

Les réseaux de correction différentielle

Renaud Lahaye¹, Sylvie Ladet²

Résumé. Cet article a pour principal objectif de répondre aux questions qui peuvent se poser au moment de la mise en place d'un dispositif de correction différentielle : pourquoi les réseaux de correction différentielle ? Quels sont-ils et où sont-ils ? Quel réseau couvre mon domaine expérimental ? Comment l'utiliser et avec quel matériel adapté ? Les systèmes satellitaires de navigation globaux (GNSS -global navigation satellite system-) présentent des sources d'erreur induisant de l'imprécision sur les calculs de géopositionnement. Ces erreurs de calcul peuvent être particulièrement problématiques pour des dispositifs expérimentaux reposant sur le géopositionnement d'un mobile en temps réel (mode RTK -real time kinematic-) appliqué par exemple à l'agriculture de précision. La solution pour améliorer significativement la précision du calcul consiste à utiliser des algorithmes correcteurs diffusés par des stations de mesure fixes ou faisant partie d'un réseau. Pour utiliser ces informations le mobile doit être capable de se connecter à la station (radio, Internet, téléphone, etc.), de charger et recalculer rapidement la géolocalisation pratiquement en temps réel. Parmi les réseaux de stations disponibles, il en existe des publics (RGP-réseau GNSS permanent-) et des privés (Teria, Sat-info, Orphéon) qui seront détaillés et comparés. Un premier tableau récapitulatif des sites expérimentaux de l'INRA équipés et les couvertures des réseaux est présenté dans cet article pour partager les informations avec les Unités expérimentales.

Mots clés : réseaux de correction différentielle, DGPS, station de référence

Introduction

La géolocalisation globale qui s'appuie sur des systèmes satellitaires (GNSS, global navigation satellite system) peut être entachée d'erreurs pouvant réduire la précision du calcul de la position à une centaine de mètres (Lahaye et Ladet, 2014). A l'origine de ces erreurs peuvent être citées : la désynchronisation des horloges des satellites et

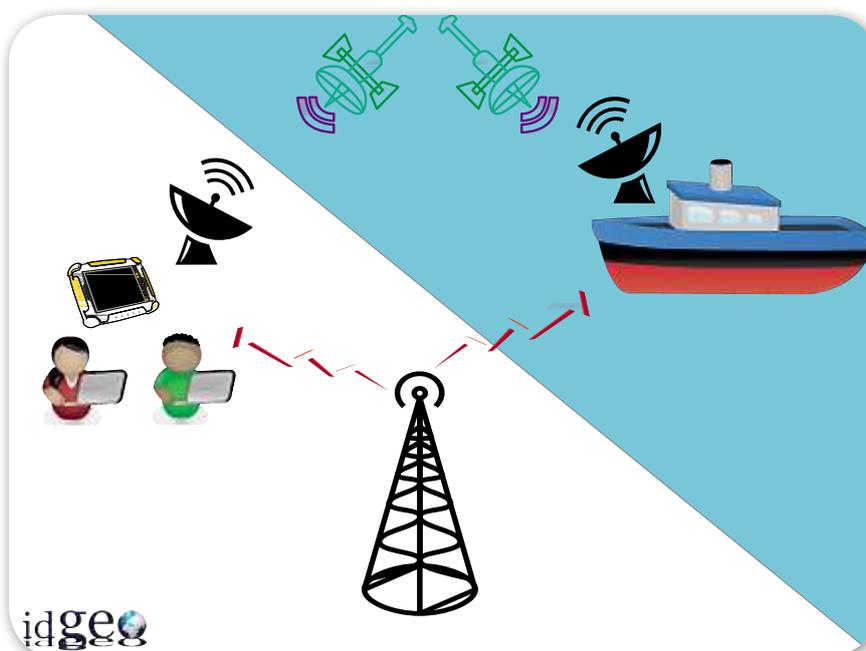


Figure 1. Station de référence DGPS diffusant ses informations aux utilisateurs. DGPS : processus de différenciation qui supprime les sources d'erreur de positionnement et améliore son intégrité. Les corrections sont calculées à partir d'une station de référence et appliquées au GPS mobile en temps réel ou dans un logiciel de post-traitement. On parle alors de correction différentielle.

