

Les applications de Navstar à la topographie

Par Georges NARD,
Directeur Technique à la Société d'Études,
Recherches et Constructions Électroniques (SERCEL)

RÉSUMÉ

Les satellites de navigation de la Marine des États-Unis ont ouvert la voie, en 1967, aux premières applications civiles de topographie et de géodésie spatiales. Ce système, le TRANSIT, bien que basé essentiellement sur des mesures de fréquence doppler opérées sur des porteuses de fréquences relativement basses et malgré certaines difficultés provenant de l'emploi d'orbites de basse altitude, a permis des opérations de topographie de précision métrique sur des bases de plusieurs centaines de kilomètres.

L'avènement opérationnel, à la fin de cette décennie, du nouveau système de satellites développé par l'armée de l'air des États-Unis ouvre de nouveaux espoirs pour les opérations de topographie et de géodésie dans le sens de l'amélioration de la précision et surtout de la réduction de la durée et du coût de ces opérations. Les premiers satellites prototypes de ce nouveau système appelé : "GLOBAL POSITIONING SYSTEM NAVSTAR" ont déjà permis l'expérimentation de plusieurs méthodes qui se sont avérées prometteuses.

Ce papier rappelle les principales caractéristiques du système NAVSTAR, décrit rapidement les méthodes expérimentées et les matériels mis en œuvre aux États-Unis. Enfin il décrit une première réalisation française d'un matériel dont les caractéristiques permettent une première approche de la solution des problèmes de topographie en utilisant avec une grande acuité un maximum d'informations doppler différentielles provenant simultanément de plusieurs satellites.

1— Première application des satellites artificiels à la topographie : le TRANSIT.

Le système de satellites artificiels de navigation TRANSIT, développé par la Marine Militaire des États-Unis au début des années 60 à des fins militaires, a pu être utilisé progressivement pour des applications civiles à partir de 1967. Peu à peu, les appareils récepteurs s'améliorant et les méthodes de détermination des données orbitales précises progressant également, des applications de topographie terrestre de base moyenne à longue ont pu être envisagées, ouvrant la voie à l'ère des applications de la topographie et de la géodésie spatiales.

Le système TRANSIT est basé sur l'entretien de la présence aussi permanente que possible de 4 à 6 satellites placés sur des orbites circulaires polaires de 1 100 kilomètres d'altitude et de période inférieure à 2 heures. La détermination de la position d'un point au sol peut être obtenue en accumulant et en traitant dans les récepteurs les résultats de mesures successives de variation de la distance séparant un satellite et le point d'observation, sur une période de temps de 15 minutes environ, les données de position instantanée du satellite sur son orbite référencées à la terre étant supposées connues.

A cette fin, chaque satellite transmet des signaux radioélectriques sur deux fréquences voisines de 400 et 150 Mhz. Ces fréquences porteuses dont l'origine est aussi bien stabilisée qu'il est possible dans les satellites, sont pour les récepteurs placés au sol la base des mesures de variations de phase en fonction du temps (effet Doppler) permettant de déterminer sur un intervalle de temps court les variations de la distance satellite-point d'observation.

Pour calculer la solution de sa position, l'observateur a besoin de connaître les éphémérides caractérisant l'orbite du satellite et une indication de temps aussi précise que possible. Ces deux informations sont transmises par les satellites eux-mêmes grâce à une modulation des deux porteuses par un message numérique mémorisé dans chaque satellite. Ces informations sont chargées deux fois par jour dans les mémoires des satellites par une liaison terre vers satellite qui transmet les données de temps, reliées au temps universel, et les éphémérides prédites qui ont été calculées préalablement à l'aide des données de 4 stations terriennes d'observation, dites "stations opérationnelles".

Dans les récepteurs, les mesures de phase des signaux reçus d'un satellite sont effectuées relativement à une source de fréquence stable pilotée par quartz. Les mesures doppler sont opérées sur des tranches de temps de l'ordre de 5 secondes et donc un récepteur dispose d'environ 150 mesures au cours du passage observable d'un satellite. Les mesures faites sur les deux fréquences permettent de connaître avec une bonne précision le retard de propagation provoqué par la traversée de l'ionosphère et de compenser presque totalement son effet sans imposer la nécessité de mesurer les paramètres physiques qui le déterminent, ce qui serait pratiquement complexe et imprécis. Une solution de position à 3 dimensions est

...Premier Congrès International de l'AFT

ajustée par la méthode des moindres carrés à l'ensemble des mesures doppler d'un passage. Chaque mesure doppler est associée à la position du satellite, laquelle est calculée à l'aide des éphémérides et des données précises de temps radiodiffusées par le satellite.

