

Effet du couvert forestier sur la précision d'un système de positionnement global différentiel (dGPS)

Philippe Lejeune ⁽¹⁾, Philippe Hellemans ⁽²⁾

⁽¹⁾ Unité de Gestion et Économie forestières. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Passage des Déportés, 2. B–5030 Gembloux. Belgique. E-mail : lejeune.p@fsagx.ac.be

⁽²⁾ Geo-6 SA. Rue Metsys, 91. B–1030 Bruxelles. Belgique. E-mail : phe.geo6@skynet.be

Reçu le 18 août 1999, accepté le 27 septembre 1999.

Les possibilités d'utilisation du GPS différentiel sont étudiées dans le contexte de la délimitation de parcelles forestières. Les difficultés liées à l'utilisation du GPS en milieu forestier découlent de l'effet du couvert forestier sur les signaux émis par les satellites. Cet effet se traduit d'une part par l'interception complète de certains signaux ou par la réflexion sur des obstacles (phénomène de multi-trajet). Deux types de récepteurs GPS différentiels ont été testés : un Trimble™ Svec Six combiné à un récepteur différentiel RDS et un Trimble™ SK8 combiné à un récepteur différentiel OMNISTAR™. Les relevés ont été réalisés selon deux modes d'acquisition : statique (temps de stationnement : une minute) et cinématique (déplacement en continu le long des limites de parcelles). Deux types de conditions forestières ont été considérées : couvert léger avec peu d'obstacles (jeune peupleraie dans un environnement dégagé) et couvert dense (pessière adulte). Les performances enregistrées en mode cinématique sont supérieures à celles obtenues en mode statique (erreurs moyennes respectives de 3,1 m et de 9,1 m). De même la localisation est plus précise pour la parcelle à couvert léger que pour la parcelle à couvert dense (erreurs moyennes respectives de 2,9 m et 9,4 m). Les différences entre modes d'acquisition semblent devoir être attribuées au phénomène de multi-trajet (multipathing) que les algorithmes de filtrage intégrés aux GPS parviennent difficilement à éliminer en mode statique. Les conditions de réception du signal différentiel ont également varié en fonction des conditions de couvert : 1,3 % et 20,5 % des observations en sont dépourvues pour les parcelles à couvert respectivement léger et dense.

Mots-clés. Système de positionnement global, cartographie forestière, arpentage.

Effect of forest canopy on the accuracy of a differential global positioning system (dGPS). The possibilities to use dGPS for forest mapping are analysed. The efficiency of dGPS in forest condition is linked to canopy interference, which intercepts signals sent by some of the satellites or reflect them (multipathing). Two types of equipment have been tested: a Trimble™ Svec Six coupled with a RDS differential receiver and a Trimble SK8 coupled with an OMNISTAR differential receiver. Recordings have been achieved according to two modes: static (recording on one spot during one minute) and cinematic (moving continuously along the stand limits). Two types of forest canopy were compared: light canopy made of young poplar plantation with few obstacles in the vicinity, and closed canopy of mature spruce stand edged with other mature stand. Cinematic mode efficiency is higher than static one (mean errors are respectively 3.1 m and 9.1 m). In the same way positioning is more accurate for the stand with light canopy than for the other one (mean errors are respectively 2.9 m and 9.4 m). Difference between recording modes are probably due to multipathing effect that filtering algorithm integrated in the GPS receivers are not able to remove in static mode. The efficiency of differential signal reception is also different for the two stands: 1.3% and 20.5% of missing differential signal respectively in the light and dense canopy conditions.

Keywords. Global positioning system, forest mapping, land survey.

1. INTRODUCTION

La gestion des ressources forestières s'appuie sur un grand nombre d'informations où la composante spatiale est omniprésente. La cartographie forestière joue ainsi un rôle central tant dans les démarches d'analyse liées aux aménagements forestiers que dans le cadre de la gestion courante des opérations sylvicoles. La réalisation et la mise à jour des cartes de peuplements par des

moyens classiques (arpentage) sont particulièrement lourdes et coûteuses à mettre en œuvre et ce d'autant plus que le parcellaire présente un morcellement important.

Les systèmes de positionnement global (GPS) et leur utilisation en combinaison avec un système d'informations géographiques (SIG) sont présentés par de nombreux auteurs comme une solution pouvant remplacer avantageusement les techniques classiques

d'arpentage et de cartographie forestière (Liu, Brantigan, 1995).

Le développement d'applications GPS en milieu forestier reste cependant limité par les problèmes d'interférence entre le couvert forestier et les signaux envoyés par les satellites vers les récepteurs GPS, ces interférences pouvant altérer la précision du positionnement de façon inacceptable (D'Eon, 1995).

L'objectif du présent article est d'analyser le comportement de deux systèmes GPS utilisés en mode différentiel (dGPS) pour la délimitation de parcelles forestières. Les résultats fournis par cette technique sont comparés à ceux obtenus par les méthodes traditionnelles d'arpentage. Le principe de fonctionnement des GPS et le type de matériel mis en œuvre sont présentés dans un premier temps. Les conditions dans lesquelles ont été testés ces équipements ainsi que les mesures qui ont été réalisées sont ensuite décrites. Les résultats de ces essais sont enfin présentés et discutés avant de conclure quant aux possibilités d'utilisation du GPS pour la cartographie forestière en Région wallonne.

2. GPS : PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT ET DE MISE EN ŒUVRE

2.1. Le dispositif GPS

Le GPS est un système de positionnement et de navigation utilisant une constellation d'environ 24 satellites NAVSTAR du Département américain de la défense, mis en orbite à environ 20000 km d'altitude et émettant des signaux radios en continu sur deux fréquences : une fréquence "civile" (L1) et une fréquence à usage militaire (L2) (Botton *et al.*, 1998). Ces satellites constituent le segment spatial du système. Ils sont en contact permanent avec quatre stations de poursuite qui constituent le segment de contrôle. Elles assurent la mise à jour et la surveillance du segment spatial (calcul des éphémérides, corrections d'horloge, etc.). Les récepteurs constituent le segment utilisateur. Ils utilisent les signaux envoyés par le segment spatial pour calculer la position par trilatération spatiale, c'est-à-dire par l'intersection de sphères de rayons connus (correspondant à la distance satellite-récepteur) centrés sur les satellites. La lecture de trois satellites permet un positionnement en deux dimensions (latitude, longitude), la lecture de quatre satellites ou plus offre un positionnement en trois dimensions (latitude, longitude et altitude).