1 Institut de Développement de la Géomatique (IDGEO) ; 42, avenue du Général de Crouette, F-31100 Toulouse ; France ; renaud.lahaye@idgeo.fr
2 INRA, UMR DYNAFOR 1201, 24 Chemin de Borde Rouge- Auzeville, CS 52627, F-31326 Castanet-Tolosan cedex, France

/ ou des récepteurs, la dégradation du signal volontaire ou non, la déviation des trajectoires des signaux satellitaires en fonction de la structure des couches ionosphériques et troposphériques. Ces erreurs étant identiques au sein d'une même zone de réception, il est possible de mettre en place un dispositif d'observation, de calcul et de transmission des erreurs : une station « relais » ou « base », dont la géolocalisation exacte est connue et qui recalcule constamment sa position en fonction des satellites disponibles. Cette station va observer des erreurs qu'elle va transmettre au récepteur qui va alors appliquer une correction différentielle : c'est le principe du GPS différentiel ou DGPS (**Figure 1**). Cette correction différentielle permet d'obtenir des précisions de géopositionnement métrique voir centimétrique si la station utilisée calcule sa position en utilisant la phase (RTK) et non le code (DGPS).

Description du matériel et/ou méthodes

Le DGPS

Le GPS Différentiel, ou DGPS, a été initialement conçu pour remédier au cryptage volontaire dit SA (selective availability) du signal GPS mis en place par l'armée américaine pour empêcher ses « ennemis » de bénéficier d'une géolocalisation trop précise. Suite à la décision du gouvernement américain de désactiver ce cryptage en 2000, le DGPS a quelque peu perdu de son intérêt. Il présente cependant l'avantage d'offrir une précision métrique là où le géopositionnement « absolu » permet généralement une résolution décamétrique. Cette technologie est encore très utilisée aussi bien en navigation maritime que terrestre.

Utilisé pour corriger sa localisation en temps réel, la clé de ce dispositif est la communication entre le récepteur et la base de référence. Une large gamme de fréquences peut être utilisée selon l'application souhaitée. Plus les relevés se situent dans des lieux confinés (milieu urbain, chantier, etc.), plus la gamme de fréquences utilisée est élevée. La portée des bases de référence peut atteindre quant à elle 300 km, permettant ainsi de répondre aux besoins de la navigation maritime.

Tableau 1. Récapitulatif des fréquences utilisées pour communiquer avec la base³

Type	Fréquence	Portée
UHF	300 MHz à 3000 MHz	Quelques Kilomètres
VHF	30 MHz à 300 MHz	Jusqu'à 20 km en mer
Grandes Ondes	Autour de 300 kHz	Entre 200 et 300 km
GSM	900 MHz, 1800 MHz	Jusqu'à 50 km

Pour s'affranchir de ces problèmes de communication en direct avec la station de référence, une autre solution consiste à corriger les erreurs de géolocalisation de retour au bureau, en « post-traitement ». L'opérateur se connecte via Internet à la station la plus proche du lieu des relevés, télécharge les fichiers nécessaires et corrige les géolocalisations relevées à l'aide d'un logiciel approprié.

3 http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Onde_radio&oldid=99236387

Les systèmes permettant d'augmenter la précision de la géolocalisation en transmettant des corrections erreurs par des satellites géostationnaires (Les SBAS, Lahaye et Ladet, 2014) pourraient être considérés comme des DGPS. Certains de ces systèmes comme le WAAS ou EGNOS sont publics et ne nécessitent généralement pas de matériel particulier pour les utiliser. D'autres sont privés comme les systèmes proposés par John Deere et Omnistar et nécessitent un abonnement ainsi qu'un matériel de géolocalisation adapté. Les corrections émises par les SBAS concernent une vaste zone contrairement au DGPS où la station envoie des corrections d'après ses relevés. Les stations utilisées par le DGPS peuvent être des bases paramétrées par l'opérateur, ce qui nécessite l'emploi simultané de deux récepteurs : un fixe et un mobile. La mise en place de réseaux de stations permanentes privés ou publics permet de s'affranchir de la base fixe habituellement surveillée par une personne afin d'éviter sa « perte », etc.

Il est possible de faire du DGPS en temps réel ou en post-traitement en utilisant des stations permanentes du réseau RGP (réseau GNSS permanent). Le récepteur mobile se base sur les codes des signaux émis par les satellites GPS pour calculer une première position absolue. En temps réel le récepteur se connecte alors à la station la plus proche pour récupérer les erreurs et les appliquer à la géolocalisation pour obtenir une position corrigée. En l'absence de moyens de communication avec la station permanente la plus proche, la correction de la géolocalisation peut s'effectuer en post-traitement de retour au bureau en récupérant les données au format « RINEX » de la station permanente. Un logiciel de post-traitement permettra d'exploiter ce format de données et d'appliquer à la géolocalisation « absolue » la correction appropriée.

