

## **comment choisir un système de positionnement par satellites quand on recherche le centimètre dix fois par seconde ?**

**Jean-Pierre Grassien**  
Chef de projet PAD

## **la méthode de sélection du port autonome de dunkerque pour l'acquisition d'un gps cinématique bi-fréquence centrimétrique réel**

**Marc Henaut**  
ingénieur-géomètre

Dans le cadre du projet d'équipement d'une vedette de sondage avec un sondeur multifaisceaux le Port Autonome de Dunkerque fait évoluer ses moyens de positionnement géographique des sondes, afin de passer d'une précision métrique, à une position centimétrique. Les progrès considérables des récepteurs GPS cinématique bi-fréquence centimétrique temps réel, capables de délivrer des positions à la précision centimétrique, à des fréquences supérieures ou égales à 10 Hz, et des précisions millimétriques à des fréquences de l'ordre de 0,2 Hz, ouvrent des perspectives nouvelles notamment en matière de positionnement dynamique de mobiles, de positionnement de sondes bathymétriques et de positionnement d'ouvrages à la mer dont les fluctuations sont très difficiles à mesurer.

Pour faire un choix judicieux, il ne suffit cependant pas de croire les affirmations des notices techniques qui accompagnent les matériels offerts sur le marché. Il s'agit de vérifier méthodiquement les performances des systèmes GPS dit LRK, avant de sélectionner un matériel, coûteux, délicat à mettre en œuvre et qui va bouleverser les usages et la connaissance du domaine assez traditionnel de l'hydrographie.

Le Port Autonome de Dunkerque a donc mis au point sa méthode de sélection avec l'aide de deux ingénieurs Alexis Badaoui, consultant et Marc Hénaut jeune ingénieur géomètre, sous la direction de Jean Pierre Grassien Chef de Projet au Port Autonome de Dunkerque, pour faire la comparaison des systèmes présentés dans le cadre d'un appel d'offres en vue de la fourniture d'un système de positionnement centimétrique par satellite à une fréquence supérieure à 5 Hz compte tenu de l'offre.



## Les objectifs du système de positionnement

Les besoins que le futur système de positionnement doit résoudre, se résument ainsi :

- délivrer en dynamique, à une cadence la plus élevée possible, une position exacte la plus précise possible et la plus "réelle" possible, dans les trois dimensions,

- délivrer en statique, une position la plus précise possible et la plus stable possible, supérieure à 10 Hz, 20 Hz si possible.

Il s'agit d'une part de réduire au minimum, l'erreur sur le positionnement des sondes bathymétriques par deux moyens qui ont recours au système de positionnement :

- le positionnement précis de la sonde elle-même en X et Y,
- la correction apportée à la sonde mesurée par le sondeur par rapport à la verticale du navire, les angles de roulis, de tangage, de cap et les mesures du pilonnement et de la marée pouvant être mesurés suivant une technique complexe que le Port Autonome de Dunkerque met au point.

## Un questionnaire préalable

Avant de procéder à la sélection des candidats sur leurs références, nous avons voulu en savoir plus sur la conception fonctionnelle des matériels proposés. Un questionnaire a été mis au point permettre aux candidats de s'exprimer au mieux en fonction de leur offre et de leur présenter nos besoins sans les imposer, ainsi que pour lever quelques doutes survenus à la lecture des notices techniques de présentation. Les questions posées ont été les suivantes.

- 1 - Le D-GPS est-il capable de donner la position centimétrique mesurée (et non interpolée) en x, y, z à une cadence supérieure ou égale à dix fois par seconde. Quelle est sa cadence?
- 2 - Quel est le temps de latence?  
Quel est l'intervalle de temps entre la prise de mesure et la délivrance de la position sur l'interface numérique?
- 3 - Quel est le temps de convergence vers la précision centimétrique après un masquage de courte durée?  
Quel est le nombre de canaux simultanés acquis en permanence?
- 4 - Dans le message délivré en sortie, y a-t-il une indication sur le type de précision centimétrique, décimétrique ou métrique?
- 5 - Le D-GPS est-il utilisable pour trouver la position de la station **de référence** sans faire appel à des mesures complémentaires, notamment une implantation topographique par un géomètre? Décrivez la procédure de localisation en coordonnées de la station **de référence**.
- 6 - Le D-GPS délivre-t-il la position X, Y, Z avec la précision centimétrique en coordonnées LAMBERT 2 (IGN80)? Peut-on choisir ou définir son système de projection?
- 7 - Peut-on connaître avec le D-GPS, les éphémérides des satellites (ceux qui sont utilisables à différents moments de la journée pour garantir la précision).
- 8 - Faut-il réserver une fréquence radio pour les essais?  
Quel est le débit de la communication radio 1200b, 2400b, 9600b. On veut connaître le débit de la communication entre les modems à l'émission et à la réception et entre le GPS et le modem.
- 9a - Y a-t-il un décalage en x, y, z dans la trajectoire du point localisé au cours d'un changement de configuration satellitaire?

