les ressources nécessaires et communique aux volontaires de l'ACRSA toutes les informations qu'il possède afin de faciliter l'identification de la cible recherchée. Le territoire à couvrir est ensuite subdivisé en secteurs, afin de répartir les opérations de recherche entre les différentes équipes. Chaque équipe doit couvrir une surface approximative de 10 milles (18.5 km) par 20 milles nautiques (37 km) et doit tracer son plan de vol sur des cartes au 1:250 000. Pour ce faire, les équipes reproduisent sur leur carte des patrons de recherche standard figurant sur une plaque de plastique transparente.

L'exécution consiste à partir avec les avions, survoler chacun des secteurs et suivre les lignes de vol prévues lors de la planification. Chaque équipe doit survoler son secteur de recherche à une hauteur constante de 1000 pieds/sol (300 m). Les observateurs balayent

visuellement le territoire, de chaque côté de l'avion, sur une distance d'un mille nautique, à la recherche de la cible ou d'indices permettant de la localiser.

Le suivi consiste à faire le bilan de la mission lorsque les avions reviennent à la base. Chaque équipe rédige un rapport qu'elle communique au responsable des recherches. Ce rapport contient la localisation du secteur survolé, la durée et l'efficacité de la recherche, le pourcentage de la zone observée et des remarques faites par l'équipage lors de la mission. C'est à ce stade qu'est décidé si les opérations reprennent ou qu'il est considéré que le secteur a été bien observé. Lorsqu'une ou plusieurs équipes doivent retourner survoler un secteur, le processus de recherche reprend à partir de l'étape de la planification.

1.1.3.3 Moyens : équipements utilisés

Pour survoler le territoire, l'ACRSA utilise des avions privés de type Cessna (figure 1.8), des récepteurs GPS (bas de gamme), des cartes (1:250 000 et 1:500 000), des règles et des crayons. Lors des recherches, quatre personnes prennent place à bord d'un avion. L'équipe est formée d'un pilote, d'un navigateur et de deux observateurs. Durant la mission, le navigateur fournit les instructions au pilote et aux observateurs en faisant la correspondance entre le territoire survolé et la carte. Le pilote utilise le compas gyroscopique, l'altimètre et la boussole pour s'orienter sur les lignes de vol à suivre (figure 1.9).



Figure 1.8 : Exemple d'un avion de recherche utilisé par l'ACRSA (Cessna 172).

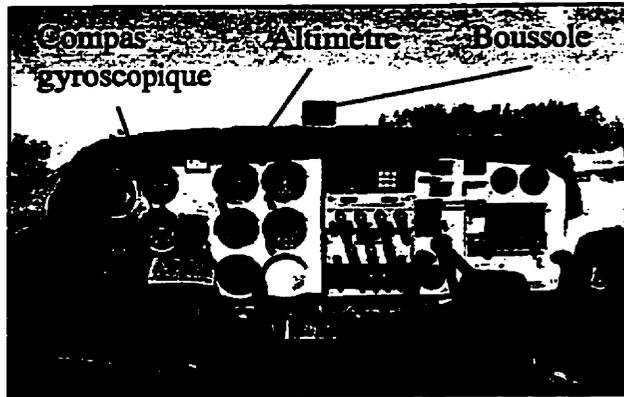


Figure 1.9 : Instruments de navigation utilisés (tableau de bord du Cessna 172).

1.2 Problématique

La planification d'une mission aérienne par une équipe de l'ACRSA est imprécise car celle-ci est effectuée à partir d'une carte dont l'échelle est de 1:250 000. Sur ces cartes, 1 mm équivaut à 250 m sur le terrain. Une erreur de quelques millimètres lors de la planification des lignes de vol peut avoir de graves conséquences sur l'efficacité de la recherche. Ces cartes ont l'avantage de couvrir de grands territoires. En contrepartie, beaucoup d'informations n'y apparaissent pas : plus l'échelle d'une carte est petite, plus le niveau de détail des données est faible. La planification est aussi superficielle, car il est difficile pour une équipe de recherche de tenir compte du relief, ce dernier étant très difficile à percevoir. Ainsi, l'avion recherché peut se trouver dans un endroit non apparent sur ce type de cartes (ravins, rivière encastrée, etc.).

Lors de l'exécution d'une mission, il est difficile pour un pilote de suivre les lignes de vol planifiées car la navigation est imprécise. Le navigateur utilise pour se positionner la boussole et la carte. Durant l'hiver, il est plus difficile de se situer sur la carte : la concordance entre le territoire survolé et la carte est laborieuse puisque la neige couvre certains détails qui peuvent permettre au navigateur de se repérer. De plus, certains détails comme des petits lacs, rivières, chemins forestiers ou routes facilitant le positionnement en régions éloignées peuvent ne pas être apparents sur la carte. En plus de la navigation imprécise, l'avion subit des déplacements involontaires provoqués par des turbulences

("poches d'air"). En quelques fractions de seconde, l'avion peut quitter la trajectoire qu'il suivait.

Le suivi d'une mission est laborieux, car la trajectoire des avions n'est pas enregistrée. Lorsque les avions reviennent à la base, il est difficile de savoir si les lignes de vol ont réellement été suivies et si le territoire a été bien couvert par les équipages de l'ACRSA. Le seul document qui peut faire office de données, concernant les opérations SAR au-dessus d'un secteur, est le rapport rédigé par chacune des équipes.

À ce stade, il est nécessaire de mentionner que ce projet de recherche ne vise pas à fournir une solution à chacune des phases d'une mission de recherche et de sauvetage. L'emphase de la recherche portera sur la phase du *suivi* d'une mission, car c'est à ce niveau que la combinaison des techniques géomatiques sera la plus efficace pour les opérations menées par l'ACRSA, et pour lesquelles rien n'a encore été fait jusqu'à ce jour. De plus, un outil géomatique (le projet PASSPORT) a déjà été développé pour les forces armées afin de soutenir la planification d'une mission. Au niveau de l'exécution, il est pratiquement impossible d'améliorer cette étape qui dépend essentiellement du type d'aéronef utilisé et des conditions atmosphériques.

1.3 Objectifs du projet de recherche

1.3.1 Objectif principal

L'amélioration du *suivi* des opérations de recherche et de sauvetage aériens se fera par la conception d'un outil géomatique utilisant les technologies du Système d'Information Géographique (SIG) et du positionnement par satellites (GPS). La saisie précise de la trajectoire suivie par un avion de recherche lors d'une mission sera faite avec le système de positionnement GPS et l'analyse de visibilité sera effectuée à l'aide des outils SIG. L'outil géomatique résultant permettra d'identifier en post-traitement les zones qui n'ont pu être observées par une équipe de recherche de l'ACRSA, lors d'une mission aérienne SAR.

1.3.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques qui permettent d'identifier les composantes d'une solution pour la conception de l'outil géomatique sont les suivants :

1. Choix et validation du type de positionnement GPS requis ;
2. Choix et validation de la résolution du modèle numérique de terrain requis, afin de représenter fidèlement le territoire survolé et de permettre l'identification des zones non visibles ;
3. Choix des paramètres utilisés par le logiciel SIG pour les calculs de visibilité (espacement des points, pas de la radiale, rayon de la radiale, hauteur de l'observateur, champ d'analyse).

1.4 Méthodologie

La démarche suivie a été la suivante :

1. Un inventaire des outils géomatiques envisageables a été réalisé ;
2. Une série d'essais préliminaires a été effectuée sur un jeu de données numériques disponibles sur un secteur test ;
3. Une hypothèse de solution a été formulée, comprenant le choix d'un mode de positionnement par satellites, d'un type de modèle numérique de terrain et des paramètres conditionnant l'analyse de visibilité ;
4. L'hypothèse de solution a ensuite été vérifiée par des tests comprenant la collecte de données GPS par avion sur le secteur choisi.

1.5 Recherches antérieures

Le Centre de Recherches pour la Défense de Valcartier (CRDV) a réalisé, en collaboration avec une firme privée et le Centre de Recherche Informatique de Montréal (CRIM), un système d'aide à la décision pour les opérations de recherche et de sauvetage. L'outil PASSPORT a pour fonction principale d'aider les centres de coordination des opérations de

sauvetage et les forces armées canadiennes dans la planification des opérations de recherche. Il permet d'optimiser la trajectoire d'aéronefs afin de maximiser les chances de détection de personnes portées disparues. Il permet aussi de mieux planifier le parcours des véhicules ou d'individus au sol lors d'une intervention. Le projet PASSPORT s'appuie sur plusieurs technologies de pointe telles que le traitement parallèle et la visualisation tridimensionnelle. L'utilisation d'ordinateurs parallèles permet principalement d'accélérer les différents traitements : le temps d'intervention étant le facteur clé d'une intervention réussie. L'exploitation de données topographiques multicouches à haute résolution permet d'atteindre un haut niveau de réalisme lors des différents traitements et lors de la visualisation des résultats obtenus. L'outil PASSPORT peut tenir compte des caractéristiques de l'avion de recherche, des conditions d'observation, des contraintes d'illumination et des contraintes de temps. Cet outil est très avancé : malheureusement les moyens actuels dont disposent l'ACRSA ne permettent pas de l'utiliser, car il demande des équipements très sophistiqués.

1.6 Contribution de la recherche

Ce projet de recherche contribue principalement au succès des opérations de recherche et de sauvetage aériens effectuées par l'ACRSA. Il permet aux organismes civils d'obtenir un outil d'aide à la décision pour identifier les zones qui ne peuvent être observées lors du suivi d'une mission aérienne. Une fois mises en oeuvre dans la pratique, les améliorations proposées se traduiront par une augmentation de l'efficacité des recherches, en facilitant la planification de missions complémentaires.

De plus, ce projet de recherche résume et explique certaines notions de base sur les systèmes d'information géographique, les modèles numériques de terrain et le positionnement par satellites. Cette vulgarisation sera précieuse lors de la formation des équipages et des spécialistes engagés dans des opérations SAR.

1.7 Contenu

Le deuxième chapitre présente les concepts de base du positionnement par satellites GPS. On y retrouve entre autres, les notions de la trilatération spatiale, les différents types d'observations et leurs équations mathématiques, les principales sources d'erreurs à considérer (erreur d'orbites, erreur d'horloge, délai troposphérique, délai ionosphérique et multitrajets), les types de positionnement, le principe du positionnement absolu et du positionnement relatif ainsi que l'ordre de grandeur des précisions qu'il est possible d'obtenir avec le système GPS en mode cinématique.

Le troisième chapitre présente les notions reliées aux SIG et aux Modèles Numériques de Terrain (MNT). On y retrouve entre autres, un historique des SIG, des définitions, les fonctionnalités d'un SIG, les notions relatives aux MNT, les sources de données utilisées pour leur génération, les types de MNT, leurs avantages et inconvénients, les différentes opérations possibles sur les modèles numériques et les domaines d'application. L'analyse de visibilité y est ensuite abordée ainsi que le concept de zone non visible et les paramètres à considérer.

Le quatrième chapitre présente les résultats qui permettent de valider l'hypothèse de solution préconisée pour le Suivi des Opérations de Recherche et de Sauvetage Aériens (SORSA). Ce chapitre est divisé en deux parties : les résultats obtenus du positionnement par satellites et les résultats obtenus à partir d'un outil SIG. La première partie présente le secteur où les tests pratiques ont été réalisés, les équipements GPS utilisés, la localisation des stations de référence, la comparaison du positionnement absolu avec le positionnement relatif avec des mesures de code, la comparaison du positionnement relatif et la comparaison du positionnement relatif avec l'OTF (*On-The-Fly*). La deuxième partie présente les résultats obtenus avec l'outil SIG, les données utilisées, les paramètres à considérer lors de l'analyse de visibilité, la justification de l'hypothèse de solution, l'analyse de visibilité effectuée sur le modèle triangulé, l'influence des peuplements forestiers, l'influence de la résolution d'un MNT grille sur le relief, une méthode de sélection d'un modèle grille pour un secteur test et l'analyse de visibilité réalisée sur une portion du MNT rehaussé.

CHAPITRE 2

POSITIONNEMENT PAR SATELLITES GPS

Ce chapitre présente les notions qui permettent de comprendre le premier volet de l'hypothèse de solution préconisée (validation du positionnement cinématique aérien). Il fournit les éléments nécessaires à la bonne compréhension du positionnement par satellites : le concept du positionnement par satellites, les composantes du système GPS, les types d'observations, les erreurs inhérentes à considérer, la disponibilité sélective, le dispositif d'anti-leurrage, les différentes techniques de positionnement et leur précision.

2.1 Historique du positionnement par satellites GPS

Depuis toujours l'homme a cherché à s'orienter, à se positionner et à délimiter son environnement. Autrefois, la technologie ne permettait pas d'effectuer des mesures sur de longues distances. L'ère des premiers satellites artificiels permit de repousser ces limites. Le système NNSS (*Navy Navigation Satellite System*) ou aussi connu sous le nom de TRANSIT a été développé par l'armée américaine originalement pour des fins militaires. Le système comprenait huit satellites situés à une altitude de 1 100 km. De par sa configuration, le système TRANSIT avait deux principaux défauts : les satellites TRANSIT n'étaient pas toujours visibles en tout temps pour un site donné et la navigation était imprécise.

Le système de positionnement global (Global Positioning System - GPS) a donc été développé afin de remplacer le système TRANSIT. Les principaux objectifs étaient militaires. Ces objectifs étaient d'établir, tester, acquérir, et déployer un système de positionnement spatial pour positionner les ressources militaires. Une utilisation civile était aussi prévue. Le premier satellite GPS a été mis en orbite en 1978. Une série de lancements a suivi pour compléter la constellation des vingt-quatre satellites prévus et pour remplacer les satellites défectueux. Les coûts totaux du système GPS se chiffrent aujourd'hui à quelque 10 milliards de dollars américains. Plus d'une quarantaine de satellites ont été placés en orbite pour obtenir la constellation actuelle. Le système GPS peut être utilisé dans différents domaines : arpentage foncier, géodésie, cartographie, système d'information à référence spatiale, photogrammétrie, télédétection, mais aussi navigation aérienne et maritime, loisirs, chasse, etc.

2.2 Concept du positionnement par satellites

Le principe du système GPS repose sur un ensemble de satellites dont on connaît la trajectoire et la position en tout temps et qui émettent des signaux pouvant être captés par des récepteurs. Le concept du positionnement est illustré à la figure 2.1.

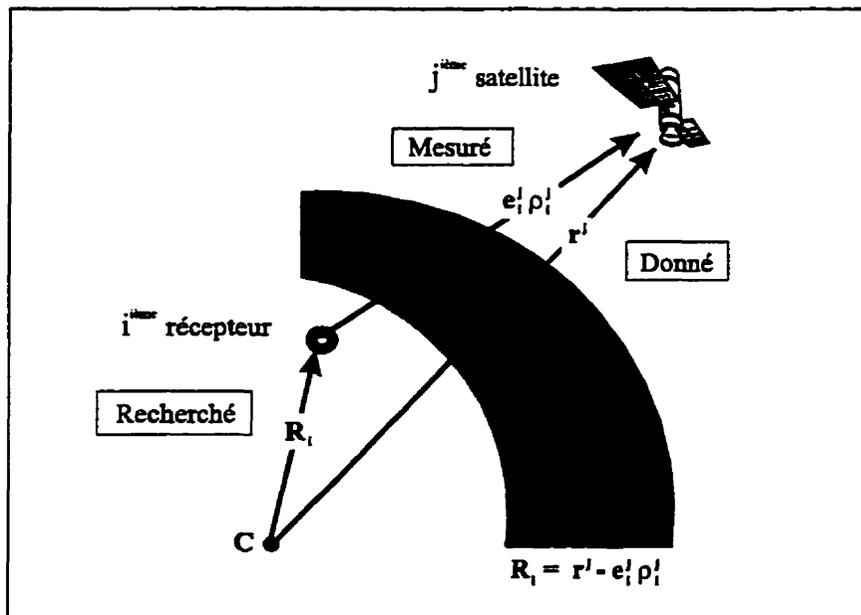


Figure 2.1 : Principe du positionnement absolu (d'après Wells et al, 1986).

En considérant le système GPS à une époque donnée, il est possible de calculer la position (r^j) des satellites à partir des éphémérides transmises. L'utilisation d'une horloge à l'intérieur du récepteur permet de calculer la distance récepteur - satellite (ρ_i^j). Le temps de propagation du signal, pour parcourir la distance satellite - récepteur, est déterminé à l'aide des horloges. Les positions des satellites sont exprimées par rapport à un système de coordonnées terrestre moyen.

Chaque distance récepteur - satellite définit une sphère dont le centre est l'antenne émettrice du satellite. La position d'un récepteur (R_i) est obtenue par trilatération spatiale (figure 2.2).

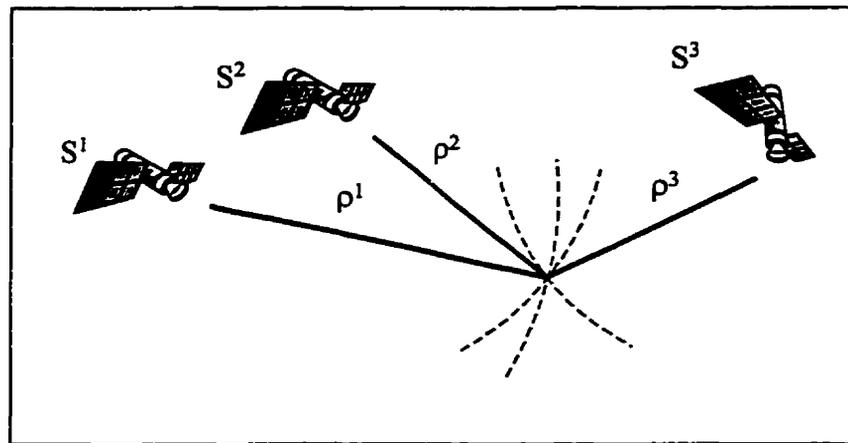


Figure 2.2 : Principe de la trilatération spatiale.

En connaissant la distance qui sépare le récepteur de chacun des satellites observés, on peut à l'aide de l'intersection de chacune des sphères, obtenir la position du récepteur. En pratique, le positionnement par satellites GPS requiert un minimum de quatre satellites pour obtenir une position tridimensionnelle, car il y a quatre inconnues à résoudre : les trois coordonnées et l'erreur de synchronisation d'horloge du récepteur.

La configuration de la constellation GPS permet d'observer jusqu'à 10 satellites simultanément lorsqu'un masque de 10° sur l'angle d'élévation est utilisé [Hofmann-Wellenhof et al, 1994]. Le système GPS permet d'obtenir une position tridimensionnelle en tout temps et partout à travers le monde entier, pour autant qu'aucun obstacle n'interfère

entre les satellites et le récepteur. Le système GPS fournit la possibilité de se positionner selon un système de coordonnées cartésiennes (x, y, z) ou des coordonnées géodésiques (latitude, longitude et altitude) (Annexe A) et de déterminer la vitesse du récepteur.

2.3 Composantes du système GPS

Les satellites NAVSTAR (*NAVigation Satellite Timing And Ranging*) orbitent à une altitude de 20 000 km au-dessus de la Terre. Cette altitude élevée permet à différents utilisateurs, très éloignés les uns des autres, de capter simultanément les signaux des mêmes satellites. La période de révolution de chacun des satellites GPS est de 11h 58 min : un satellite effectue donc deux tours complets autour de la Terre durant une même journée. La constellation comprend vingt-quatre satellites, répartis sur 6 plans orbitaux dont l'inclinaison est de 55° par rapport à l'équateur terrestre. Le système GPS comprend trois principaux segments : spatial, contrôle et utilisateur.

Segment spatial

Le segment spatial est constitué des vingt-quatre satellites opérationnels. Ce segment a pour fonction de générer et de transmettre les signaux GPS afin que les utilisateurs puissent obtenir des mesures de code (ou pseudodistance), des mesures de phase, des fréquences Doppler et qu'ils puissent recevoir les éphémérides transmises.

Segment de contrôle

Le segment de contrôle a pour principale fonction de prédire les orbites des satellites, de synchroniser les horloges, d'injecter des données et de surveiller l'état des satellites. Ce segment est constitué d'une station maîtresse et de stations de poursuite réparties à travers le monde entier. Les stations de poursuite traquent les satellites visibles afin de transmettre les données recueillies à la station maîtresse, où elles sont traitées dans le but de permettre la mise à jour du message de navigation des satellites.

Segment utilisateur

Le segment utilisateur est constitué des différents récepteurs : militaires et civils. Ce segment a pour fonction de fournir la position du récepteur.

2.4 Types d'observations

Les mesure de distances obtenues par la comparaison de codes identiques sont appelées *pseudodistance*. Les mesures de distance calculées à partir des différences de phase obtenues en comparant la phase du signal reçu du satellite à une époque et celle générée par le récepteur s'appellent *mesures de phase*. Les mesures *Doppler* sont déterminées par les différences de fréquences obtenues : la fréquence du signal émis par un satellite est différente de celle qui est reçue par le récepteur. Cette différence de fréquence s'explique par le fait que les satellites et le récepteur sont en mouvement continu.

Pour obtenir ces différentes mesures, on peut utiliser un récepteur GPS mono-fréquence ou bi-fréquence. En fonction du type de récepteur utilisé, les signaux GPS seront captés sur les deux bandes (L1 et L2) ou sur la bande L1 seulement. La bande L1 est modulée par le code C/A et le code P (ou Y)¹ et par un message qui contient entre autres les éphémérides. La bande L2 est modulée par le code P (ou Y) et par un message. La fréquence de la bande L1 est de 1575.42 MHz et celle de la deuxième bande est de 1227.6 MHz. La deuxième bande sert principalement à éliminer les erreurs dues à l'ionosphère et à faire des combinaisons de mesures de phase.

2.4.1 Mesure de pseudodistance

La pseudodistance est la mesure de la distance entre un satellite et un récepteur. Elle est obtenue en effectuant la différence entre l'instant de la transmission du signal par le satellite et celui de sa réception au récepteur. Le temps de propagation du signal requis pour parcourir la distance satellite-récepteur est mesuré en comparant des codes identiques de bruit pseudo-aléatoire (PRN : *Pseudo Random Noise*) générés par un satellite et par un récepteur. Pour ce faire, la réplique du code PRN (générée par le récepteur) est déplacée dans le temps jusqu'à ce qu'un maximum de corrélation soit obtenu entre le code généré par un satellite et celui généré par un récepteur. Le code généré au récepteur provient de

¹ Pour l'explication concernant le *code P (ou Y)*, le lecteur se référera à la section 2.8

l'horloge du récepteur et le code reçu provient de l'horloge du satellite. Ceci génère une *erreur de synchronisation* des horloges. Il est aussi nécessaire de tenir compte des autres erreurs telles que les erreurs dues à la propagation de l'onde dans l'atmosphère, les bruits et effets résiduels non modélisés.

L'équation d'observation pour la mesure de pseudodistance est définie de la façon suivante :

$$P = \rho + c dt - c dT + d_{ion} + d_{trop} + d_{mt_p} + \varepsilon_p \quad (2.1)$$

- où
- P : observation de pseudodistance (code P(ou Y) ou C/A) (m)
 - ρ : distance géométrique entre le récepteur et le satellite (m)
 - c : vitesse de la lumière dans le vide (m/s)
 - dt : erreur d'horloge du satellite (s)
 - dT : erreur d'horloge du récepteur (s)
 - d_{ion} : erreur de distance causée par la réfraction ionosphérique (m)
 - d_{trop} : erreur de distance causée par la réfraction troposphérique (m)
 - d_{mt_p} : erreur de distance causée par les multitrajets (m)
 - ε_p : bruit (code P(Y) ou C/A) et effets résiduels (m)

2.4.2 Mesure de phase

En pratique, on mesure une *différence de phase*, entre la phase générée par le récepteur au temps de réception et celle générée par le satellite (au temps de transmission) et reçue par le récepteur (au temps de réception). Cette différence de phase est fonction du temps de propagation de l'onde porteuse pour parcourir la distance récepteur-satellite. L'équation d'observation pour la mesure de phase est définie de la façon suivante :

$$\Phi = \rho + c dt - c dT + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + d_{mt_\Phi} + \varepsilon_\Phi \quad (2.2)$$

- où
- Φ : observation de phase de l'onde porteuse (m)
 - ρ : distance géométrique entre le récepteur et le satellite (m)
 - c : vitesse de la lumière dans le vide (m/s)
 - dt : erreur d'horloge du satellite (s)
 - dT : erreur d'horloge du récepteur (s)
 - λ : longueur d'onde de la porteuse (m)
 - N : nombre entier de longueurs d'onde (ambiguïté de phase)
 - d_{ion} : erreur de distance causée par la réfraction ionosphérique (m)

$dtrop$: erreur de distance causée par la réfraction troposphérique (m)

dmt_{ϕ} : erreur de distance causée par les multitrajets (m)

ε_{ϕ} : bruit et effets résiduels non modélisés (m)

La mesure de phase est une mesure de distance très précise, mais elle contient une ambiguïté : le nombre entier initial de longueurs d'onde contenu dans la distance récepteur - satellite n'est pas connu (inconnue supplémentaire à résoudre). Une ambiguïté de phase doit être déterminée pour chaque mesure effectuée : le récepteur mesure la phase de battement et compte le nombre entier de longueurs d'onde représentant la variation de distance récepteur - satellite depuis l'époque initiale d'observation. Tant qu'il n'y a pas de saut de cycle causé par une obstruction ou par un mauvais fonctionnement du récepteur, une seule ambiguïté sera calculée pour chaque paire de récepteur - satellite. La mesure de phase peut donc être interprétée comme une mesure très précise de la variation de distance récepteur - satellite.

2.5 Précision des mesures effectuées par un récepteur

La précision des mesures effectuées par un récepteur varie en fonction du type d'observations et de la bande porteuse utilisée (tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Précisions des observations GPS (d'après Santerre, 1995).

Observations	Précision (m)		Variance (m ²)	
	L1	L2	L1	L2
C/A	±3	-	9	-
P	±0.3	±0.3	0.09	0.09
Φ	±0.002	±0.0025	4×10^{-6}	6.25×10^{-6}

La résolution d'une mesure de pseudodistance diffère de celle d'une mesure de phase. L'ordre de grandeur de la résolution d'une mesure de pseudodistance pour le code C/A est de ± 3 m et de ± 0.3 m pour le code P (ou Y). L'ordre de grandeur d'une mesure de phase est

de ± 2 mm. Une mesure de phase est donc très précise ; par contre, elle est ambiguë. En plus de la précision des mesures effectuées par le récepteur, il faut tenir compte de toutes les erreurs inhérentes au positionnement avec le système GPS. Ces erreurs sont présentées à la section 2.6.

2.6 Erreurs inhérentes au positionnement GPS

Toutes les sources d'erreurs faussent la distance géométrique récepteur - satellite à moins qu'elles ne soient modélisées ou éliminées. Les principales sources d'erreurs qui affectent le système GPS sont divisées en trois catégories : les erreurs reliées au satellite, à l'atmosphère et au récepteur (tableau 2.2). Dans la première catégorie, il faut considérer les erreurs d'horloge et d'éphéméride (ou erreurs d'orbite). Les erreurs dues à la troposphère et à l'ionosphère constituent la deuxième catégorie. Finalement, les erreurs provenant du bruit ou des effets résiduels non modélisés, les multitrajets et les erreurs d'horloge font partie de la troisième catégorie.

Tableau 2.2 : Sources d'erreurs du positionnement par satellites GPS.