Se basant sur le code, le DGPS classique ne permet d'obtenir une précision « que » métrique. Cette précision est souvent suffisante pour rendre plus précise des opérations culturales. Certaines applications, en agriculture de précision notamment, nécessitent une résolution qui est plutôt de l'ordre du centimètre pour un dispositif en mouvement. Ces applications auront recours à une autre méthode : le GPS RTK (real time kinematics ou cinématique temps réel) plus appropriée à la géolocalisation centimétrique d'un mobile. Le RTK se développe aujourd'hui car il rend possible l'autopilotage des machines agricoles.

Le RTK classique

Le GPS RTK utilise le même principe de correction différentielle que le DGPS : un récepteur fixe dont la position est connue (station de l'utilisateur ou station d'un réseau, on parle également de base) transmet des corrections à un récepteur mobile qui se déplace sur des points dont on souhaite déterminer précisément les coordonnées (**Figure 2**). L'avantage du RTK réside dans l'utilisation de la différence de phase utilisée pour la correction, c'est

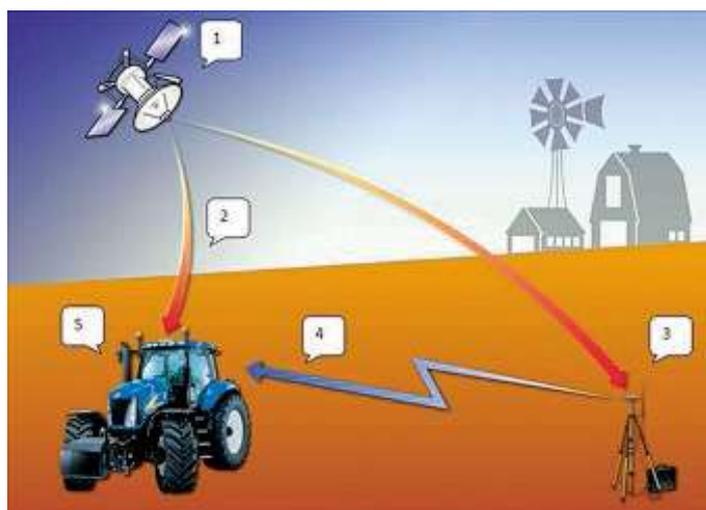


Figure 2. Princes du RTK. 1/ Constellation de satellites GNSS 2/ Signal GNSS 3/ Station de référence RTK 4/ Signal radio de correction RTK 5/ Récepteur GNSS/radio sur le véhicule.

Source : <http://www.geo-pro.fr/aggps-542-rtk.html>

à dire la différence entre l'instant où un signal est émis depuis le satellite et l'instant auquel il est enregistré par le récepteur (Lahaye et Ladet, 2014). Le code C/A étant émis à une fréquence de 1.023 MHz et la phase de la porteuse L1 oscillant à une fréquence de 1575.42 MHz, l'utilisation de la phase permet un positionnement environ 150 fois plus précis que le code, en théorie.

L'emploi de la phase nécessite un dispositif particulier permettant de lever les ambiguïtés, c'est à dire le nombre d'oscillations qu'il y a eu entre les satellites et le récepteur (Lahaye et ladet, 2014). La station fixe a pour objectif de lever cette ambiguïté pour calculer une position au millimètre près. Le récepteur mobile se connecte à cette station pour récupérer les informations de correction de position et atteindre ainsi une résolution centimétrique. Quand la station fixe est mise en place et paramétrée par un opérateur, le récepteur mobile ne peut pas s'éloigner à plus de 10-15 km (limites radio), distance au-delà de laquelle l'incertitude sur la position augmente significativement.

Le RTK Réseau

Pour s'affranchir des problèmes de distance récepteur mobile - récepteur fixe précédemment décrits et surtout pour limiter le coût du dispositif (économie du temps de paramétrage de la station fixe, du matériel et de la personne qui surveille ce matériel), l'idée s'est développée de remplacer la station fixe indispensable par des stations fixes permanentes utiles à la communauté des utilisateurs et de mettre les données à disposition par l'intermédiaire du réseau Internet. Des réseaux publics (RGP) et privés (Teria, SatInfo, Orphéon) ont été ainsi créés pour répondre à un besoin de géolocalisation précise en constante évolution.