Une telle utilisation immédiate des signaux des satellites TRANSIT caractérise la plupart des applications de navigation.

Les indications de position sont généralement établies en longitude, latitude et élévation, basées sur une ellipsoïde géocentrique.

La précision ainsi obtenue est de l'ordre de 50 mètres si le point d'observation est fixe, et peut atteindre 100 à 300 mètres si le récepteur est installé sur une plateforme mouvante dont l'attitude et les lois de mouvements sont mal connues.

Mais la topographie terrestre peut, le plus souvent, satisfaire à la souhaitable immobilité du point d'observation. Dans ce cas, il est possible de mémoriser dans les récepteurs les données individuelles des mesures d'un passage, puis d'un autre passage, puis de plusieurs. Après plusieurs passages, la précision absolue de la solution de position s'améliore et peut tendre vers une valeur de 5 mètres environ, ceci après 30 passages, soit environ 3 jours d'observation.

On s'aperçoit alors que la limite de précision atteinte provient des écarts de position des satellites qui évoluent avec des caractéristiques orbitales réelles différentes de celles calculées à l'aide des éphémérides radiodiffusées. En effet, "l'âge" de ces éphémérides peut atteindre 12 heures aux instants d'observation : elles correspondent essentiellement aux accélérations ou ralentissements incontrôlés et non mesurés des satellites sur leurs orbites pendant plusieurs révolutions.

En vue d'améliorer les précisions possibles, un réseau beaucoup plus complet d'orbitographie a été mis en place : le TRANET qui comprend 20 stations d'observation dont les données sont centralisées et traitées pour pouvoir établir des éphémérides précises basées sur des observations en temps quasi réel. Les résultats sont ensuite rendus disponibles aux usagers qui peuvent procéder à des post calculs à l'aide des données relevées et mémorisées sur le terrain. Dans ce cas, la précision absolue peut atteindre 2 mètres en X, Y et Z toujours pour 3 jours d'observations.

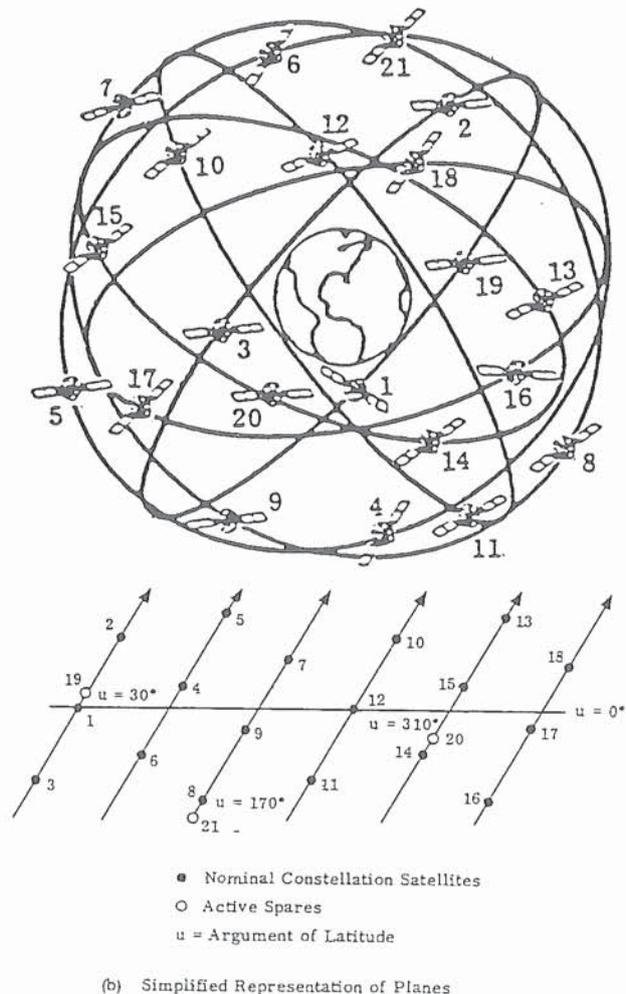
Mais le plus souvent, le problème posé aux topographes est de relier un point de coordonnées réputées connues à un ou plusieurs autres points dont il faut déterminer la position. Il est alors possible de procéder à des observations différentielles des passages des mêmes satellites aux mêmes instants en effectuant des relevés à l'aide de deux récepteurs installés, l'un au point connu, l'autre au point à déterminer. Cette technique, appelée aussi "translocation", permet d'atténuer encore certaines erreurs résiduelles liées aux connaissances orbitales et à la propagation. Des précisions relatives de l'ordre de 50 centimètres ont été obtenues à 300 kilomètres et meilleure que 1 mètre à 1 000 kilomètres, toujours pour des temps d'observation de l'ordre de 3 jours. Ces ordres de grandeur sont comparables à ceux obtenus à l'aide de cheminements terrestres par les méthodes classiques.