Les récepteurs se différencient entre autres par la manière de recevoir les signaux (nombre de canaux, réception séquentielle ou parallèle) et par la manière d'utiliser ces signaux. On distingue à ce niveau :

– les récepteurs utilisant le code C/A pour mesurer une pseudodistance (satellite-récepteur) en calculant le

temps de transmission du signal et

– les récepteurs observant la phase de l'onde porteuse. Ces derniers permettent d'obtenir une plus grande précision, mais exigent un verrouillage de phase impliquant une réception sans interruption du signal émis par un satellite. Une telle contrainte rend quasi inutilisable ce type de récepteur en présence d'un couvert forestier (Darche, Forgues, 1998).

Les récepteurs que nous avons testés utilisent tous le code C/A qu'ils interprètent à l'aide d'algorithmes propres aux différents constructeurs. Les positions sont exprimées en latitude, longitude et altitude par rapport à un système d'axes géocentriques baptisé WGS84. Elles sont transmises sous forme ASCII (format standard NMEA) à un terminal au rythme de une donnée toutes les secondes.

2.2. Les modes de fonctionnement du GPS

En mode de fonctionnement autonome (récepteur mobile unique), et si l'on considère un environnement d'utilisation idéal (absence d'obstacle), les récepteurs C/A offrent une précision variant de 30 à 100 m (Deckert, Bolstad, 1996). La dérive des mesures de positions provient principalement d'une altération volontaire et aléatoire du signal GPS introduite par le Ministère américain de la Défense (Selective Availability ou SA). De façon moindre, des interférences ionosphériques et troposphériques, ainsi que des erreurs d'horloges ou d'éphémérides voire même des erreurs de calcul peuvent affecter la précision du positionnement.

Ces erreurs peuvent en grande partie être éliminées par la méthode différentielle (dGPS). Le principe consiste à calculer des corrections à partir d'une ou de plusieurs stations de référence dont on connaît la position exacte. Un signal de correction est généré et utilisé pour corriger les informations collectées par le récepteur mobile. Ce signal peut être transmis en temps réel au récepteur GPS qui les intègre dans le calcul de la solution, ou utilisé *a posteriori* (traitement en post-processing).

Les méthodes différentielles permettent de ramener les erreurs de positionnement dans une fourchette allant de 1 à 10 mètres selon le type de récepteur et pour autant que celui-ci se trouve dans des conditions de réception optimales.

La transmission en temps réel des corrections au récepteur mobile peut s'opérer de plusieurs manières, en fonction du vecteur de télécommunication employé (ondes radios FM, UHF, satellite géostationnaire de télécommunication, téléphone cellulaire). Ces signaux sont proposés sur le marché sous forme d'abonnements payants, leur disponibilité étant toutefois limitée dans l'espace. Ainsi en Belgique, les signaux de correction transmis par RDS (radio FM) sont proposés par un opérateur privé et couvrent la moitié nord du pays

seulement. Par contre les signaux de correction transmis par satellite (satellite OMNISTAR) sont potentiellement disponibles sur l'ensemble du globe. La réception implique toutefois la visibilité du satellite émetteur. Pour la Belgique, l'azimut du satellite est de $165,7^\circ$ (SSW) et son élévation moyenne de $31,8^\circ$.

2.3. Dilution de précision et multi-trajets

Lorsque l'observateur se situe en condition idéale de réception, il est placé au cœur d'une constellation bien répartie de 6 à 12 satellites. La redondance d'informations reçues permet de calculer la position la plus probable. Dans la réalité, de nombreux obstacles entravent la visibilité du ciel et donc la possibilité de recevoir correctement les différents signaux. Deux phénomènes se conjuguent généralement pour réduire la précision de positionnement.

Une diminution du nombre de satellites visibles se traduit généralement par une moins bonne répartition géométrique de ceux-ci dans le ciel (**Figure 1**). Cet effet est caractérisé par le paramètre dop (*dilution of precision*) renseigné par le récepteur dans sa composante horizontale (*horizontal dilution of precision* ou hdop).

Le second phénomène est constitué des multi-trajets (*multipathing*) qui se manifestent lorsque le signal issu du satellite arrive au récepteur en ayant suivi un autre chemin que le chemin direct, en particulier après réflexion sur un obstacle (**Figure 2**) : murs, surfaces vitrées ou métalliques en zones urbaines, troncs d'arbres ou feuillage en forêt (Botton *et al.*, 1998). Les multi-trajets entraînent une surévaluation des distances satellite-récepteur et donc une dérive des positions. Ce phénomène est d'autant plus important que le nombre de satellites visibles est petit. Le phénomène de multi-trajet est assez difficile à mettre en évidence en milieu forestier car les obstacles sont rarement immobiles et les dérives associées ne sont donc pas répétables.