Source d'erreurs	Catégorie
Satellite	Erreurs d'horloge Erreurs d'orbite
Atmosphère	Délai ionosphérique Délai troposphérique
Récepteur	Erreurs d'horloge Multitrajets Bruit

2.6.1 Erreurs d'horloge

Les instruments de mesures électroniques traditionnels (le télémètre par exemple) calculent la distance entre l'appareil et un prisme de réflexion. Pour ce faire, l'onde est réfléchiée par

le prisme vers son point d'émission. En connaissant le temps de propagation de l'onde et sa vitesse de propagation, il est possible de déterminer la distance parcourue. Cette distance est calculée à partir de l'aller - retour qu'effectue l'onde. Une seule horloge est nécessaire pour effectuer ce genre de mesures. Le système GPS calcule directement le temps de propagation de l'onde entre un satellite et un récepteur. Pour ce faire, deux horloges sont nécessaires dont une est montée à bord d'un satellite et l'autre est à l'intérieur du récepteur. Les mesures de distance sont calculées directement : l'onde émise n'est pas réfléchi. En réduisant les erreurs dues à la propagation des ondes, une erreur supplémentaire s'ajoute : l'erreur de synchronisation des horloges. Notons que les horloges utilisées pour les satellites sont de qualité supérieure à celles des récepteurs. L'erreur d'horloge d'un satellite peut être modélisée par un polynôme algébrique d'ordre 2 pour chaque heure. Le polynôme qui permet de calculer l'erreur d'horloge d'un satellite est le suivant :

$$dt = a_0 + a_1 (t - t_{oc}) + a_2 (t - t_{oc})^2 \quad (2.3)$$

- où
- dt : erreur d'horloge du satellite (s)
 - a_0 : décalage (*offset*) de l'horloge (s)
 - a_1 : dérive de l'horloge (s/s)
 - a_2 : accélération de l'horloge (s^{-1})
 - t : temps de transmission sur l'échelle de temps GPS (s)
 - t_{oc} : temps de référence des coefficients d'horloge du satellite (s)

Les coefficients d'horloges (a_0 , a_1 , a_2 et t_{oc}) sont transmis dans le message du satellite. Ces paramètres servent principalement à corriger l'erreur d'horloge du satellite observé. L'erreur d'horloge d'un satellite est évaluée à une précision de ± 30 ns (± 10 m) [Wells et al, 1986] lorsque l'accès sélectif (SA) n'est pas activé par l'armée américaine. Sans la correction contenue dans les éphémérides, l'erreur de synchronisation est d'environ 1 ms (ou 300 km). L'erreur d'horloge d'un récepteur, la quatrième inconnue, est déterminée dans la compensation par moindres carrés en résolvant un paramètre d'horloge du récepteur à chaque époque d'observation.

2.6.2 Erreurs d'orbite

La qualité du positionnement avec le système GPS dépend essentiellement de la position des satellites observés. L'imprécision sur la position obtenue avec un seul récepteur est fortement corrélée avec l'erreur résultant de l'imprécision des éphémérides (ou erreurs d'orbites).

Certaines applications requièrent un positionnement de meilleure précision. Le positionnement relatif permet d'éliminer les effets de l'accès sélectif et toutes les erreurs communes aux deux sites d'observation, d'où le gain de précision. La figure 2.3 illustre la propagation des erreurs d'orbite sur une ligne de base. On constate que la longueur de la projection de l'erreur d'orbite sur la ligne *station mobile - satellite* est différente de celle de la projection sur la ligne *station fixe - satellite*. Dans le cas de la figure 2.3, l'erreur due aux éphémérides δr produit une petite erreur δr_s à la station fixe et elle produit une plus grande erreur δr_u à la station mobile.

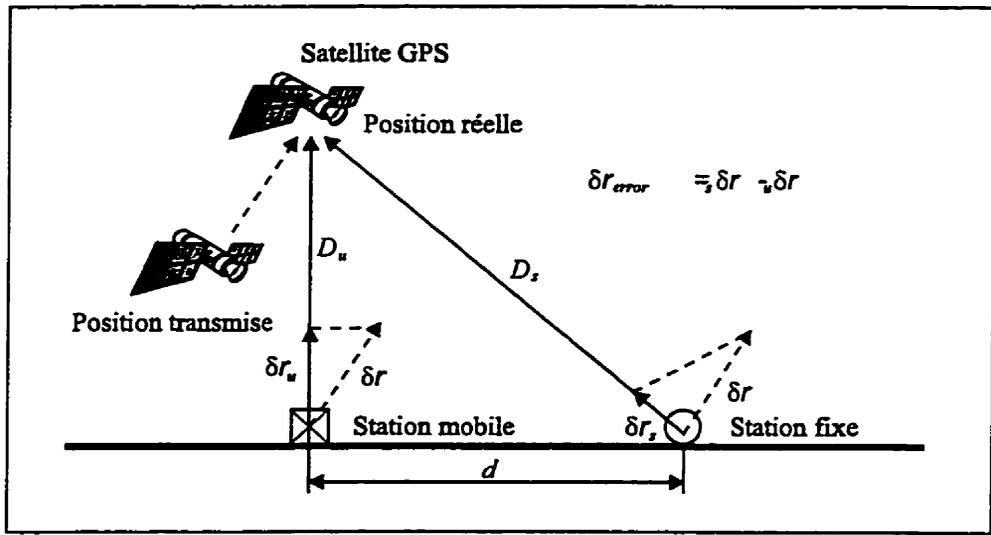


Figure 2.3 : Précision en fonction de la distance (d'après Enge et Parkinson, 1995).

Le positionnement relatif n'élimine donc pas toutes les erreurs d'orbites : les erreurs d'éphémérides ne peuvent s'annuler puisque leur influence est différente selon les positions relatives des récepteurs et du satellite ($\delta r_s - \delta r_u \neq 0$). L'efficacité des corrections transmises par une station de référence se dégrade en fonction de la distance b . En positionnement

relatif, l'effet des erreurs d'orbites est proportionnelle à la longueur de la ligne de base [Hofmann-Wellenhof et al, 1994]. La propagation des erreurs d'orbites sur une ligne peut être déterminée approximativement par la relation suivante :

$$\|db\| = \frac{b \|dr\|}{\rho} \quad (2.4)$$

- où $\|db\|$: erreur résultante sur la ligne de base (m)
 b : longueur de la ligne de base (m)
 $\|dr\|$: erreur d'orbite ou erreur de position du satellite (m)
 ρ : distance récepteur - satellite (m)

Le tableau 2.3 présente la propagation des erreurs d'éphémérides en fonction de la distance de séparation entre la station fixe et la station mobile. Pour les calculs de la propagation des erreurs, il est admis que la distance entre les satellites et le récepteur (ρ) est de l'ordre de 20 000 km et les erreurs d'orbites (dr) pour chacun des satellites sont de 10 m. À la suite de l'analyse, on constate que les erreurs dues aux éphémérides augmentent en fonction de la distance de séparation entre les deux stations.

Tableau 2.3 : Propagation des erreurs d'orbites sur une ligne de base.

B (km)	db (m)
100	0.05
1 000	0.5
5 000	2.5

$Dr = 10 \text{ m}, \rho = 20\,000 \text{ km}$

2.6.3 Erreurs dues à la troposphère

Les satellites GPS orbitent à 20 000 km d'altitude et sont situés hors de l'atmosphère. La troposphère est la partie de l'atmosphère comprise entre le sol et la stratosphère. Le signal émis par les satellites doit traverser la troposphère pour être capté par une antenne au sol (figure 2.4). Il est donc affecté par la réfraction troposphérique. La principale

caractéristique de la troposphère est qu'elle est un milieu non dispersif pour les ondes radioélectriques : les vitesses de phase et de groupe y sont égales. Le délai troposphérique pour une mesure de code et une mesure de phase est donc de même amplitude et ce, sur chaque onde porteuse. De plus, le délai troposphérique est de même magnitude sur les deux bandes.

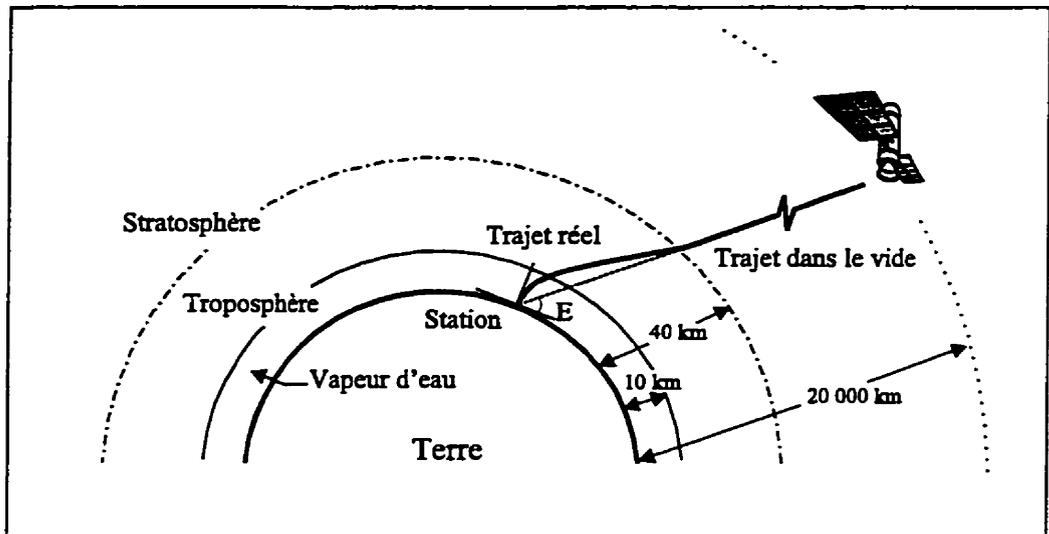


Figure 2.4 : Milieu traversé par les ondes radioélectriques (d'après Forgues, 1996).

La vitesse de déplacement d'une onde varie dans un milieu hétérogène : elle est accélérée ou décélérée en fonction de l'indice de réfraction du milieu. La réfraction troposphérique est une source d'erreurs importante pour les techniques de mesures en géodésie. La troposphère affecte principalement la composante verticale de la position obtenue (ou altitude). L'onde radioélectrique émise par les satellites GPS subit un ralentissement et un effet de courbure. Le délai troposphérique peut varier de 2 à 26 mètres [Forgues, 1996] selon l'angle d'élévation du satellite observé.

Des modèles mathématiques ont été élaborés pour représenter les effets de la troposphère sur la propagation de l'onde. Un modèle troposphérique est constitué du délai troposphérique zénithal et d'une fonction de projection troposphérique afin de déterminer le délai troposphérique selon l'angle d'élévation du satellite observé. On peut le décrire comme étant le produit du délai troposphérique zénithal et d'une fonction de projection qui

ramène celui-ci pour un angle d'élévation donné. Le délai troposphérique est généralement décomposé en deux parties : hydrostatique et humide. En fonction de la latitude du site d'observation, la vapeur d'eau est confinée approximativement dans les 10 premiers kilomètres de la troposphère. La vapeur d'eau n'étant pas distribuée de façon homogène, elle est donc difficile à prédire. La détermination de la composante humide le long de la trajectoire du signal GPS représente la plus grande difficulté à cause de la variation de la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Mathématiquement, le délai troposphérique est représenté de la façon suivante :

$$dtrop = d_w^z m_w(E) + d_d^z m_d(E) \quad (2.5)$$

- où
- $dtrop$: délai troposphérique pour un angle d'élévation donnée (m)
 - d_w^z : composante humide du délai troposphérique zénithal (m)
 - m_w : fonction de projection troposphérique pour la composante humide
 - E : angle d'élévation du satellite observé (°)
 - d_d^z : composante sèche du délai troposphérique zénithal (m)
 - m_d : fonction de projection troposphérique pour la composante sèche

Le délai troposphérique est donc fonction de l'angle d'élévation et des conditions météorologiques (température, pression et humidité relative de l'atmosphère). Plus l'angle d'élévation sera élevé, plus petit sera le délai troposphérique. Il faut donc éviter les satellites situés près de l'horizon lors du calcul d'une solution puisque le délai troposphérique y est maximal : l'onde traverse une plus grande partie de la troposphère.

2.6.4 Erreurs dues à l'ionosphère

L'ionosphère s'étend de 50 km à 1 000 km au-dessus de la surface terrestre. Les rayons ultraviolets émis par le soleil entrent en collision avec des molécules d'oxygène de la haute atmosphère et génèrent des ions. Lors de cette collision, des électrons sont arrachés aux molécules d'oxygène. La réfraction ionosphérique est proportionnelle à la densité d'électrons rencontrés lors du parcours de l'onde du satellite au récepteur. L'indicateur qui permet de quantifier la densité ionosphérique est le contenu total d'électrons (TEC). Le TEC est défini comme étant la quantité d'électrons contenus dans un cylindre vertical de

section de 1 m^2 qui s'élève de la surface terrestre pour atteindre le sommet de l'atmosphère. Il s'exprime en électrons par mètre carré (el/m^2). Le contenu total d'électrons est fonction de plusieurs facteurs : le temps local, la saison, la localisation du site d'observation (latitude géomagnétique), l'état de l'activité solaire et géomagnétique. Le TEC est à son maximum, dans la plupart des régions du globe, en début d'après-midi. L'effet diurne maximal survient à environ 14 heures ± 1 heure, temps local [Klobuchar, 1975]. L'ionosphère est un milieu dispersif pour les ondes radioélectriques : les vitesses de groupe sont inférieures aux vitesses de phase. À cause de l'ionosphère, les mesures de pseudodistance sont plus grandes et les mesures de phase sont plus courtes lorsqu'elles sont comparées à la vraie distance géométrique entre les satellites observés et le récepteur. De plus, la magnitude des mesures de pseudodistance et de phase observées sur les deux bandes diffèrent.

La valeur du délai ionosphérique au zénith est de 50 mètres ; à l'horizon, sa valeur extrême est de 150 mètres [Santerre, 1995]. Le délai ionosphérique peut être corrigé de 50% à 75% par des coefficients d'un modèle global de prédiction ionosphérique contenus dans le message transmis par les satellites, et ce lorsqu'ils sont appliqués à l'algorithme de positionnement pour les récepteurs mono-fréquence. Ces paramètres transmis ne permettent pas d'éliminer entièrement le délai ionosphérique, car ils ne s'appliquent qu'à un modèle global et non local. Le délai ionosphérique pour des mesures de pseudodistance bi-fréquence peut être calculé de la façon suivante. À partir de l'équation d'observation d'une mesure de pseudodistance (équation (2.1)), il est possible d'écrire celle-ci sous la forme suivante :

$$P_1 = \rho + c dt - c dT + d_{ion_1} + dtrop + dmt_p + \varepsilon_p \quad (2.6)$$

$$P_2 = \rho + c dt - c dT + d_{ion_2} + dtrop + dmt_p + \varepsilon_p \quad (2.7)$$

Sachant que le délai ionosphérique est défini de la façon suivante [Santerre, 1995]:

$$d_{ion_1} = \frac{40.3}{f_1^2} \text{TEC} \quad (2.8)$$

$$d_{ion_2} = \frac{40.3}{f_2^2} \text{TEC} = \frac{40.3f_1^2}{f_1^2 f_2^2} \text{TEC} \quad (2.9)$$

En soustrayant les observations de pseudodistance P_2 de P_1 , on obtient :

$$P_1 - P_2 = \text{dion}_1 - \text{dion}_2 \quad (2.10)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{40.3}{f_1^2} \text{TEC} \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right) \quad (2.11)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{40.3}{f_1^2} \text{TEC} \left(\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2}\right) \quad (2.12)$$

$$P_1 - P_2 = \text{dion}_1 \left(\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2}\right) \quad (2.13)$$

$$\text{dion}_1 = \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}\right)(P_1 - P_2) \quad (2.14)$$

- où dion_1 : délai de groupe ionosphérique sur la bande L1 pour une mesure de pseudodistance (m)
 f_1 : fréquence de l'onde porteuse L1 (Hz)
 f_2 : fréquence de l'onde porteuse L2 (Hz)
 P_1 : mesure de pseudodistance sur la bande L1 (m)
 P_2 : mesure de pseudodistance sur la bande L2 (m)

Le délai ionosphérique pour des mesures de phase bi-fréquence peut être calculé de façon similaire, sauf que les termes N_1 et N_2 sont ajoutés. À partir de l'équation d'observation d'une mesure de phase (équation (2.2)) et du même raisonnement, on obtient l'équation suivante [Santerre et al, 1994] :

$$\text{dion}_1 = \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}\right)(\Phi_1 - \Phi_2 - \lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2) \quad (2.15)$$

- où dion_1 : erreur de phase ionosphérique sur la bande L1 pour une mesure phase (m)
 f_1 : fréquence de l'onde porteuse L1 (Hz)
 f_2 : fréquence de l'onde porteuse L2 (Hz)
 Φ_1 : mesure de phase sur la bande L1 (m)
 Φ_2 : mesure de phase sur la bande L2 (m)
 N_1 : nombre entier de longueurs d'onde sur la bande L1
 N_2 : nombre entier de longueurs d'onde sur la bande L2

L'utilisation de récepteurs bi-fréquence permet de calculer le délai ionosphérique et permet de former la bande L3 par la combinaison des mesures de phases recueillies sur les bandes L1 et L2. L'équation qui permet de combiner les observations recueillies sur les deux bandes et de former la nouvelle bande L3 afin d'éliminer le biais ionosphérique est la suivante :

$$\Phi_3 = 2.55 \Phi_1 - 1.55 \Phi_2 - 2.55 \lambda_1 N_1 + 1.55 \lambda_2 N_2 \quad (2.16)$$

- où
- Φ_1 : mesure de phase sur la bande L1 (m)
 - Φ_2 : mesure de phase sur la bande L2 (m)
 - Φ_3 : mesure de phase sur la bande L3 (m)
 - λ_1 : longueur d'onde de la porteuse sur la bande L1 (m)
 - λ_2 : longueur d'onde de la porteuse sur la bande L2 (m)
 - N_1 : nombre entier de longueurs d'onde sur la bande L1
 - N_2 : nombre entier de longueurs d'onde sur la bande L2

Cette nouvelle bande formée n'est pas affectée par l'ionosphère, par contre, elle a le désavantage d'amplifier le bruit d'un facteur 3.2 [Santerre, 1995] sur les observations.

2.6.5 Multitrajets

Dans des conditions idéales d'observation, le signal émis est capté directement par une antenne. Malheureusement, certains sites ne permettent pas toujours d'obtenir ces conditions optimales d'observation.

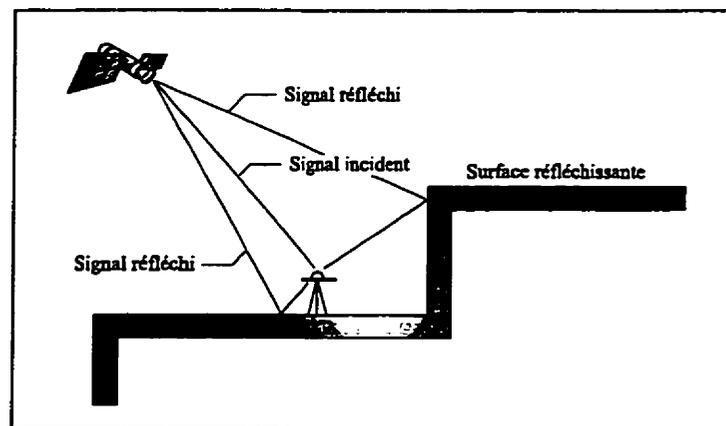


Figure 2.5 : Multitrajets (d'après Hofmann-Wellenhof et al, 1994).

La figure 2.5 illustre un site où le signal émis par un satellite est réfléchi par le sol et par un mur proche. Lorsque des surfaces réfléchissantes sont situées près de l'antenne et que le signal réfléchi est dirigé vers celle-ci, une erreur d'observation se produit : le signal capté par l'antenne n'est pas celui qui provient directement des satellites. L'erreur maximale causée par les multitrajets sur les mesures de code et les mesures de phase est donnée au tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Erreur maximale causée sur les observations par les multitrajets.

Observations :	C/A	P1 ou P2	$\Phi 1$	$\Phi 2$
Erreur max. :	± 300 m	± 30 m	± 5 cm	± 6 cm

On constate, à la suite de l'analyse de ce tableau, que l'erreur causée par les multitrajets influence plus les mesures de pseudodistance que les mesures de phase. Les multitrajets sont principalement fonctions du coefficient de réfraction et de la rugosité des surfaces réfléchissantes, de l'orientation et de la proximité des surfaces réfléchissantes au site choisi, de la fréquence de l'onde porteuse, du type d'observations recueillies. La géométrie et la distribution des satellites ont également un effet sur les coordonnées. Lors d'une session d'observation, il faut prévoir des emplacements loin des surfaces réfléchissantes afin de réduire ou d'éliminer l'impact des multitrajets sur le positionnement. Il est toujours possible d'utiliser des antennes qui tiennent compte de la polarité du signal, des antennes avec anneaux d'étranglement, du matériel absorbant les ondes radioélectriques ou un masque pour éliminer les satellites près de l'horizon lorsque les conditions d'observation ne sont pas idéales.

2.7 Disponibilité sélective ou accès sélectif

L'armée américaine injecte volontairement des erreurs dans les éphémérides transmises par les satellites et fait varier la fréquence fondamentale des horloges des satellites. Le but recherché est de réduire la précision de la navigation. Cette dégradation est appelée *disponibilité sélective* ou *accès sélectif* (Selective Availability - SA). Actuellement, l'armée américaine est la seule à pouvoir utiliser le plein rendement du système GPS en

positionnement absolu. Avec l'accès sélectif activé, la précision pour les composantes horizontales (latitude et longitude) est de 100 m et de 156 m pour la composante verticale à niveau de probabilité de 95%. Pour un niveau de probabilité de 99%, la précision pour les composantes planimétriques est de 300 m et de 500 m pour la composante altimétrique [Department of Defense, 1993]. La variation de la fréquence des horloges a un impact direct sur les mesures de pseudodistance et de phase. Quant aux erreurs injectées dans les éphémérides transmises, elles empêchent la bonne détermination de la position des satellites observés. La disponibilité sélective fausse donc le positionnement.

2.8 Dispositif d'anti-leurrage

La conception du système GPS inclut la possibilité de rendre inaccessible le code P ou d'invoquer un code encrypté afin de rendre celui-ci inaccessible à toute personne non autorisée. Ce moyen est appelé dispositif d'anti-leurrage ou d'anti-brouillage (Anti-Spoofing - AS). Cette contre-mesure électronique est une protection. Elle empêche l'introduction d'un faux signal ayant la signature GPS par des nations hostiles, signal qui créerait de la confusion ou fausserait le positionnement des ressources militaires américaines [Hofmann-Wellenhof et al, 1994]. Le dispositif d'anti-leurrage a été réalisé par l'ajout d'une modulation inconnue (code W) au code P pour former le nouveau code Y. Lorsque ce dispositif est activé, le code P sur les bandes L1 et L2 est donc remplacé par le code inconnu Y. Seuls les récepteurs de l'armée américaine (à code Y) peuvent fournir le plein accès au code Y lorsque le dispositif d'anti-leurrage est activé. Les récepteurs civils modernes de haut de gamme n'ont pas l'accès au code Y, mais réussissent quand même à calculer des mesures de code et de phase par différentes techniques de corrélation [Ashtech, 1991] lorsque le dispositif d'anti-leurrage est activé.

2.9 Type de positionnement

Les système GPS peut servir à déterminer la position d'un objet ou d'un phénomène fixe, où celle d'un véhicule terrestre, maritime ou aérien. Il est donc possible de faire du positionnement statique ou cinématique.

2.9.1 Positionnement statique

En positionnement statique, l'antenne est placée à l'aide d'un trépied au-dessus de l'objet à positionner. Il est alors possible d'obtenir une position à chaque époque ou de cumuler les observations GPS afin d'obtenir plusieurs solutions (ou une redondance des observations). Lorsqu'il y a redondance des observations, il est possible d'obtenir une position avec une meilleure précision. La position peut être obtenue en temps réel ou en post-traitement. Ce type de positionnement est surtout utilisé pour des applications nécessitant une bonne précision : géodésie, mesure de déformations de structures, etc.

2.9.2 Positionnement cinématique

En positionnement cinématique, l'antenne est fixée sur un objet en mouvement. Il n'est pas possible de cumuler les observations : une nouvelle position doit être calculée à chaque époque. La position peut être obtenue en temps réel ou en post-traitement. Pour obtenir une position tridimensionnelle, un minimum de quatre satellites visibles est requis. Ce type de positionnement peut être utilisé pour la navigation terrestre, maritime et aérienne.

2.10 Techniques de positionnement

Le système GPS fournit la possibilité de se positionner à l'aide d'un seul récepteur ou à l'aide de plusieurs récepteurs. La méthode de positionnement choisie dépend principalement de la précision recherchée. La précision est tributaire du type d'observations recueillies et du type de traitements réalisés sur les observations. En fonction des besoins recherchés, il existe donc deux techniques de positionnement : en absolu et en relatif.

2.10.1 Positionnement absolu avec des mesures de pseudodistance

Le positionnement réalisé avec un seul récepteur se nomme positionnement absolu. La position obtenue est géocentrique (par rapport au centre de la Terre). Un minimum de quatre observations de pseudodistance permet d'obtenir une solution unique. Lorsqu'il y a

plus de quatre satellites observés, la solution est obtenue à l'aide de la compensation par moindres carrés de la façon suivante :

$$\hat{X} = (A^T P_p A)^{-1} (A^T P_p W) \quad (2.17)$$

$$\hat{X} = N^{-1} U \quad (2.18)$$

$$\hat{X} = \bar{X}^0 + \hat{X} \quad (2.19)$$

$$\hat{V} = A\hat{X} - W \quad (2.20)$$

- où \hat{X} : vecteur des corrections à appliquer aux valeurs approchées des paramètres inconnus
 \bar{X}^0 : vecteur des valeurs approchées de la station inconnue
 \hat{X} : vecteur des paramètres compensés
 P_p : matrice des poids des observations de pseudodistance
 W : vecteur de fermeture des observations
 A : matrice des dérivées partielles des équations d'observation de pseudodistances par rapport aux paramètres inconnus
 \hat{V} : vecteur des résiduelles

La matrice A est définie de la façon suivante :

$$A = \begin{pmatrix} -e_x^1 & -e_y^1 & -e_z^1 & -c \\ -e_x^2 & -e_y^2 & -e_z^2 & -c \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -e_x^n & -e_y^n & -e_z^n & -c \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Les éléments de la matrice A sont obtenus en dérivant l'équation d'observation (équation (2.1)) par rapport aux 4 inconnues.

$$\partial p / \partial X = \partial \rho / \partial X = -e_x = -\rho_x / \rho \quad (2.22)$$

$$\partial p / \partial Y = \partial \rho / \partial Y = -e_y = -\rho_y / \rho \quad (2.23)$$

$$\partial p / \partial Z = \partial \rho / \partial Z = -e_z = -\rho_z / \rho \quad (2.24)$$

$$\partial p / \partial T = -c \quad (2.25)$$

La matrice W est obtenue de la façon suivante :

$$W = \begin{pmatrix} P^1 - (\rho^1 + c dt^1 - c dT + dion^1 + dtrop^1) \\ P^2 - (\rho^2 + c dt^2 - c dT + dion^2 + dtrop^2) \\ P^3 - (\rho^3 + c dt^3 - c dT + dion^3 + dtrop^3) \\ \vdots \\ P^n - (\rho^n + c dt^n - c dT + dion^n + dtrop^n) \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

La matrice de poids des observations de pseudodistance P_p est une matrice diagonale dont chacun des éléments est composé de l'inverse de la variance associée (tableau 2.1) à chacune des mesures de pseudodistance.

La précision du positionnement est obtenue à partir de la racine carrée des éléments de la diagonale de la matrice de variances-covariances. Celle-ci est obtenue de la façon suivante :

$$\hat{\Sigma}_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1} \quad (2.27)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{V}^T P_p \hat{V}}{n - u} \quad (2.28)$$

où n représente le nombre d'observations à une époque donnée et u le nombre de paramètres à estimer ($u=4$).