9b - Peut-on appliquer les corrections **venant de la station de référence**, en temps différé?

9c - L'équipement mobile doit pouvoir permettre de faire simultanément les corrections en temps réel et la récupération par un ordinateur connecté des données de positionnement corrigées et des données brutes qui permettront de faire des corrections exhaustives en temps différé.

10a - Le D-GPS accepte-t-il des équipements radios courants entre la station et le récepteur mobile?

10b - Quelle est la validité dans le temps d'une correction? Le but étant de diminuer le débit de la transmission radio.

11 - Quels sont les conditions limites d'utilisation (vitesse du mobile, accélérations en x, y, z, accélérations angulaires)?

12 - Quel est le mode d'alimentation électrique et son autonomie?

Les réponses à certaines questions méritaient d'être vérifiées c'est pourquoi, nous avons voulu aller plus loin qu'une simple démonstration en réalisant des tests.

## Les conditions de tests

Les conditions des tests devaient être objectives, c'est-à-dire opposables à ceux qui proposaient leur matériel. Elles ont été acceptées par les candidats.

Les mesures effectuées devaient évidemment être vérifiables et comparables, non pas seulement entre elles mais par rapport à une réalité objective définie préalablement.

Les systèmes proposés devaient pouvoir être analysés au plan conceptuel et au plan fonctionnel et vérifiés au plan de la réalité des performances annoncées.

## Deux séries de tests en statique et en dynamique

Il a surtout été important que les deux systèmes réalisent les mêmes tests dans des conditions similaires. Selon les possibilités du GPS deux catégories d'essais statiques et trajectographiques ont été réalisées.

Pour tous les tests, la station GPS de référence a été mise en place sur un point géodésique de l'IGN très stable et favorisant l'observation des satellites et la liaison radio.

Durant tous les essais les positions du GPS mobile ont été enregistrées soit sur un PC portable, soit sur le système lui-même, si sa capacité d'enregistrement était suffisante, à des cadences variables selon les tests, voire selon des cadences différentes pour les mêmes tests. De plus, les observations ont été continuellement sauvegardées en temps réel puis en post-traitement.

## Les tests statiques

### Observations de points géodésiques

On a observé plusieurs points du réseau géodésique du PAD sur des jours consécutifs. Les points ont été observés à des heures différentes selon les jours, c'est-à-dire que l'on a modifié le sens d'observation du réseau tous les jours.

Pour tester la vitesse de rattachement des systèmes, on a effectué des retournements de l'antenne. On a chronométré le temps de rattachement que l'on a retrouvé aussi dans les fichiers d'enregistrements datés.



## Mesure d'une base d'étalonnage

On dispose sur la digue de Dunkerque-Malo d'une base d'étalonnage constitué de quatre points situés à 72 m 028, 527 m 987 et 350 m 976 avec des dénivelées de +0,011 m - 0,127 m et +0,409 m.

La vétusté de la base n'a pas permis d'utiliser les données de haute précision diffusées.

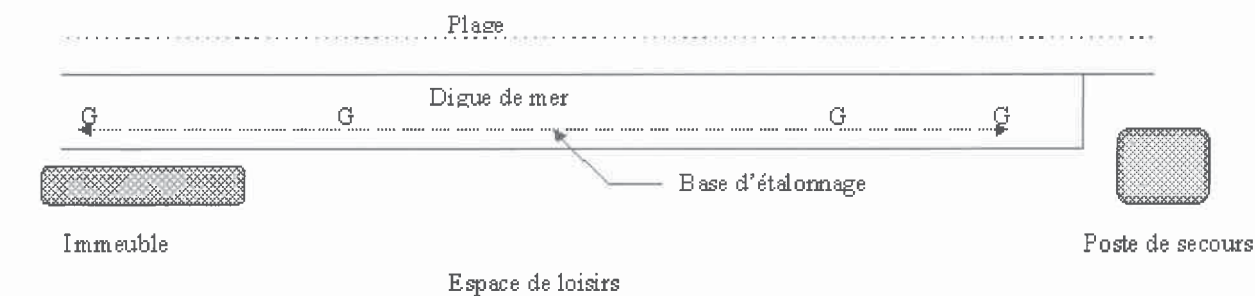
Cette base a été observée par conséquent par moyen topographique classique afin de déterminer à nouveau les distances d'étalonnage avec précision.

