

Le positionnement par satellite avec le MAGNAVOX MX 1502

*Patrice GAUBERT
Ingénieur Géomètre ETP
Sté Wild + Leitz France*



La présentation du Système de positionnement par satellite Magnavox MX 1502 au colloque de Versailles, les 25 et 26 novembre 1982, a été ressentie par beaucoup comme marquant l'entrée de notre profession dans l'ère spatiale.

Le présent article a pour but de montrer les possibilités, encore trop peu exploitées par les organismes français, d'obtenir des déterminations de positions de points isolés ou de sommets de canevas à l'aide du Système transit, grâce à l'appareil Magnavox MX 1502.

I — HISTORIQUE

Quand Spoutnik 1 fut lancé en 1957, des chercheurs américains qui suivaient les signaux radios émis par le satellite constatèrent un important effet Doppler. Ils mirent au point des algorithmes pour déterminer la trajectoire complète du satellite à partir de mesures Doppler soigneusement effectuées en une seule station terrestre.

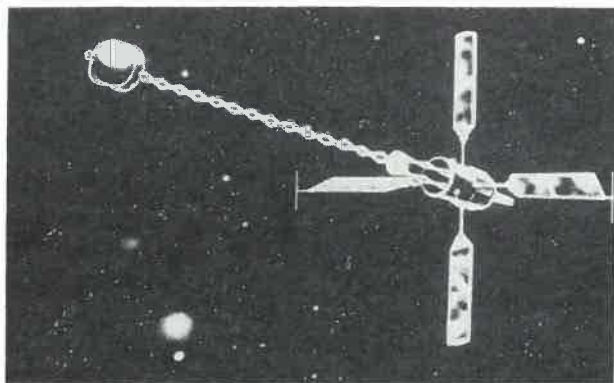
On songea ensuite à renverser le procédé ; et à déterminer la position d'une station par mesure de l'effet Doppler sur les signaux émis par un satellite dont l'orbite serait parfaitement connue. Lancé en 1958 sous le nom de Transit le système devint opérationnel en 1964 pour les armées américaines, puis s'ouvrit aux utilisateurs civils en juillet 1967.

II — DESCRIPTION

Le Système Transit se compose de 5 satellites artificiels en orbite circulaire, polaire, à environ 1 075 km d'altitude, qui font le tour de la terre en 107 minutes. Cette constellation d'orbites forme une cage à l'intérieur de laquelle la terre tourne.

Quand un satellite apparaît au-dessus de l'horizon, on peut obtenir une position de récepteur.

Le satellite émet en permanence deux fréquences stables et bien calibrées proches de 150 et 400 MHz.



1) Message diffusé par le satellite

Un message que le satellite a en mémoire est diffusé vers la terre par modulation des phases des ondes porteuses. Ce message radio se répète et est transmis en continu. Il dure exactement 2 minutes, commençant et se terminant à chaque minute impaire.

Il se compose de 6 103 bits binaires, organisés en 6 colonnes et 26 lignes de mots de 39 bits, plus 19 bits à la fin. Les 25 derniers bits de chaque message, composés de 23 "1" encadrés de 2 "0", forment un message de synchronisation (top horaire) précis, indiquant les minutes impaires. C'est en reconnaissant ce mot que le MW 1502 se recadre sur le message.

Les paramètres de l'orbite se trouvent dans les 22 premiers mots de la colonne 6. Les paramètres contenus dans les lignes 9 à 22 ne sont changés que quand un nouveau message est injecté en mémoire. Ils définissent une orbite elliptique.

Les mots des lignes 1 à 8 se décalent d'une ligne toutes les 2 minutes, car ils décrivent les variations de la trajectoire par rapport à l'orbite elliptique toutes les 2 minutes.

2) Principe du calcul de position

En recevant les deux signaux on peut utiliser les informations suivantes pour le calcul d'un point :

- a) position du satellite,
- b) l'effet Doppler sur le signal reçu,
- c) les tops horaires précis,
- d) la correction de la réfraction ionosphérique, obtenue par combinaison des deux fréquences Doppler.