Aujourd'hui le système TRANSIT est opérationnel et assez bien entretenu ; cependant l'administration des Etats-Unis n'envisage pas actuellement de l'entretenir au-delà de 1994.

Plusieurs modèles de récepteurs particulièrement développés pour la topographie sont aujourd'hui en service courant ; ils sont essentiellement d'origine américaine.

2— Le système de navigation par satellites G.P.S. Navstar ou "Global Positioning System".

Ce nouveau système de satellites constitue pour les Etats-Unis l'étape suivante de l'avènement des moyens de navigation et de localisation à base spatiale. Il est en développement sous le contrôle de l'armée de l'air de ce pays depuis 1972 et vise à la mise en place, aux environs de 1988, de 18 satellites répartis par groupes de 3 sur 6 plans orbitaux inclinés à 55° par rapport à l'équateur (voir figure 1). Les orbites circulaires à une altitude de 20 200 kilomètres déterminent une période de 12 heures.

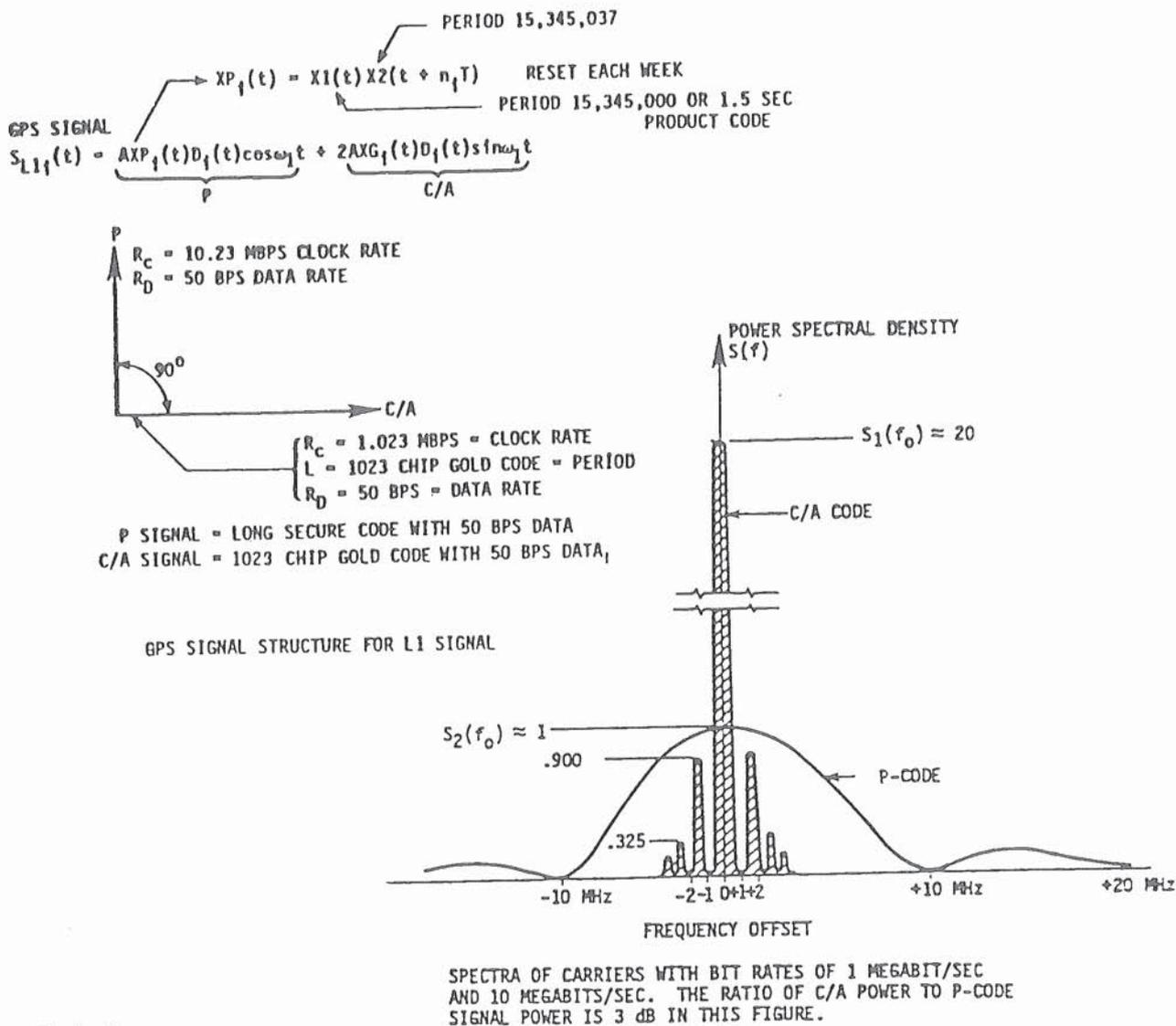


— Figure 1 : Constellation des satellites GPS NAVSTAR sur 6 plans orbitaux.