L'idée du RTK réseau est de faire supporter différents types de calculs à un serveur distant qui transmet en retour quasi spontanément les corrections. Les réseaux vont différer sur les types de calculs pris en charge par le serveur distant, sur la méthode de transmission des corrections, sur la distribution des stations de référence sur le territoire, sur les couvertures réseaux, etc.

Tableau 2. Comparaison des principales méthodes de géolocalisation GPS avec les précisions généralement observées, le matériel à utiliser et le type de mesure effectuée

Méthode	Précision	Matériel	Mesure
GPS absolu	+/- 10m	1 récepteur	Code (C/A)
GPS + EGNOS / WAAS	+/- 5m	1 récepteur compatible WAAS / EGNOS	Code (C/A)
DGPS	+/- 1m	1 récepteur pouvant communiquer avec une station	Code (C/A)
RTK classique	1 à 10 cm	2 récepteurs	Phase
RTK réseau	1 à 10 cm	1 récepteur pouvant communiquer avec une station d'un réseau	Phase

- ✓ Le Réseau Teria (**Figure 3**) : premier réseau privé mis en place par l'ordre des Géomètres-Experts Français. Le projet initié en 2005 couvre l'ensemble du territoire avec un maillage de stations qui permet de capter les corrections d'une station située à moins de 100 km n'importe où sur le territoire. Les stations prennent en compte les constellations GPS et GLONASS (Lahaye et Ladet, 2014). Elles sont également compatibles avec les satellites Galileo en attente de la mise en fonction officielle de ce système. Les stations font partie intégrantes du réseau RGP de l'IGN. Dans le cas de Teria le serveur distant récupère les données des stations de référence. Il effectue la résolution des ambiguïtés par la méthode FPK (ou paramètre de correction surfacique) permettant



la triangulation du mobile. Le serveur diffuse en permanence les données par onde radio. Le mobile se connecte au serveur qui renvoie les corrections au mobile. Ce dernier génère alors les interpolations nécessaires et obtient ainsi la position.

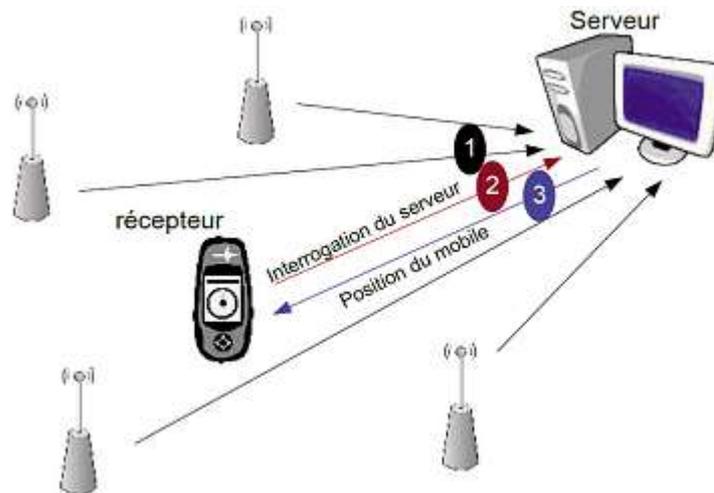


Figure 3. Schéma du fonctionnement du réseau Téria. Plusieurs stations diffusent leurs données au serveur qui procède aux calculs des erreurs et à la géolocalisation du récepteur par triangulation (source : MEDDAT, 2008).

- ✓ Le réseau SATINFO (**Figure 4**) : les stations de ce réseau sont installées sur le territoire et réparties tous les 60 à 70 km les unes des autres. La couverture du territoire n'est pas totale : elle comprend la moitié Nord, les arrondissements de Bordeaux, Toulouse et globalement le pourtour méditerranéen. Les stations sont toutes reliées par ADSL à des serveurs de données et transmettent leurs informations GPS toutes les secondes. Le logiciel GPSNet (Trimble Terrasat GmbH) installé sur les serveurs enregistre alors ces données et effectue des calculs afin de minimiser les erreurs systématiques (ionosphère, troposphère, orbites des satellites, multipath, centre de phase de l'antenne, etc.). Lorsqu'un utilisateur vient se connecter sur le réseau, le logiciel modélise les différentes sources d'erreurs en s'appuyant sur les données des stations de référence. Il interpole l'influence de ces erreurs à proximité de l'utilisateur en créant une station virtuelle de référence (VRS). L'utilisateur utilise ainsi des algorithmes RTK classiques à partir de cette station virtuelle (VRS).