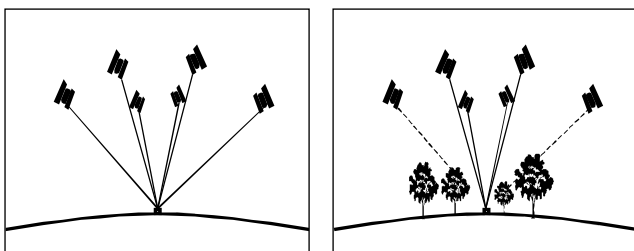


Figure 1. Illustration du rôle du couvert forestier sur l'interception des signaux de certains satellites et de la moins bonne disposition des satellites restant visibles — *Illustration of interception of some satellite signals by trees. Generally associated with a less appropriate geometry of the still visible satellites.*

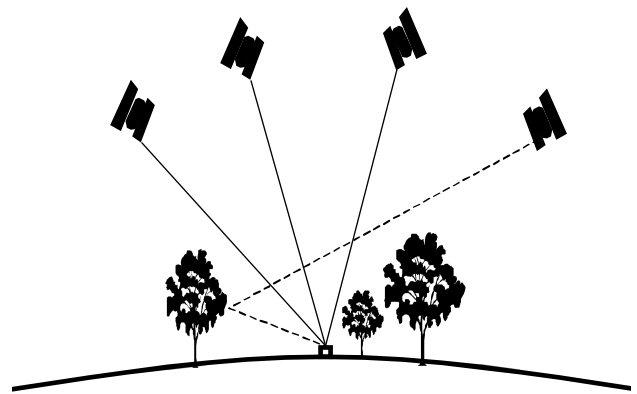


Figure 2. Illustration du phénomène de multi-trajet — *Illustration of the multipathing phenomenon.*

2.4. Description du matériel utilisé

Deux modèles différents de GPS différentiels ont été utilisés. Le premier est un récepteur GPS Trimble à huit canaux parallèles (Svee Six) combiné à un récepteur RDS (fréquence modulée) pour la réception des signaux de correction différentielle. Par la suite nous ferons référence à cet équipement sous l'appellation RDS. Le second équipement est un OMNISTAR 3000 LR8. Il est constitué d'un récepteur GPS Trimble SK8 à huit canaux parallèles combiné à un récepteur OMNISTAR pour la réception des signaux de correction différentielle émis par un satellite de communication géostationnaire. Cet équipement sera désigné par l'appellation OMNISTAR (ou OMNI dans les tableaux).

3. DESCRIPTION DE L'EXPÉRIMENTATION

3.1. Description des peuplements

Les essais ont porté sur la délimitation de deux parcelles forestières se différenciant par la nature de leur couvert. Elles font toutes deux partie du Bois de l'Ermitage situé dans la commune de Villers-la-Ville (Brabant wallon, Belgique). La parcelle 1 est constituée d'une plantation de peupliers âgés de trois ans, alors que la parcelle 2 est occupée par un peuplement d'épicéas communs âgés de 50 ans. Le **figure 3** renseigne sur l'environnement de ces deux parcelles. Les abords immédiats de la parcelle 1 sont constitués d'un terrain nu, d'un taillis et de peuplements feuillus adultes. La parcelle 2 est bordée d'une pessière âgée, d'une futaie feuillue, d'une jeune peupleraie et d'une prairie.

3.2. Arpentage classique

Les sommets des polygones constituant les deux parcelles ont été matérialisés à l'aide de piquets. La délimitation de ces polygones par arpentage classique

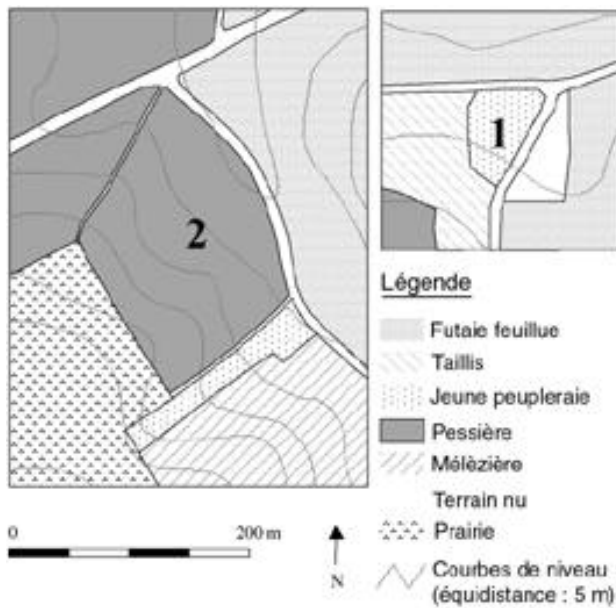


Figure 3. Représentation schématique de l'environnement des 2 parcelles ayant fait l'objet des observations GPS — *Plan showing the environment of the 2 stands surveyed by GPS.*

s'est faite à l'aide d'un mètre à ruban métallique (type chevillère suédoise), d'une boussole (type SUUNTO) et d'un clinomètre (type SUUNTO). La distance ainsi que le gisement et la pente entre les sommets consécutifs des polygones ont été mesurés à deux reprises. Les données ainsi enregistrées ont été converties en coordonnées cartésiennes à l'aide des relations suivantes :

$$\begin{aligned} x_i &= d_i \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \cos(\text{pente}_i) \\ y_i &= d_i \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\text{pente}_i) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + \Delta x_i \\ y_i &= y_{i-1} + \Delta y_i \end{aligned}$$

où x_i et y_i sont les coordonnées cartésiennes du sommet i ;
 d_i , la distance entre le sommet $i-1$ et le sommet i ;
 α_i , le gisement mesuré depuis le sommet $i-1$ vers le sommet i ;
 pente_i , la pente du terrain entre les sommets $i-1$ et i .

Les erreurs de fermeture observées lors de l'arpentage de ces deux polygones (Bondesson *et al.*, 1998), exprimées en termes de Δx et Δy , varient entre -0,2 m et 1,1 m (**Tableau 1**). Les écarts observés entre répétitions pour chaque stationnement n'excèdent jamais 1 m. Compte tenu de la faible amplitude de ces erreurs, aucune méthode de correction n'a été appliquée.