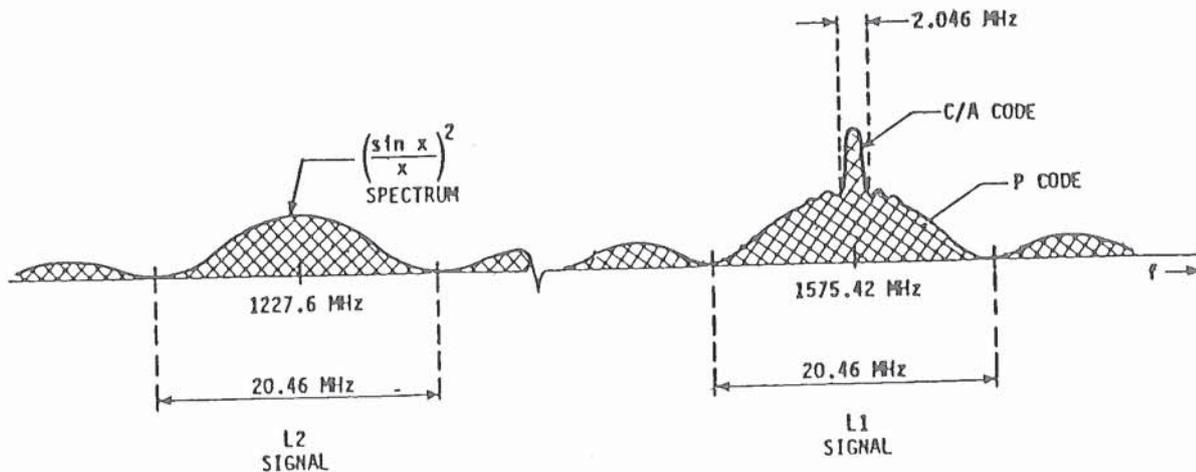
De plus, 3 satellites de rechange actifs portent la constellation à 21 satellites. Cette configuration offre à l'utilisateur la possibilité d'observer à tout moment au

moins 4 satellites simultanément. La durée des passages observables utilement est bien supérieure à celle du TRANSIT : elle peut dépasser 5 heures pour un satellite ayant son élévation maximum proche du Zénith du point d'observation.

Chaque satellite émet sur deux fréquences porteuses voisines l'une de 1 575 Mhz, l'autre de 1 227 Mhz. (Voir figure 2). Ces porteuses sont modulées en phase par des séquences pseudo-aléatoires de deux types. (Voir figure 3). La première