Le message reçu définit la position du satellite toutes les 2 minutes, et aux temps intermédiaires par interpolation, utilisant comme top horaire certains bits au cours du message.

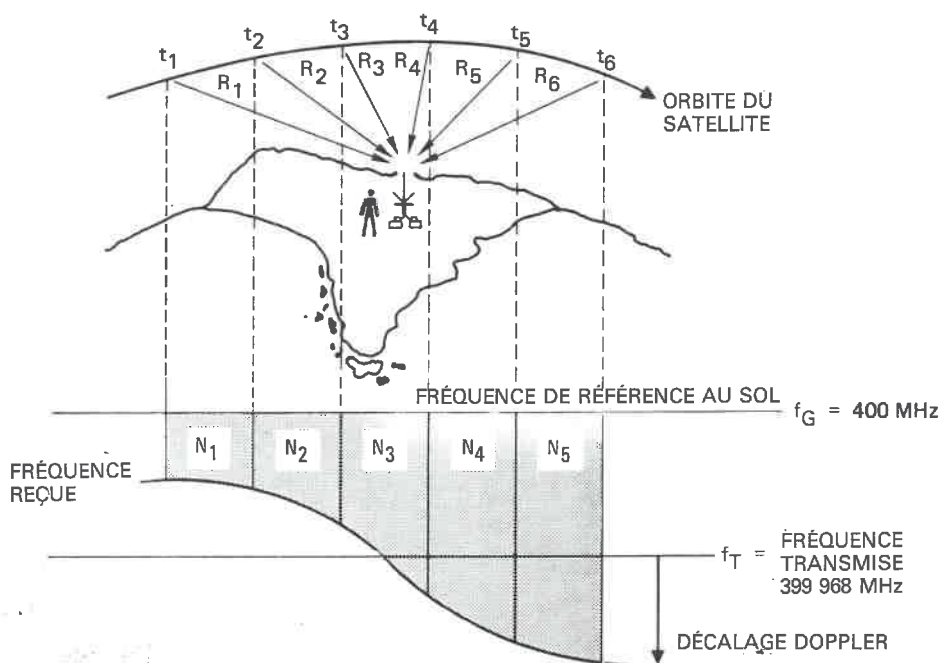
Pour obtenir une position, le MX 1502 mesure sa position par rapport à la position connue du satellite. Ceci se fait en comptant le nombre de cycles-Doppler entre 2 tops horaires.

Un comptage Doppler entre deux tops horaires reçus nous donne la variation de la distance entre le satellite et le MX 1502 dans cet intervalle. La position est calculée par comparaison entre la variation de distance qui se serait produite entre la position estimée du MX 1502 et la position connue du satellite, et la variation de distance qui s'est réellement produite et a été constatée par le comptage Doppler. Le MX 1502 ajuste sa propre position jusqu'à ce que la variation de distance calculée s'adapte au mieux à celle mesurée. Un paramètre de fréquence doit aussi être pris en compte. Un minimum de 3 paramètres sont déterminés dans le calcul. Ces paramètres sont la latitude, la longitude, et la fréquence.

Pour calculer un point en 2 dimensions le MX 1502 doit d'abord obtenir les valeurs suivantes :

- a) orbite du satellite,
- b) comptage Doppler,
- c) altitude,
- d) estimation de la latitude et longitude de la station.

Les paramètres d'orbite et les comptages Doppler sont obtenus automatiquement par le MX 1502.



Passage d'un satellite

L'altitude et la position estimées sont entrées manuellement par l'utilisateur pendant l'initialisation.

Quand le MX 1502 a tous les éléments, il calcule la position en 10 étapes.

1) Vérifie s'il y a eu injection de nouveau message au cours du passage.

2) Sélectionne des données en exploitant les redondances.

3) Corrige les données Doppler de la réfraction.

4) Calcule la position du satellite.

5) Estime la position du récepteur.

6) Calcule les distances Satellite/Récepteur aux tops horaires.