Les coordonnées fournies par cette approche, bien que pouvant être entachées d'erreurs de mesures, ont été considérées dans la suite de l'expérimentation comme

Tableau 1. Erreurs de fermeture observées lors de l'arpentage des deux parcelles. Surface et périmètre des parcelles estimés par arpentage — *Shutting errors resulting from land measuring. Stand area and perimeter estimated by land measuring.*

	Erreur en x		Erreur en y		Dimensions estimées par arpentage	
	$\Sigma \Delta x$	(%)	$\Sigma \Delta y$	(%)	Surface	Périmètre
P1	-0,20	-0,29	-0,20	-0,25	0,3292 ha	236 m
P2	0,60	0,35	1,1	0,43	2,6397 ha	635 m

P1 = Parcelle 1, P2 = Parcelle 2.

constituant la référence, par rapport à laquelle les mesures GPS sont comparées. Les différences entre les mesures GPS et les localisations par arpentage sont de ce fait qualifiées d'erreurs même s'il s'agit en réalité de différences entre deux méthodes de mesures.

3.3. Mesures au GPS

Les deux équipements GPS décrits précédemment ont été utilisés à la fois en mode statique et en mode cinématique.

La prise de mesures en mode statique a été réalisée en immobilisant l'opérateur portant le GPS dans un sac à dos équipé de l'antenne réceptrice près des piquets matérialisant les sommets des polygones. Chaque prise de mesures a duré une minute, les coordonnées étant enregistrées à raison d'un couple de coordonnées par seconde. Ce temps de stationnement relativement court est parfois qualifié de semi-cinématique (Darce, Forgues, 1998).

Pour le mode cinématique, les opérateurs ont parcouru le périmètre des parcelles en marchant, les sommets étant joints par des trajets aussi rectilignes que possible en fonction de la configuration du terrain (présence de fossés, de talus, d'arbres abattus, etc.).

Les prises de mesures en mode statique et en mode cinématique ont été répétées à deux reprises, à des moments différents de la journée (16 mars 1998 matin et 9 avril 1998 après-midi).

Les coordonnées fournies par les GPS sont exprimées, après transformation, dans le référentiel cartographique LAMBERT72 défini par l'Institut Géographique National de Belgique (IGN, 1989). Les coordonnées provenant de l'arpentage sont initialement exprimées dans un référentiel local ayant pour origine (0,0) le premier point de chaque cheminement. Pour rendre les différents jeux de données comparables, nous avons corrigé les coordonnées relatives à la méthode d'arpentage en leur appliquant une translation définie par la localisation de certains sommets des parcelles sur le fond topographique 1/10.000 scanné de l'IGN, celui-ci étant exploité dans un SIG.

Outre les informations (x, y et z) relatives au positionnement du récepteur, les GPS fournissent d'autres renseignements relatifs notamment à la qualité des signaux reçus : nombre de satellites visibles, dilution de précision horizontale (hdop), signal différentiel (présence ou absence), âge du signal différentiel (depuis la dernière mise à jour).

3.4. Calcul des erreurs liées à la méthode GPS

Contrairement à certains auteurs s'intéressant à l'erreur commise sur l'estimation de la surface des parcelles (Liu, Brantigan, 1995 ; Darce, 1998), nous avons préféré baser nos calculs d'erreurs sur des distances entre positions supposées réelles et positions estimées par GPS.

Les modalités du calcul d'erreur ont été adaptées au mode d'acquisition des coordonnées (statique ou cinématique). Pour le mode statique, l'erreur correspond à la distance entre les points de localisation des sommets dérivant respectivement de la méthode d'arpentage et de la méthode GPS. Par définition, le mode cinématique ne concerne pas la seule localisation des sommets, mais bien l'ensemble du périmètre des polygones. Dans ce cas, l'erreur est définie comme la distance minimum entre le point localisé par GPS et le segment de droite le plus proche qui relie deux sommets consécutifs.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Erreur moyenne de localisation

La première analyse réalisée ne prend en compte que les observations où les récepteurs GPS recevaient effectivement le signal de correction différentielle. Les erreurs moyennes de localisation sont beaucoup plus faibles pour la parcelle 1 (couvert léger) que pour la parcelle 2 (couvert important). En mode statique, l'erreur moyenne est de 4,6 m pour la parcelle 1 contre 13,7 m pour la parcelle 2 (**Tableau 2, Figure 4**). Les différences entre machines sont très faibles (1 m). Les erreurs enregistrées en mode cinématiques suivent la même tendance, avec des erreurs moyennes moins importantes : 1,25 m pour la parcelle 1 et 5,0 m pour la parcelle 2, les deux machines présentant à nouveaux des niveaux de performance très comparables (**Tableau 2**).

La **figure 5** présente un exemple de relevés de terrain pour la parcelle 1, respectivement en mode statique et en mode cinématique.

Les résultats obtenus montrent, comme on pouvait le présager, une augmentation de l'erreur de localisation en présence d'un couvert forestier dense et ce quelque soit le matériel utilisé. Une telle différence s'explique essentiellement par le phénomène d'interception du couvert réduisant le nombre de satellites visibles.

Tableau 2. Erreur de localisation par dGPS : valeurs moyennes, écart-types et nombres d'observations en fonction de l'appareillage, du mode d'acquisition et de la parcelle — *dGPS Positioning error: mean values, standard deviations and numbers of observations according to equipment, acquisition mode and stand.*

	Mode statique				Mode cinématique			
	P1		P2		P1		P2	
	RDS OMNI	RDSOMNI	RDS OMNI	RDSOMNI	RDS OMNI	RDSOMNI	RDS OMNI	RDSOMNI
Moyenne	5,1	4,1	13,2	14,2	1,1	1,4	5,0	5,1
Écart-type	3,1	2,5	12,5	16,5	0,8	1,1	3,8	5,9
Nombre d'observations	1482	1482	1581	1581	193	135	481	303

P1 = Parcelle 1, P2 = Parcelle 2.

La plus grande précision des résultats obtenus en mode cinématique est par contre plus surprenante. Si cette différence ne trouve pas d'explication à ce stade de l'étude, elle conforte l'idée qu'il n'est pas nécessaire de stationner sur les sommets des parcelles que l'on désire cartographier.