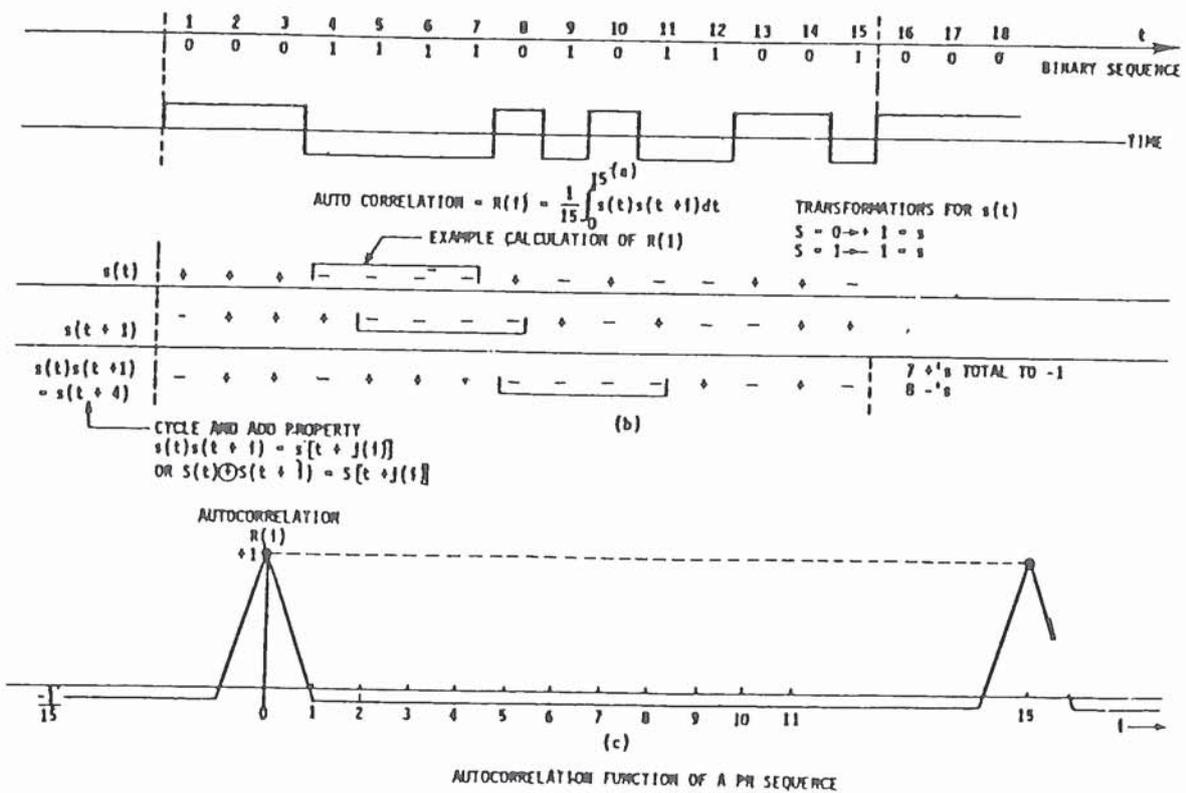
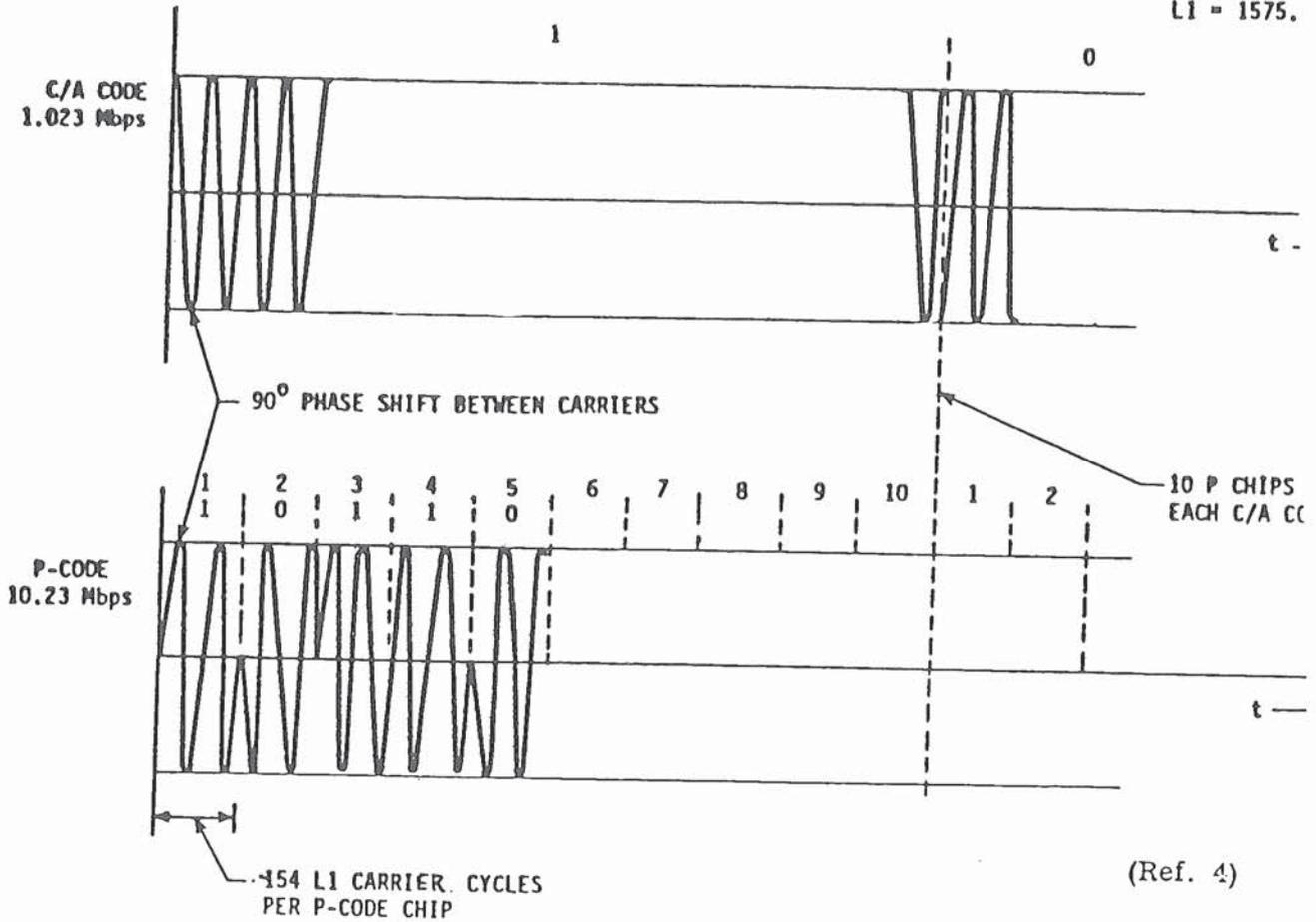
(Ref. 4)