La station GPS itinérante a été déplacée sur les autres repères. On a réalisé une mise en station à chaque fois, pour pouvoir observer le point quelques minutes.

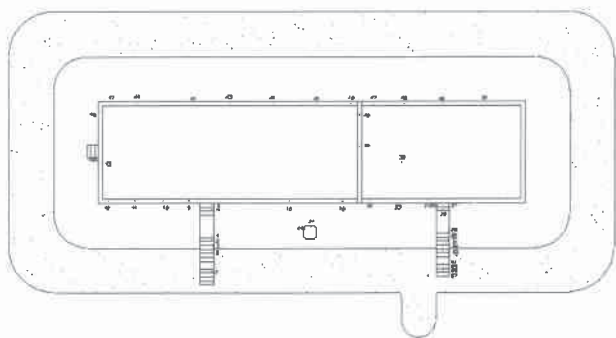
## Test sur le micro-canevas altimétrique

Il a été mis en place un micro canevas altimétrique sur un ancien pont de levage, présentant des opportunités de dénivelées. Sur ce site, 50 points ont été mesurés précisément. On disposait donc, à partir d'un point de référence, de toutes les dénivelées.

Le test a consisté à observer tous les points avec le récepteur mobile. L'observation s'effectuant de manière continue, c'est-à-dire que le récepteur enregistrerait les données durant tout le test et que les points furent « topés ». La station de référence était située à 13 km de la zone de tests et permettant ainsi de vérifier la tenue des performances sur un vecteur important. On disposait donc de l'altitude de tous ces points. On en a tiré les dénivelées pour une comparaison.



	<b>G5-G6</b>	<b>G6-G8</b>	<b>G8-G9</b>
Distance	72,028 m	527,0987 m	359,976 m
Dénivelées	0,011 m	- 0,127 m	0,409 m



<b>Points</b>	<b>Dénivelée</b>
REF I	<b>0,0000</b>
REF II	0,0351
1	2,3484
2	2,1897
3	2,0358
4	1,8759
5	1,7199
6	1,0979
7	2,6244
8	2,7720

## Les tests dynamiques

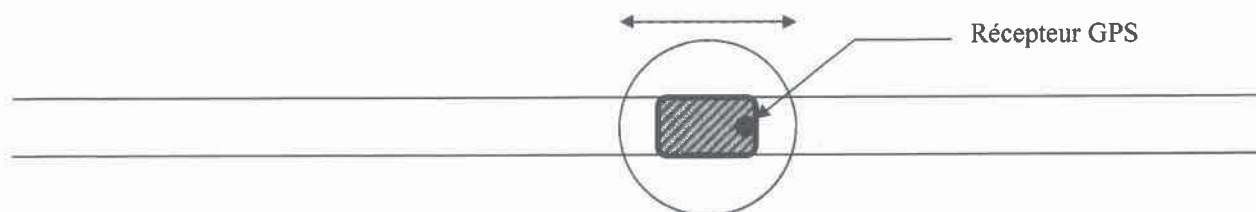
### Tests trajectographiques (Photo de la grue Calillard)

Des essais ont été réalisés sur cette grue de quai, une Caillard de 10 t dont le sommet de la flèche culmine à 34 m 50, la cabine est à 16 m du sol.

### Test sur la grue

Le Port Autonome de Dunkerque dispose de grandes grues de quai circulant sur des rails rectilignes. L'idée de mettre un récepteur sur une grue est venue de la certitude de pouvoir déterminer une trajectoire par le calcul et par le constat mesurable et chronométrable de l'attitude du récepteur sur un mobile.