4.2. Altération du signal par le couvert forestier

La différence d'erreur moyenne de localisation observée entre parcelles trouve entre autre son origine dans l'interception par le couvert d'une partie des signaux émis par les satellites visibles, cette interception induisant généralement une moins bonne disposition des satellites utilisables (augmentation de la dop). Le **tableau 3** présente les valeurs moyennes pour le nombre de satellites visibles et la hdop en fonction du matériel, du mode d'acquisition et du type de couvert. On observe une perte moyenne d'environ deux satellites et une augmentation de hdop d'une unité et demi entre la parcelle 1 et la parcelle 2. Les différences entre machines et méthodes d'acquisition peuvent être considérées comme négligeables.

La liaison entre l'erreur de localisation et le nombre de satellites captés apparaît à la lecture du **tableau 4** qui globalise les résultats des deux machines. La proportion d'observations entachées d'une erreur supérieure à 10 m passe respectivement de 28 % à 2 % pour le mode statique et de 12 % à 0 % pour le mode cinématique lorsque le nombre de satellites passent de trois à huit. En mode cinématique, aucune erreur supérieure à 10 m n'est enregistrée dès lors que le nombre de satellites captés est égal ou supérieur à six.

4.3. Multi-trajet

Le multi-trajet est un phénomène qui, s'il s'explique facilement d'un point de vue théorique, est par contre beaucoup plus difficile à mettre en évidence et donc à

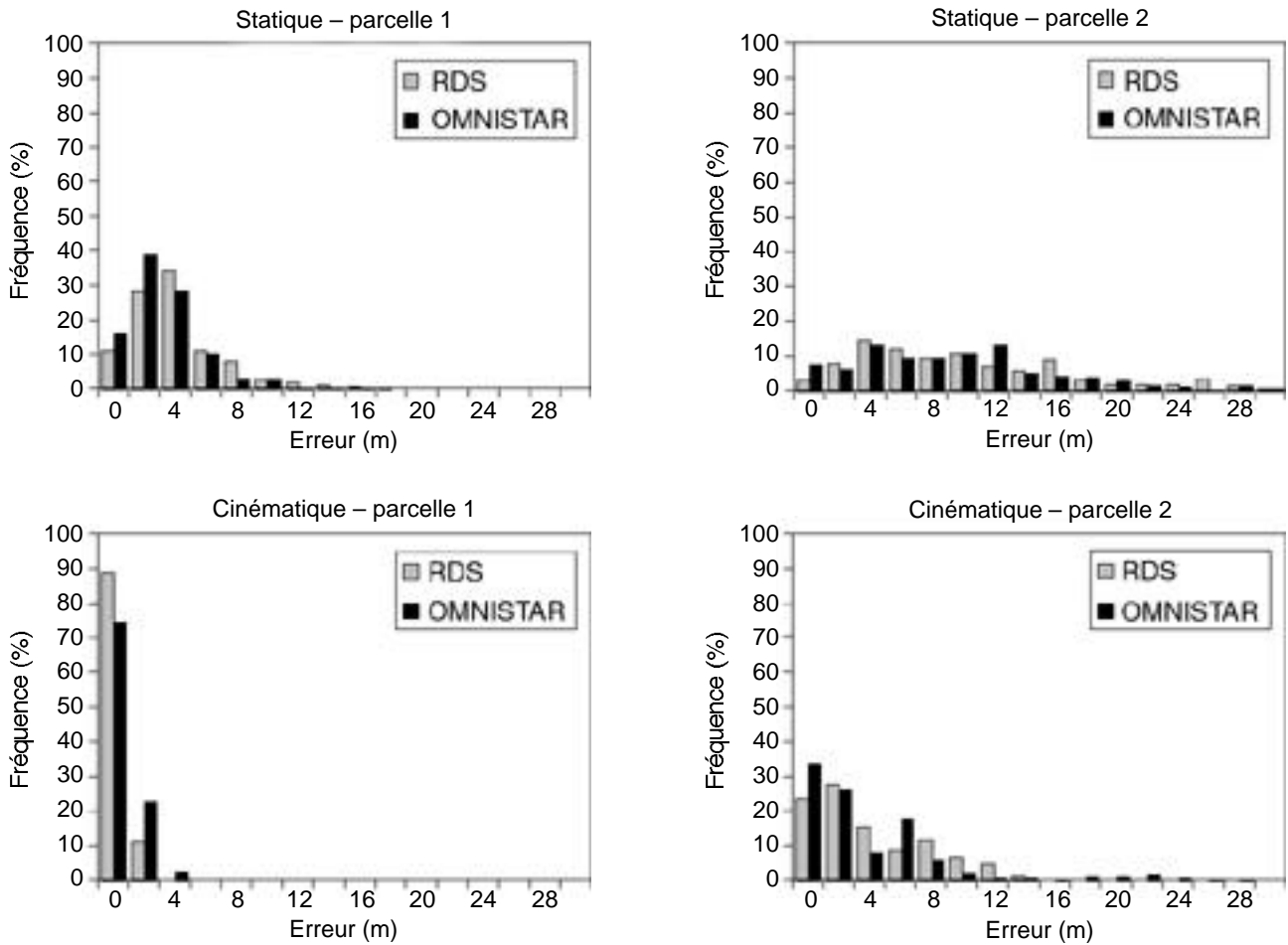


Figure 4. Distributions de fréquence des erreurs de positionnement par dGPS (en m) selon l’appareillage (RDS ou MONISTAR), le mode d’acquisition (statique ou cinématique) et la parcelle (parcelle 1 ou 2) — *Frequency distribution of dGPS positioning errors (in m) according to equipment (RDS or OMNISTAR), acquisition mode (static or cinematic), and stand.*