— Figure 2 : Caractéristiques de modulation des satellites GPS.

GPS SIGNAL WAVEFORM - L1 CHANNEL

L1 = 1575.



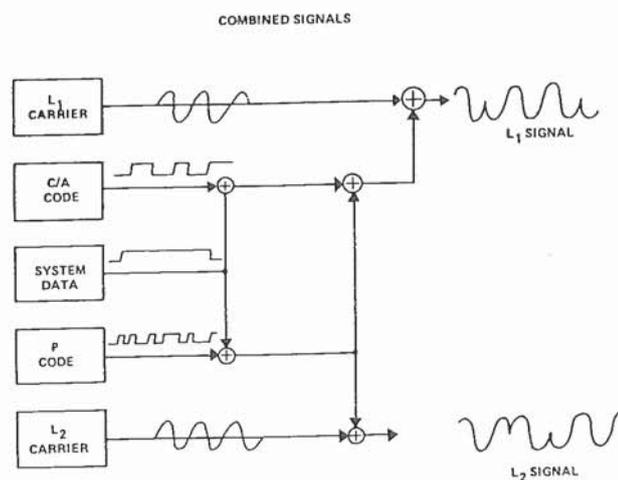
— Figure 3 : Caractéristiques des codes P et C/A.

présente une fréquence de bits de 10,23 Mhz qui module de façon synchrone les deux fréquences porteuses constituant ainsi un repère temporel précis appelé "code P". La période de répétition naturelle de ce code est de plusieurs mois, mais il est volontairement remis à un état particulier précis chaque semaine.

Chaque satellite peut transmettre un code "P" particulier pouvant être choisi depuis le sol parmi un très grand nombre de combinaisons. Toutes les propriétés de ce signal P ne peuvent donc être acquises que par les seuls utilisateurs disposant de la combinaison définissant chaque code P.

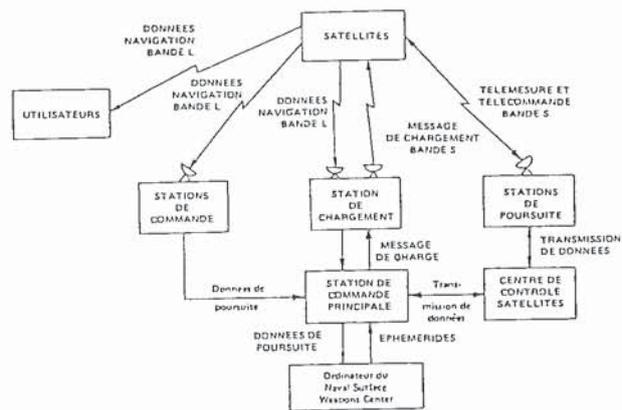
La deuxième séquence présente une fréquence de bits 10 fois plus faible : 1,023 Mhz et une période de répétition beaucoup plus courte de 1 milliseconde environ et appelée code "C/A". Elle module en phase la seule fréquence L1 selon une référence en quadrature de phase avec celle intéressant la modulation par le code P. Cette deuxième séquence constitue un deuxième repère temporel, très répétitif, lui aussi "remis à l'heure" de façon précise au début de chaque semaine. Chaque satellite transmet un code C/A particulier et immuable. Sa définition est simple et connue de tous, et son usage et ses propriétés sont donc en principe librement accessibles. L'état d'un compteur des périodes écoulées du code C/A est transmis aux utilisateurs par les satellites, ce qui permet de relier aisément mais grossièrement ces deux repères de temps entre eux.

Les fréquences porteuses et celles initialisant les signaux codés sont cohérentes et issues de la même source de fréquence très stable pilotée par un groupe de résonateurs au césium embarqué sur chaque satellite (voir figure 4).



— Figure 4 : Organisation des émissions à bord d'un satellite.