7) Compare les variations de distance calculées et observées par effet Doppler.

8) Ajuste l'estimation de la position du récepteur, et répète les pas 5, 6, 7 jusqu'à ce que les éléments calculés et observés s'adaptent.

9) Calcule la position du récepteur.

10) Enregistre la position sur la cassette.

Les données Doppler des 2 canaux sont combinées pour obtenir une information corrigée de la réfraction. Le MX 1502 calcule aussi les coordonnées cartésiennes de la station, puis la distance satellite/récepteur à partir de ces jeux de coordonnées, et la compare à la valeur issue du comptage Doppler (étape 7). En calculant les dérivées par rapport à la latitude et la longitude, le MX 1502 détermine les corrections à apporter à la position estimée du MX 1502 pour minimiser par moindres carrés les différences entre éléments calculés et observés.

3) Précision

On obtient dès le premier message de satellite une précision suffisante pour vérifier que l'on a bien stationné l'endroit désiré : le premier passage acceptable donne une précision de 37 m (1 σ) si l'altitude est connue au départ à ± 20 m.

La précision s'améliore par multiplication des passages.

Les erreurs sont en grande part aléatoires ce qui permet d'obtenir une précision, par multiplication des passages des satellites, de 3 à 5 mètres. C'est la technique du point isolé qui met en œuvre un seul appareil.

Un réseau de poursuite des satellites calcule leur trajectoire et l'extrapole sur 16 heures, puis l'injecte à chaque satellite qui malheureusement ne suit pas exactement cette trajectoire prédite, ce qui provoque l'imprécision sur le point au sol. Les techniques dites de translocation exploitent le fait que ces erreurs sont fortement corrélées pour 2 récepteurs suivant le même passage de satellites pour relier avec précision une station inconnue à un point connu. (A mieux que 1 mètre).

L'obtention a posteriori d'éphémérides précises est un autre moyen d'améliorer les résultats, mais est réservée à certains organismes.

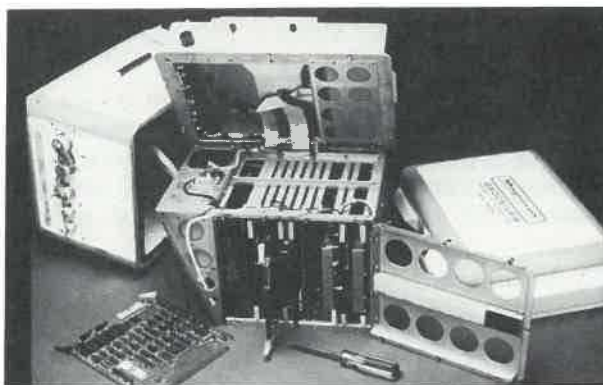
Un calcul en bloc d'un réseau permet d'atteindre des précisions de 30 cm.

III — RÉCEPTEUR MAGNAVOX MX 1502

1) Description

L'appareil se compose d'un récepteur calculateur enregistreur de 19 kg et d'une antenne/préampli démontable de 7,7 kg présentés en coffret. Il est conçu pour résister aux intempéries, est étanche, et même flotte si son couvercle est en place. Sa fiabilité est de l'ordre de grandeur de 10 000 heures MTBF (temps moyen entre pannes).

Un test interne automatique quotidien détecte les éléments qui seraient défectueux ; l'échange de ces éléments ne nécessite que 3 tournevis !



2) Mise en œuvre

La mise en œuvre de cet appareil s'effectue d'une manière incroyablement simple.

On arrive sur le terrain avec les 2 coffrets et une alimentation 12 volts.

On ouvre le coffret de l'antenne/préampli, visse l'ensemble et l'installe sur le point à relever.

On branche le câble entre le préampli et le coffret du récepteur, que l'on branche sur le 12 volts.

On met l'appareil en route ; lui-même pose des questions, auxquelles on répond par le clavier :

- nombre de satellites à écouter,
- numéro de la station,
- mode d'utilisation.