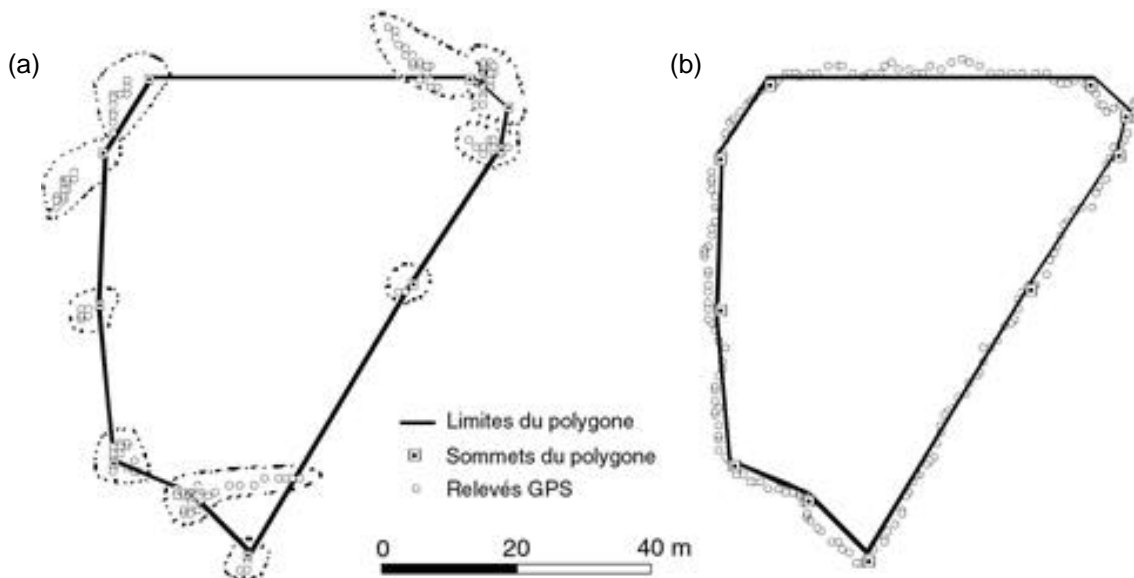


Figure 5. Exemple de relevés GPS pour la parcelle 1 : (a) relevés en mode statique (les lignes pointillées regroupent les observations GPS et le sommet auquel elles se rapportent) ; (b) en mode cinématique — *Example of GPS recording for stand 1: (a) in static recording (dotted lines regroup observations and the vertex to which they correspond); (b) in cinematic mode.*

Tableau 3. Nombre de satellites visibles et paramètre hdop : valeurs moyennes, écart-types et nombres d'observations en fonction de l'appareillage, du mode d'acquisition et de la parcelle — *Number of visible satellites and hdop parameter: mean value, standard deviation and number of observations according to equipment, acquisition mode and stand.*

		Mode statique				Mode cinématique			
		Parcelle 1		Parcelle 2		Parcelle 1		Parcelle 2	
		RDS	OMNI	RDS	OMNI	RDS	OMNI	RDS	OMNI
Nombre de satellites	Moyenne	6,46	7,01	4,35	4,61	5,93	6,30	4,43	4,20
	Écart-type	0,952	1,054	1,025	0,882	0,739	0,623	0,793	0,811
hdop	Moyenne	1,28	1,20	2,61	2,62	1,34	1,22	2,64	3,10
	Écart-type	0,213	0,142	1,518	1,520	0,214	0,202	0,927	1,380

maîtriser dans la pratique. La représentation cartographique de certains résultats obtenus en mode statique (**Figure 6**) montre clairement que les observations réalisées en un même point et durant un laps de temps relativement court (une minute) peuvent présenter des variations importantes voire très importantes, alors que les conditions apparentes de réception ne changent pas (couvert identique, nombre de satellites captés et hdop constants). Si ce phénomène s'est manifesté très fréquemment en mode statique, il semble par contre absent des résultats obtenus en mode cinématique, ce qui explique la différence enregistrée au niveau des erreurs moyennes de localisation pour les deux méthodes.

L'explication suivante peut être avancée pour justifier de telles différences. Les fluctuations enregistrées en mode statique résultent de la qualité médiocre (rapport signal/bruit proche de zéro) des signaux reçus, en raison notamment du phénomène de multi-trajet. Ces fluctuations sont cependant atténuées par une procédure de lissage fixée dans les paramètres internes du GPS. Ce lissage explique la disposition des localisations successives du point de stationnement sous la forme d'une "trace" (**Figure 6**). Lorsque le récepteur est en mouve-

ment, la qualité du signal en provenance d'un même satellite fluctue fortement en fonction des conditions de visibilité très changeantes (ces changements s'opèrent le plus souvent durant des fractions de seconde). Le récepteur a la faculté de pouvoir rester verrouillé sur un satellite même quand le signal qu'il reçoit de celui-ci devient très faible (rapport signal/bruit proche de 0) (Trimble, 1997). En utilisant la valeur de ce rapport signal/bruit comme critère de sélection, le récepteur a donc la possibilité de filtrer les signaux reçus et de garder les meilleurs d'entre eux, permettant ainsi une localisation plus précise en mode cinématique.

Pour quantifier l'instabilité du positionnement en mode statique, nous avons calculé l'écart maximum

Tableau 4. Relation entre le nombre de satellites visibles et l'erreur de localisation : erreur moyenne et pourcentage d'observations présentant une erreur supérieure à 10 m, en fonction du mode d'acquisition (statique ou cinématique) — *Relationship between number of visible satellites and positioning error: mean error and proportion of observations affected by an error greater than 10 m, according to acquisition mode (static or cinematic).*

Nombre de satellites	Erreur moyenne (m)		Observations (%) avec une erreur > 10 m	
	Statique	Cinématique	Statique	Cinématique
3	17,5	7,5	27,8	12,3
4	14,1	5,7	35,1	15,5
5	11,7	3,3	24,8	7,0
6	5,8	1,5	10,1	0,0
7	4,6	1,2	2,1	0,0
8	4,1	0,0	0,0	-