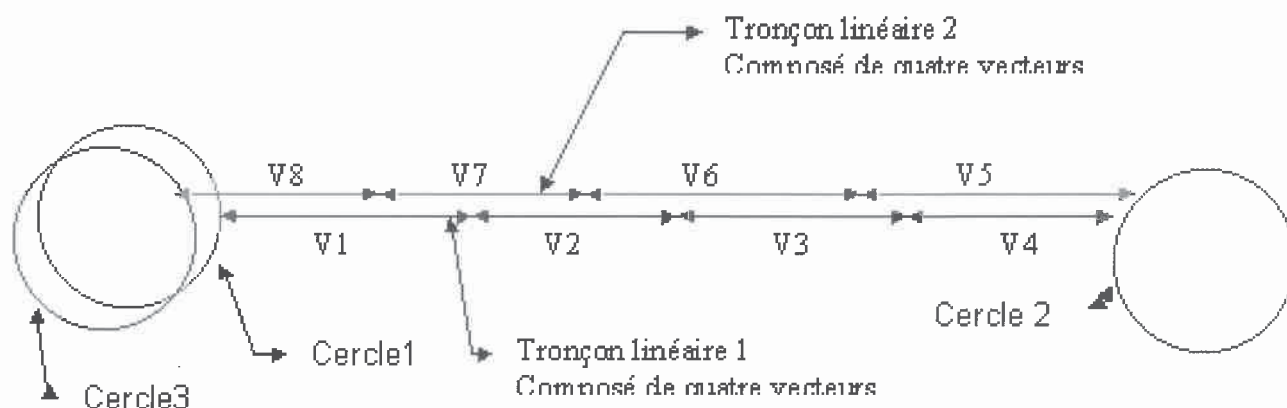
### Darse n°3

*Schéma du site : (ci-dessus)*

Le récepteur mobile a été placé contre les rambarde de sécurité sur la plate forme supérieure de la grue. Celle-ci située à 17 mètres de hauteur est dégagée et permet une réception maximale. La grue effectuera plusieurs mouvements de rotation et de translation sur les rails. Lors des différents arrêts, des marques au sol ont été réalisées.

Il faut bien noter le fait que la grue n'a pas un mouvement souple. À chaque arrêt de la grue, le mobile est contraint à des secousses qui occasionnent donc des déplacements. Il a fallu tenir compte de ce facteur pour apprécier les mouvements relatifs du mobile.

### Décomposition de la trajectographie



La trajectographie effectuée par le mobile a été projetée sur les trois plans du système spatial de référence.

La projection dans le plan XY a donné le déplacement du mobile projeté sur le sol. On a retrouvé donc les mouvements effectués avec la grue.

On a calculé les vitesses de déplacements du mobile dans les trois plans du système spatial de référence.

Théoriquement, la vitesse devait être nulle lorsque le mobile était à l'arrêt.

Pour chaque tronçon linéaire le gisement (direction) général a été calculé puis le gisement de tous les vecteurs le composant. La comparaison des deux a permis de calculer des écarts angulaires ou normaux aux déplacements.



La somme des écarts devait être proche de zéro puisque les points devaient statistiquement se répartir autour des trajectoires théoriques.

Pour les mouvements circulaires, on a étudié les écarts sur les rayons. Les différents points d'arrêts effectués pendant ces mouvements ont permis de déterminer les centres et les rayons des cercles. Pour chaque point des cercles, on a calculé ensuite le rayon. Par comparaison avec le rayon général, on disposait ainsi des écarts des points par rapport au cercle théorique.

Comme pour les mouvements linéaires, la somme des écarts par rapport à la trajectoire circulaire théorique devait être nulle et les écarts devaient se répartir statistiquement de part et d'autre du mouvement calculé. Néanmoins la définition

du cercle restant théorique, on n'a pu complètement se fier à un jugement sur la somme des écarts.

Lors du test de la grue, chaque arrêt de celle-ci dans les mouvements linéaires a été marqué au sol puis chaîné. On disposait donc d'éléments de comparaison avec les données issues du GPS.

### Test sur la vedette

Un système GPS a été installé sur la vedette de sondage bathymétrique "FREGATE" (longueur 8 mètres, largeur 5 mètres) pour apprécier la tenue des performances annoncées en réception et en fourniture de position dans ces conditions.



Les sites d'essais n'étant pas soumis à des effets de marée, puisqu'ils ont été réalisés dans l'enceinte portuaire, les heures d'observations n'avaient donc pas d'importance pour respecter l'égalité des conditions d'essais.

Sur trois sites, la vedette a suivi des trajectoires approximatives prédéfinies.