On a le choix entre les 5 modes suivants :

a) Mode Standard

Mode normal pour l'écoute de satellites, et le calcul en 2D et 3D des points isolés.

b) Mode off line

Pour le calcul de bandes enregistrées sur un site. Le récepteur est déconnecté.

c) Mode Remote

(Pour la translocation en temps réel).

Réception des satellites, des valeurs de translocation obtenues par télécommunication d'un autre 1502, et calcul en 2D/3D par point isolé et translocation.

d) Mode Control

(Pour la translocation en temps réel).

Réception des satellites, calcul en 2D et 3D point isolé, et télécommunication des données vers le poste 1502 Remote.



e) Mode Navigare

Pour la navigation sur mer ou sur terre.

L'utilisateur sélectionne le mode, et spécifie vitesse et direction du mouvement du MX 1502.

Le MX 1502 calcule une position à l'estime qui sera corrigée par les résultats 2D après passages du satellite. La distance et l'azimut vers un point à atteindre peuvent être calculés en utilisant soit l'orthodromie, soit la loxodromie.

Les résultats de navigation estimée peuvent être affichés à la demande et imprimés à intervalles donnés en utilisant l'option imprimante.

- estimations à 2 degrés près de la latitude et de la longitude,
- altitude au-dessus du niveau de la mer du point de référence marqué d'une bande rouge sur l'antenne,
- l'heure de greenwich à 1/4 d'heure près, et la date, si l'appareil ne les a pas.

Toute autre initialisation est facultative.

3) Opérations d'initialisation facultatives

A) On peut d'une part introduire dans l'appareil divers paramètres éventuellement utiles pour un calcul postérieur au bureau.

B) On peut d'autre part introduire les éléments d'un ellipsoïde de référence local. On obtient alors longitude et latitude, et même coordonnées UTM dans ce système directement sur le MX 1502.

C) On peut par ailleurs apprendre au MX 1502, s'il ne les a déjà les éphémérides approximatives des satellites, en faisant lire par l'appareil une cassette enregistrée il y a moins de trois mois par un MX 1502. L'appareil en extraira les éphémérides des satellites, et son unité de calcul les traitera avec les valeurs d'initialisation du site, pour afficher les heures de passages des satellites visibles du site et la géométrie de ces passages.

Le triple intérêt de cette information est :

- a) de faire ce calcul avant la campagne de mesure pour organiser au mieux le circuit de site à site. Et sur le site pour estimer le moment où on aura accumulé suffisamment de passages,
- b) sur le site de situer le 1^{er} passage car on a toujours intérêt à examiner ce 1^{er} passage, ne serait-ce que pour vérifier le choix du site,
- c) l'appareil exploite automatiquement ces calculs pour se mettre en sommeil pour économiser l'énergie, entre deux passages.

Si l'on n'a pas ces éphémérides, l'appareil va alternativement se mettre à l'écoute quelques instants, pour ne pas manquer un passage, puis se mettre en sommeil 2 minutes s'il n'a pas décelé de satellite, ce qui permet de limiter la consommation jusqu'à l'obtention de toutes les éphémérides.

4) Mesures et Repli

Que l'on utilise ou non ces possibilités, on laisse maintenant le MX 1502 fonctionner le temps nécessaire. Il traite après chaque passage acceptable l'ensemble des informations reçues depuis le début



de la station, et enregistre les données et les résultats.

Le prochain moment important sera le repli.

On note les derniers résultats ; leur précision ; le nombre de passages acceptables :

- si l'on travaille en point isolé ou en translocation en temps réel les coordonnées sont prêtes à être exploitées, ou livrées,

- si l'on travaille en translocation sur le terrain, mais pas en temps réel, on fait lire la cassette du point inconnu par le MX 1502 du point connu, qui fera les calculs.

On peut aussi retraiter les cassettes au bureau sur un ordinateur indépendant. Cela ne paraît indispensable que dans le cas d'une compensation en bloc pour l'obtention de coordonnées à 30 cm près.

Que faire sinon des cassettes ?