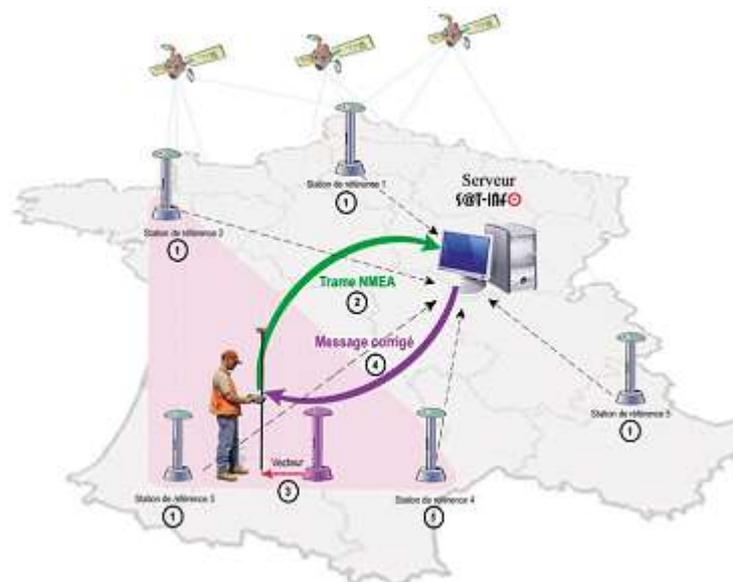


Figure 4. Schéma du fonctionnement du réseau Sat-info (source : <http://www.sat-info.fr>).

- ✓ Le réseau Orphéon (**Figure 5**) : avec 160 stations en France continentale, toutes compatibles GPS et GLONASS, Orphéon est le premier réseau Français multi-constellation. Il propose des abonnements différents pour les applications agricoles et le génie civil. La couverture du réseau est nationale. Ce réseau repose sur le concept de Maître-auxiliaire (MAC) : les stations de référence d'une même zone ont un certain nombre de corrections en commun (correction satellite, atmosphérique, etc.). Le système s'appuie sur ces informations pour envoyer au serveur les données communes. La station de référence la plus proche de l'opérateur est désignée comme maître, elle possède un certain nombre de corrections transmises au serveur de calcul. Les autres stations alentours sont désignées auxiliaires. Le serveur calcule alors des corrections différentielles entre les stations et envoie les corrections relatives à la station maîtresse. Cette dernière envoie les données brutes issues de ces observations. Cet arrangement des données génère des messages compacts, peu consommateurs de bande passante. Le mobile récupère les informations auprès du serveur Internet et de la station maîtresse puis effectue les interpolations.

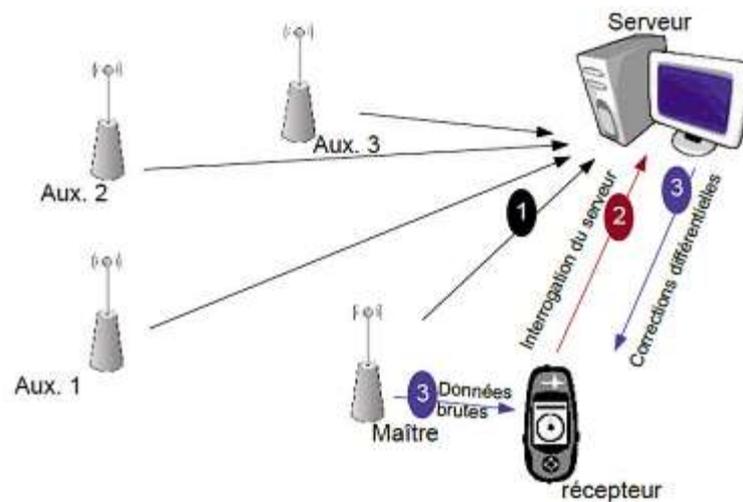


Figure 5. Schéma du fonctionnement du réseau Orphéon (source : MEDDAT, 2008).

Le concept MAC délègue certes au mobile une part importante de calcul de position (ce qui est pris en charge par le serveur pour VRS (SatInfo) et FPK (Teria)) mais il apporte plus de latitude dans les déplacements et les renouvellements de correction.