2.10.2 Positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance

Le positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance en temps réel est aussi appelé DGPS (Differential Global Positioning System). Le principe du positionnement relatif consiste à utiliser deux récepteurs. Le premier récepteur (station de référence) doit être placé au-dessus d'un point connu et le second (station mobile) doit être placé au-dessus de l'objet que l'on veut positionner. En connaissant les coordonnées de la station de référence, il est possible de déterminer les distances théoriques entre le récepteur et les

satellites observés. En comparant les distances théoriques et les distances observées par le récepteur des différences sont obtenues. Ces différences sont les corrections qu'il faut appliquer aux observations recueillies à la station mobile. Cette combinaison des observations recueillies à la station de référence et à la station mobile permet d'éliminer les erreurs communes aux deux sites d'observation (troposphère, ionosphère, erreur d'orbites, l'accès sélectif, etc.). Les corrections DGPS peuvent être transmises en temps réel ou peuvent être appliquées en post-traitement. Pour transmettre les corrections en temps réel, un modulateur et un système radio reliés au récepteur de la station de référence sont nécessaires. Le modulateur transforme les corrections afin que celles-ci puissent être portées par une onde radio. Un démodulateur relié au récepteur de la station mobile permet ensuite d'appliquer les corrections reçues. En mode relatif, le système GPS fournit les composantes tridimensionnelles (ou différences de coordonnées) de la ligne de base (du vecteur). L'équation d'observation de pseudodistance en différence simple est définie de la façon suivante :

$$\Delta p = \Delta \rho - c\Delta dT + \Delta d_{ion} + \Delta d_{trop} + \Delta d_{mt_p} + \Delta \varepsilon_p \quad (2.29)$$

- où
- Δp : différence simple des observations de pseudodistance
 - $\Delta \rho$: différence simple des distances géométriques
 - $c \Delta dT$: erreur relative des horloges des récepteurs
 - Δd_{ion} : erreur dans la différence simple des distances causées par le délai ionosphérique
 - Δd_{trop} : erreur dans la différence simple des distances causées par le délai troposphérique
 - Δd_{mt_p} : erreur dans la différence simple des distances causées par les multitrajets
 - $\Delta \varepsilon_p$: bruit de l'observation de différence simple et les effets résiduels non modélisés

En positionnement relatif, la position est obtenue par rapport à la station de référence et non par rapport au centre de la Terre. Pour obtenir une solution instantanée (à chaque époque d'observation), un minimum de quatre observations de pseudodistance communes aux deux sites sont requises. La solution est obtenue à l'aide de la compensation par moindres carrés

lorsque plus de quatre observations communes aux deux sites sont recueillies. La compensation s'applique de la façon suivante :

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P}_{\Delta P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P}_{\Delta P} \Delta \mathbf{W}) \quad (2.30)$$

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{U} \quad (2.31)$$

$$\hat{\bar{\mathbf{X}}} = \bar{\mathbf{X}}^0 + \hat{\mathbf{X}} \quad (2.32)$$

$$\Delta \hat{\mathbf{V}} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{X}} - \Delta \mathbf{W} \quad (2.33)$$

- où $\hat{\mathbf{X}}$: vecteur des corrections à appliquer aux valeurs approchées des paramètres inconnus
 $\bar{\mathbf{X}}^0$: vecteur des valeurs à priori des paramètres (valeurs approchées)
 $\hat{\bar{\mathbf{X}}}$: vecteur des paramètres compensés
 $\mathbf{P}_{\Delta P}$: matrice des poids des observations de pseudodistance en différence simple
 $\Delta \mathbf{W}$: vecteur de fermeture
 \mathbf{A} : matrice des dérivées partielles des équations d'observations de pseudodistances par rapport aux paramètres inconnus
 $\Delta \hat{\mathbf{V}}$: vecteur des résiduelles

La matrice \mathbf{A} (station mobile) se définit de la même façon qu'en positionnement absolu (équation (2.21)). Les éléments qui la constituent sont toujours obtenus en dérivant l'équation d'observation par rapport aux 4 inconnues (équations (2.22) à (2.25)).

Le vecteur de fermeture $\Delta \mathbf{W}$ est obtenu en soustrayant à la valeur de pseudodistance observée (corrigée des erreurs modélisées) la valeur calculée de la distance récepteur - satellite pour les stations de référence et mobile. Le vecteur de fermeture $\Delta \mathbf{W}$ est obtenu de la façon suivante :

$$\Delta \mathbf{W} = \mathbf{W} - \mathbf{W}_{\text{ref}} \quad (2.34)$$

- où \mathbf{W}_{ref} : vecteur de fermeture des observations de la station de référence
 \mathbf{W} : vecteur de fermeture des observations de la station mobile

Les vecteurs \mathbf{W} et \mathbf{W}_{ref} sont obtenus à partir de l'équation (2.26).

La matrice de poids des observations de pseudodistance $P_{\Delta p}$ est une matrice diagonale dont chacun des éléments est composé de l'inverse de la variance associée à chacune des mesures de pseudodistance en différence simple. La matrice des poids en positionnement relatif diffère de celle du positionnement absolu, puisqu'il faut considérer les mesures de pseudodistance recueillies aux deux stations. Chacun des éléments de la matrice est déterminé de la façon suivante :

$$\sigma^2(\Delta p) = \sigma^2(p_{ref}) + \sigma^2(p) \quad (2.35)$$

où $\sigma^2(\Delta p)$: variance des observations en différence simple

$\sigma^2(p_{ref})$: variance pour la station de référence

$\sigma^2(p)$: variance pour la station mobile

La précision du positionnement est obtenue à partir de la racine carrée des éléments de la diagonale de la matrice de variances-covariances. Celle-ci est obtenue de la façon suivante :

$$\hat{\Sigma}_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1} \quad (2.36)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\Delta \hat{V}^T P_{\Delta p} \Delta \hat{V}}{n - u} \quad (2.37)$$

où n représente le nombre d'observations à une époque donnée et u le nombre de paramètres à estimer ($u=4$).

Le traitement des observations en simple différence permet d'éliminer l'erreur d'horloge des satellites. Le positionnement relatif peut aussi être effectué en traitant les mesures de pseudodistance en différence double. Cette technique permet d'éliminer l'erreur d'horloge entre les récepteurs. Le traitement des observations en simple ou double différence donne des résultats semblables.

2.10.3 Positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance filtrées

La précision du positionnement GPS dépend principalement de la géométrie des satellites, de leur distribution dans le ciel et de la précision des mesures effectuées lors de la collecte de données [Santerre et al, 1995]. La précision des mesures est fonction du type d'observations recueillies et de la résolution des mesures effectuées par le récepteur. Comme il a été mentionné à la section 2.5 (tableau 2.1), les mesures de pseudodistance sont de moins bonne résolution que les mesures de phase. La mesure de phase dont l'ambiguïté n'est pas résolue donne de l'information très précise sur la variation de la distance entre le satellite et le récepteur depuis l'époque initiale d'observation.

Le filtrage est une technique permettant d'améliorer la qualité du positionnement. Celui-ci améliore la résolution des mesures de pseudodistance à l'aide des mesures de phase de battement de l'onde porteuse. L'utilisation des mesures de phase permet de réduire le bruit associé aux mesures de code. Le filtrage comporte plusieurs étapes. À la première époque d'observation, le récepteur collecte les mesures de code et de phase. La première solution est déterminée en mode relatif avec des mesures de code brutes, car il n'est pas encore possible de filtrer les mesures de pseudodistance. À la deuxième époque, le récepteur collecte de nouvelles observations. À l'aide de la mesure de code de l'époque précédente et de la variation de la mesure de phase (époque actuelle – époque précédente), une nouvelle valeur de code peut être prédite pour l'époque en cours : il y a donc deux mesures de pseudodistance pour la même distance récepteur - satellite. La pseudodistance filtrée est obtenue en calculant la moyenne pondérée de la pseudodistance observée (brute) et la mesure de pseudodistance prédite avec un poids variant avec le temps. Au fur et à mesure que le temps s'écoule, les mesures de phase s'accumulent (époque après époque) et le filtrage devient de plus en plus efficace. La résolution des mesures de code va donc s'améliorer graduellement jusqu'à un certain seuil puisque les mesures de phase ne sont pas parfaites.

Cette technique permet de réduire les erreurs à caractère dispersif (fonction de la fréquence de l'onde porteuse) telles que le bruit et les multitrajets, mais non le délai ionosphérique. Par contre, les autres erreurs telles que le délai troposphérique, les erreurs d'orbites et

d'horloges restent de même magnitude pour les mesures de pseudodistance brutes ou filtrées et doivent être considérées. Le filtrage des mesures de pseudodistance s'applique pour chaque paire satellite - récepteur et sur chaque fréquence individuellement. Il est important de noter que lorsqu'un saut de cycle se produit entre deux époques d'observation, le procédé de filtrage doit être réinitialisé pour chaque paire de récepteur - satellite touchée par cette interruption du signal. Le filtrage peut être utilisé en temps réel, car les observations GPS n'ont pas à être emmagasinées. Les équations qui permettent de procéder au filtrage sont les suivantes [Santerre et al, 1994] :

$$\overset{>}{p}_k = \left(\frac{w_p}{w_p + w_p^>} \right) p_k + \left(\frac{w_p^>}{w_p + w_p^>} \right) \left(\overset{>}{p}_{k-1} + \delta \Phi_{k-1,k} + 2\delta \text{dion}_{k,k-1} \right) \quad (2.38)$$

- où
- $\overset{>}{p}_k$: observation de pseudodistance filtrée à l'époque k
 - p_k : observation de pseudodistance brute à l'époque k
 - $\overset{>}{p}_{k-1}$: observation de pseudodistance filtrée à l'époque k-1
 - w_p : poids de l'observation de pseudodistance brute
 - $w_p^>$: poids de l'observation de pseudodistance filtrée
 - $\delta \Phi_{k-1,k}$: différence de phase entre les époques k-1,k
 - $\delta \text{dion}_{k,k-1}$: variation du délai ionosphérique entre les époques k-1,k

La variation du délai ionosphérique entre les époques k et k-1 pour un récepteur bi-fréquence est déterminée à partir de l'équation (2.15). L'équation qui permet de calculer la variation du délai est la suivante :

$$\delta \text{dion}_{k,k-1} = \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) (\Phi_1 - \Phi_2)_k - (\Phi_1 - \Phi_2)_{k-1} \quad (2.39)$$

- où
- $\delta \text{dion}_{k,k-1}$: variation du délai ionosphérique entre les époques k et k-1 (m)
 - f_1 : fréquence de l'onde porteuse L1 (Hz)
 - f_2 : fréquence de l'onde porteuse L2 (Hz)
 - Φ_1 : mesure de phase sur la bande L1 (m)
 - Φ_2 : mesure de phase sur la bande L2 (m)

Les éléments de la diagonale de la matrice des poids sont déterminés de la façon suivante :

$$\sigma^2(\hat{p}_k) = \frac{1}{W_p + W_p} ; W_{\hat{p}_k} = W_p + W_p \quad (2.40)$$

où $\sigma^2(\hat{p}_k)$: variance de la pseudodistance filtrée à l'époque k
 W_p : poids de l'observation de pseudodistance filtrée

$$W_p = \frac{1}{\sigma^2(p_k)} \quad (2.41)$$

où W_p : poids de l'observation de pseudodistance
 $\sigma^2(p_k)$: variance de l'observation de pseudodistance à l'époque k

2.10.4 Positionnement relatif avec des mesures de phase

Les mesures de phase qui sont enregistrées par un récepteur sont en réalité des mesures cumulées. Le récepteur enregistre la partie fractionnaire de la phase de l'onde porteuse et le nombre entier de longueurs d'onde cumulées depuis l'époque initiale de l'acquisition du signal. Le nombre entier de longueurs d'ondes initiales (ou l'ambiguïté de phase) compris dans la distance récepteur - satellite ne varie pas lorsque le récepteur utilisé conserve le verrouillage sur le signal capté pour chacun des satellites visibles. Il est possible de faire du positionnement cinématique avec les ambiguïtés non fixées, mais la précision ne sera pas meilleure que celle qui est obtenue à l'aide du filtrage. Lorsqu'un positionnement de précision est recherché, il est nécessaire de faire du positionnement relatif, d'utiliser les mesures de phase, de déterminer et de fixer le nombre d'ambiguïtés de phase à sa valeur entière. La nouvelle génération de récepteurs permet d'effectuer des mesures plus précises, et par conséquent, permet de fixer plus facilement les ambiguïtés de phase.

La technique, de plus en plus utilisée, est la résolution des ambiguïtés en mouvement (OTF- *On The Fly*). La combinaison des observations effectuées à l'aide de récepteurs bi-fréquence permet de créer la bande large, dont la longueur d'onde est de 86 cm. Cette nouvelle bande facilite la résolution des ambiguïtés puisque la longueur d'onde est approximativement 4 fois plus grande que celle de L1. Il est donc plus facile de compter le

nombre de longueurs d'onde de 86 cm que de 20 cm entre le récepteur et les satellites observés. L'avantage de cette technique est qu'il n'est pas nécessaire de placer le récepteur au-dessus d'un point connu pour fixer les ambiguïtés. La première étape consiste à calculer une solution à l'aide du filtrage avec des mesures de pseudodistance (section 2.10.3). Ceci permet de déterminer les valeurs initiales des ambiguïtés de phase pour chacun des satellites observés. L'équation en simple différence qui permet d'obtenir la valeur approchée des ambiguïtés est la suivante :

$$\Delta N_0 = \left[\frac{\Delta\Phi - \Delta\rho + c \Delta dT + \Delta d_{ion} - \Delta d_{trop}}{\lambda} \right] \quad (2.42)$$

- où ΔN_0 : valeur approchée de l'ambiguïté de phase initiale
 $\Delta\Phi$: mesure de phase (m)
 $\Delta\rho$: distance récepteur - satellite calculée à partir de solution de code filtrée (m)
 $c \Delta dT$: erreur relative de l'horloge des récepteurs (m)
 Δd_{ion} : délai ionosphérique (m)
 Δd_{trop} : délai troposphérique (m)
 λ : longueur d'onde de la porteuse sur la bande large (m)
 $[]$: opérateur de valeur entière la plus proche

En fonction de la précision de la détermination ΔN_0 , il faut faire l'essai de différents jeux de valeurs entières autour de l'ambiguïté approchée pour chacun des satellites observés. Chaque combinaison doit passer une série de tests. La combinaison d'ambiguïté unique fournissant la solution optimale sera celle qui satisfait une série de tests statistiques et des critères de validation dans la compensation par moindres carrés. Lorsqu'une combinaison est retenue après tous ces tests, cela signifie que les ambiguïtés sont résolues et qu'il est possible de déterminer une solution à partir d'ambiguïtés fixées. [Abidin, 1993] présente sous forme d'organigramme les étapes de la résolution d'ambiguïtés dans le cas d'un récepteur en mouvement.

2.11 Ordre de grandeur des précisions du positionnement par satellites GPS

Le tableau 2.5 présente les différentes précisions qu'il est possible d'obtenir avec le système GPS dans des conditions normales d'observation. Les précisions présentées sont fonctions de la technique de positionnement choisie et du type d'observations recueillies. De plus, la précision est fonction de plusieurs facteurs en autres : la distance entre les récepteurs, le PDOP, la qualité des récepteurs utilisés, de l'environnement physique lors de la collecte de données (troposphère, ionosphère, multitrajets). Ce tableau présente les précisions du positionnement absolu et du positionnement relatif pour un niveau de probabilité de 95%.

Tableau 2.5 : Ordre de grandeur des précisions du positionnement GPS.

Positionnement	Observation	Précision
Absolu	Pseudodistance	100 à 150 m
Relatif	Pseudodistance	2 à 10 m
Relatif	Pseudodistance filtrée	1 à 2 m
Relatif	Phase (ambiguïtés fixées)	5 à 10 cm

CHAPITRE 3

MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

Ce chapitre rappelle quelques principes nécessaires à la compréhension du deuxième volet de l'hypothèse de solution (choix du MNT et des paramètres à considérer lors de l'analyse de visibilité). Il fournit les éléments qui permettent de comprendre le processus d'identification des zones non observables. Pour ce faire, les notions de base sur les systèmes d'information géographique et sur les modèles numériques de terrain sont abordées.

3.1 Système d'information géographique

3.1.1 Historique

L'association entre la cartographie et l'informatique remonte aux années 70 avec l'apparition des logiciels de cartographie numérique : les données étaient numérisées pour être stockées sous format informatique et restituées sous forme graphique (plans ou cartes de papier). Depuis ce temps, les systèmes informatiques ont grandement évolué. L'accroissement de la puissance des équipements informatiques a permis de confier aux logiciels de cartographie la gestion et la mise à jour des informations numérisées, de les exploiter par des traitements plus complexes et de manipuler un plus grand volume de données. C'est ainsi que sont nés les systèmes d'information géographique (SIG).

3.1.2 Définition

Au début des années 90, époque à laquelle les écrits spécialisés sur ce sujet se sont multipliés, [Maguire et al, 1991] ont pu recenser plus d'une dizaine de définitions relatives aux SIG [Maguire et al, 1991]. Suite aux différentes définitions proposées, il ne semble pas encore y avoir de consensus à ce sujet. Dans le cadre de ce projet de recherche, les outils SIG sont considérés comme une catégorie de logiciels spécialisés. À titre d'exemple suivent deux définitions représentatives de la perception de l'outil SIG :

«Le système d'information géographique est un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées» [Laurini and Milleret-Raffort, 1993] .

«Un SIG [...] est souvent identifié comme étant un logiciel offrant des capacités de cartographie numérique, de gestion de bases de données et d'analyse spatiale» [Gagnon, 1990] .

3.1.3 Description du SIG

Les principales composantes qui constituent le logiciel SIG sont le système de gestion de base de données, le logiciel de dessin assisté par ordinateur et les données. L'outil SIG est donc un ensemble de modules (ou de programmes) qui permettent de réaliser des opérations ou des traitements sur des données (calculs statistiques, analyse spatiale, génération de cartes thématiques, etc.). Ces opérations sont réalisées, via l'environnement du SIG, à l'aide de l'utilisation combinée du système de gestion de base de données (SGBD) et du logiciel de dessin.

3.1.4 Type de données SIG

Les logiciels SIG utilisent des données qui permettent de représenter ou de codifier la réalité dans un environnement informatique. Les outils SIG utilisent des données qui peuvent être soit géométriques ou soit alphanumériques.

Données géométriques

Les données graphiques peuvent être sous la forme matricielle ou vectorielle. La structure de données sous forme matricielle (ou en mode image) correspond à un tableau de valeurs numériques qui représentent les données graphiques. Celles-ci sont référencées géographiquement par rapport à un système de coordonnées. L'unité spatiale fondamentale est de forme rectangulaire et porte le nom de pixel. C'est l'ensemble de ces unités fondamentales qui constitue une image numérique [Collet, 1992]. Les pixels d'une grille ont la particularité d'être de forme et de taille identiques, ainsi que d'être agencés régulièrement, selon une même orientation. Ce type de données provient entre autres de photographies aériennes numériques ou d'images satellitaires.

Les données de type vectorielles sont représentées à l'aide des trois principales primitives géométriques : le point, la ligne et la surface (ou polygone)². La position des objets, représentés par ces primitives, est exprimée par des coordonnées cartésiennes ou géographiques rattachées à un système de référence. Le *point* est l'objet le plus simple à représenter : une seule paire de coordonnées suffit pour le définir. La *ligne* est représentée par une suite continue de points et possède une dimension de longueur. Chaque point de cette suite est relié au point suivant par un segment de droite, ce qui permet de représenter des éléments linéaires (ex : lignes de vol, courbes de niveau, etc.). La *surface* est décrite par un polygone qui définit le périmètre de l'élément surfacique. Celle-ci possède deux dimensions. Elle se délimite par un objet linéaire qui se ferme sur lui-même. Les éléments surfaciques permettent de représenter les limites d'un territoire, d'un réservoir hydrographique, etc. Ce type de données est généralement défini dans un espace à deux dimensions. C'est à partir de ce type de données qu'il est possible de générer des données géométriques en trois dimensions (3D), tels que des modèles numériques de terrain (section 3.2).

² Il faut remarquer que nombre de logiciels SIG ne traitent pas à proprement parler des *surfaces*, mais plutôt des lignes polygonales fermées délimitant une portion d'espace à deux dimensions; mais il serait hors de propos d'entrer ici dans ces considérations.

Données alphanumériques

Les données alphanumériques ou descriptives sont des données de type numériques ou nominales (textuelles). Ces informations sont normalement contenues à l'intérieur d'une base de données ou à l'intérieur de fichiers graphiques. Elles peuvent servir à quantifier, à numéroter, à qualifier, à identifier, à localiser des objets, etc. À titre d'exemples, ces informations pourraient être des superficies, des noms ou des valeurs de pente.

3.1.5 Fonctionnalités des SIG

Pour répondre aux différents besoins des utilisateurs, les systèmes d'information géographique doivent pouvoir effectuer quatre grands types d'opérations sur les données : la saisie, la gestion, l'exploitation et la diffusion [Pompon, 1992].

Saisie

L'acquisition des données est l'étape la plus dispendieuse dans l'implantation d'un système d'information géographique. Dans un système d'information, les données constituent l'élément de base sur lequel reposent tous les traitements. Les SIG permettent de saisir des données géométriques et des données alphanumériques. Les fonctions de saisie les plus courantes sont les suivantes :

- Numérisation, transformation des éléments graphiques en éléments vectoriels et superposition des données ;
- Structuration des données géographiques pour effectuer le nettoyage après la saisie et la construction de la topologie ;
- Saisie alphanumérique ;
- Superposition dans un même référentiel de données géométriques.

Gestion

Les SIG offrent des fonctionnalités de gestion des données (géométriques et alphanumériques). Les fonctions les plus courantes qui permettent la gestion des données sont les suivantes :

- Organisation des données géométriques (couches, classes d'objets, topologie, etc.) ;
- Édition des données (modifications, corrections, etc.) ;
- Contrôle des liens entre les éléments géométriques et alphanumériques compris dans la base de données ;
- Création et gestion d'index facilitant l'accès aux données à partir de différents critères (géographiques, thématiques, topologiques, etc.).

Traitement

Il existe trois façons d'exploiter les données géométriques et alphanumériques avant de les diffuser : l'extraction, l'interrogation et l'analyse spatiale. L'analyse spatiale est plus sophistiquée, car elle requiert certains traitements plus complexes et n'est pas toujours disponible sur les outils SIG.

Interrogation et extraction

La grande diversité des données stockées dans un SIG ne permet pas toujours à un usager de trouver instantanément l'information qu'il requiert. L'accès à ces données se fait par interrogation de la base de données. L'interrogation consiste à effectuer des requêtes sur la base de données à l'aide du langage SQL (*Structured Query Language*).

Analyse spatiale

L'analyse spatiale permet d'incorporer aux requêtes des critères géométriques à l'aide de différents opérateurs d'analyse. Elle permet aussi d'effectuer certains calculs sur les données géographiques, comme des calculs de superficie. Les opérateurs géométriques sont généralement l'inclusion, l'intersection et la distance par rapport à un point ou un objet. Il est possible de combiner aux opérateurs géométriques des opérateurs booléens (et, ou, union, intersection, exclusion, inclusion) et des valeurs attributives (égal, différent, inférieur, supérieur, etc.). Les autres fonctions d'analyse spatiale sont les opérateurs mathématiques qui permettent l'exploitation des propriétés topologiques des données géographiques. L'analyse spatiale permet de réaliser les tâches suivantes :

- Superposition de polygones et création de nouveaux polygones à partir des opérateurs booléens ;

- Analyse de graphes permettant ainsi le calcul du plus court chemin pour se rendre d'un endroit à un autre.

Diffusion

Les systèmes d'information géographique permettent la diffusion des données et des résultats obtenus lors de traitements sous différentes formes : affichage à l'écran, impression sur un traceur ou une imprimante, création de rapports et génération de graphiques divers.

De nos jours, les systèmes d'information géographique sont de plus en plus utilisés, l'amélioration des interfaces aux usagers, la diminution des coûts d'acquisition et l'augmentation de la puissance des équipements les ayant rendus plus accessibles. La combinaison de toutes ces fonctionnalités permet d'entrevoir de nombreuses possibilités et applications différentes, comme celle qui nous préoccupe. Dans le cadre de ce projet de recherche, l'outil SIG est utilisé pour ses différentes fonctionnalités, qui permettent entre autres la génération de modèles numériques de terrain, les analyses de visibilité et la diffusion des résultats obtenus. Le SIG sera utilisé pour l'identification des zones non visibles lors d'une mission de recherche et de sauvetage aériens.

3.2 Modèle numérique de terrain

L'utilisation des modèles numériques de terrain remonte aux années 50 [Miller et Laflamme, 1958]. Les modèles numériques de terrain sont devenus graduellement la composante de base pour un grand nombre d'applications dans le domaine des sciences et du génies. Un modèle numérique de terrain (MNT) peut être défini comme une représentation numérique tridimensionnelle d'une portion de la surface terrestre. Les modèles numériques de terrain se distinguent des données conventionnelles en deux dimensions (2D). La génération et le traitement des données d'un MNT doivent être considérés comme une fonctionnalité différente de celles qui sont utilisées pour les données 2D. Les différentes opérations possibles sur un MNT, de la réalité à une application spécifique, sont représentées à la figure 3.1.

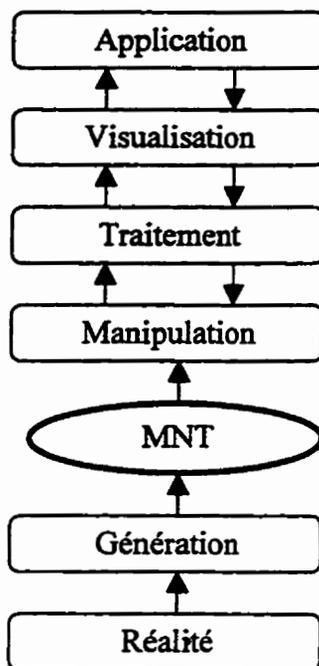


Figure 3.1 : Opérations possibles sur un MNT (d'après Weibel et Heller, 1991).

3.2.1 Types de modèle numérique de terrain

En général, deux types de modèle numérique de terrain sont générés. Ils peuvent l'être sous la forme d'une grille (GRID) ou bien d'un réseau de triangles irréguliers (TIN – *Triangulated Irregular Network*). La figure 3.2 présente les deux types de MNT.

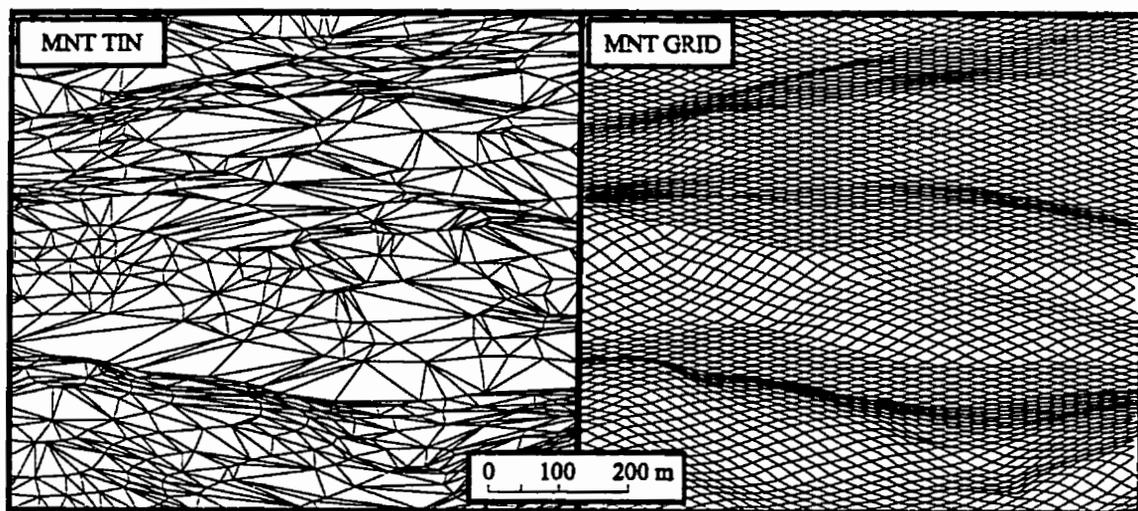


Figure 3.2 : Comparaison d'un MNT TIN et d'un MNT GRID.