Les archiver, les livrer au client, les traiter au bureau sur le 1502 après la campagne, ou les réutiliser, tout en en gardant une pour y lire les éphémérides lors de la prochaine campagne.

Le repli physique, comme l'installation, ne prend que quelques minutes. Notons que laisser l'appareil en Stand by pour le temps d'un transport présente l'avantage de lui faire conserver certains paramètres comme heure, date, les éphémérides, et de maintenir l'oscillateur interne.

IV — MÉTHODE PERMETTANT D'OBTENIR UN POINT EN 3 DIMENSIONS

Le MX 1502 offre deux méthodes pour déterminer une position 3D, le "point" 3D et la translocation. Le point offre une précision meilleure que 5 m emq, la translocation mieux que 1 m emq.

1) Le Point 3D

C'est la méthode de base du positionnement par satellite. Elle consiste en l'accumulation de passages de satellites dont on connaît les éphémérides. Elle ne nécessite qu'un appareil, en un seul site, pour obtenir latitude, longitude, et altitude, dans le système satellite.

S'il y a 5 satellites opérationnels, on obtient 10 passages de satellites de 6 h 30 à 16 h suivant la latitude, et 50 passages de 32 à 79 heures.

La précision finale dépend du nombre de passages suivis.

2) La translocation

La translocation utilise des données reçues simultanément par deux MX 1502 installés en 2 sites différents pour relier avec précision un site à l'autre. L'avantage de la méthode est que la position relative peut être établie précisément avec très peu de passages, même pour des points éloignés de plusieurs centaines de kilomètres.

La translocation détermine une position en 3 dimensions en compensant les erreurs d'une détermination individuelle. Les principales sources d'erreurs d'une détermination individuelle sont : la définition de l'orbite donnée par le satellite, les erreurs troposphériques résiduelles, et les erreurs de réfractions ionosphériques. Une compensation pré-

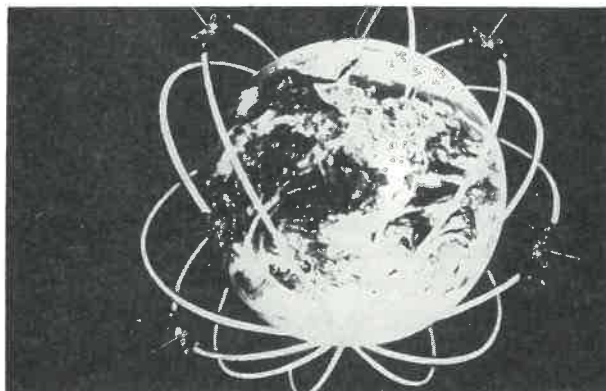
cise de ces erreurs est possible quand le même signal est reçu en des sites, même éloignés de centaines de kilomètres.

Dans sa forme la plus simple, la méthode de translocation nécessite 2 MX 1502. Une unité est installée sur une position connue, (site de contrôle) en un système géodésique donné. On aura pu déterminer cette position par positionnement 3D, translocation antérieure, ou par la connaissance de coordonnées d'un point géodésique classique.

L'autre unité occupe le point inconnu (site éloigné, ou Remote) dont on cherche les coordonnées. Les données satellite reçues simultanément par les 2 unités sont calculées par n'importe quelle unité MX 1502.

La translocation profite de la corrélation des erreurs résultant sur les 2 antennes pour relier le point inconnu au point connu à mieux que le mètre après relativement peu de passages.

Un MX 1502 en site de contrôle peut servir au calcul de la position d'autant de MX 1502 éloignés que l'on souhaite, pourvu que l'on traite à chaque fois des données communes.



La translocation peut être calculée en off-line ou en temps réel. En mode off-line, les données sont accumulées sur cassette par chacune des unités tant contrôle que éloignées, et les cassettes sont physiquement apportées à un MX 1502 pour le calcul.