Le capteur a été installé sur une partie dégagée de la vedette. Il a rencontré des contraintes importantes causes de perturbations, des masques des masses métalliques, des liaisons radios parasites, etc.

Les trajectographies réalisées sur les plans d'eau ont démontré la qualité des systèmes à fournir un positionnement précis et en continu malgré les masques et les perturbations engendrés par un environnement hostile.

En effet dans les secteurs portuaires traversés par la vedette, un portique à charbon situé à 80 mètres de hauteur,

un dock flottant de trois cents mètres de long et de 40 mètres de hauteur et de multiples interférences radios sont autant de risques de dégradations de performances séduisantes sur le papier.

Par ailleurs, nous avons testé la capacité du système à fournir des données sur des sorties numériques différentes du récepteur.

La vitesse de raccrochement en conditions réelles a pu être déterminée grâce au dépouillement des observations des différentes trajectographies.

Les objectifs des tests							
OBJECTIFS	TESTS	Tests statiques				Tests cinématiques	
		Observation des points géodésiques	Mesure d'une base d'étalement	Mesure d'un micro canevas altimétrique	Test d'initialisation	Test sur la grue	Test sur la vedette
Cohérence entre les positions fournies par le récepteur et les positions connues des points tests		x	x	x		x	
Capacité de l'ensemble à fournir les positions selon les précisions demandées et les cadences requises		x	x	x		x	x
Capacité de l'ensemble à fournir les informations demandées en simultané sur les différentes sorties RS232 sans dégradation de fonctionnement							x
Vérification du Latency							x
Vérification de la tenue des performances en fonction de l'éloignement de la station différentielle en milieu portuaire		x		x			x
Capacité du système de recalcul des positions en léger différé							x
Test de la conversion de Lambert		x					
Vitesse de raccrochement et de convergence à la précision centimétrique					x		x
Capacité du système à travailler sans filtrage et sans extrapolation et prédiction						x	
Capacité du système à travailler en continu						x	x
Répétabilité des mesures		x		x			
Capacité du système à indiquer le niveau de précision des données fournies							x

## Les résultats

Sans porter de jugement de valeur sur les matériels testés, malgré le soin que chaque candidat y a apporté, les tests se sont révélés, malgré tout, insuffisants pour juger complètement de leur adéquation à notre problématique.

La conception des tests n'a pu parfois déterminer la réalité des positions mesurées, car beaucoup de causes d'erreurs indépendantes des systèmes, n'ont pas été éclaircies, notamment les problèmes dus au géoïde et à la conversion entre les systèmes WGS84 et IGN80. Par ailleurs malgré un chronométrage rigoureux, le fameux "latency" qui se révèle bien complexe à déterminer.

On s'aperçoit bien que la date affectée à une mesure de position est un élément essentiel et difficile à expliciter dès lors que l'on atteint les limites des moyens de calcul des systèmes proposés. Quelle est la valeur objective d'une mesure dont on ne sait finalement pas exactement si elle résulte d'un constat corroboré à une mesure résultant elle-même d'une prédiction, cette dernière étant fondée sur une interpolation de positions

passées? L'étonnante stabilité de certains résultats, peut engendrer le doute, mais reconnaissons que nous abordons là une utilisation bien particulière qui consiste à positionner un mobile dans l'espace en temps réel ou en léger différé.

Il est néanmoins essentiel de démontrer par quelques graphiques que ces tests ont pu apporter des éléments d'interrogation sur les systèmes GPS auxquels les constructeurs n'ont pas de réponse immédiate pour des raisons bien compréhensibles.

### Exemple de résultat en altimétrie :

Les observations sur le canevas altimétrique étaient importantes puisque le système choisi doit au final servir d'appui pour des données bathymétriques, la composante verticale du GPS est donc pour nous essentielle. L'estimation de la précision des systèmes en altimétrie a donc été soignée. Les écarts constatés, comme le montre le graphique suivant, trouvent des explications dans bien des directions (conditions météorologiques, constellation satellitaire, vecteur de base important, etc.) mais démontre la problématique de l'altimétrie de précision par GPS.