Principe du TIN

Un modèle numérique de type TIN est formé d'un réseau de triangles irréguliers reliés les uns aux autres, ce qui permet de représenter le relief d'une surface topographique. Il existe plusieurs méthodes qui permettent de générer les triangles à partir d'un semis de point ; la méthode de triangulation la plus courante est celle de Delaunay.

Avantages et inconvénients

Ce type de modèle numérique présente l'avantage de bien représenter le relief lorsque la répartition des points recueillis n'est pas homogène. Le réseau de triangles irréguliers s'adapte à n'importe quel type de relief (plat ou accident) puisque la dimension des triangles est variable. De plus, il est possible d'obtenir directement un TIN à partir des points décrivant des courbes de niveau provenant d'un fichier numérique.

Par contre, ce type de modèle ne permet pas de visualiser facilement le relief (figure 3.2).

Principe du GRID

Le modèle numérique de type grille est une matrice de points situés les uns par rapport aux autres, à égale distance. Chacun des points comprend des coordonnées tridimensionnelles, ce qui permet de représenter le relief. Ce type de modèle est représenté sous la forme d'un ensemble de cellules rectangulaires épousant la forme du relief. L'espacement du grillage peut être de différentes longueurs. C'est ce qu'on appelle la résolution ou la finesse du MNT.

Avantages et inconvénients

Ce modèle est utilisé pour créer des images de synthèse telles que des vues artificielles de paysage : sa structure régulière permet de coller une image sous forme de pixels plus facilement. De plus, il est plus facile de visualiser le relief représenté à l'aide d'un GRID (figure 3.2) et il est plus facile de modifier sa résolution.

La précision d'un modèle grille dépend essentiellement de la densité et de l'espacement des points recueillis. Lorsque le nombre de points recueillis est insuffisant ou lorsque l'espacement du grillage est trop grand, le relief est aplani. Dans ces conditions, le modèle

GRID ne peut s'adapter à la complexité du relief. Pour représenter correctement un relief irrégulier, un grand nombre de points sont nécessaires. De plus, il est impossible d'obtenir directement un GRID à partir de courbes de niveau : des opérations de conversion sont nécessaires. Lors de la conversion, il y a une perte de précision, car les données initiales sont modifiées.

3.2.2 Génération du MNT

L'hypothèse de solution prévoit l'utilisation des deux types de modèles numériques (section 4.6.2.3). Pour comprendre ces choix, il est nécessaire d'aborder le processus de génération d'un MNT. La génération de MNT implique la transformation des données topographiques en un modèle tridimensionnel. Il existe deux techniques d'acquisition pour obtenir des points spécifiques du relief : on peut soit les obtenir directement à partir de *relevés sur le terrain*, de *photographies aériennes*, d'*images de télédétection*, soit indirectement à partir d'une *représentation cartographique* préexistante du relief. La précision des modèles dépend de la provenance des données. Il est donc important de choisir la bonne technique d'acquisition pour obtenir un modèle numérique de terrain de qualité.

- Les modèles numériques peuvent être générés à partir de *relevés sur le terrain* (télémètres, stations totales, etc.). Ces MNT sont les plus précis, si la densité et la répartition des points recueillis suffisent à la bonne représentation du secteur à modéliser. Il faut saisir des points aux endroits où il y a un changement de pente (crêtes, fonds de vallées, dénivellations importantes, ravins, etc.). L'acquisition des données de base est laborieuse et très coûteuse et ne peut être pratiquée que pour de petites surfaces. Cependant, elle peut être couplée à d'autres sources de données, afin d'augmenter la précision d'un secteur particulier.
- Les données provenant de la *photogrammétrie* et de la *télédétection* sont basées sur l'interprétation stéréoscopique de photographies aériennes ou d'images satellitaires. Cette méthode minimise le temps d'acquisition des données et permet de couvrir de plus grandes surfaces. La précision des MNT générés dépendra de la résolution des

images satellitaires, de l'échelle des photographies aériennes ainsi que la densité de l'échantillonnage des points recueillis sur les images ou photographies.

- Un MNT peut être généré à partir de documents *cartographiques conventionnels* contenant essentiellement la topographie d'un secteur (courbes de niveau, réseau hydrographique, etc.). Les données numériques peuvent être obtenues par la numérisation ou par le balayage optique de cartes topographiques.

Dans le cas particulier de ce projet, de recherche, les MNT utilisés proviennent de documents cartographiques.

Pour bien comprendre le type de modèle que nous avons utilisé, il faut savoir que le premier modèle numérique de terrain obtenu est un TIN. La longueur des différents triangles dépend donc essentiellement de l'espacement entre les courbes de niveau : plus les courbes sont éloignées les unes des autres, plus les triangles formés sont grands. Un MNT de type GRID a été utilisé pour effectuer le rehaussement à l'aide un couvert. Contrairement au TIN, il est possible de choisir la résolution, ce qui permet de tenir compte des facteurs liés aux peuplements forestiers telles que les différences de hauteur entre peuplements et leur forme.

3.2.3 Manipulations du MNT

Le logiciel SIG permet d'effectuer plusieurs opérations sur un MNT. Certaines manipulations sur le modèle sont nécessaires pour qu'il puisse répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs. Ces manipulations consistent principalement à l'éditer, à l'aplanir, à augmenter sa qualité, à le fusionner et à le convertir.

Modification

La modification consiste à effectuer la mise à jour ou la correction des erreurs sur les éléments qui constituent le modèle. Les opérations d'édition permettent l'effacement d'une partie du modèle, l'ajout et le déplacement d'éléments, le changement d'élévation, le changement d'attribut des éléments géométriques permettant de visualiser le modèle, etc.

Filtrage

Le filtrage doit servir deux buts : le lissage et le rehaussement de la qualité du modèle. Les effets du lissage consistent à enlever certains détails du MNT et à aplanir la surface du modèle. Le rehaussement de la qualité du MNT est l'effet contraire du lissage, il permet de mettre l'emphase sur la discontinuité de certains secteurs du MNT ou d'ajouter de nouveaux éléments comme des lacs ou un couvert forestier. Le filtrage est utilisé pour éliminer les erreurs provenant des données initiales, pour réduire le volume du MNT, pour réduire les temps de traitement, pour augmenter la résolution du MNT et pour augmenter sa ressemblance avec la réalité.

Fusion

Il est possible de fusionner des données, afin de couvrir un plus grand secteur ou d'augmenter la précision d'un MNT. Par contre, lorsque les données proviennent de sources différentes ou ont été acquises par des méthodes différentes, il en résulte des problèmes de structure géométrique et de qualité des données.

Conversion de MNT

La conversion permet de transformer un modèle triangulé en modèle grille, l'inverse aussi. Elle permet aussi de changer la résolution d'un modèle numérique de terrain. Le changement de la résolution d'un GRID peut être réalisé lors de la transformation du TIN au GRID. Cette opération fournit la possibilité de choisir l'espacement de la grille. Il est aussi possible de changer la résolution d'un TIN. Pour ce faire, il faut convertir celui-ci en GRID avec la résolution souhaitée et ensuite le reconvertir en TIN.

La figure 3.3 illustre deux modèles différents superposés. Le TIN est le modèle généré à partir des données originales; l'autre modèle provient de la conversion du TIN au GRID. Le relief est atténué lorsque le pas de la grille est notablement plus grand que les triangles du modèle TIN de base.

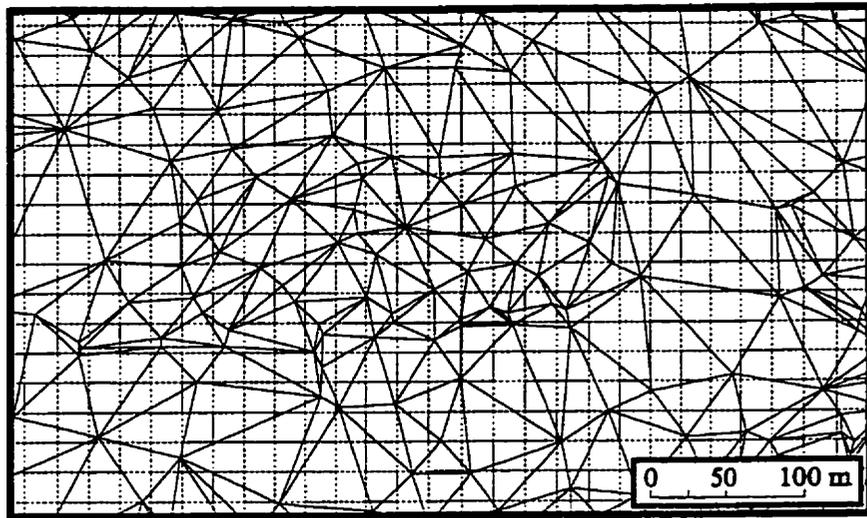


Figure 3.3 : Conversion d'un MNT TIN en GRID.

3.2.4 Traitements sur le MNT

Une fois généré, un MNT peut faire l'objet de divers traitements.

Génération de nouvelles données

Les calculs de pente peuvent être réalisés sur un modèle numérique de terrain. Ces calculs permettent d'apprécier les dénivelées du relief à partir de valeurs de pente : plus la valeur est élevée, plus la dénivellation est forte. La pente est définie comme une surface tangente au terrain à un endroit quelconque. Elle a deux composantes : le gradient (taux maximum de changement en altitude en fonction de la distance) et l'aspect (direction du taux maximum). Il est possible de générer des cartes de pente à partir des MNT.

Amélioration de la qualité du MNT

La génération d'un modèle numérique peut engendrer des erreurs de modélisation. Celles-ci proviennent généralement des données initiales ou d'une erreur de manipulation lors du processus de génération. Ces erreurs peuvent être aléatoires ou systématiques. La détection et la correction de ces erreurs sont importantes pour obtenir un modèle de qualité. La méthode d'inspection la plus courante est souvent visuelle. Plusieurs techniques d'affichage peuvent être utilisées pour détecter les différentes erreurs. La vue en perspective du modèle permet d'identifier les erreurs grossières. Ces erreurs apparaissent à

l'extérieur du modèle. Il est aussi possible d'éliminer certaines erreurs en comparant les variations anormales entre les différents gradients obtenus lors des calculs de pente.

Le contrôle de la qualité des modèles numériques de terrain générés peut être réalisé par la comparaison de données de référence : points de contrôle ou autres modèles numériques du même secteur. L'écart moyen (RMS - *Root Mean Square*) est généralement utilisé pour valider la qualité de la concordance entre le MNT et une série de points de contrôle. D'autres techniques peuvent être utilisées pour comparer des modèles numériques de terrain du même secteur telles que l'analyse statistique des surfaces résiduelles ou l'analyse comparative visuelle. Ces techniques de contrôle de la qualité du MNT peuvent être utilisées pour détecter les erreurs systématiques.

Fonctions spécialisées

La génération de profils de terrain constitue un autre type de traitements sur un MNT. Cela consiste à produire une coupe verticale d'une section d'un MNT, ce qui permet de mieux apprécier la variation des dénivelées sur une distance quelconque. Le profil est obtenu par l'interpolation des dénivelées du terrain en fonction d'un plan de coupe orthogonal. Un profil de terrain peut montrer l'influence de la résolution sur le relief lorsqu'il est généré pour un même secteur, à la condition d'utiliser des modèles numériques de résolutions différentes (section 4.6.5.2).

Certaines applications, comme le suivi des opérations de recherche et de sauvetage aériens, nécessitent des fonctions de traitement plus spécialisées, telles que l'analyse de visibilité. Le concept de l'analyse de visibilité consiste à déterminer ce qui est visible ou non à partir d'un point (section 3.3).

3.2.5 Visualisation des MNT

La visualisation joue un rôle important dans un système d'information géographique. Elle est étroitement liée à l'étape du traitement des MNT. Les résultats des opérations de modélisation sont souvent présentés sous forme graphique. Les résultats obtenus peuvent

être affichés sous différentes formes. Il existe deux techniques de visualisation des MNT : *l’affichage orthographique* et *l’affichage en perspective*.

Affichage orthographique

L’affichage orthographique est la forme la plus courante utilisée pour représenter le relief. Elle consiste à projeter verticalement les éléments représentatif sur un plan. L’avantage de l’affichage orthographique est que toutes les parties d’une surface de terrain sont visibles et relativement peu déformées. Les éléments représentés peuvent être sous la forme de courbes de niveau, d’ombres portées, éventuellement combinées à d’autres données planimétriques.

Courbes de niveau

La représentation du relief sous la forme d’un ensemble de courbes de niveau est la technique la plus courante. Il existe plusieurs façons d’afficher les courbes de niveau afin de mieux apprécier la topographie. Ces courbes peuvent être classifiées selon une couleur représentant un niveau d’élévation ou en leur assignant une épaisseur et un type de trait différents.

Ombre portée

Cette méthode de visualisation utilise le principe de l’éclairage d’un modèle. Par conséquent, des intensités lumineuses doivent être calculées pour chacune des facettes du modèle. Les valeurs des intensités sont calculées en deux étapes. Le vecteur normal à une facette est déterminé et ensuite le modèle d’intensité est appliqué. Cependant, aucune indication ne permet de quantifier l’élévation du modèle. Le résultat ne permet qu’une analyse qualitative (impression de relief)

Combinaison d’autres données 2D

L’affichage des courbes de niveau et le rendu peuvent être superposés avec d’autres éléments tels que des images satellitaires, des données thématiques, des orthophotographies, etc.

Affichage en perspective

La visualisation en perspective fournit des résultats plus convaincants. Cependant, deux problèmes doivent être résolus : la projection d'une surface tridimensionnelle sur un médium en deux dimensions et l'élimination des éléments cachés (lignes de construction) lors de l'affichage. Ce type d'affichage requiert des moyens informatiques performants pour obtenir des résultats rapides.

3.2.6 Applications des MNT

De nos jours, un grand nombre d'applications nécessitent l'utilisation de MNT. Trois grands domaines d'applications peuvent être distingués : génie civil, planification des ressources naturelles et applications militaires. Les récents développements technologiques ont permis aux SIG de se complexifier afin d'offrir un éventail de solutions de plus en plus large. Il devient donc possible de créer davantage de nouvelles applications, telles que celle qui nous préoccupe.

Génie civil

L'utilisation des modèles numériques de terrain dans le domaine du génie civil est orientée vers les applications de conception de routes et terrains d'aviation ou de construction d'infrastructures majeures (barrages, réservoirs). Le domaine du génie civil est l'un des plus importants utilisateurs de MNT.

Planification et gestion des ressources

La planification et la gestion des ressources naturelles est un autre domaine important d'application des modèles numériques de terrain. Ce champ d'application combine un grand nombre de disciplines relativement diversifiées comme l'environnement, la planification urbaine, la télédétection, la géologie, l'agriculture, la foresterie, la météorologie et la climatologie. Toutes ces disciplines sont centrées sur la gestion de ressources naturelles. Les applications typiques incluent les études d'impact sur l'environnement : impact de coupe à blanc sur les paysages forestiers, modélisation potentielle de l'érosion des sols, dispersion de matières polluantes, etc.

Sciences de la Terre

Les applications en sciences de la Terre (géologie, géomorphologie, hydrographie, étude des glaces, etc.) sont traitées comme un groupe à part, même si elles partagent plusieurs similarités avec d'autres domaines d'applications. Elles requièrent des fonctions spécifiques pour la modélisation et l'interpolation des discontinuités du terrain. Ces applications peuvent être le contrôle de bassin versant, le contrôle de la pollution ou des inondations, la cartographie géologique, la simulation géomorphologique (mouvement de la croûte terrestre), etc.

Applications militaires

Les applications militaires combinent tous les aspects considérés dans les domaines précédents. Le terrain est l'une des composantes importantes de l'environnement militaire. Les militaires sont d'importants producteurs de modèles numériques de terrain et accordent beaucoup d'importance aux fonctions d'acquisition et de transformation de données. L'utilisation des MNT par les militaires inclut la planification des opérations sur un secteur donné, les fonctions d'analyse de visibilité pour le transport des troupes, la planification de réseau de communication, le calcul des trajectoires et le pilotage automatique à basse à altitude, etc.

3.3 Analyse de visibilité

L'identification des zones non observables se fait à l'aide de fonctionnalités d'analyse de visibilité disponibles dans le logiciel utilisé et par l'utilisation d'un MNT. L'analyse de visibilité peut être définie comme la localisation et la délimitation des surfaces visibles ou non à partir d'un point donné. Pour ce faire, il est important de bien comprendre le concept de zone non visible et les différents paramètres qui seront choisis dans la formulation de l'hypothèse de solution.

3.3.1 Concept de zone non visible

Au cours d'une mission SAR, les avions de recherche volent à une hauteur de 1000 pieds/sol et les observateurs scrutent le territoire sur une bande d'un mille nautique

(environ 1800 m) de chaque côté de l'aéronef. La hauteur de l'avion par rapport au sol et la largeur de la zone d'observation permettent de calculer une pente d'observation minimale approximative de 9° . Pour qu'une zone soit non visible, la pente du terrain doit être supérieure à l'inclinaison de la ligne de visée (figure 3.4). La surface hachurée correspond à une zone non visible (ou non observable).

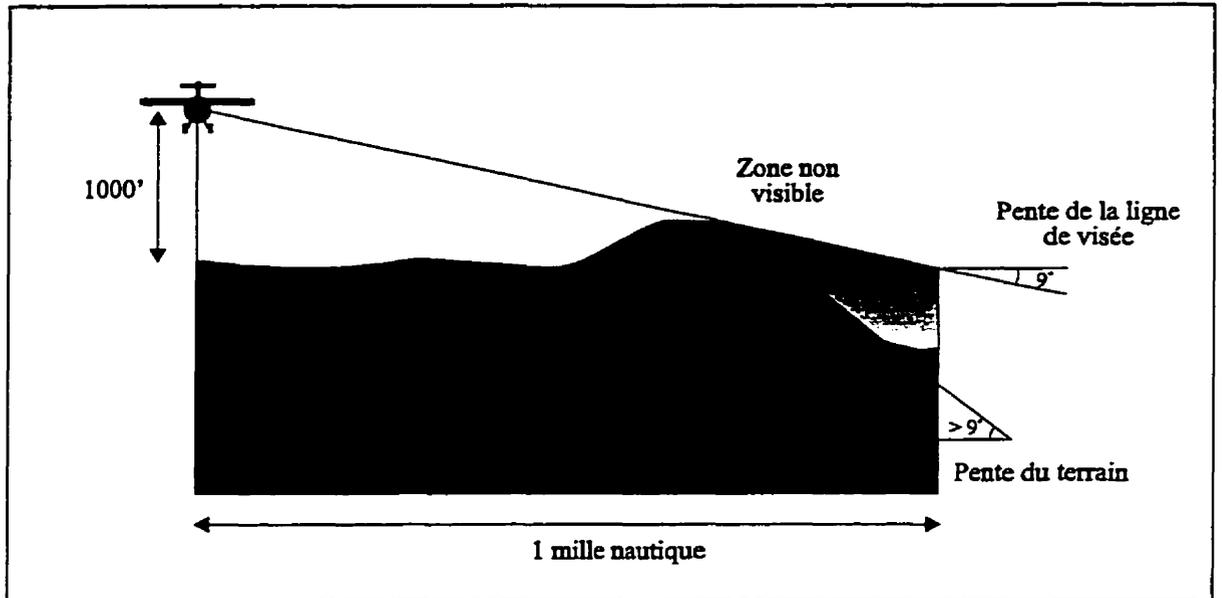


Figure 3.4 : Concept d'une zone non visible.

3.3.2 Paramètres à considérer

L'environnement du SIG fournit une interface qui permet à l'utilisateur de choisir certaines options et de modifier certains paramètres. Pour identifier des zones non visibles, il est nécessaire de choisir certains paramètres : le rayon, le pas de la radiale, le champ d'analyse et la hauteur du point d'analyse (hauteur de l'observateur). Ces paramètres sont illustrés à la figure 3.4 et à la figure 3.5.

Rayon

Distance sur laquelle les calculs de visibilité sont effectués. Cette distance doit être exprimée en mètres.

Radiale

Ligne sur laquelle l'analyse de visibilité est effectuée.

Pas de la radiale

Écart angulaire entre deux radiales consécutives d'analyse successifs lors du calcul des zones visibles ou non visibles. Plus le pas est petit, mieux les zones non visibles sont détectées et délimitées. Par contre, plus le nombre des calculs est grand et plus le temps de traitement s'accroît. Le pas de la radiale s'exprime en degrés.

Champ d'analyse

Le champ d'analyse correspond à la surface couverte lors des calculs de visibilité. Il est possible de choisir une valeur entre 0° et 360° .

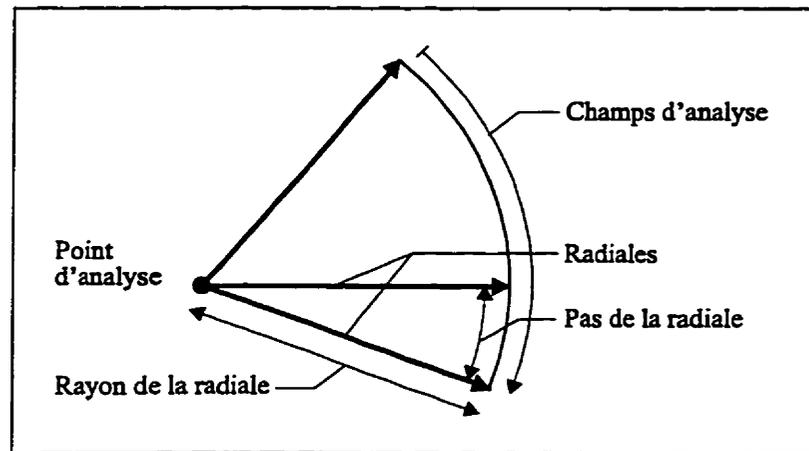


Figure 3.5 : Paramètres à considérer lors de l'analyse de visibilité.

Hauteur du point de l'analyse

La hauteur du point d'analyse correspond à la hauteur au-dessus du terrain à partir de laquelle l'analyse de visibilité est effectuée.

Mode de calcul des zones non visibles

La détection des zones non visibles se fait avec une série de radiales générées à partir d'un point d'analyse. Les calculs de visibilité s'effectuent à l'aide de profils calculés le long des radiales générées. Pour ce faire, il faut déterminer le champ d'analyse, le pas de la radiale

et son rayon d'action. Lorsqu'une radiale rencontre le relief, celle-ci est fragmentée en un ou plusieurs segments, successivement visibles et non visibles (figure 3.6).

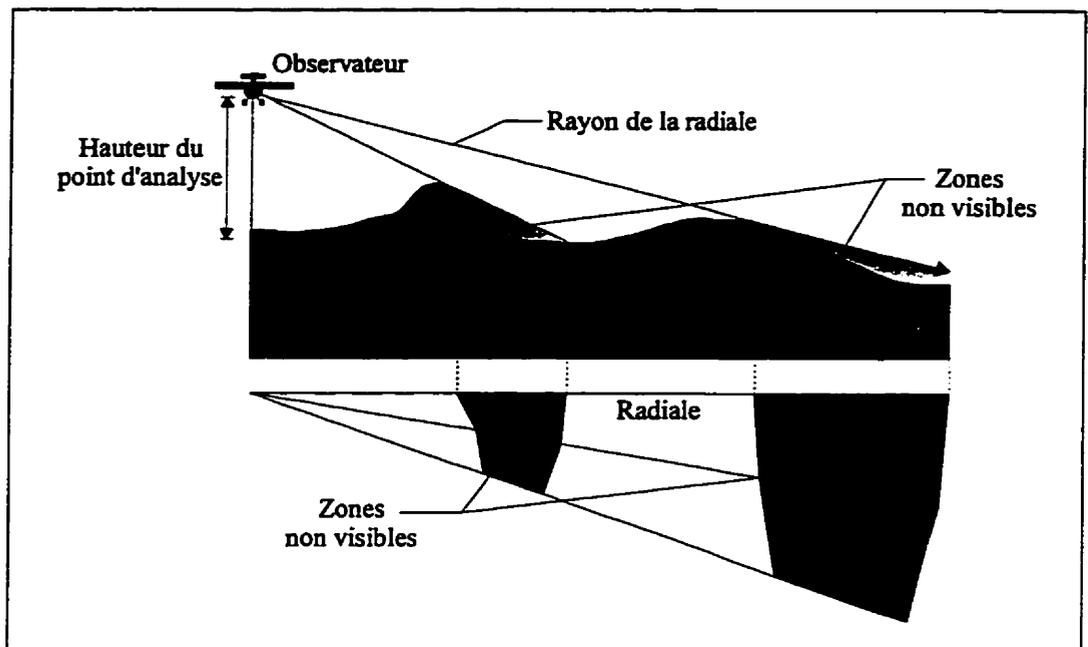


Figure 3.6 : Profil et vue en plan d'une radiale.

Les zones non visibles sont obtenues en reliant les extrémités des segments de radiales non visibles. La figure 3.6 illustre le mode de calcul des zones non visibles à partir d'un point. Pour obtenir les zones non visibles lors d'une mission, il faut effectuer l'analyse de visibilité tout au long de la trajectoire de l'avion. Pour ce faire, il faut encore définir l'espacement des points d'analyse et leur hauteur le long de la trajectoire.

3.3.3 Détection de zones non visibles

En utilisant le positionnement par satellite pour obtenir la position d'un avion de recherche, les fonctionnalités d'analyse de visibilité de l'outil SIG et les modèles numériques de terrain, il devient donc maintenant possible de mettre à contribution les technologies géomatiques pour le suivi des opérations SAR. La figure 3.7 illustre le type de zones que nous cherchons à détecter. Il s'agit d'une rivière, mais cela pourrait être un secteur où il y a de fortes dénivelées, un ravin, un canyon ou une falaise. Un avion écrasé au fond de ce

ravin peut ne pas être aperçu. Il importe donc de détecter ces zones pour augmenter l'efficacité des recherches.



Figure 3.7 : Type de relief générant des zones non visibles lors d'une mission.

CHAPITRE 4

SUIVI DES OPÉRATIONS DE RECHERCHE ET DE SAUVETAGE AÉRIENS

4.1 Introduction

Les notions qui permettent de comprendre les éléments sur lesquels repose l'outil SORSA ont été présentées dans les chapitres précédents. Il est maintenant possible d'aborder la description de l'outil conçu pour l'identification des zones non visibles lors d'une mission de recherche et de sauvetage aériens. L'hypothèse de solution comprend 2 volets : le volet positionnement par satellites pour obtenir la trajectoire de l'avion et le volet SIG pour l'identification des zones non visibles avec l'utilisation de modèles numériques et le recours à des fonctionnalités d'analyse de visibilité. L'hypothèse de solution se décompose ainsi :

1. Positionnement en mode relatif avec des mesures de pseudodistance ;
2. MNT de type TIN pour le relief de base ;
3. MNT de type GRID (résolution de 20 m x 20 m) pour le rehaussement du modèle avec des peuplements forestiers ;
4. Position du point d'analyse avec le positionnement GPS, rayon de la radiale d'un mille nautique, pas de la radiale de 0.5°, espacement des points d'analyse à chaque 500 m.

Les composantes de cette hypothèse sont le compromis d'une haute précision et d'un temps de calcul acceptable pour obtenir les résultats escomptés. Ce chapitre présente donc les résultats qui permettent de corroborer l'hypothèse de solution choisie. La méthodologie suivie ne repose donc pas sur une analyse scientifique rigoureuse, mais sur une approche pragmatique exploratoire visant à satisfaire un besoin concret.