De façon analogue au TRANSIT, les références orbitales précises de chaque satellite sont établies par 4 stations au sol et chargées au moins 1 fois par orbite dans la mémoire des satellites (Voir Fig. 5). Ces données sont aussi radiodiffusées par les satellites vers les utilisateurs. De plus, l'état et la marche des horloges de bord sont établies par les stations au sol, comparées au temps universel, et les éléments utiles à l'établissement très précis du temps sont également mis en mémoire dans les satellites.



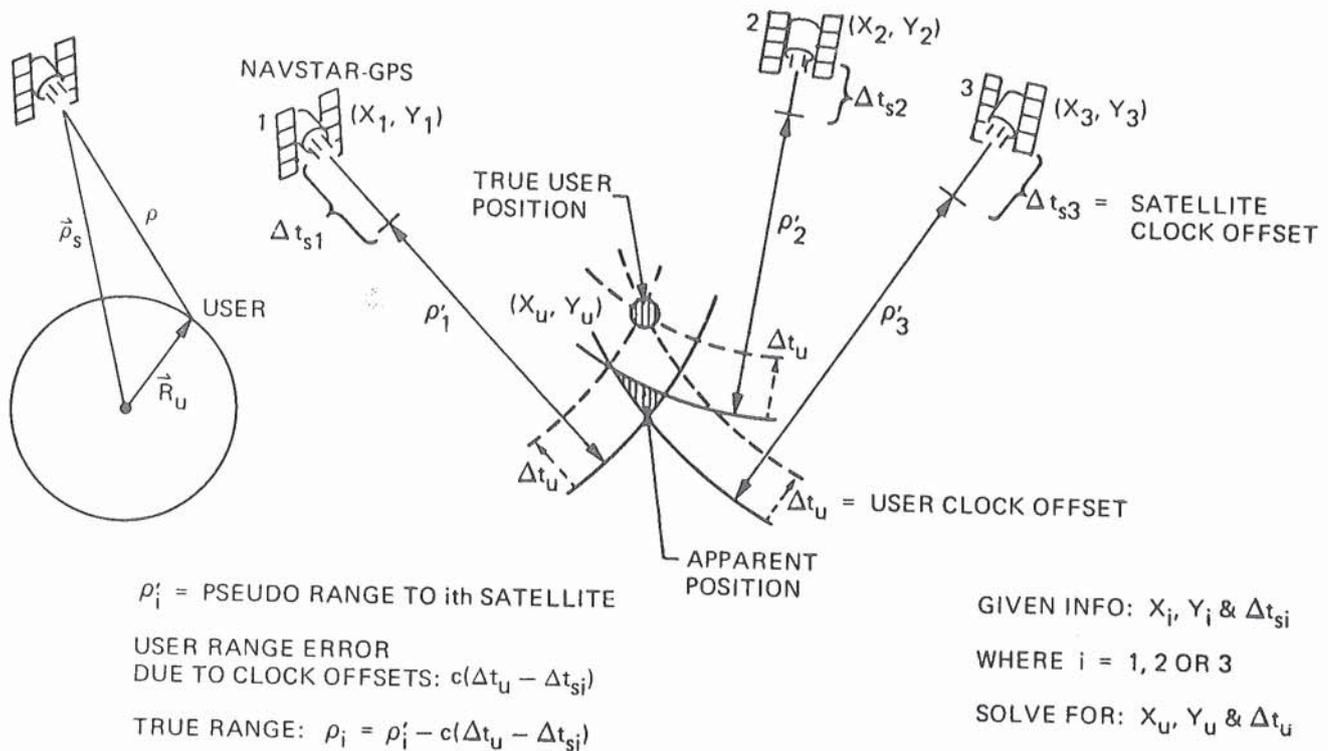
— Figure 5 : Organisation des stations de surveillance et de chargement des satellites.

L'ensemble des phases des porteuses et tous les repères temporels transmis par tous les satellites sont par conséquent reliés de façon très précise à une référence unique de temps, elle-même reliée au temps universel.

Le concept général d'emploi des satellites NAVSTAR pour la navigation consiste à établir dans les récepteurs une solution de position à 3 dimensions en mesurant simultanément les distances instantanément observées entre le récepteur et un minimum de 3 satellites. Ce principe de base supposerait que l'utilisateur puisse disposer par ailleurs d'une référence de temps reliée très précisément aussi au temps universel, et à l'aide de laquelle il lui serait possible d'établir le temps précis du parcours des signaux et donc les distances le séparant de chaque satellite. En réalité, ce cas n'existe pratiquement jamais et en fait le récepteur de l'utilisateur est équipé d'une source de temps — fréquence de bonne qualité mais classique et indépendante. Aux estimations à 3 dimensions que le récepteur doit faire, s'ajoute donc une 4^e qui concerne l'écart entre la référence de temps locale du récepteur et celle de l'ensemble du système NAVSTAR. Ceci n'est possible que si une quatrième donnée indépendante est entrée dans l'estimateur sous la forme des mesures provenant d'au moins un quatrième satellite.