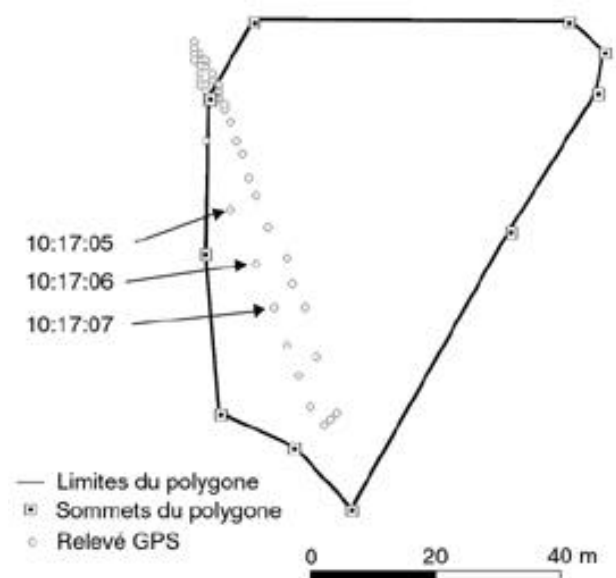


Figure 6. Exemple de relevés GPS réalisés en mode statique pour la parcelle 1 montrant l'apparition d'un phénomène de multi-trajet. Les relevés sont enregistrés à raison de un par seconde (3 relevés consécutifs sont désignés par des flèches avec l'heure d'enregistrement correspondante) — *Example of GPS recording in static mode for stand 1 showing multipathing effect. Observations are recorded at a rate of one observation per second (3 consecutive recordings are pointed out by arrows, with corresponding recording time).*

(EM) existant entre les localisations d'un sommet réalisées au cours d'une même séance de mesures. Les valeurs moyennes de cet écart sont respectivement de 24,7 m pour le système RDS et de 25,5 m pour l'OMNISTAR. Si l'on considère une valeur limite de 20 m, celle-ci est dépassée dans 43 % des cas pour le RDS contre 32 % pour l'OMNISTAR.

La mise en relation de cette variable (EM) avec le nombre de satellites captés montre que, même si ce phénomène n'est pas lié directement à l'interception des signaux par le couvert forestier, il est d'autant plus marqué que le nombre de satellites captés est faible (**Figure 7**).

4.4. Réception du signal différentiel

L'analyse a ensuite été étendue à l'ensemble des données collectées par les deux appareils pour évaluer leur capacité à recevoir le signal différentiel en fonction des conditions rencontrées (**Tableau 5**). Le taux d'absence de ce signal lors de l'acquisition en mode statique est en moyenne de 2 % pour la parcelle 1 et de 16 % pour la parcelle 2. Ces valeurs moyennes masquent des différences importantes entre équipements puisque le signal différentiel est absent pour 22 % des mesures réalisées par l'OMNISTAR, contre 10 % seulement pour le système RDS. Cet écart est encore plus important pour le mode cinématique où, dans le cas de la parcelle 2, l'absence du signal

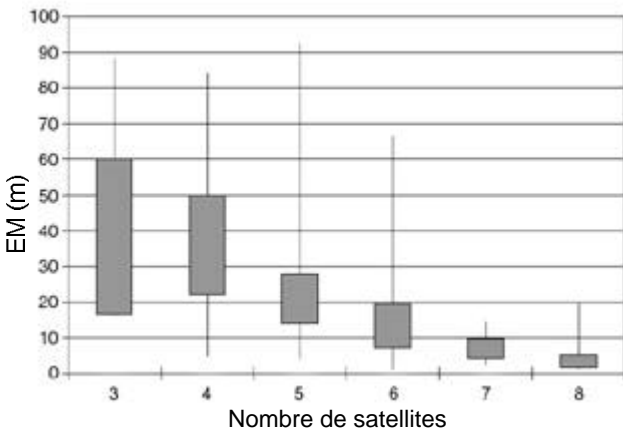


Figure 7. Relation entre le nombre de satellites visibles et l'écart maximum (EM) mesuré lors des observations en mode statique (la barre centrale correspond à la moitié des observations, les lignes inférieures et supérieures joignent les valeurs extrêmes) — *Relationship between the number of visible satellites and the maximum distance (EM) between observations for one recording period in static mode (the central bar correspond to half of the observations, upper and lower lines join extreme values).*

Tableau 5. Pourcentage des points avec signal différentiel en fonction de l'appareillage, du mode d'acquisition et de la parcelle — *Percentage of points with differential signal according to equipment, acquisition mode and stand.*

	Mode statique		Mode cinématique					
	P1	P2	P1	P2				
	RDS	OMNI	RDS	OMNI				
Présence du signal dGPS (%)	99,7	96,4	90,4	77,8	100	98,5	91,4	58,7

P1 = Parcelle 1, P2 = Parcelle 2.

différentiel concerne 41 % des enregistrements contre 9 % pour le système RDS. La **figure 8** illustre, pour l'OMNISTAR dans le cas de la parcelle 2, les conséquences d'une disparition du signal différentiel sur la qualité du positionnement. On remarque que cette disparition n'est pas aléatoire, mais se produit essentiellement le long de la limite nord-est de la parcelle, le satellite OMNISTAR étant masqué à cet endroit par les arbres du peuplement.