4.2 Secteur test

La figure 4.1 présente une vue d'ensemble du secteur sur lequel les tests pratiques ont été réalisés. Situé dans le parc des Laurentides, à une centaine de kilomètres au nord de la ville de Québec, ce secteur est représentatif des conditions des territoires inhospitaliers canadiens. Lorsque l'on survole cette région en avion, on constate qu'il n'y a pas d'habitation et qu'aucun réseau routier n'est apparent. Le couvert forestier domine par sa présence et plusieurs interventions forestières comme la coupe à blanc y ont été pratiquées. On remarque aussi la présence de lignes à haute tension et de nombreux petits lacs.



Figure 4.1 : Vue d'ensemble du secteur sur lequel les tests ont été effectués.

4.3 Positionnement par satellites

Cette section présente les équipements GPS utilisés, les emplacements du secteur test et des stations de référence, les résultats qui permettent de valider les différentes techniques de positionnement utilisées et les moyens permettant de choisir la technique de positionnement requise pour l'identification des zones non visibles.

4.3.1 Aspects techniques

Pour réaliser la collecte de données GPS, les équipements suivants ont été utilisés : un avion bimoteur, trois antennes GPS dont une bifréquence aéroprofilée et trois récepteurs Ashtech Z-XII³.



Figure 4.2 : Avion utilisé lors de la collecte de données GPS.

Pour effectuer la collecte des différentes observations, une antenne bifréquence aéroprofilée (figure 4.3) est requise à bord de l'avion. Celle-ci a permis d'obtenir des mesures de pseudodistance et des mesures de phase sur les deux bandes. Dans des conditions normales d'observation, il est possible d'obtenir une position très précise, grâce à la technique de

³ Il importe de mentionner que l'aéronef (figure 4.2) utilisé lors de la mission ne peut être utilisé pour les opérations de recherche et de sauvetage aériens. Les avions utilisés par l'ARCSA sont des monomoteurs légers à quatre places et dont les ailes sont situées au-dessus de la cabine de pilotage (figure 1.8). Il est important que les ailes soient au-dessus de la cabine de pilotage, afin de permettre aux observateurs de bien observer le territoire.

l'OTF (section 2.10.4) et par conséquent de valider la qualité du positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance.



Figure 4.3 : Antenne GPS bifréquence aéroprofilée.

Les récepteurs utilisés sont de type géodésique (haut de gamme) : Ashtech Z-XII (figure 4.4). Ils permettent d'enregistrer des observations GPS sur les deux bandes lors de la mission, de faire du positionnement cinématique et de modifier le taux d'échantillonnage. À partir des observations et des logiciels de positionnement, il est possible d'obtenir une position en mode absolu ou en mode relatif.

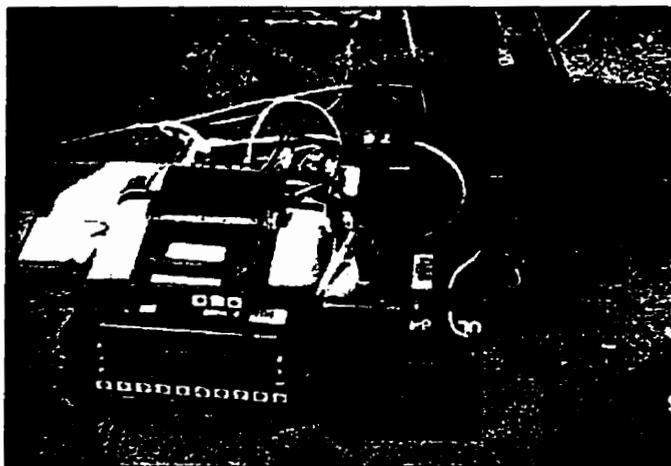


Figure 4.4 : Récepteur GPS (Ashtech Z-XII).

4.3.2 Emplacement des stations de référence

Afin de simuler une recherche effectuée par l'ACRSA, l'avion a survolé le secteur test de la même manière qu'une équipe de recherche l'aurait réalisée. Pour ce faire, le pilote a volé à

une hauteur de 1000 pieds/sol et à une vitesse de 110 nœuds (environ 200 km/h). La collecte de données a été réalisée le 10 avril 1997, vers 12 h 30 min. Pour ce faire, deux stations de référence ont été utilisées pour comparer le positionnement relatif et par mesure de sécurité. La figure 4.5 présente la localisation des stations de référence utilisées lors de la mission. La première station de référence (PEPS) était située sur le toit du Pavillon de l'Éducation Physique et des Sports (PEPS) de l'Université Laval. La seconde station (FORET) était située, au niveau du sol et en bordure d'un chemin forestier, à la forêt Montmorency de l'Université Laval. Le meilleur emplacement choisi était celui de la station PEPS, car aucun obstacle ne pouvait nuire à la visibilité des satellites. Les conditions d'observation à la station FORET étaient de moins bonne qualité qu'à la station PEPS : les accumulations de neige provenant du dégivrage du point géodésique sur lequel a été placé le récepteur, le relief des montagnes et la présence de quelques arbres et arbustes situés à quelques mètres de l'antenne pouvaient nuire à la bonne réception du signal et à la visibilité des satellites.

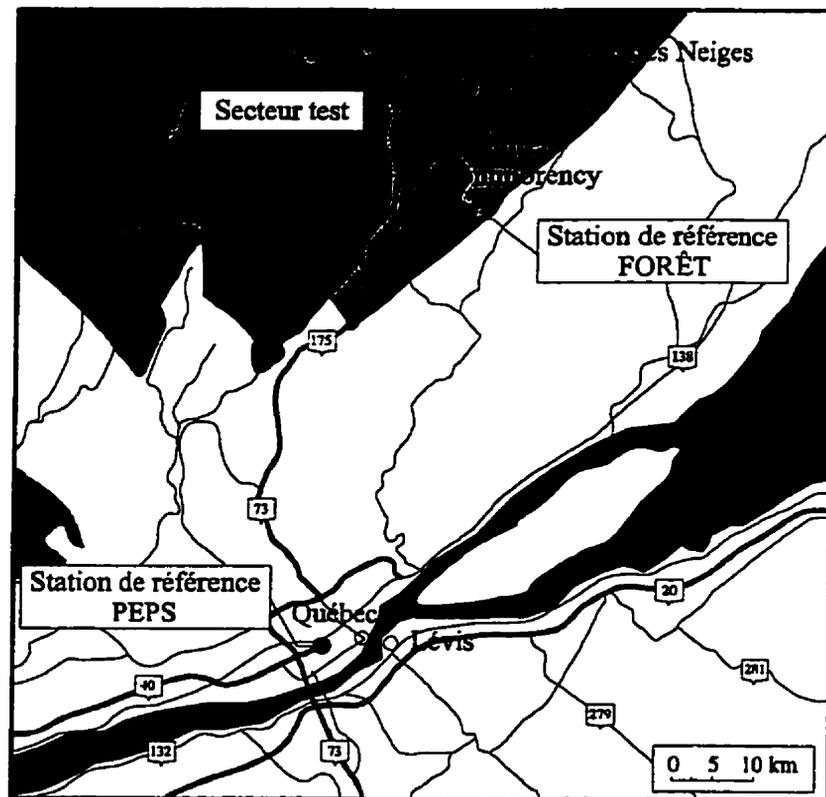


Figure 4.5 : Localisation des stations de référence GPS.

4.3.3 Comparaison entre l'absolu et le relatif avec mesures de pseudodistance

Les logiciels conventionnels de positionnement absolu utilisent des mesures de code C/A (sur L1) pour calculer une position. Ceux-ci ne tiennent pas compte de l'erreur causée par la réfraction ionosphérique (équation (2.14)). Le logiciel de positionnement absolu CINABSO a été développé, par l'auteur, pour calculer une position (ϕ , λ , h) à chaque nouvelle époque d'observation. CINABSO utilise des mesures de code P (ou Y). Celles-ci sont de meilleure résolution que les mesures de code C/A (tableau 2.1). À l'aide des observations recueillies sur les deux bandes, le logiciel CINABSO calcule et élimine l'erreur causée par la réfraction ionosphérique à l'aide d'un modèle permettant de modéliser cette erreur. Il est donc possible d'obtenir un positionnement de meilleure précision qu'avec les logiciels de positionnement sur le marché.

Les trois prochains graphiques des figures 4.6, 4.7 et 4.8 présentent les différences obtenues sur les coordonnées d'un même point entre l'absolu et le relatif avec la station de référence située au PEPS. Le positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance a été obtenu à l'aide du logiciel PPDIFF de la compagnie Ashtech. Ce logiciel utilise des mesures de code C/A et ne corrige pas les erreurs causées par la réfraction ionosphérique. Le positionnement relatif sert de référence puisqu'il fournit des résultats plus précis que le positionnement absolu. La composante DN correspond à la différence de latitude, la composante DE à la différence de longitude et la composante Dh correspond à la différence d'altitude géodésique. Toutes ces différences sont exprimées en mètres.

Le tableau 4.1 présente une synthèse des différences de coordonnées obtenues lors de la comparaison du positionnement de l'avion en mode absolu avec le mode relatif. Les différences obtenues pour toutes les composantes (DN, DE, Dh) respectent l'ordre de grandeur de la précision du positionnement absolu (tableau 2.5). Les écarts minimums et maximums sont inférieurs à 150 m. Par exemple, une erreur de 150 m équivaut à la moitié de l'altitude de vol d'un avion durant une mission (1000 pieds/sol).

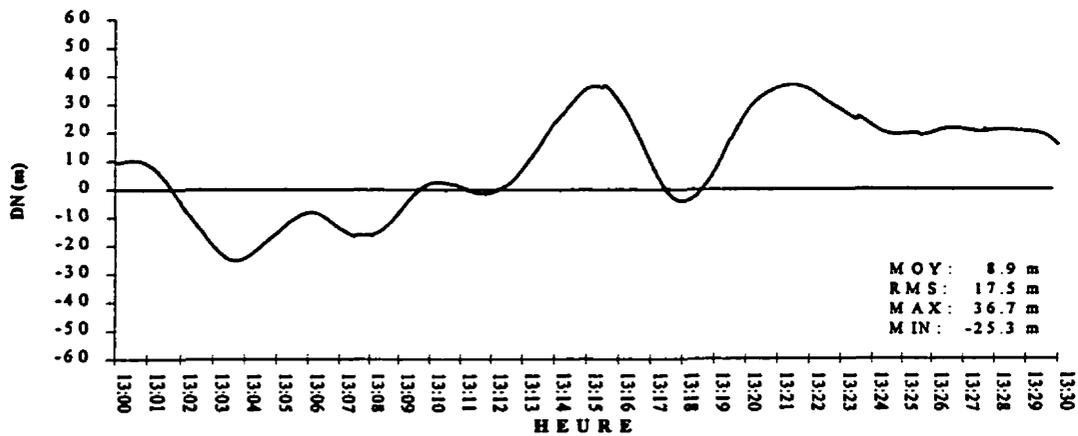


Figure 4.6 : DN entre le positionnement absolu et le relatif (PEPS).

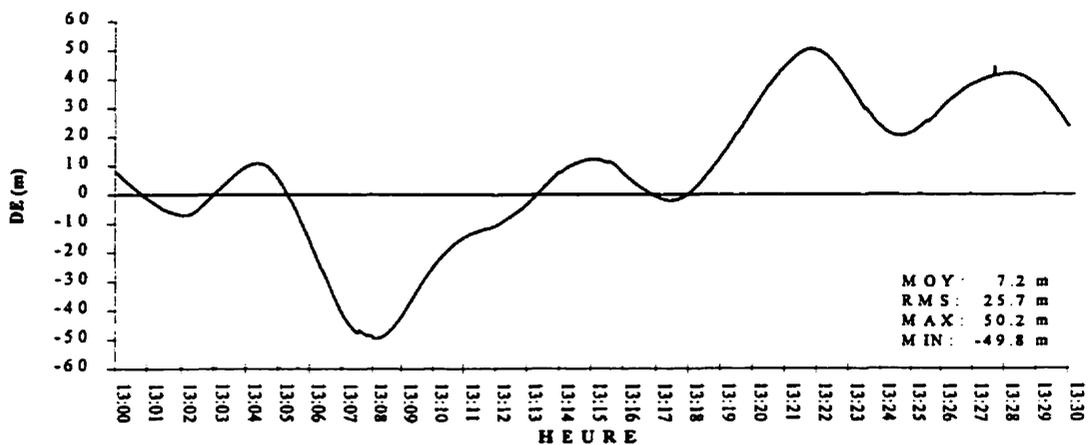


Figure 4.7 : DE entre le positionnement absolu et le relatif (PEPS).

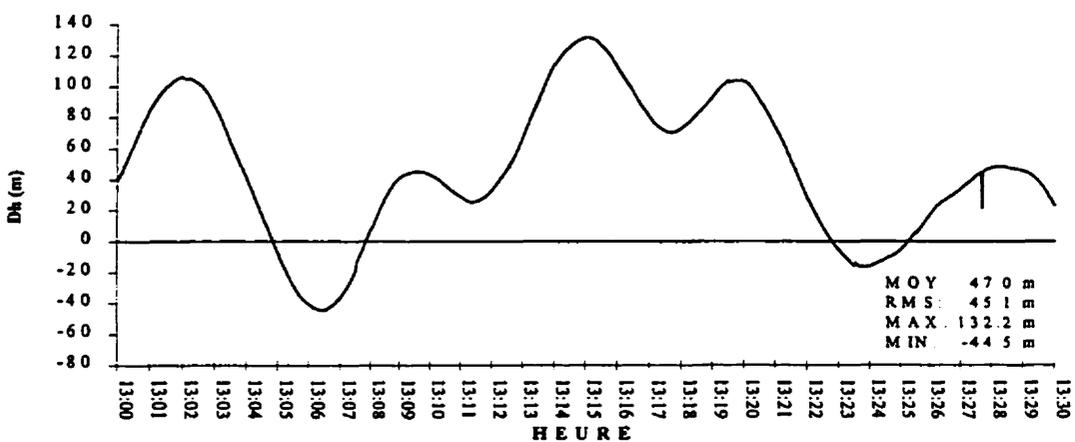


Figure 4.8 : Dh entre le positionnement absolu et le relatif (PEPS).

L'écart maximum constaté pour la composante verticale est de 131 m. Les écarts type (*Root Mean Square* - RMS) correspondent à un niveau de probabilité de 68%. Ils sont inférieurs à ± 26 m pour les différences de latitude et de longitude. L'écart type pour la composante altimétrique est plus grand : il est de 45 m. On constate que la composante altimétrique est moins précise que les composantes planimétriques : l'écart type est de 2 à 3 fois plus grand. Par ailleurs, on constate aussi que les écarts obtenus sont inférieurs à la précision théorique du positionnement absolu.

Tableau 4.1 : Sommaire entre l'absolu et le relatif (PEPS).

Comparaison entre l'absolu et le relatif			
	DN(m)	DE(m)	Dh(m)
Moyenne	8.9	7.2	47.0
Écart type	17.5	25.7	45.1
Maximum	36.7	50.2	131.2
Minimum	-25.3	-49.8	-44.5

4.3.4 Comparaison du positionnement relatif

La précision du positionnement relatif est fonction, entre autres, de la distance qui sépare la station référence de la station mobile : plus cette distance augmente, plus l'imprécision croît. En théorie, la précision du positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance est de 2 à 10 m pour une distance de la station de référence inférieure à 100 km. Pour comparer les différences de coordonnées obtenues à l'aide des stations PEPS et FORET, il faut connaître ces distances. La figure 4.9 présente les distances séparant l'avion des stations de référence PEPS et FORET en fonction du temps.

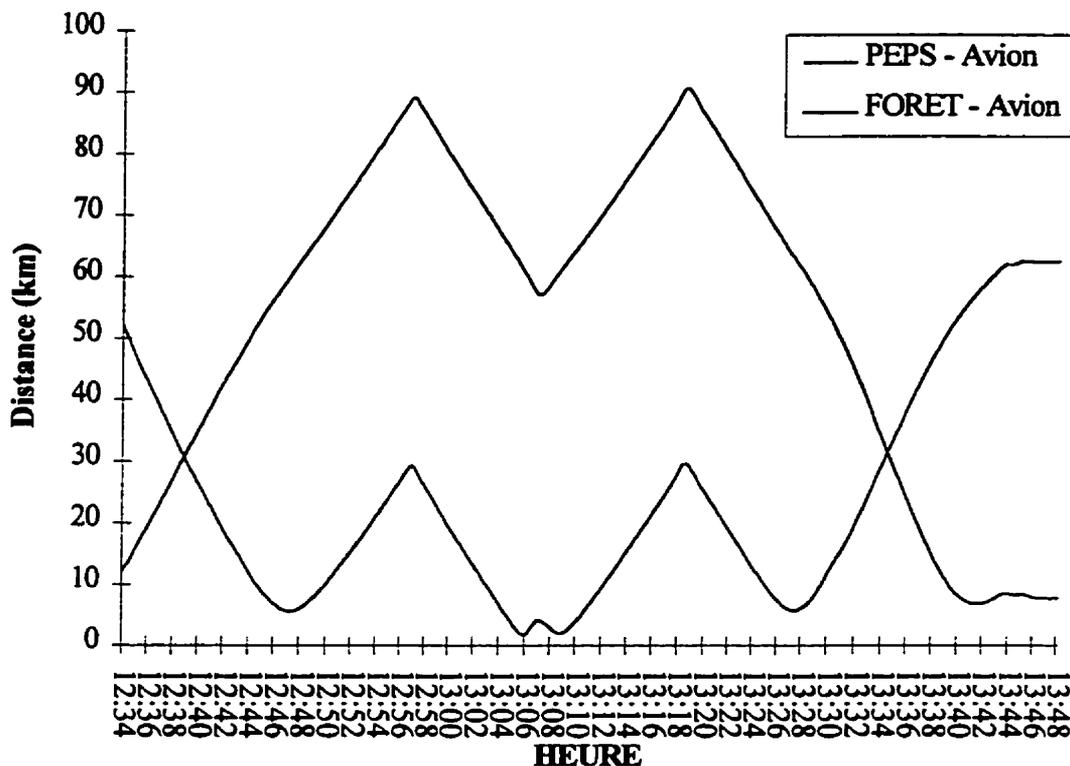


Figure 4.9 : Distance entre l'avion et les deux stations de référence.

Suite à l'analyse de la figure 4.9, on constate que l'écart maximal entre les stations de référence et la station mobile est inférieur à 100 km. Il est donc possible, dans des conditions normales d'observation, d'obtenir une précision de l'ordre de 2 à 10 m pour le positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance (tableau 2.5). On constate aussi que les distances de séparation initiales et finales diffèrent, ce qui ne devrait pas être le cas. L'explication provient du fait que l'enregistrement des observations n'a pu débuter simultanément entre les stations de référence et la station mobile, d'où la perte de données.

Les trois prochaines figures 4.10, 4.11 et 4.12 présentent les écarts observés au cours de la comparaison des positionnements relatifs de l'avion obtenu à partir des deux stations de référence.

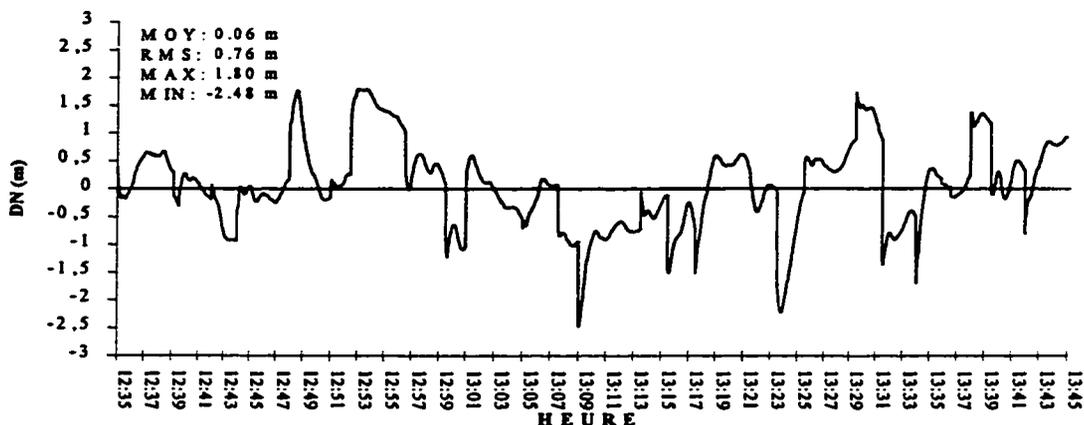


Figure 4.10 : DN entre les coordonnées obtenues à partir de PEPS et FORET.

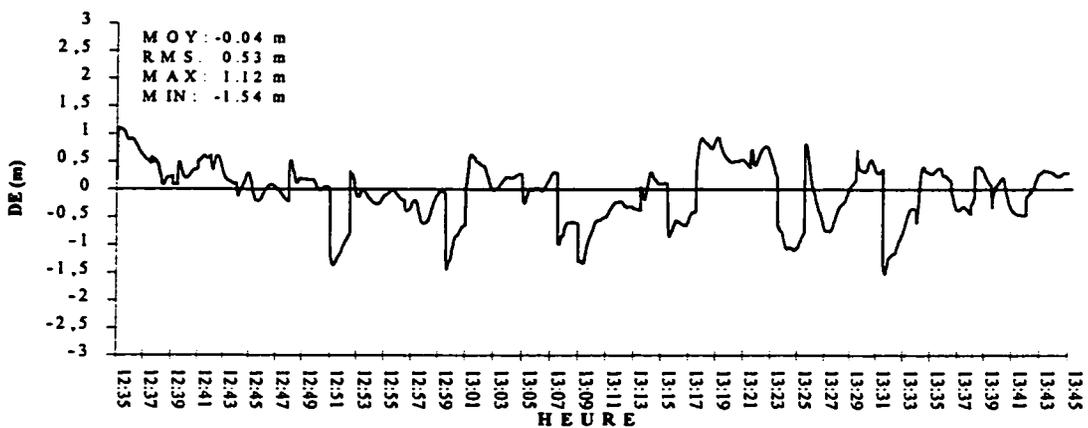


Figure 4.11 : DE entre les coordonnées obtenues à partir de PEPS et FORET.

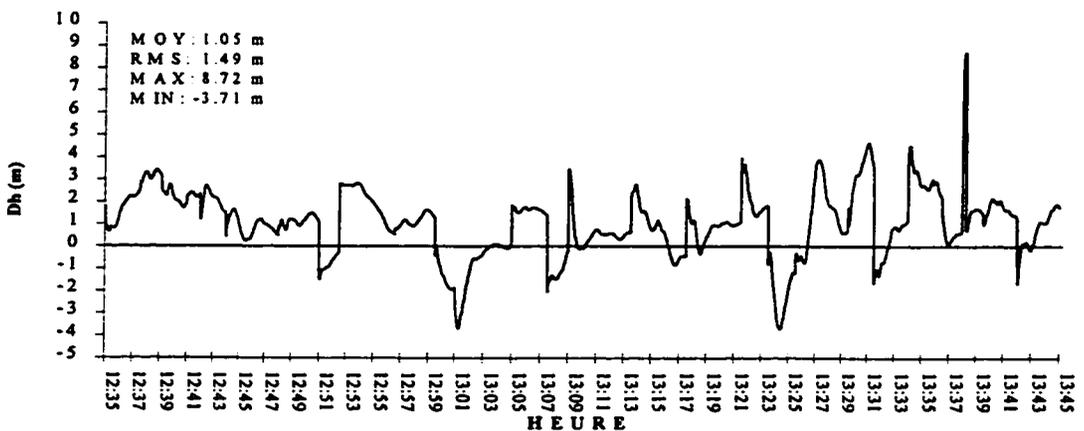


Figure 4.12 : Dh entre les coordonnées obtenues à partir de PEPS et FORET.

Le tableau 4.2 présente une synthèse des écarts obtenus lors de la comparaison du positionnement relatif obtenu à partir des stations PEPS et FORET. Les différences obtenues pour les composantes (DN, DE, Dh) respectent l'ordre de grandeur de la précision du positionnement relatif (tableau 2.5). Un écart de ± 8.72 m a été constaté à la fin de la session d'observation pour la composante verticale. Cet écart ne signifie pas que la précision globale du positionnement se situe dans cet ordre de grandeur. Il s'agit d'un phénomène ponctuel qui provient du nombre de satellites visibles à la station FORET : un déficit de deux satellites a été constaté à une époque, d'où une valeur de GDOP élevée. Les corrections de la station FORET ne pouvant être appliquées à toutes les observations de la station mobile, il en résulte une perte de précision sur la position obtenue. On constate que la composante altimétrique est moins précise que les composantes planimétriques : l'écart type obtenu est de 2 à 3 fois plus grand.

Tableau 4.2 : Sommaire entre le relatif (PEPS) et le relatif (FORET).

Comparaison entre le relatif (PEPS et FORET)			
	DN(m)	DE(m)	Dh(m)
Moyenne	0.06	-0.04	1.05
Écart type	0.76	0.53	1.49
Maximum	1.80	1.12	8.72
Minimum	-2.48	-1.54	-3.71

4.3.5 Comparaison entre le positionnement relatif et l'OTF

Cette dernière comparaison permet d'évaluer la qualité du positionnement relatif avec les mesures de pseudodistance. Les figures 4.13 à 4.18 présentent les différences de coordonnées entre le positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance et le positionnement relatif avec des mesures de phases dont les ambiguïtés ont été fixées à l'aide de la technique de l'OTF. L'OTF sert de référence puisqu'elle est la technique de positionnement la plus précise en mode cinématique.

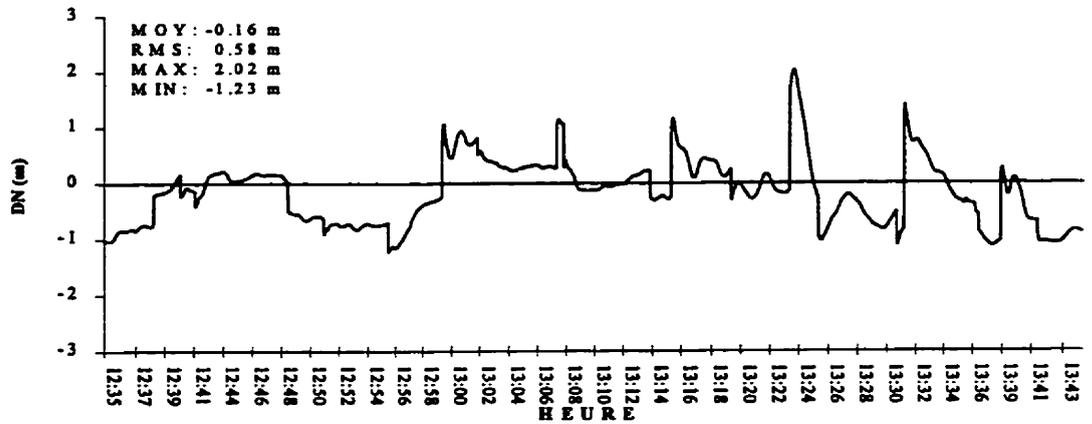


Figure 4.13 : DN entre le relatif par rapport à l'OTF à la station PEPS.

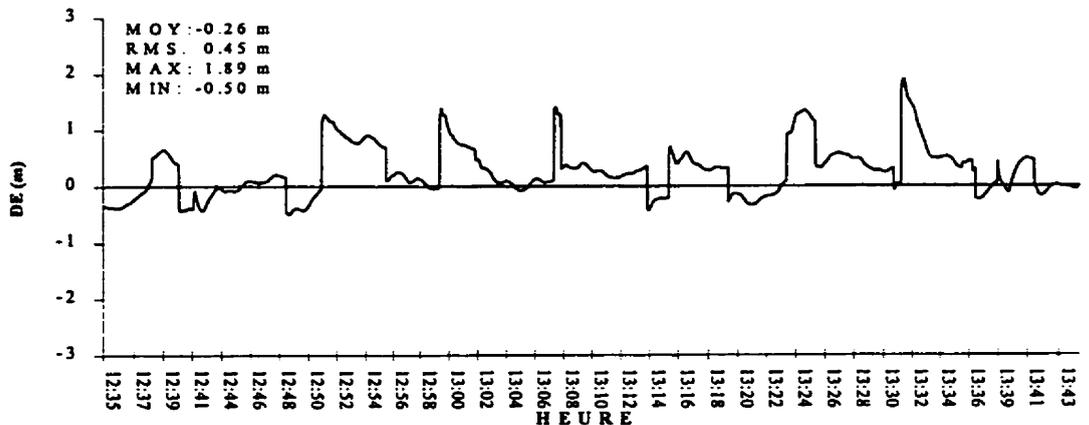


Figure 4.14 : DE entre le relatif par rapport à l'OTF à la station PEPS.