## DOMAINE D'APPRÉCIATIONS

### Qualités techniques générales

Performances Radio  
Adéquation logicielle  
Compatibilité entre systèmes

### Prestation Terrain

Réalisation des objectifs demandés  
Suivi des tests

Mise en œuvre station de référence  
Mise en œuvre grue  
Mise en œuvre vedette  
Mise en œuvre statique

Liaison radio  
Enregistrements des données  
Tenue des batteries

### Résultats tests

Fourniture des résultats  
Suivi des calculs

#### Réseau de points

Différence temps réel/post-traitement  
Différence deux moments d'observations différents  
Précision sur le réseau

#### Base d'étalonnage

Précision intasèque  
Différence temps réel/post-traitement  
Trajectographie d'un point statique

#### Micro canevas altimétrique

Précision altimétrique  
Différence temps réel/post-traitement  
Différence deux moments d'observations différents

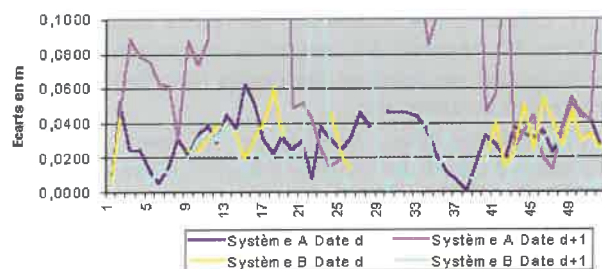
#### Trajectographie grue

Déplacement du mobile dans les différents plans  
Vitesse de déplacements dans les plans  
Trajectoire linéaire  
Trajectoire circulaire  
Distance mesurées

#### Trajectographie Vedette

Suivi général de la route  
Zone de perturbations  
Raccrochements de la précision centimétrique  
Indication de la précision

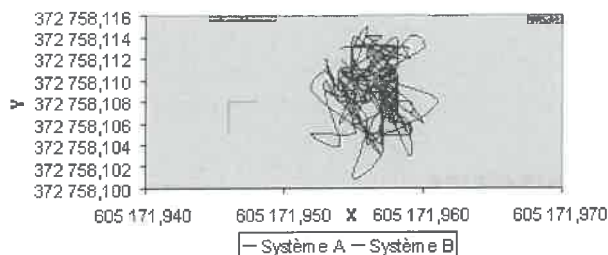
### Appréciation générale



Précision altimétrique temps réel

### Exemple de résultat en trajectographie :

Les observations sur un point de canevas géodésique ont été traitées en trajectographie. Le graphique suivant en résultant est significatif de différences entre deux systèmes.



Trajectographie d'un point statique

## Conclusion

Vouloir comparer des systèmes GPS entre eux est déjà en soi un challenge technique important, sinon original, l'opportunité de la structure et des moyens d'un grand port l'ont permis dans une certaine mesure qui reste insuffisante. Il a été difficile de définir des éléments extérieurs de comparaison qui permettraient d'apprécier réellement les qualités de précision, de cadence et de fiabilité de systèmes GPS centimétrique temps réel. C'est pourquoi les tests et le dépouillement des données enregistrées se doivent d'être (et ils l'ont été) très rigoureux.

Certes les tests réalisés ont permis de collecter des informations en quantité et en qualité très variées et de vérifier qu'au moins la fréquence de 10 Hz de fourniture de mesures à la précision centimétrique existait bien, que la précision centimétrique est réelle, et que les mesures à la précision centimétrique sont maintenues à une distance supérieure à 15 km de la station de référence. Les vérifications concernant la mesure du Latency d'une part et la présence ou absence d'interpolation ou d'extrapolation, d'autre part, n'ont pas été suffisantes (du fait de la capacité d'enregistrement de données dont nous disposions). L'exploitation de ces données a posé de nombreux problèmes, non pas à cause de la quantité de mesures, mais parce que le GPS est influencé de nombreux facteurs d'autant plus apparents que la fréquence des mesures est élevée. Ces facteurs influents peuvent être éliminés en ce qui concerne les problèmes de géoïde. Pour ceux qui dépendent du milieu, ils doivent être constamment surveillés. À cet égard la liaison radio entre la station de référence et le récepteur mobile est un élément qui demande beaucoup d'attention.

Depuis, le Port Autonome de Dunkerque a fait l'acquisition de trois récepteurs "mobiles" du même fournisseur, ce qui a permis encore de faire des constatations et des vérifications intéressantes. En tout cas les applications du GPS LRK en dynamique sont nombreuses dans le milieu portuaire, que ce soit dans les domaines de la bathymétrie et de la topographie mais aussi dans le domaine de la manutention et de la conduite des navires. Nous tiendrons les lecteurs de la revue X, Y, Z informés de ces développements.