En temps réel, le MX 1502 au site contrôle envoie les données en temps réel (c'est-à-dire dès qu'elles sont calculées à partir du passage d'un satellite) par un canal de télécommunication, à un ou plusieurs sites éloignés (Remote) pour que chacun calcule immédiatement la translocation.

Le programme intégré au MX 1502 utilise la translocation par semi arc-court qui consiste à recalculer en travaillant sur 3 degrés de liberté, l'orbite du satellite, puis à calculer le point inconnu avec ces nouvelles valeurs, pour obtenir des résultats à mieux que le mètre.

V — DÉFINITION DES POSITIONS

1) Positions mémorisées

Huit jeux de coordonnées de positions (latitude, longitude et altitude) sont gardés par le MX 1502 : position introduite, position de référence, position du point de contrôle, position 2D, position 3D (point),

position par translocation, position à l'estime, position du point à atteindre.

Toutes ces coordonnées s'entendent pour le centre électrique de l'antenne (marque rouge).

Position introduite (input)

La position introduite est le dernier jeu de coordonnées entré au clavier.

Position de référence

La position de référence est normalement la position introduite utilisée comme référence pour le calcul en 2D, en 3D ou par translocation. La précision des calculs dépend de celle de la référence. Si la position introduite diffère de la solution 2D donnée par le premier passage du satellite, de plus de 300 mètres, c'est la position 2D qui devient la position de référence pour les passages ultérieurs.

Position de contrôle

La position de contrôle est la position introduite qui définit la position connue dans un calcul de translocation.

Position 2D

La position 2D est la position en deux dimensions (latitude et longitude) qui est calculée après chaque passage. La position 2D est calculée à partir des données reçues au cours du passage d'un seul satellite. Sa précision est sensiblement affectée par la précision de l'estimation de l'altitude.

Position 3D (point)

Le "Point" 3D est la position en trois dimensions, (latitude, longitude et altitude) qui est calculée par le MX 1502 après chaque passage acceptable du satellite. Un passage acceptable du satellite a les caractéristiques suivantes :

- 1) L'angle maximum d'élévation du satellite a été supérieur à 15°.
- 2) Le satellite était en service pendant le passage.
- 3) Il a fallu moins de 7 itérations dans le calcul 2D.
- 4) Les données Dopplers sont symétriques autour du point où le satellite est le plus proche de la station.
- 5) La distance entre la position 2D et la position de référence est inférieure à un kilomètre.
- 6) On n'a pas demandé de ne pas prendre en compte le satellite.
- 7) Des données des deux canaux ont été utilisées pour le calcul 2D.
- 8) L'écart type des résidus du comptage Doppler est inférieur à la limite (sélectionnée par l'utilisateur, valeur 25 cm par défaut).
- 9) Le calcul 2D s'est effectué à partir d'au moins 8 comptages Doppler.

La position 3D, est calculée à partir de l'accumulation de données de différents passages de satellites. En général la précision du point est proportionnelle au nombre de passages de satellites. Le processus d'accumulation de données s'arrête, et on recommence une nouvelle accumulation dans les cas suivants :

- 1) Le numéro de site a été changé.
- 2) La position introduite a été changée.

3) Le courant est appliqué au MX 1502 par l'interrupteur (Power).

4) S'il s'est produit une panne de courant qui peut avoir détruit les paramètres dans la mémoire-horloge.

Quand les coordonnées définissant la position introduite sont entrées dans le MX 1502, elles sont utilisées comme position de référence et comme point 3D.

Après le premier passage acceptable de satellite suivant le commencement d'une nouvelle accumulation de données, la position de référence est soit la position 3D, (valeurs initiales), soit la position introduite, ou soit la position courante 2D, suivant la distance entre ces 2 positions. Si la distance est inférieure à 300 m, la précédente valeur 3D, ou la position introduite, est utilisée comme position de référence. Si la distance est supérieure à 300 m, la position courante 2D est utilisée comme référence.

Position par translocation

La position par translocation est une position en 3 dimensions (latitude, longitude, et altitude). Elle est calculée par le MX 1502 en mode off-line, ou en mode Remote, utilisant des données de deux sites différents.