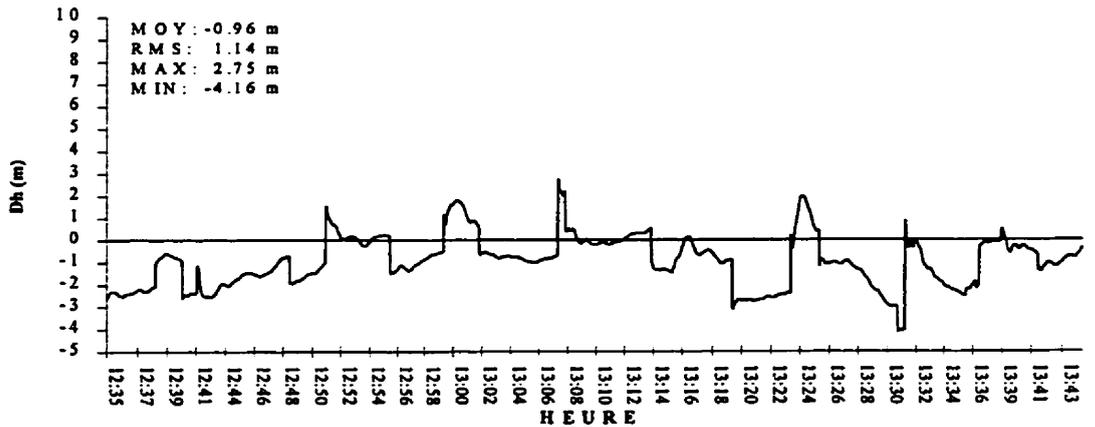


Figure 4.15 : Dh entre le relatif par rapport à l'OTF à la station PEPS.

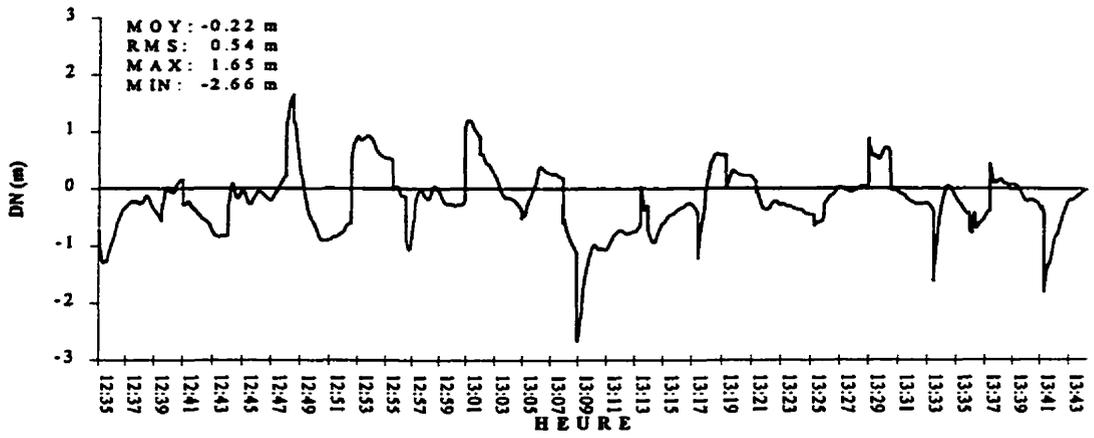


Figure 4.16 : DN entre le relatif par rapport à l'OTF à la station FORET.

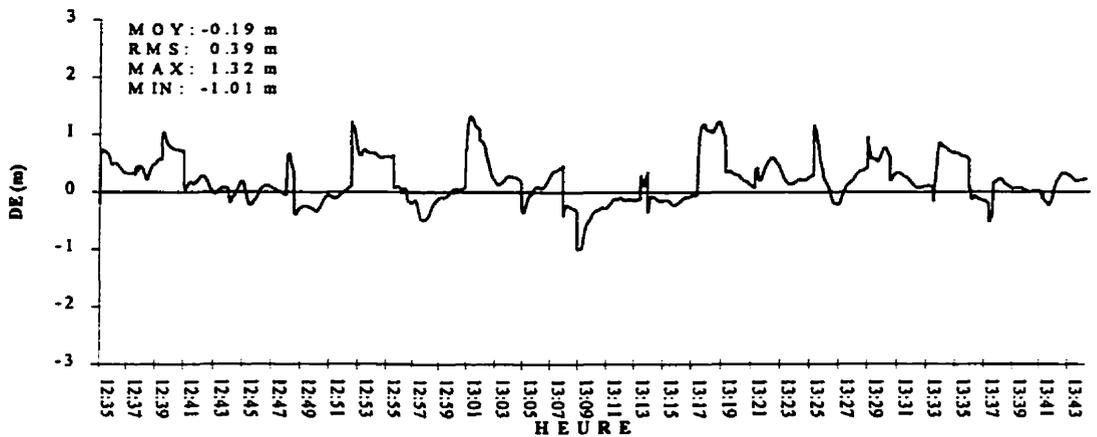


Figure 4.17 : DE entre le relatif par rapport à l'OTF à la station FORET.

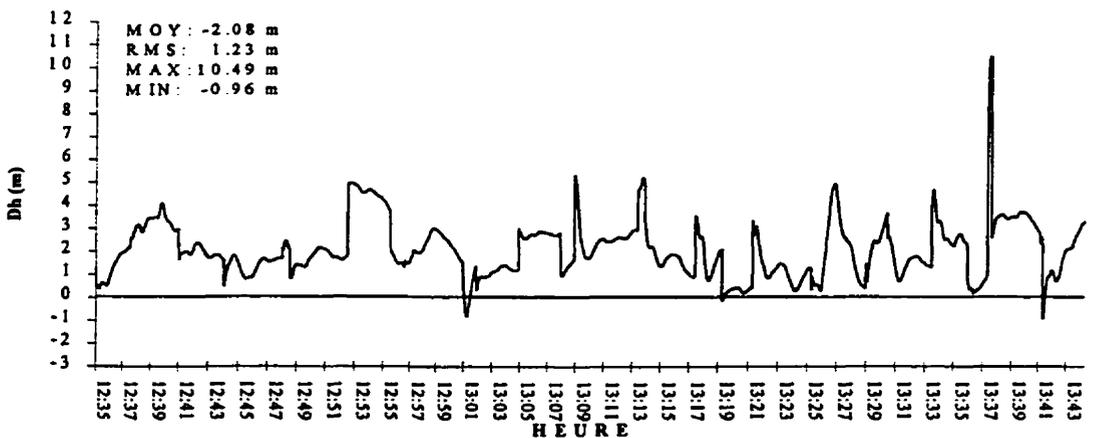


Figure 4.18 : Dh entre le relatif par rapport à l'OTF à la station FORET.

Le logiciel PNAV de Ashtech a été utilisé pour obtenir le positionnement avec l'OTF. Dans des conditions normales, cette technique permet d'obtenir une précision de 10 cm. Le tableau 4.3 présente un sommaire des différences de coordonnées obtenues à partir des deux stations utilisées. Les résultats obtenus, entre le positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance et l'OTF, pour la station de référence PEPS montrent que l'écart type maximum est de ± 1.13 m pour les trois composantes. Les résultats obtenus pour la station de référence FORET montre que l'écart type maximum pour la composante planimétrique est de ± 1.23 m. L'écart maximal de 10.49 m, pour la composante verticale, s'explique encore une fois par la valeur élevée du GDOP. Ce phénomène est ponctuel et est relié à la qualité du site d'observation de la station FORET.

Tableau 4.3 : Sommaire entre le relatif et l'OTF.

Comparaison entre le positionnement relatif avec mesures de pseudodistance et l'OTF						
	Station PEPS			Station FORET		
	DN (m)	DE(m)	Dh(m)	DN (m)	DE(m)	Dh(m)
Moyenne	-0.16	0.26	-0.96	-0.22	0.19	2.08
Écart Type	0.58	0.45	1.13	0.54	0.39	1.23
Maximum	2.02	1.89	2.75	1.65	1.32	10.49
Minimum	-1.23	-0.50	-4.16	-2.66	-1.01	-0.96

4.3.6 Choix d'une technique de positionnement

L'objectif de toutes ces comparaisons était de valider le choix du positionnement relatif comme technique de positionnement pour les missions de recherche aériennes. La première comparaison (section 4.3.3) permet de rejeter le positionnement absolu, car les différences de position sont trop grandes. Les deuxième et troisième comparaisons (sections 4.3.4 et 4.3.5) permettent grâce aux résultats obtenus de justifier le choix du positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance : la précision obtenue est inférieure à la précision théorique (2 à 10 m). Le positionnement relatif avec la technique

de l'OTF a aussi été rejeté, car la logistique nécessaire est complexe, les équipements sont plus coûteux et une précision centimétrique n'est pas requise pour les missions de recherche et de sauvetage aériens. Il importe de mentionner que les récepteurs utilisés dans ce projet de recherche pour faire l'acquisition des données GPS étaient de haute qualité. Des récepteurs bas de gamme n'auraient pas permis d'obtenir d'aussi bons résultats pour le positionnement relatif.

4.4 Transformation de l'altitude géodésique

La figure 4.19 présente l'altitude géodésique de l'avion en fonction de la durée de la session d'observation. Suite à l'analyse du graphique, on constate que l'avion a atterri à une altitude de 39 m et qu'il est monté jusqu'à 1852 m d'altitude. L'altitude moyenne durant la mission était de 1052 m. La période correspondant au survol du secteur test se situe au milieu du graphique, entre 12 h 48 min et 13h 30 min.

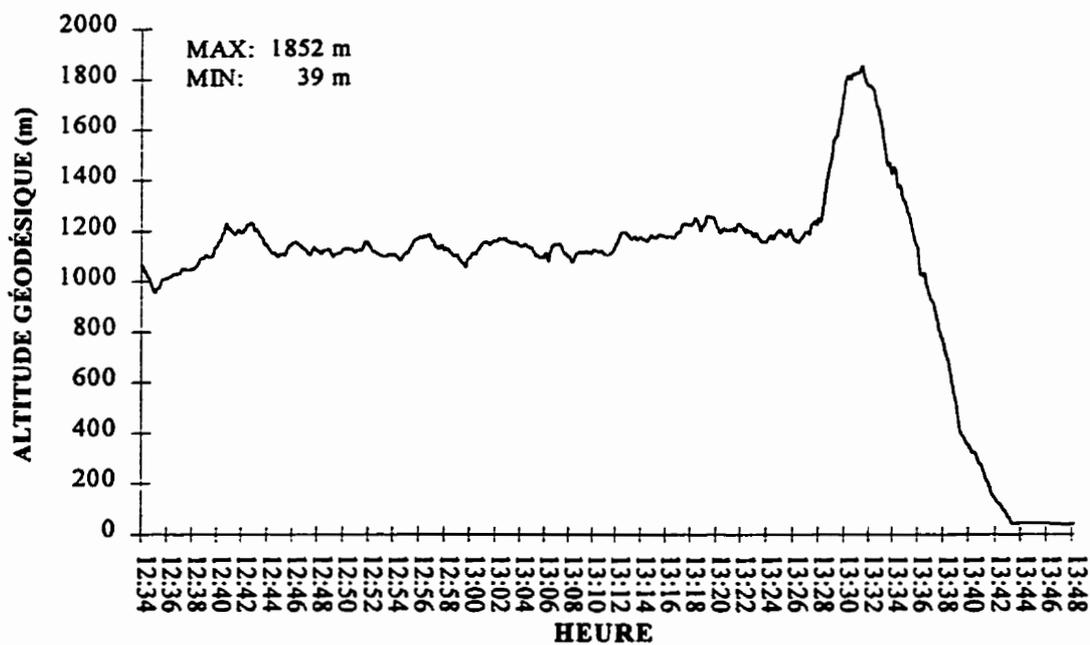


Figure 4.19 : Altitude géodésique de l'avion durant la mission.

Le système GPS fournit une altitude par rapport à l'ellipsoïde de référence, alors que les cartes topographiques se réfèrent au niveau moyen des mers. Pour faire la concordance

entre ces deux altitudes, il est nécessaire d'extraire l'ondulation du géoïde à partir d'une table [Division des Levés Géodésiques, 1995] pour chacune des positions obtenues avec le GPS. En soustrayant à l'altitude géodésique l'ondulation du géoïde, on obtient l'altitude orthométrique (équation (A.16)). Pour réaliser correctement l'analyse de visibilité, il faut tenir compte de l'ondulation, puisqu'elle a une influence sur la hauteur des points d'observation. L'ondulation calculée varie approximativement de -26 m à -29 m pour le secteur survolé.

4.5 Trajectoire injectée dans le SIG

La figure 4.20 présente la trajectoire de l'avion en projection isométrique. Le tracé plus épais représente la trajectoire de l'avion durant la mission de collecte de données GPS. Pour mieux visualiser le déplacement vertical de l'avion, la composante verticale a été multipliée par un facteur d'amplification de 20 fois. Les quatre lignes de vol qui serviront à valider l'hypothèse de solution pour la seconde partie de ce chapitre sont situées entre les huit lignes composées de petits traits.

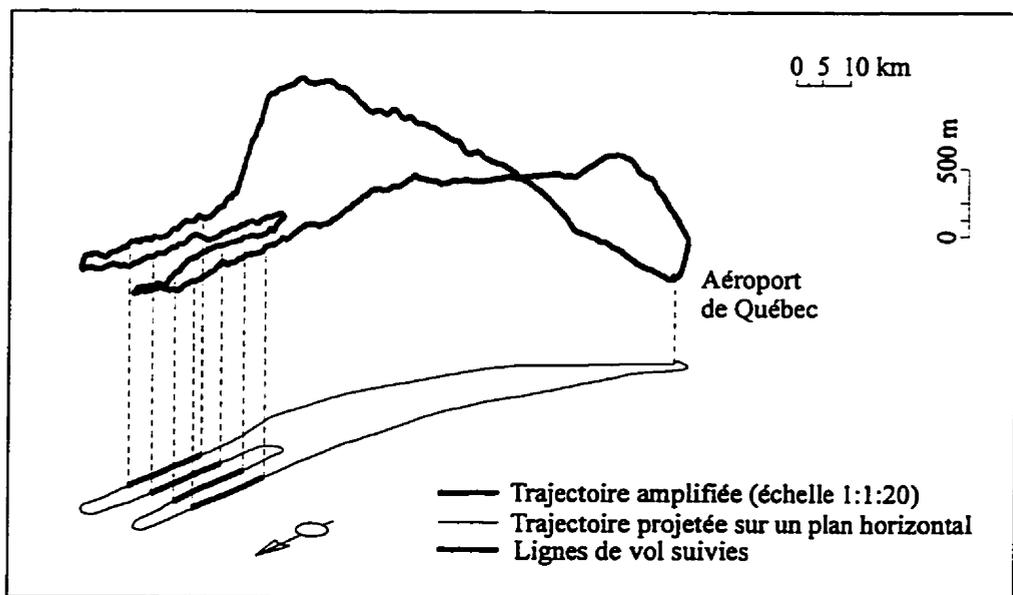


Figure 4.20 : Vue perspective de la trajectoire de l'avion lors de la mission.

4.6 Analyse de visibilité

Cette section présente une description des paramètres à considérer, la justification des résultats obtenus, les résultats de l'analyse de visibilité, les conséquences de l'ajout d'un couvert forestier, le concept de zone critique, l'influence de la résolution d'un modèle numérique de terrain sur le relief, le choix de la résolution d'un MNT en fonction de la superficie occupée par les zones critiques, le rehaussement d'un modèle numérique avec une ligne à haute tension et les résultats obtenus lors de l'analyse de visibilité.

4.6.1 Aspects techniques

Les données numériques du secteur test proviennent de la numérisation des courbes de niveau d'un feuillet cartographique 1:20 000 dont l'équidistance est de 10 m. La superficie couverte par les données numériques est approximativement de 26 390 hectares. Le relief y est irrégulier et les dénivelées sont de l'ordre de 400 m. L'altitude minimum pour le secteur test est de 750 m, tandis que l'altitude maximum est de 1150 m.

Les données utilisées ont été traitées sur une station InterPro (modèle 6840), possédant 64 Mo de mémoire vive, avec deux écrans (un écran pour visualiser les zones non visibles et l'autre pour choisir les points à partir desquels l'analyse sera effectuée). Les logiciels qui ont été utilisés sont le logiciel SIG MGE (*Modular GIS Environment*), le logiciel de dessin MicroStation, le système de gestion de base de données Informix et le système d'exploitation Unix.

4.6.2 Paramètres à considérer lors de l'analyse de visibilité

Lors des calculs de visibilité, il faut déterminer et modifier certains paramètres utilisés par le logiciel SIG. L'ensemble de ces paramètres peut être regroupé en trois grandes composantes : 'algorithme', 'position' et 'modèle numérique de terrain'.

4.6.2.1 Composante 'algorithme'

La première composante comprend les paramètres nécessaires aux algorithmes de calcul de visibilité. Ces paramètres sont le rayon de la radiale, le pas de la radiale et le champ d'analyse.

Rayon de la radiale

Le rayon de la radiale choisi est de 1900 m. Cette valeur correspond à la distance préconisée par le maître des recherches lors d'une mission.

Pas de la radiale

Il importe de considérer le temps de traitement, car des vies sont en jeu. Un intervalle d'un demi-degré est un bon compromis entre la dimension d'un avion et le temps de traitement. L'écart angulaire constaté à l'extrémité de la radiale est de 16.5 m, ce qui correspond approximativement à la dimension d'un avion léger monomoteur.

Le champ d'analyse

La valeur du champ d'analyse choisie est de 360°, car il faut tenir compte du fait qu'il y a deux observateurs.

4.6.2.2 Composante 'position'

Cette composante comprend les points d'analyse extraits de la trajectoire suivie par l'avion, soit la position des points, l'espacement des points et la hauteur des points.

Espacement des points d'analyse

L'espacement des points d'analyse détermine la fréquence selon laquelle les calculs de visibilité doivent être effectués le long de la trajectoire de l'avion. Plus les points d'analyse sont nombreux et plus le temps de traitement sera long. Il faut donc choisir judicieusement cet espacement, pour obtenir un résultat satisfaisant dans un temps acceptable. L'espacement choisi est de 500 m, ce qui correspond à 9 secondes de vol de l'avion de recherche.

Position des points d'analyse

La trajectoire de l'avion est obtenue à partir du taux d'échantillonnage lors de la collecte de données GPS. Une position a été obtenue à toutes les 2 secondes, soit à tous les 113 m. La trajectoire de l'avion s'obtient en reliant successivement les positions entre elles. C'est à partir de la trajectoire que la position des points d'analyse est déterminée. Pour accélérer le processus d'identification des zones non visibles, la trajectoire GPS est insérée au fichier graphique et est décomposée en une série de points. Il est nécessaire de bien connaître la trajectoire de l'avion, puisque l'espacement et la hauteur des points d'analyse sont déterminés à partir de celle-ci.

Hauteur du point d'analyse

L'outil SIG ne fournit pas la possibilité d'effectuer directement les calculs de visibilité à partir de la position obtenue par positionnement GPS : il ne considère que les points constituant le modèle numérique de terrain. Il faut donc calculer, pour chaque point d'analyse, sa hauteur au-dessus du MNT, à partir des altitudes orthométriques de l'avion et des courbes de niveau ou du MNT.

4.6.2.3 Composante 'modèle numérique de terrain'

La troisième composante comprend les types de modèle numérique de terrain (TIN ou GRID) qui permettent de représenter le territoire survolé : MNT avec un relief de base et MNT rehaussé avec un couvert forestier.

MNT de base

Pour identifier les zones non visibles sur le secteur test, il est nécessaire de générer un modèle numérique de terrain. Celui-ci peut être de type TIN ou GRID. L'analyse de visibilité peut être effectuée sur ces deux types de modèle numérique. Il importe de choisir le bon type de modèle numérique en fonction des objectifs recherchés. C'est le modèle numérique de type TIN qui a été utilisé lorsqu'il représente un sol nu.

MNT rehaussé avec un couvert forestier

Le MNT de base ne tient compte que des courbes de niveau et des lacs. Dans la réalité, les peuplements forestiers peuvent créer des zones non visibles. Pour donner au MNT plus de ressemblance avec la réalité, il faut le rehausser avec le couvert forestier. Le rehaussement d'un modèle numérique permet d'être plus discriminant : il fournit la possibilité de mettre en évidence les zones non visibles le long des lisières ou des lignes de transport d'énergie. Ceci a été réalisé à l'aide d'un modèle numérique de type GRID (section 3.2.3), avec une résolution de 20 m x 20 m.

4.6.3 Justification de l'hypothèse de solution

Cette section présente les différents résultats qui permettent de confirmer l'hypothèse de solution. Les résultats présentés proviennent du choix du pas de la radiale, de l'espacement des points d'analyse et de la hauteur du point d'analyse.

4.6.3.1 Pas de la radiale

Le mécanisme de génération des zones non visibles a été décrit à la section 3.3.2. On peut déduire que plus le pas de la radiale est grand, moins on détectera de zones non observables. Ce phénomène est illustré à la figure 4.21.

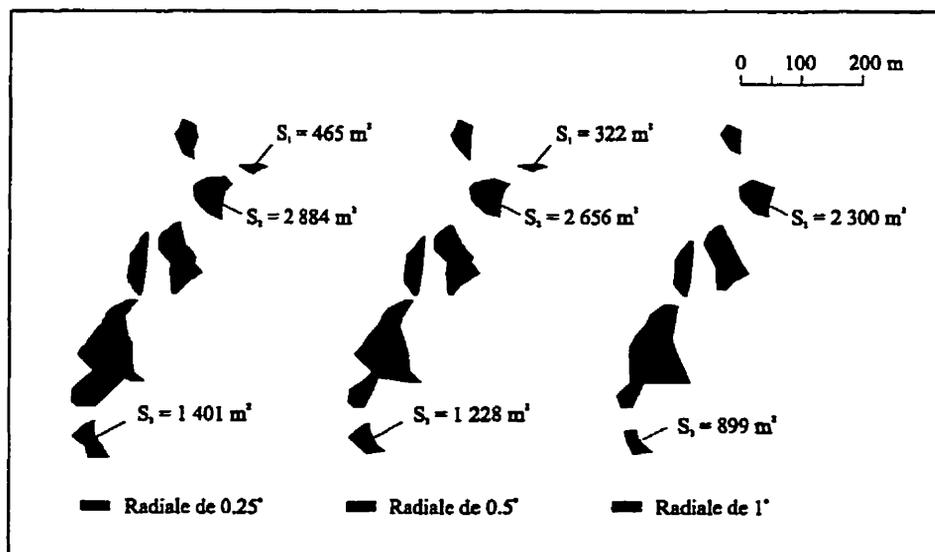


Figure 4.21 : Influence du pas de la radiale sur la détection des zones non visibles.

Cette figure présente l'influence du pas de la radiale sur l'identification des zones non visibles à partir d'un même point pour trois valeurs différentes du pas de la radiale. On constate que plus le pas de la radiale est grand, moins de zones sont détectées : la surface S_1 a disparu lorsque le pas de la radiale est supérieur à 0.5° et les surfaces S_2 et S_3 diminuent graduellement. L'analyse des zones permet de conclure qu'il est préférable de choisir un pas de la radiale de 0.5° , qui permet de détecter toutes les zones non visibles, tout en réduisant le temps de traitement.

4.6.3.2 Espacement des points d'analyse

L'espacement des points d'analyse le long de la trajectoire de l'avion est un facteur important à considérer : plus la densité des points est élevée, plus les procédures de calcul sont longues. Pour identifier les zones non visibles, il faut franchir une série d'étapes. Il faut insérer la trajectoire de l'avion dans le fichier des éléments graphiques (courbes de niveau et lacs). Ensuite, il faut décomposer cette trajectoire en une série de points ayant une distance de 500 m entre eux. Pour chacun des points, il faut ensuite calculer la hauteur des points au-dessus du MNT. La figure 4.22 illustre les zones non visibles en fonction de l'espacement des points d'analyse.

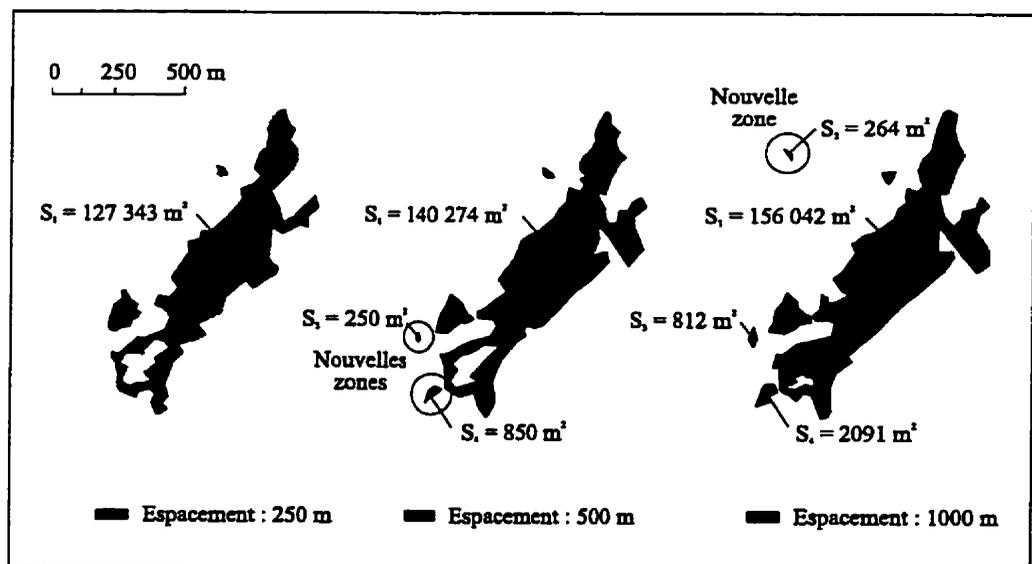


Figure 4.22 : Influence de l'espacement des points d'analyse sur la détection des zones.

L'accroissement de l'espacement entre les points d'analyse n'élimine pas les zones non visibles, il fait apparaître de nouvelles zones. Celles-ci sont entourées d'un cercle, afin de mieux les localiser. Ces zones sont facilement reconnaissables, car elles sont toutes petites. L'objectif recherché est de trouver le meilleur compromis possible entre la détection des zones et le temps de traitement. Il n'est pas nécessaire de délimiter précisément ces zones. Le temps de calcul à partir d'un seul point est approximativement de 15 secondes. En espaçant les points d'analyse de 500 m entre chacun d'eux, on réduit les temps de traitement et il est donc possible d'obtenir des résultats plus rapidement.

4.6.3.3 Hauteur du point d'analyse

La hauteur d'un point d'analyse est importante, car elle a une incidence directe sur la détection des zones non visibles lors d'une mission. Par ailleurs, l'altimètre de l'avion est l'instrument utilisé par le pilote pour conserver la hauteur sur sol demandée (300 ') ; mais il faut savoir que les indications des altimètres utilisés dans les avions monomoteurs légers ne peuvent pas être enregistrées automatiquement. On doit donc recourir au GPS pour obtenir les trois coordonnées de l'avion à un instant donné. Il est donc nécessaire de connaître les limites de la technique de positionnement utilisée afin de pouvoir juger de l'importance de ses répercussions sur la qualité des résultats attendus. Comme il a été présenté au tableau 2.5, la précision altimétrique du positionnement par satellites en mode absolu est de ± 150 m. Durant une mission, il est présumé que les avions volent à une altitude de 300 m au-dessus du sol. À cause de l'imprécision du positionnement absolu, il est possible d'affirmer que le point d'analyse, situé à 300 m au-dessus du sol, puisse se situer entre 150 m et 450 m (pour la composante verticale).