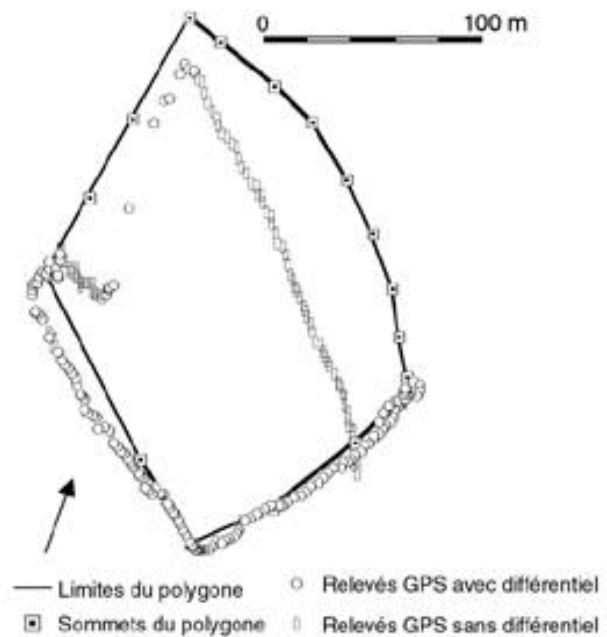


Figure 8. Exemple de relevés GPS réalisés en mode cinématique pour la parcelle 2 montrant les conséquences d'une perte du signal différentiel sur la précision de la localisation. La flèche indique l'azimut du satellite OMNISTAR — *Example of GPS recording in cinematic mode for stand 2 showing effect of differential signal loss on positioning accuracy. The arrow shows the bearing of the OMNISTAR satellite.*

5. CONCLUSIONS

La comparaison d'essais de délimitation de parcelles forestières par dGPS avec les résultats obtenus par les techniques classiques d'arpentage a montré que la présence d'un couvert forestier altérait globalement la précision du résultat final. Le couvert forestier induit deux effets sur le fonctionnement du dGPS :

- interception des signaux GPS et différentiel,
- réflexion des signaux GPS (multi-trajet).

En milieu forestier, le mode d'acquisition cinématique s'est avéré plus précis que le mode statique, les résultats de ce dernier présentant d'importantes variations pour un même point de stationnement, ces variations étant attribuées au phénomène de multi-trajet.

Pour les observations réalisées en mode statique dans les conditions de couvert les plus difficiles, l'erreur moyenne de localisation est d'environ 5 m si l'on ne considère que les observations bénéficiant de la correction différentielle et ce quelle que soit la machine utilisée. Ce niveau de précision reste tout à fait compatible avec les exigences en matière de cartographie forestière réalisée en Région wallonne (échelle du 1/10.000).

Les deux équipements testés ont cependant montré des différences dans la continuité avec laquelle ils recevaient le signal différentiel. Si le système RDS présente un taux de réception du différentiel de plus de 90 % sous couvert dense, le récepteur OMNISTAR n'a affiché, dans nos conditions expérimentales, qu'un résultat de 57 %, les périodes pendant lesquelles le signal différentiel est absent étant parfois de longue durée. Il s'agit cependant d'un phénomène tout à fait prévisible lié à la présence d'obstacles (peuplements forestiers, topographie) combinée à un angle d'élévation du satellite OMNISTAR relativement bas (31,8°). Une solution à ce problème pourrait être de placer le récepteur OMNISTAR à un endroit "dégagé" et de relier celui-ci au récepteur GPS par signal radio.

Le meilleur comportement du système RDS doit pour sa part être tempéré par le fait que la couverture du pays par le signal RDS est loin d'être satisfaisante. Elle est par exemple presque inexistante au sud du sillon Sambre et Meuse, région particulièrement concernée par ce genre d'application. Là aussi une solution peut être apportée par le distributeur du signal RDS en amplifiant la couverture du signal RDS par la mise en service de relais supplémentaires.

Les résultats qui viennent d'être présentés montrent les potentialités d'utilisation du GPS pour la cartographie forestière, mais ils en soulignent également les limites et donc la nécessité d'adopter des techniques de levé appropriées dans les conditions défavorables.

Une étude beaucoup plus complète devrait permettre d'analyser la précision des dGPS dans des situations beaucoup plus diversifiées (conditions de couvert et

situations topographiques) de même qu'évaluer la portée des évolutions techniques que connaît constamment ce type d'appareil (augmentation du nombre de canaux, amélioration des algorithmes de traitement, etc).

L'interférence du couvert forestier avec les différentes composantes de l'appareillage GPS reste la problématique principale liée à ce type d'application et appelle des solutions essentiellement techniques. La manière avec laquelle l'outil GPS est intégré dans la filière d'acquisition de l'information en cartographie forestière appelle également à une réflexion approfondie concernant notamment la combinaison avec d'autres outils de télémétrie ou encore l'utilisation d'encodeurs de terrain équipés d'un SIG.

Remerciements

Les auteurs remercient Mr D. DUCHENE, gestionnaire forestier de la société DOMANOY s.a., pour son aimable collaboration.

Bibliography

- Bondesson L., Stahl G., Holm S. (1998). Standard errors of area estimates obtained by traversing and GPS. *For. Sci.* **44**, p. 405–413.
- Botton S., Duquenne F., Egels Y., Even M., Willis P. (1998). *GPS, localisation et navigation*. Paris : Édition Hermès, 159 p.
- D'Eon P. (1995). Accuracy and signal reception of hand-held global positioning system (GPS) receiver. *For. Chron.* **71**, p. 192–196.
- Darche MH. (1998). *Comparaison de quatre nouveaux systèmes GPS en conditions forestières. Rapport spécial RS-128*. Institut Canadien de Recherche en Génie forestier (FERIC), 16 p.
- Darche MH., Forgues I. (1998). *Modes de positionnement par GPS : introduction et application en foresterie. Fiche technique FT-277*. Institut Canadien de Recherche en Génie forestier (FERIC), 12 p.
- Deckert C., Bolstad PV. (1996). Forest canopy, terrain, and distance effects on global positioning system point accuracy. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, **62**, p. 317–321.
- IGN (1989). *Systèmes de références et formules de transformation en usage en Belgique*. Institut Géographique National, Bruxelles, 48 p.
- Liu CJ., Brantigan R. (1995). Using differential GPS for forest traverse surveys. *Can. J. For. Res.* **25**, p. 1795–1805.
- Trimble (1997). *Lassen-SK8 embedded GPS module system designer reference manual, part number: 34149-01*. Trimble Navigation Ltd Commercial System Group, Sunnyvale, CA 94088-3642 USA. 32 p.

(9 ref.)