L'acceptation d'un passage de satellite pour la translocation répond aux mêmes critères que l'acceptation pour un point 3D.

Position à l'estime

La position à l'estime (DR) est la position courante de l'antenne du MX 1502 quand le MX 1502 est en mode "Navigation". Elle est calculée à partir des positions 2D des satellites, et la vitesse et la direction introduites.

Position du point à atteindre

La position du point à atteindre est spécifiée par l'utilisateur quand le MX 1502 est en mode "Navigate" (c'est la destination). Le MX 1502 peut calculer la distance et le gisement entre la position DR actuelle et cette position du point à atteindre.

2) Conversion de système

Toutes ces positions qui sont maintenues dans le MX 1502 (2D, point 3D, translocation, etc...) sont en coordonnées géodésiques dans le système satellite, qui utilise l'ellipsoïde de référence W G S 72. Il existe des codes pour convertir et afficher ces positions en XYZ, système satellite, XYZ système géodésique local, ou coordonnées UTM. Avant de demander une conversion de système ou en UTM, l'utilisateur doit entrer les paramètres de conversion. Quand ces paramètres sont introduits, ils n'ont pas à être modifiés tant que l'on ne change pas de réseau.

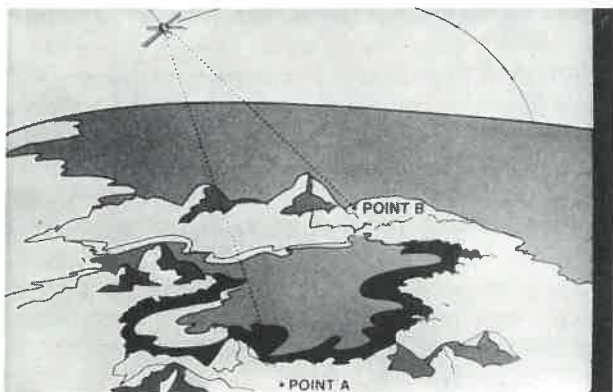
Ces paramètres sont :

A 1/2 grand axe

1/F l'inverse de l'aplatissement ex : 297

X composantes de la distance des centres des ellipsoïdes de références du système satellite et du Z système local (en m)

RX rotation autour de chacun des axes, comptés RY en secondes d'arc, le + pour le sens trigonométrique, - pour le sens des aiguilles d'une montre



On peut allonger facilement cette liste en se référant au tableau ci-dessous.

BS chiffres significatifs des PPM (parts par million) du facteur d'échelle.

VI – DOMAINE D'EMPLOI

Le récepteur MX 1502 peut être utilisé pour :

- Détermination de points isolés.
- La création de canevas nationaux
- Liaison de deux réseaux.
- Études géophysiques (campagnes sismiques).
- Calage photogrammétrique.
- Délimitation de concession.
- Positionnement de balises de radiolocalisation.
- Positionnement en mer.
- Pose de pipelines et de câbles.

TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT DOPPLER APPLICABLES AUX DIFFÉRENTES PRÉCISIONS

Précision recherchée Positionnement horizontal 1 Sigma	Technique de positionnement Doppler	Nombre minimum d'unités MX 1502 nécessaire	Nombre minimum de passages nécessaires
≥ 37 m	Passage unique	1	1 passage acceptable (altitude connue à ± 20 m).
≥ 10 m	Points 3D	1	15 passages acceptables.
≥ 1 m	Translocation sur le terrain ou en temps réel.	2	4 passages acceptables communs aux deux stations.
$\geq 0,5$ m $\leq 1,0$ m	Translocation sur le terrain ou en temps réel.	2	17 passages acceptables communs aux deux stations.
$\geq 0,3$ m	Ajustement d'un d'un réseau	3	20 passages communs à au moins deux stations.

La simplicité d'emploi du MX 1502 et le grand intérêt que présente l'exploitation de ses résultats, font comprendre pourquoi les américains donnent au MX 1502 le surnom de "Kit de survie pour les topographes".