Tableau 3. Comparaison des principaux réseaux RTK

Réseau RTK	Particularité	Couverture	Calculs position
SATINFO	VRS	Moitié Nord, Bordeaux, Toulouse et pourtour méditerranée	Serveur distant
TERIA	FPK	Nationale	Serveur distant
ORPHEON	MAC	Nationale	Mobile

Précautions : avant d'envisager une méthode de géolocalisation centimétrique en temps réel (et le matériel associé), il est nécessaire de pouvoir répondre aux questions suivantes :

- localisation de l'étude : elle déterminera les réseaux RTK auxquels vous aurez accès ;



- mobilité du dispositif à géolocaliser et instantanéité du calcul de repositionnement : si le mobile est en mouvement rapide il sera certainement plus opportun de dédier les calculs à un serveur distant. Le réseau Orphéon peut proposer d'autres méthodes de calcul ;
- la précision souhaitée : métrique ou centimétrique ? Des commerciaux peu scrupuleux ont pour habitude de vendre des matériels très coûteux qui offrent une précision centimétrique là où vous auriez simplement besoin d'une précision métrique dix fois moins coûteuse, etc. ;
- la transmission GSM des corrections : des pertes de signal de correction peuvent être constatées à cause de l'encombrement du réseau téléphonique. Pour y remédier Orphéon propose son propre réseau de télécommunication.

Résultats et exemple d'application

Couvertures des principaux réseaux et des UE INRA équipées

Les données relatives aux couvertures des réseaux ont été facilement obtenues à partir des sites Internet des réseaux (**Tableau 4**).

Tableau 4. Rappel des couvertures des trois réseaux Teria, Sat-info et Orphéon avec le lien vers les webmaps qui permettent d'interroger les caractéristiques des stations les plus proches de votre site

TERIA	SATINFO	ORPHEON
		
<p>http://www.reseau-teria.com/dossiers_carto_teria.aspx</p>	<p>SAT-INFO réseau GPS RTK / "NORD" : https://maps.google.fr/maps/ms?msid=207056217822984798906.0004b78531435847a92d4&msa=0</p> <p>SAT-INFO réseau RTK / SUD - SUD OUEST : https://maps.google.fr/maps/ms?msid=207056217822984798906.0004d573617813f31876a&msa=0</p>	<p>http://reseau-orpheon.fr/le-reseau-orpheon#couverture</p>

Concernant la géolocalisation des Unités expérimentales équipées le travail aurait nécessité une enquête longue et approfondie auprès de chaque Unité pour avoir l'exhaustivité. La centralisation de ce genre d'information est à l'étude à l'heure actuelle. Cependant vous pouvez vous rapprocher d'Unités déjà équipées et recensées (**Tableau 5**).

Tableau 5. Coordonnées de quelques UE de l'INRA équipées en GPS RTK

Unité	Nom du Directeur d'unité	Contact
UE_DOMAINE EXP. D'AUZEVILLE	GAVALAND André	05 61 28 54 19
UE DIASCOPE_DOMAINE EXP. DE MELGUEIL	DESCLAUX Dominique	04 67 29 06 09
UE_DOMAINE EXP. DE LA MOTTE AU VICOMTE	NEDELEC Gabriel	02 23 48 51 47
UE GRANDES CULTURES INNOV. ENVIRONNEMENT PICARDIE	STREHL Nathalie	03 22 85 75 14
ORE THEIX LAQUEVILLE	LOUAULT Frédérique	04 73 62 44 30

Conclusions et perspectives

La géolocalisation différentielle comme le DGPS permet d'atteindre des précisions métriques avec du matériel peu coûteux. Le développement du RTK et des réseaux privés rendent possible la géolocalisation centimétrique d'un mobile en temps réel. Cette technologie autorise maintenant l'autoguidage d'engins motorisés, une technologie en pleine expansion dans l'agriculture de précision. Ces technologies restent cependant très coûteuses, aussi nous vous conseillons fortement de vous rapprocher d'unités expérimentales déjà équipées pour bénéficier de leur expérience et faire des choix appropriés parmi l'éventail des possibilités disponibles sur le marché de la géolocalisation centimétrique en temps réel également en plein essor. Les tarifs ont tendance à baisser et des baisses importantes semblent se profiler dans un avenir proche avec la « massification » de ce type de service. On peut aujourd'hui avoir un équipement RTK complet pour 8 000 euros environ. Des fabricants annoncent des systèmes à moins de 1 000 \$ (Piksi, <http://swift-nav.com/piksi.html>). Dans le secteur agricole, l'autopilotage des engins est en train de devenir le standard aux USA et en Australie où les surfaces sont très vastes et homogènes.

Références bibliographiques

Wiki : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=GPS_diff%C3%A9rentiel&oldid=97372762

Lahaye R, Ladet S (2014) Les concepts de base des SIG nomades. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp. 28-35.