La figure 4.23 illustre les conséquences de l'imprécision du positionnement du mode absolu sur la détection des zones non visibles. La hauteur de 300 m sur sol correspond à la hauteur imposée lors d'une mission. Les surfaces non visibles à partir de ce point représentent $4\,244\text{ m}^2$ et 580 m^2 . La figure représente, pour comparaison, les zones qui seraient non visibles à partir d'une hauteur de 150 m au-dessus du sol (limite inférieure du positionnement absolu). Les superficies des zones non visibles ont augmenté considérablement, la première est 7 fois plus grande, et la seconde est 39 fois plus grande.

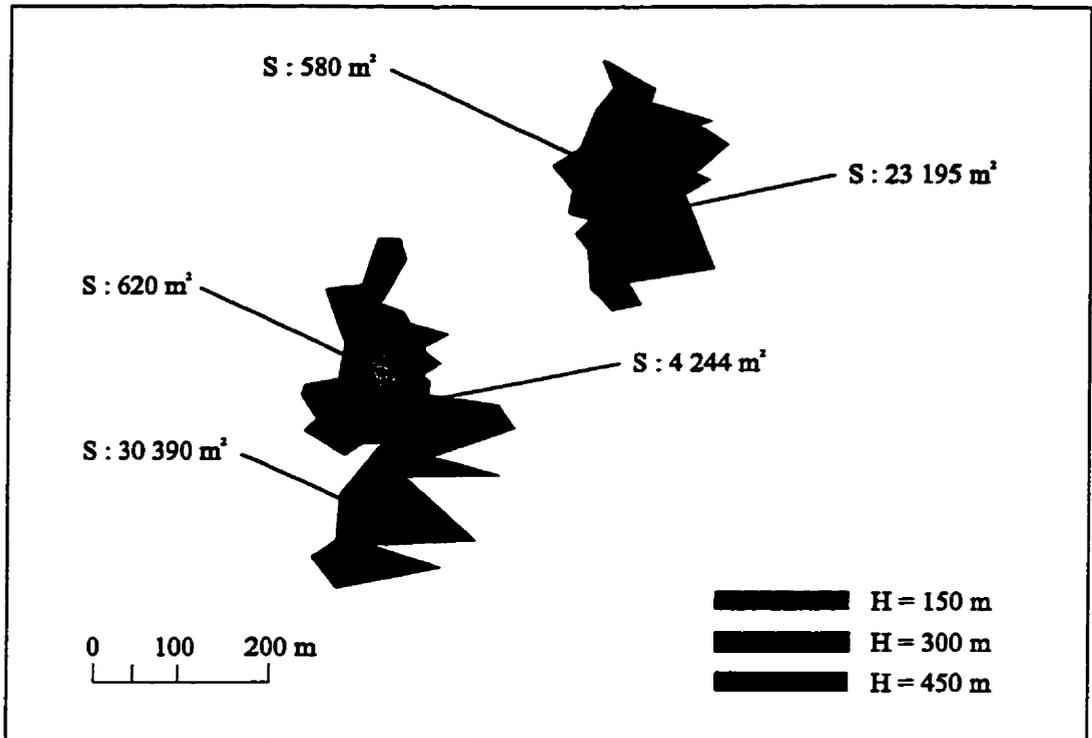


Figure 4.23 : Influence de l'imprécision du positionnement absolu altimétrique.

Elles occupent respectivement une superficie de $30\,390\text{ m}^2$ et de $23\,195\text{ m}^2$. Ce phénomène s'explique par le fait que plus un point d'analyse se situe près du sol, plus il y aura des zones identifiées comme non observables. On a également fait figurer la zone non observable à partir d'une hauteur de 450 m. Une des deux zones (580 m^2) détectées pour les conditions normales (300 m sur sol) a complètement disparu. L'autre zone, qui a été détectée, est 7 fois plus petite qu'elle ne devrait l'être : sa superficie est de 620 m^2 (par rapport à $4\,244\text{ m}^2$).

Le positionnement absolu ne peut être utilisé pour la détection des zones non visibles puisque son imprécision peut avoir de graves conséquences : des zones ne seront pas détectées ou des zones, qui en réalité ne seraient pas détectées, seront identifiées comme non visibles. Il est donc important de choisir une technique de positionnement plus précise, afin de détecter correctement les zones non observables. Le positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance a été choisi puisque celui-ci offre une meilleure précision (2 à 10 m) que le positionnement absolu.

4.6.4 Analyse de visibilité avec TIN (secteur non rehaussé)

La figure 4.24 illustre le secteur sur lequel les tests ont été réalisés. Lors de la collecte de données, quatre lignes de vol avaient été planifiées pour la mission. Les quatre lignes continues représentent les lignes suivies par l'avion durant la mission. L'écart maximum se situe sur la deuxième ligne de vol : une différence de 375 m a été constatée entre la ligne de vol planifiée et celle qui a été suivie. Les écarts constatés auraient pu être plus grands, car le pilote de l'avion utilisait un système de positionnement avec un récepteur GPS et une carte numérique, ce qui lui permettait de s'orienter sur les lignes de vol et de corriger sa trajectoire au besoin. Normalement, la navigation doit se faire à la carte, or il est plus difficile de bien suivre les lignes de vol dans ces conditions. La longueur de chacune des lignes est approximativement de 14 km. Les points carrés sur ces lignes représentent les points d'analyse. Chaque ligne comprend 27 ou 28 points.

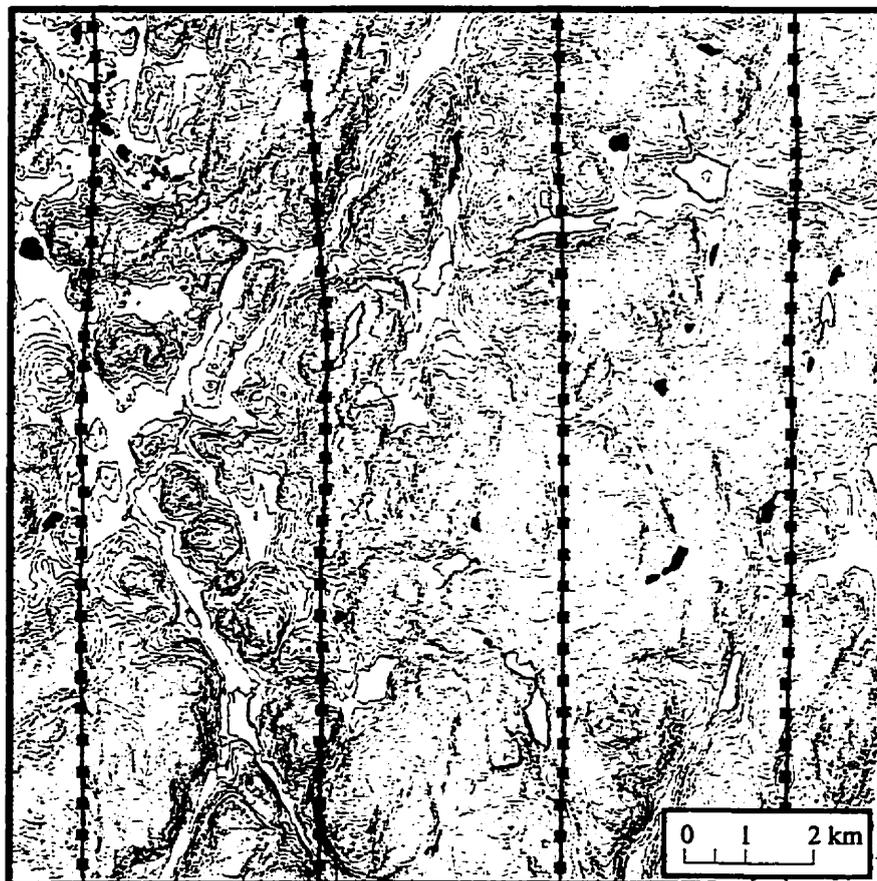


Figure 4.24 : Lignes de vol suivies lors de la mission.

La figure 4.25 présente les zones non visibles à partir de la trajectoire de l'avion. L'ensemble des zones non visibles se situe à l'extrémité des zones d'observation. Cette figure montre que de grandes surfaces n'ont pu être observées. Il importe de mentionner que certaines zones identifiées comme non visibles peuvent être visibles. Ces zones litigieuses se situent entre deux lignes de vol. Celles-ci apparaissent lorsque l'avion s'écarte trop des lignes planifiées : le rayon de la radiale utilisé par le logiciel SIG n'est plus suffisamment grand pour couvrir ces écarts. Une zone litigieuse a été identifiée par un cercle dans le haut de l'image à l'endroit où l'écart maximum de 375 m a été constaté.

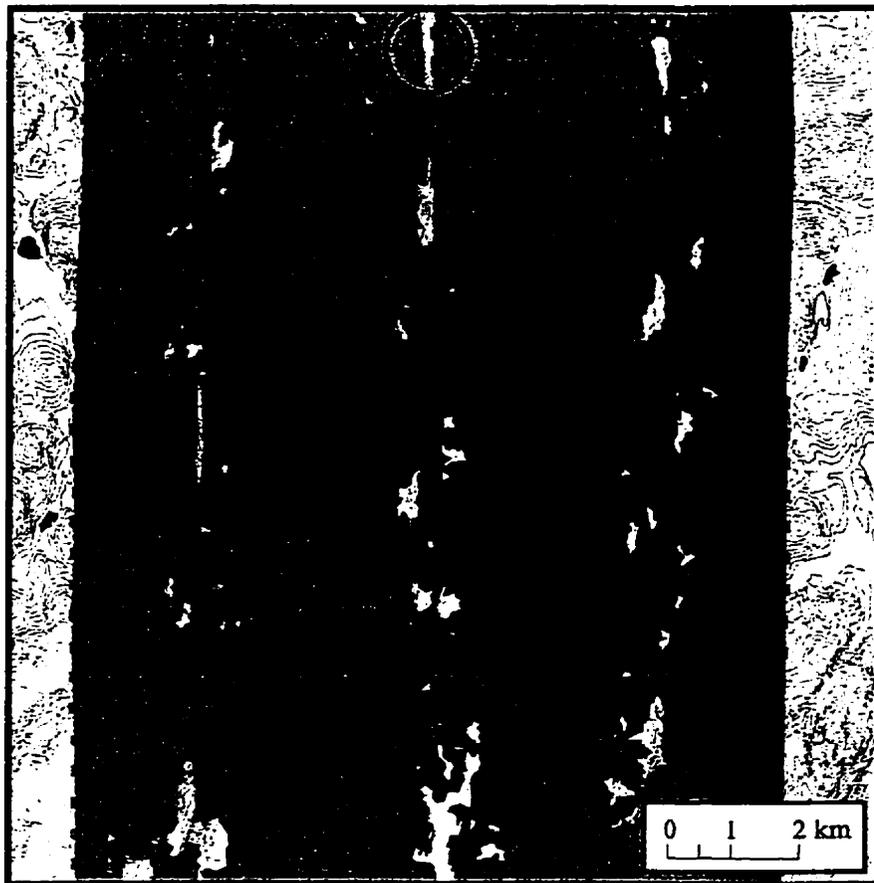


Figure 4.25 : Zones non observables lors de la mission.

4.6.5 Analyse de visibilité avec GRID (secteur rehaussé)

4.6.5.1 Influence des peuplements forestiers

Le secteur sur lequel les tests ont été réalisés n'est pas qu'un sol nu: il est aussi couvert de peuplements forestiers. Ces peuplements forestiers peuvent avoir une influence sur l'observation. La figure 4.26 illustre l'influence des peuplements forestiers sur la détection des zones non visibles. L'analyse effectuée avec le MNT représentant le sol nu permet de détecter des zones non visibles.

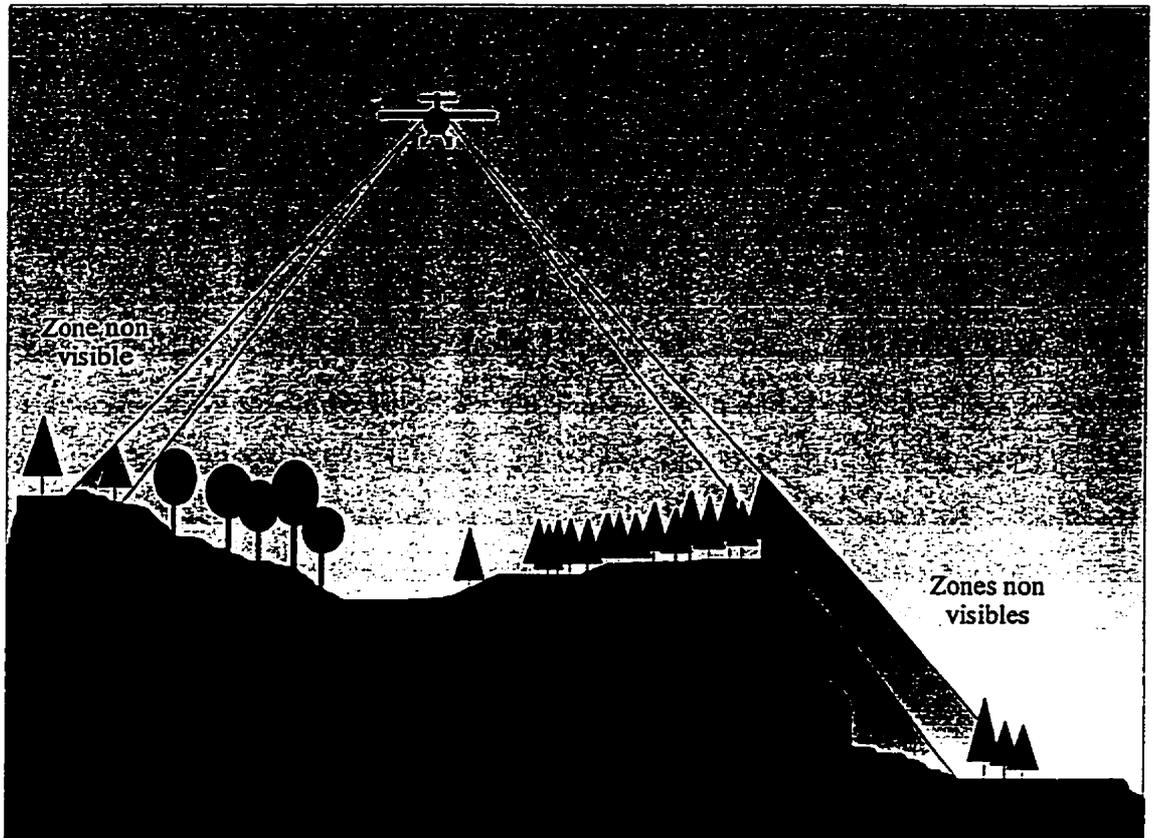


Figure 4.26 : Influence du couvert forestier sur l'identification des zones non visibles.

Lorsque le couvert forestier est ajouté au relief, de nouvelles zones non visibles peuvent être détectées. Ces nouvelles zones proviennent de la variation de la hauteur des peuplements (coupe à blanc, âge, espèces différentes, feu de forêt, etc.), de couloirs traversant les peuplements forestiers (ligne à haute tension, chemin forestier, rivière, etc.) ou des peuplements bordant une variation marquée du relief (falaise, ravin, etc.).

4.6.5.2 Influence de la résolution du MNT sur le relief

Le choix de la résolution est important, car celle-ci influence directement la représentation du relief. Plus la résolution est fine, plus le modèle numérique sera précis, et mieux il reflétera le relief du secteur modélisé. À l'inverse, plus la résolution d'un MNT est grande, plus le modèle sera grossier et plus le relief sera atténué. La figure 4.27 présente les conséquences de la résolution d'un MNT sur le relief. Le premier profil reflète un secteur dont la pente du terrain (13°) est calculée dans un modèle numérique avec une résolution de 20 m x 20 m. Ce secteur est donc susceptible de ne pas être observé lors d'une mission, puisque la pente du terrain est supérieure à la pente d'observation (figure 3.4). Le deuxième profil du même secteur a été calculé dans un modèle numérique de terrain avec une résolution de 400 m x 400 m.

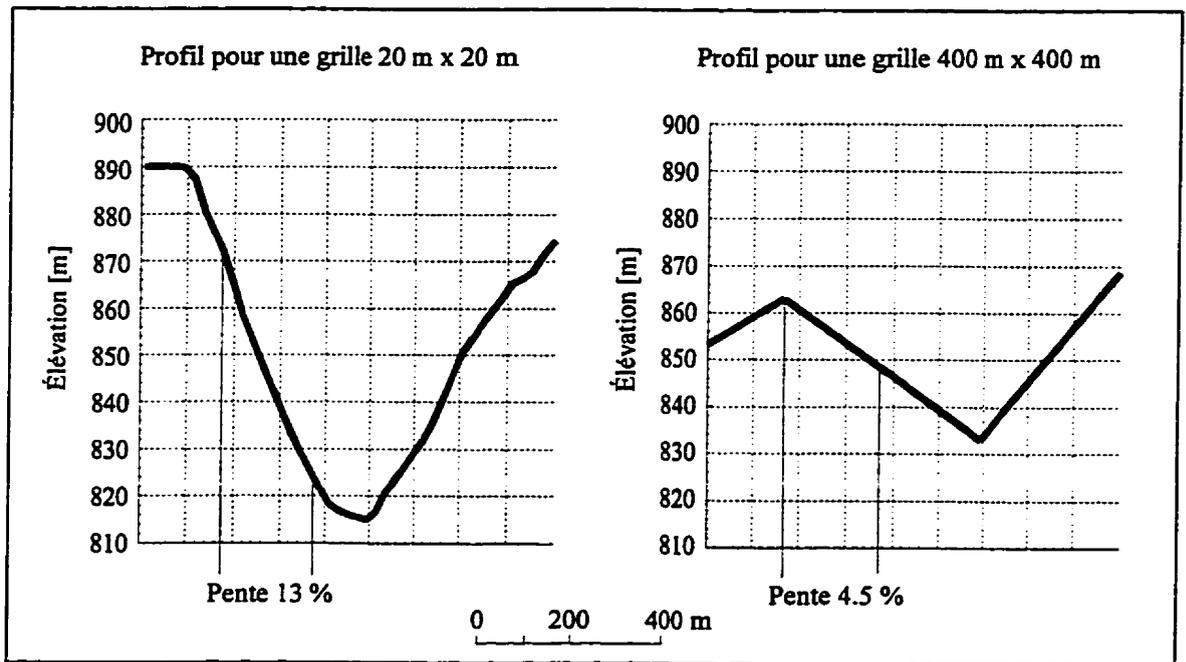


Figure 4.27 : Influence de la résolution d'un MNT GRID sur le relief.

Le calcul avec une grille de 20 m x 20 m indique une pente du terrain de 13°, alors que le calcul avec une résolution de 400 m x 400 m donne un résultat de 4.5°. Cette zone, qui serait en réalité non observable, ne sera pas détectée dans ce dernier modèle, puisque la pente calculée est inférieure à la pente d'observation.

Ces deux profils illustrent bien les conséquences négatives de l'augmentation de la résolution d'un MNT sur le relief : l'augmentation de la résolution aplanit le relief, par conséquent les pentes calculées à l'aide du modèle diminuent. Un tel modèle numérique de terrain ne permet pas la détection fiable des zones non observables. Il est donc important de bien choisir la résolution du modèle utilisé.

4.6.5.3 *Choix de la résolution du MNT GRID*

Pour bien comprendre la sélection de la résolution d'un MNT, il est nécessaire d'aborder le concept de *zone critique*. Toutes les zones dont la pente minimum est supérieure à 9° sont susceptibles de ne pas être observées, et seront donc considérées comme critiques.

Le processus de calcul des zones critiques consiste principalement à effectuer des calculs de pente sur les MNT de résolutions différentes. Pour ce faire, il est nécessaire de générer un modèle numérique de terrain de type TIN, de le convertir en modèle GRID avec la résolution désirée et de le reconverter en modèle TIN. Ces multiples conversions permettent principalement d'obtenir le modèle numérique de terrain avec la résolution souhaitée. Le logiciel utilisé oblige la conversion du GRID au TIN pour calculer et stocker les résultats obtenus dans une base de données. Le stockage des calculs de pente se fait par la création d'une base de données, de tables et d'entités. Pour détecter et identifier les zones critiques du secteur test, des requêtes ont été faites sur la base de données. Ces requêtes consistent à demander au système de gestion de la base de données d'effectuer la sommation des polygones dont la pente de terrain est supérieure à 9°. En effectuant ces requêtes sur les différents modèles numériques, il est donc possible d'obtenir la variation de la superficie totale des zones critiques.

À l'aide de cette méthode, il est possible de choisir adéquatement la résolution du MNT qui représentera le mieux le territoire sur lequel les tests sont effectués. La figure 4.28 présente le pourcentage des zones critiques sur la superficie totale du secteur test en fonction de la variation de la résolution des différents modèles numériques de terrain.

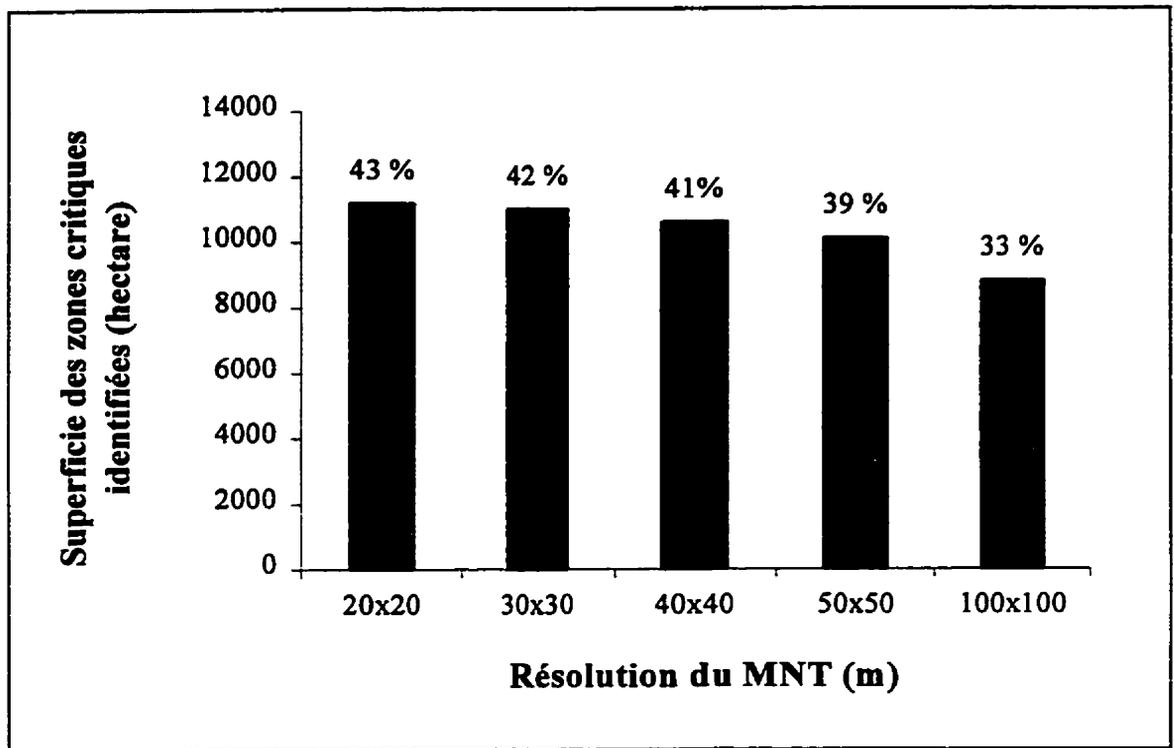


Figure 4.28 : Superficies des zones critiques en fonction de la résolution du MNT.

Suite à l'analyse de l'histogramme, on constate que le pourcentage des zones critiques diminue en fonction de l'augmentation de la résolution du modèle numérique de terrain utilisé. La figure 4.28 montre qu'il faut choisir la résolution la plus fine afin de perdre le moins de zones critiques. Il est donc important de bien choisir la résolution du modèle numérique de terrain si l'on veut s'assurer que toutes les zones non visibles soient bien détectées. Sur la base de cette analyse, nous avons choisi une résolution de 20 m x 20 m.

4.6.5.4 Rehaussement

Afin de vérifier l'impact d'un couvert forestier, lors des calculs de visibilité, un modèle numérique a été rehaussé. La figure 4.29 présente le secteur servant à vérifier l'incidence d'une ligne à haute tension lors de l'identification des zones non visibles. La trajectoire de l'avion se trouve à gauche de la figure et le couloir à droite.

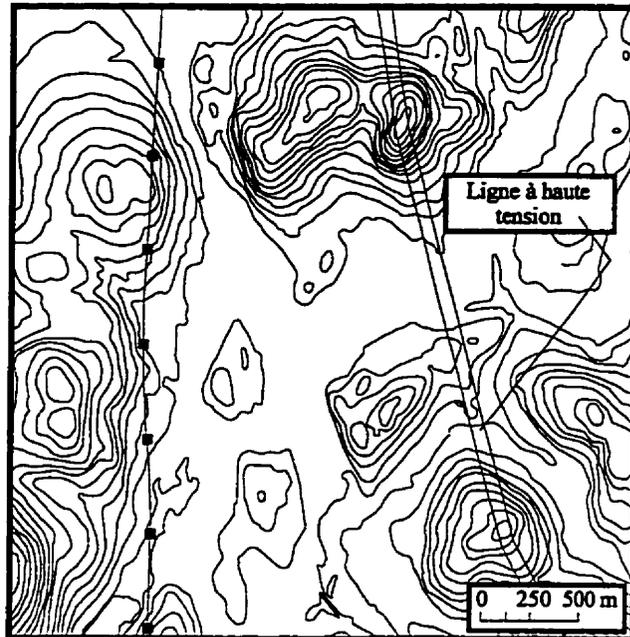


Figure 4.29 : Rehaussement du modèle avec une ligne à haute tension.

La figure 4.30 illustre le couloir qui a été ajouté au modèle. La tranchée apparaissant au milieu du modèle correspond au couloir de la ligne à haute tension. Elle mesure 60 m de largeur et 20 m de hauteur.

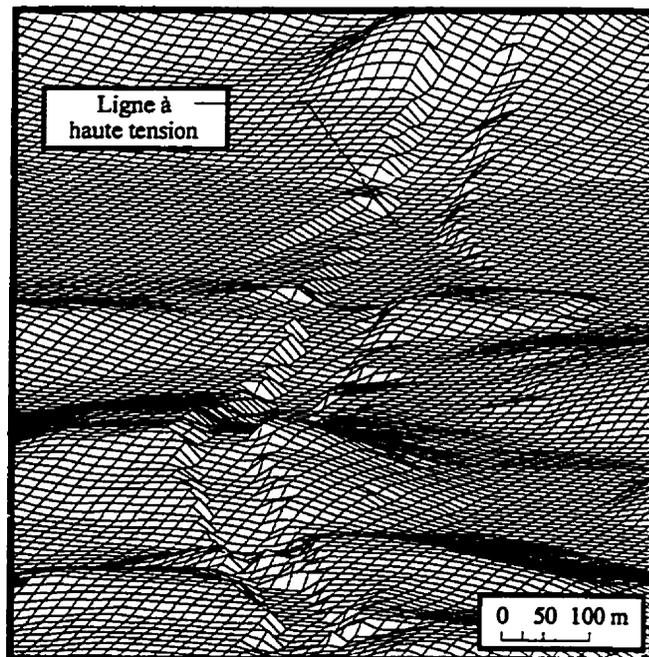


Figure 4.30 : Territoire avec ligne à haute tension.

La figure 4.31 présente les résultats issus de l'identification des zones non visibles. La surface sombre correspond à ce qui est observable. L'essentiel du couloir de la ligne à haute tension est donc non observable depuis la ligne de vol.

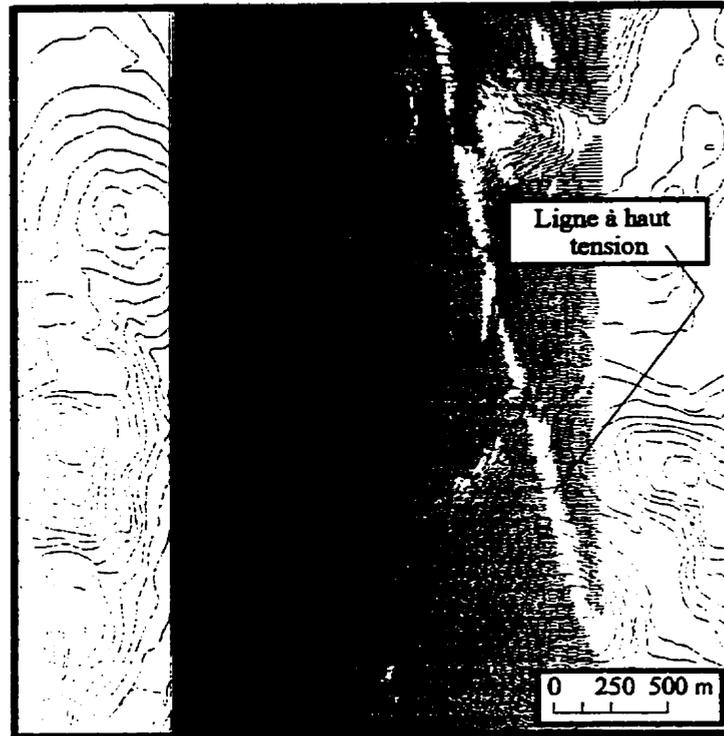


Figure 4.31 : Zones non visibles sur le modèle rehaussé.

Suite à l'analyse de la figure 4.31, un couloir défini par une ligne haute tension peut donc avoir des répercussions importantes sur la détection des zones non visibles. Le couloir est presque entièrement non visible. Si un avion s'était écrasé à cet endroit, il ne pourrait être vu par l'équipe de recherche.

4.7 Solution préconisée pour un outil opérationnel

L'hypothèse de solution est validée. Les paramètres choisis permettent d'identifier les zones qui ne peuvent être observées lors d'une mission. La solution préconisée est l'utilisation d'un modèle numérique de terrain de type TIN, lorsque les données initiales proviennent de cartes numériques. La structure du réseau de triangles irréguliers est la plus apte à mieux représenter tous les types de relief, en particulier les plus accidentés. Par

ailleurs, le logiciel SIG doit générer un modèle triangulé pour obtenir un modèle sous forme de grille lorsque les données de base sont des courbes de niveau. La conversion d'une structure irrégulière en structure régulière peut dégrader la représentation du relief ou la finesse du modèle (figure 3.5).

L'utilisation du modèle numérique de terrain rehaussé donne des résultats intéressants quant à l'ajout du couvert forestier. Par contre, pour arriver à des résultats crédibles, il faut s'assurer que l'information forestière est à jour. Dans le contexte économique actuel, il est donc difficile de croire que toute l'information concernant la couverture forestière soit mise à jour de façon continue. Le rehaussement rapproche le modèle numérique de la réalité du terrain. Par contre, rehausser un MNT avec un couvert forestier est une étape fastidieuse et laborieuse, qui devrait absolument être effectuée à l'avance, et tenue à jour en fonction de l'évolution du couvert forestier.

4.8 Limites de l'outil (SORSA)

L'objectif de ce projet de recherche était de développer un prototype d'outil pour le suivi des opérations de recherche et de sauvetage aériens. Le succès de la combinaison des technologies SIG et GPS pour l'identification des zones non visibles permet de démontrer la faisabilité de l'outil SORSA. Une des principales limites de l'outil découle du fait qu'on a utilisé un ensemble de logiciels, de fonctionnalités de SIG etc. disparates et non intégrées dans une application personnalisée, avec un interface convivial et adapté aux conditions des opérations SAR. Un volontaire de l'ACRSA ne peut donc pas l'utiliser. Actuellement, seule une personne ayant de bonnes connaissances des logiciels utilisés de positionnement par satellites, des outils SIG et de la programmation peut utiliser l'outil. À titre d'exemple, pour identifier les zones non visibles, il faut traiter les observations GPS recueillies, extraire l'ondulation du géoïde d'une table et l'appliquer pour chacune des positions calculées afin de transformer toutes les altitudes géodésiques obtenues en altitudes orthométriques; de même, la série des opérations nécessaires pour identifier les zones non visibles peut être compliquée pour une personne inexpérimentée. Il est donc nécessaire de

développer des interfaces à l'utilisateur, afin de guider et d'assister une personne non expérimentée dans le processus de détection des zones non visibles.

Certaines procédures d'automatisation des traitements ne font pas partie de l'outil SIG utilisé. Il est donc impossible de réduire les procédures d'analyse de visibilité à partir d'un fichier. Pour identifier les zones non visibles le long de la trajectoire de l'avion, il faut calculer manuellement la hauteur de chacun des points d'analyse. Le logiciel ne considère que les points sur le MNT pour effectuer ses calculs. Cette étape augmente les temps de traitement et peut introduire des fautes : une mauvaise interprétation de la hauteur du relief, une mauvaise soustraction lors du calcul de la hauteur de l'avion par rapport au MNT, etc.

Ces considérations ne diminuent en rien le potentiel de l'utilisation conjointe des technologies géomatiques dans les opérations SAR. Par contre, force est de constater que l'on ne dispose pas de solutions toutes faites, et que même les logiciels les plus courants (comme le SIG utilisé) n'offrent pas toutes les fonctionnalités nécessaires à de telles applications, que l'on pourrait qualifier de "non traditionnelles".

CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet était de proposer des améliorations aux méthodes et techniques de suivi des opérations de recherche et de sauvetage aériens effectués par des organismes civils. Ces propositions se sont traduites par la conception d'un outil géomatique qui utilise les technologies du système d'information géographique et du positionnement par satellites GPS. L'hypothèse de solution préconisée comportait deux aspects : le positionnement et l'analyse de visibilité. L'hypothèse est la suivante :

- Positionnement de l'avion en mode relatif avec des mesures de pseudodistance ;
- MNT TIN, pour le relief de base ;
- MNT GRID, pour le relief avec un couvert forestier ;
- Position du point d'analyse obtenue avec l'altitude GPS, rayon de la radiale de 1 900 m, un pas de la radiale de 0.5° et espacement des points d'analyse à tous les 500 m.

Pour valider l'hypothèse de solution, plusieurs tests ont été réalisés sur le secteur du lac des Neiges (Réserve faunique de Laurentides). Les tests consistaient à utiliser une technique de positionnement très précise (OTF) et à comparer celle-ci avec les différentes techniques utilisées. Le positionnement absolu a été rejeté, en raison de sa grande imprécision en altimétrie (± 150 m). Les résultats obtenus lors de la comparaison du positionnement de l'avion en mode relatif à partir des deux stations de référence et lors de la comparaison du positionnement de l'avion en mode relatif avec la technique de l'OTF permettent de justifier notre choix : les positions obtenues rencontrent les précisions théoriques et sont beaucoup plus précises que le positionnement absolu. Le choix du modèle numérique de terrain de type TIN est le plus approprié pour un relief de base lorsque les données

proviennent de cartes topographiques. Il est généré directement à partir des données initiales et représente mieux un relief irrégulier. Par contre, le rehaussement d'un modèle GRID avec un couvert forestier, permet de mieux tenir compte des différences de hauteur entre les peuplements. Ce modèle est plus fidèle à la réalité. Les zones telles que les coupes à blanc, les lignes à haute tension et les lisières d'arbres ressortiront. Toutefois, il est à noter que la conversion du TIN en GRID et l'ajout des peuplements forestier atténue le relief. De plus, ce type de MNT doit être préparé à l'avance car sa préparation est longue et compliquée. L'ajout de nouveaux éléments sur le modèle, comme un ligne à haute tension, nécessite la régénération du modèle numérique et son contrôle afin qu'il représente fidèlement le secteur.

L'hypothèse de solution choisie a été validée sur un secteur test. Les paramètres choisis peuvent être appliqués à tous les reliefs accidentés. Le processus d'identification des zones non visibles lors de notre mission prend approximativement une vingtaine de minutes. Pour un vrai secteur de recherche (10 milles nautiques par 20 milles nautiques), le temps de calcul nécessaire serait de 1h 15 min avec les équipements utilisés. Pour d'autres types de reliefs, certains de ces paramètres pourraient être différents. La faisabilité et l'intérêt de la solution ont été clairement démontrés. Un intervenant de l'ACRSA ne pourrait utiliser l'outil SORSA sous sa forme actuelle, car il reste encore plusieurs étapes à franchir pour le rendre opérationnel :

- Développer des interfaces à l'utilisateur qui simplifieront et guideront l'utilisateur lors du processus d'identification des zones non visibles ;
- Développer des algorithmes qui génèrent des cartes de visibilité par traitements en lots (contrairement à la situation actuelle). Ceci permettrait d'augmenter la rapidité des traitements et de réduire les erreurs de manipulation ;
- Donner une formation aux intervenants de l'ACRSA ;
- Doter l'ACRSA des équipements et logiciels nécessaires ;
- Vérifier l'incidence sur les méthodes de travail.

La trajectoire de l'avion peut s'obtenir aussi, en mode absolu, en utilisant des éphémérides précises fournies par le Système canadien de contrôle actif (SCCA). Le SCCA a été mis en

place, par Géomatique Canada, afin d'améliorer la précision et l'efficacité du positionnement GPS. Depuis 1992, il fournit des éphémérides et des corrections d'horloges précises pour les satellites GPS. Il est donc possible grâce à cette information d'obtenir une précision en mode absolu du même ordre de grandeur que le positionnement relatif avec des mesures de pseudodistance. Une précision, en mode absolu, de 1 à 2 m peut s'obtenir avec un récepteur bifréquence lorsque les erreurs dues à l'ionosphère sont éliminées. L'utilisation de récepteurs mono-fréquence donne des précisions moindres, si aucune correction n'est appliquée pour corriger les erreurs dues à l'ionosphère. L'avantage principal de cette nouvelle technique de positionnement est qu'elle ne nécessite pas de station de référence.

Un outil comme SORSA pourrait aussi servir à la planification d'une mission. Les analyses de visibilité pour obtenir une cartographie des zones non visibles pourraient être réalisées à partir des trajectoires planifiées et de l'altitude de vol préconisée lors de la mission, et chaque équipe de recherche pourrait alors planifier de nouvelles lignes de vol optimales qui tiendront compte des zones non observables. Cette méthode assurera que le territoire couvert sera bien observé dès la première fois et évite de retourner ultérieurement les équipes de recherche.

Les avions utilisés par les militaires (figure 1.2 à 1.6) pourraient être munis des équipements nécessaires à l'analyse de visibilité. Grâce à leur tonnage, ces avions spécialisés peuvent transporter le matériel qui permet d'identifier en temps réel les zones non observables. Les équipes de recherche peuvent dès lors s'ajuster en fonction des résultats obtenus en temps réel durant la mission. Le positionnement de l'avion en temps réel peut être obtenu à l'aide d'une des deux approches suivantes : les corrections sur les observations de pseudodistance (DGPS) en mode relatif ou l'utilisation, en temps réel, d'éphémérides et de corrections d'horloge précises en mode absolu.

En effet, depuis 1996, le SCCA travaille à la mise en place d'une infrastructure qui permettra la diffusion en temps réel des éphémérides et des corrections d'horloges précises. Ce service, appelé GPS•C, devrait être opérationnel dans les prochains mois.

77

Ce projet contribue à fournir une solution concrète à des problèmes pratiques, en utilisant une combinaison de technologies disponibles. Il sera plus facile d'intéresser un organisme impliqué dans la recherche et le sauvetage à prendre la relève et à poursuivre l'objectif visé par cette recherche. Ce projet est d'actualité, c'est le premier de la sorte dans le domaine des opérations de recherche et de sauvetage. Certaines démarches ont été effectuées dans ce sens auprès du Centre de Recherche pour la Défense de Valcartier (CRDV). Le CRDV a déjà contribué aux opérations de recherche et de sauvetage avec son projet PASSPORT pour supporter la planification d'une mission. Il serait donc possible de combiner ces deux projets car ceux-ci sont complémentaires. Des contacts ont également eu lieu avec des officiers responsables de ce domaine à la base des forces armées canadiennes de Trenton. L'intérêt de ces organisations a été stimulant et laisse espérer une suite à ce projet de recherche.

RÉFÉRENCES

- Abidin, H.Z. (1993). "Computational and geometrical aspects of On-The-Fly ambiguity resolution". Department of Surveying Engineering Technical Report (164), University of New Brunswick, Fredericton, 290 p.
- Arbour, B. (1994). "Étude des effets des multitrajets sur le positionnement GPS avec les mesures de phase des ondes porteuses." Mémoire de maîtrise, Département des sciences géomatiques, Université Laval, Québec 108 p.
- Ashtech (1991). "Ashtech Z-12 Field Surveyor GPS Receiver : The Z-Tracking™ Advantage at an Affordable Price". Technical specifications, Sunnyvale, U.S.A., 2 pp.
- Bélanger, P., R. Santerre, et D. Parrot (1991). "Étude de faisabilité sur l'utilisation du système de positionnement GPS pour les travaux d'auscultation topographique des ouvrages hydroélectriques." Rapport de recherche pour Hydro-Québec, Division des Ouvrages de génie civil, Service appareillage, Région La Grande Rivière, 84 p.
- Bilodeau, J.-M. et R. Santerre (1996). "Utilisation du système de positionnement GPS en foresterie." Manuel de foresterie, chap. 12., Presses de l'Université Laval, Québec pp. 589-603.
- Bourassa, M. (1994). "Étude des effets de la variation des centres de phase des antennes GPS." Mémoire de maîtrise, Département des sciences géomatiques, Université Laval, Québec, 109 p.
- Collet, C. (1992). "Système d'information géographique en mode image." Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 186 p.

- Dendron Ressource Surveys (1994). "Visibility analysis : A decision support technique for forest resource management planning." Northern Ontario Development Agreement (NODA), Ottawa, 8 p.
- Division des Levés Géodésiques (1995). Logiciel Quad 2.0 pour le calcul de l'ondulation du géoïde et les composantes de la déviation de la verticale.
- Duval, R. et F. Lahaye (1997). "GPS•C : Le service de corrections GPS en temps réel du système canadien de contrôle actif." Actes de colloque, Géomatique VI – Un monde accessible, ACSG (section de Montréal), pp. 87-95.
- Fels, J.E. (1992). "Viewshed Simulation and Analysis : An Interactive Approach." URISA Annual Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 264-276.
- Forgues, I. (1996). "Étude des fonctions de projection troposphérique et de leurs impacts dans le positionnement GPS." Mémoire de maîtrise, Département des sciences géomatiques, Université Laval, Québec, 141 p.
- Gagnon P. and D.J. Coleman (1990). "La géomatique : une approche systémique intégrée pour répondre aux besoins d'information sur le territoire". CISM JOURNAL ACSGC, Vol. 44 (4), Winter 1990, pp 383-389
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins (1994). "Global Positioning System - Theory and Practice." Third edition, Springer-Verlag Wien, New York, 326 p.
- Klobuchar, J.A. (1975). "A first order, worldwide, ionospheric, time-delay algorithm". Air Force Cambridge Research Laboratories AFCRL-TR-75-0502, Air Force Surveys in Geophysics, No. 324, Hanscom AFB, U.S.A.
- Laurini R. and F. Milleret-Raffort (1993). "Les bases de données en géomatique". Hermès, Paris, 340 p.
- Lee, J. (1995). "Analyses of visibility sites on topographic surfaces." International Journal of Geographical Information Systems (IJGIS), Vol. 5 (4), pp. 424- 429.

- Maguire, D.J., M.F. Goodchild and D.W. Rhind (1991). "Geographical Information Systems : Principles and Applications." New York, Longman Scientific & Technical, Vol. 1, 649 p.
- Miller, C.L. and R.A. Laflamme (1958). "The digital terrain model – theory and application." Photogrammetric Engineering, Nb. 24 (3), p. 433-442.
- Morissette, D. (1997). Entretien personnel. Directeur régional de l'ACRSA, Québec.
- National Defence, (1997). "Civilian Searchers Critical to SAR." (Url : <http://www.dnd.ca/eng/index.html>).
- Parkinson, B.W. and P.K. Enge (1995). "Differential GPS", Global Positioning System : Theory and Applications Volume II." Parkinson, B.W., Spilker J.J., chap. 1, pp. 3-50.
- Parkinson, B.W., T. Stansell, R. Beard and K. Gromov (1995). "A History of Satellite Navigation." Navigation : Journal of The Institute of Navigation, Vol. 42 (1), Special Issue, pp. 109-164.
- Pornon, H. (1992). "Les SIG : Mise en œuvre et applications." Paris, Hermes, 158 p.
- Raper, J. (1989). "Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems." Taylor and Francis, London, 189 p.
- Santerre, R. (1995). "Positionnement par satellites GPS : Partie II." Notes de cours, Techniques géodésiques modernes, Département des sciences géomatiques, Université Laval, Québec, 264 p.
- Santerre, R., É. Roy and D. Parrot (1994). "Positionnement cinématique GPS à l'aide de mesures de pseudodistance lissées." Rapport scientifique du Module Télédétection - GPS, Projet PREDIR, Centre de Recherche en Géomatique, Université Laval, Québec, 109 p.

- Santerre, R., É. Roy and D. Parrot (1995). "Positionnement GPS avec des mesures de pseudodistance filtrées et lissées." Lighthouse, Edition 52, pp. 21-29.
- Santerre, R., I. Forgues, V.B. Mendes and R.B Langley (1995). "Comparison of Tropospheric Mapping Functions : Their effects on station coordinates." International Union of Geodesy and Geophysics XXI General Assembly, Boulder, Colorado, July, 20 p.
- Search and Rescue Society of British Columbia, (1995). "National Search and Rescue Manual." (URL : <http://www.sarbc.org/sarbc/nat.html>).
- Secrétariat National, Recherche et Sauvetage, (1997). "Activités de recherche et de sauvetage des Forces canadiennes, 1947-1997." (Url : <http://www.nss.gc.ca/>).
- Wells, D., N. Beck, D. Delikaraoglou, A. Kleusberg, E.J. Krakiwsky, G. Lachapelle, R.B. Langley, M. Nakiboglu, K.-P. Schwarz, J.M. Tranquilla and P. Vanicek (1986). "Guide to GPS Positioning." Canadian GPS Associates, Fredericton, Canada, 600 p.

ANNEXE

TRANSFORMATIONS DE COORDONNÉES

Cette annexe présente les différentes transformations de coordonnées utiles pour l'interprétation des résultats obtenus à l'aide du positionnement par satellites : la transformation des coordonnées du système terrestre moyen au système géodésique et la transformation inverse, la transformation du système terrestre moyen en système géodésique local et la conversion de l'altitude géodésique en altitude orthométrique.

Le système de coordonnées utilisé pour le positionnement par satellites GPS est le World Geodetic System de 1984 (WGS-84). Les résultats obtenus avec le système GPS sont à toutes fins pratiques compatibles avec le North American Datum de 1983 (NAD-83).

A.1 Transformation des coordonnées géodésiques en coordonnées terrestre moyen

L'origine du système de coordonnées TM coïncide avec celui de l'ellipsoïde de révolution (NAD-83) qui est géocentrique. La transformation des coordonnées géodésiques en coordonnées TM s'effectuent directement, aucune itération n'est requise. Le système terrestre moyen est un système cartésien ayant son origine au centre de la Terre. Ses trois axes sont définis comme suit :

- L'axe Z_m coïncide avec l'axe moyen de rotation de la Terre ;
- L'axe X_m est défini par l'intersection du plan de l'équateur terrestre moyen avec le plan méridien moyen de Greenwich ;

- L'axe Y_m est défini à partir de l'origine par une direction $X_m O_m Z_m$ et définit un système « de la main droite ».

Les équations de transformation sont les suivantes [Hofmann-Wellenhof et al, 1994] :

$$X = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \quad (\text{A.1})$$

$$Y = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \quad (\text{A.2})$$

$$Z = \left(\frac{b^2}{a^2} N + h \right) \sin \varphi \quad (\text{A.3})$$

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \quad (\text{A.4})$$

- où
- a : demi grand axe de l'ellipsoïde de révolution (m)
 - b : demi petit axe de l'ellipsoïde de révolution (m)
 - N : rayon de courbure de l'ellipsoïde du premier vertical (m)
 - φ, λ, h : coordonnées géodésiques d'un point (radians, radians, m)
 - X, Y, Z : coordonnées terrestre moyen d'un point (m)

A.2 Transformation des coordonnées terrestre moyen en coordonnées géodésiques

Il faut franchir plusieurs étapes pour calculer des coordonnées géodésiques (latitude, longitude et altitude) à partir des coordonnées TM [Hofmann-Wellenhof et al, 1994]. Ces étapes sont les suivantes :

- 1) Calcul de l'excentricité au carré :

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (\text{A.5})$$

- 2) Calcul du terme ρ :

$$\rho = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (\text{A.6})$$

- 3) Calcul d'une valeur approchée de la latitude :

$$\varphi_{(0)} = \arctan\left(\frac{Z}{\rho}(1 - e^2)^{-1}\right) \quad (\text{A.7})$$

4) Calcul d'une valeur approchée du rayon de courbure de l'ellipsoïde:

$$N_{(0)} = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi_{(0)} + b^2 \sin^2 \varphi_{(0)}}} \quad (\text{A.8})$$

5) Calcul d'une valeur de la latitude :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Z}{\rho}\left(1 - e^2 \frac{N_{(0)}}{N_{(0)} + h}\right)^{-1}\right) \quad (\text{A.9})$$

6) Calcul de l'altitude géodésique :

$$h = \frac{P}{\cos \varphi_{(0)}} - N_{(0)} \quad (\text{A.10})$$

7) Calcul de la longitude géodésique :

$$\tan \lambda = \frac{Y}{X} \quad (\text{A.11})$$

- où
- e : excentricité de l'ellipsoïde de révolution
 - a : demi grand axe de l'ellipsoïde de révolution (m)
 - b : demi petit axe de l'ellipsoïde de révolution (m)
 - $N_{(0)}$: rayon de courbure approché de l'ellipsoïde du premier vertical (m)
 - $\varphi_{(0)}$: latitude approchée d'un point (radians)
 - φ, λ, h : coordonnées géodésiques d'un point (radians, radians, m)
 - X, Y, Z : coordonnées terrestre moyen d'un point (m)

Le calcul de la latitude doit s'effectuer par itérations, il faut estimer une valeur approchée de la latitude tant que $\varphi \neq \varphi_{(0)}$.

A.3 Transformation du système terrestre moyen au système géodésique local

Le système géodésique local est un système cartésien qui à son origine en un point (φ, λ, h) de la surface terrestre. Les trois axes se définissent ainsi :

- L'axe Z_1 coïncide avec la normale à l'ellipsoïde passant par l'origine et est positif vers le haut;
- L'axe X_1 est défini par l'intersection du plan horizontal avec le plan du méridien géodésique du lieu et est dirigé vers le nord géodésique;
- L'axe Y_1 est défini à partir de l'origine par une perpendiculaire au plan $X_1O_1Z_1$ et définit un système « de la main gauche ».

La relation qui permet de transformer des coordonnées définies dans le système terrestre moyen dans le système géodésique local est la suivante :

$$\bar{X}_{GL} = T_2 R_2(\varphi - 90^\circ) R_3(\lambda - 180^\circ) \bar{X}_{TM} \quad (A.12)$$

où \bar{X}_{GL} : vecteur dans le système géodésique local

\bar{X}_{TM} : vecteur dans le système terrestre moyen

φ : latitude géodésique

λ : longitude géodésique

R_2 : matrice de rotation autour de l'axe des Y

R_3 : matrice de rotation autour de l'axe des Z

T_2 : matrice de réflexion le long de l'axe des Y

Les matrices sont définies de la façon suivante :

$$R_2(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (A.13)$$

$$R_3(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (A.14)$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (A.15)$$

A.4 Altitude géodésique et altitude orthométrique

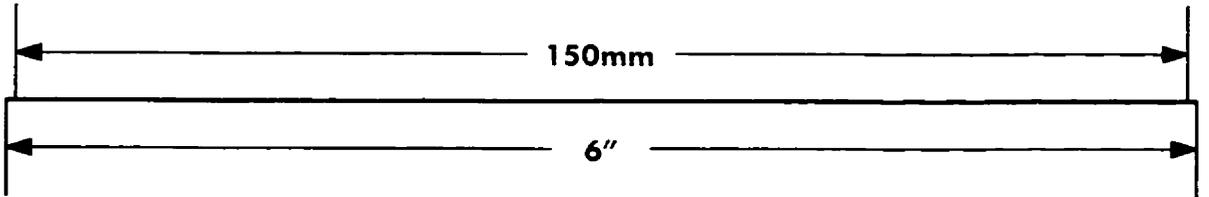
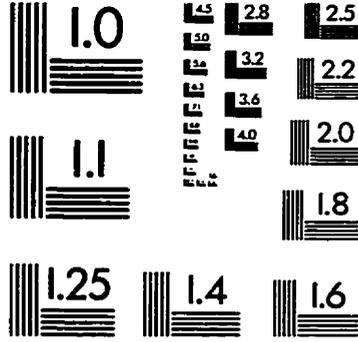
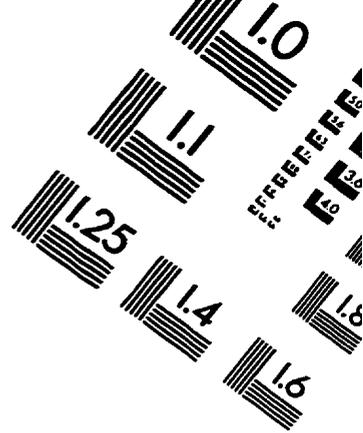
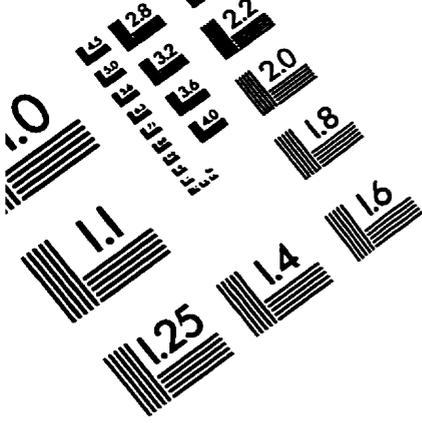
L'altitude géodésique est mesurée au-dessus de l'ellipsoïde de référence. L'ellipsoïde de révolution est une approximation mathématique de la forme de la Terre. Le géoïde est une surface de référence utilisée pour représenter la forme actuelle de la Terre. Celui-ci a été choisi pour définir l'origine des datums verticaux : le géoïde correspond approximativement au niveau moyen des mers. La surface du géoïde est très irrégulière, il est donc impossible de déterminer un modèle mathématique qui permettent de le représenter comme c'est le cas de l'ellipsoïde. L'ondulation du géoïde, la différence de hauteur entre l'ellipsoïde et le géoïde, varie d'un endroit à un autre. Elle peut atteindre 100 m à certains endroits du globe. Il est donc important, lorsqu'on utilise le système GPS pour se positionner en altitude orthométrique, de connaître l'ondulation du géoïde. La relation qui permet de transformer l'altitude géodésique obtenue par GPS en altitude orthométrique est définie de la façon suivante :

$$h = H + N \quad (\text{A.16})$$

où

h :	altitude géodésique (m)
H :	altitude orthométrique (m)
N :	ondulation du géoïde (m)

N.B. : L'ondulation du géoïde (N) ne doit pas être confondue avec le terme du rayon de courbure de l'équation (A.8) : il s'agit de deux termes différents.



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