Dans la réalité, les récepteurs mesurent donc des "pseudo-distances" comportant chacune la distance que l'on désire mesurer depuis chaque satellite, plus une grandeur commune à toutes les mesures qui correspond à l'écart entre la référence de temps du récepteur et celle du système de satellites. (Voir Fig. 6).

Les pseudo-distances peuvent être établies à partir de l'observation du repère temporel du code C/A seul : dans ce cas, la mesure n'est issue que de la seule fréquence L1. Contrairement à une idée assez répandue, la précision qu'il offre n'est pas très différente de celle que permettent les codes P. Mais, par contre, le code C/A n'étant transmis que sur la seule fréquence L1, les mesures issues de ce repère temporel ne pourront être corrigées des effets de la traversée de l'ionosphère que grâce à un calcul utilisant un modèle de propagation. Cette méthode ne peut apporter qu'une correction imparfaite.



— Figure 6 : Le principe des mesures de pseudo-distances

On peut éventuellement aider aussi les mesures par les observations doppler qui permettent de réduire le bruit des mesures. Ces moyens qui sont en principe accessibles à tous se sont avérés très précis puisque les premières mesures faites à l'aide de satellites expérimentaux, sur des temps d'observation de l'ordre de quelques secondes, indiquent des erreurs de position absolue de l'ordre de 15 à 30 mètres seulement.

Les pseudo-distances peuvent aussi, pour les usagers connaissant la clé d'accès au code P, être établies à l'aide des marques de temps de ce code observées sur les deux fréquences L1 et L2. Elles peuvent aussi être aidées par des mesures doppler opérées sur ces deux fréquences.

Dans ce cas d'utilisation, en principe réservé uniquement aux militaires des Etats-Unis, les récepteurs disposent d'un moyen de mesure présentant un pouvoir plus aigu de discrimination temporelle assurant une meilleure réjection des effets des trajets multiples, ce qui est un aspect assez important pour la qualité du positionnement instantané. Ils disposent également des éléments utiles à une correction très précise des erreurs de propagation transionosphérique et enfin, ce qui est intéressant du point de vue militaire, ils disposent d'une capacité d'antibrouillage considérablement accrue.

Les premières expérimentations de positionnement instantané, au niveau de quelques secondes d'observation, montrent des précisions de l'ordre de 10 à 15 mètres. Ce niveau moyen de précision n'est

pas considérablement meilleur que celui apporté par les observations faites avec le code C/A ; cependant, il est vraisemblablement plus fiable lors de perturbations ionosphériques importantes associées à une forte activité solaire.

La bonne qualité des résultats obtenus à l'aide du seul code C/A incite les Etats-Unis à envisager, pour des raisons de sécurité militaire, une dégradation volontaire des données de base utiles à la solution instantanée de position. Cette dégradation toucherait probablement les données orbitales et les repères temporels eux-mêmes.

Le positionnement instantané, essentiel pour la navigation précise, verrait sa précision limitée aux environs de 50 à 70 mètres en moyenne. Ce niveau de précision, acceptable pour de nombreuses applications de navigation, interdit cependant les missions civiles les plus précises qui requièrent des précisions de l'ordre de la dizaine de mètres. Pour les assurer, bien qu'en utilisant les seuls éléments C/A et doppler de la fréquence L1, même dégradés, la mise en œuvre de techniques différentielles rapides en temps réel est envisagée. Ces techniques devraient permettre de compenser dans une large mesure les effets de ces dégradations volontaires, ainsi que celles des erreurs orbitales et ionosphériques résiduelles. Elles peuvent donc être efficaces jusqu'à des distances de plusieurs centaines de kilomètres. Elles ne devraient pas compromettre l'aspect stratégique militaire que les Etats-Unis cherchent à sauvegarder, compte tenu de leur vulnérabilité évidente.

3— Les applications de Navstar à la topographie et la géodésie.

Les critères relatifs à la précision intéressant le positionnement instantané précis appliqué à la navigation sont très sensiblement différents de ceux s'appliquant à la précision des méthodes utiles à la topographie.

En effet, alors que le navigateur a besoin d'informations de position fiables, de précision métrique à décimétrique, et à une cadence élevée de l'ordre de une à quelques secondes, la topographie a des exigences et des tolérances notablement différentes.

Les méthodes topographiques vont consister à utiliser l'information d'une autre façon : il est possible de préparer le travail, de sélectionner les instants d'observation pour obtenir la meilleure géométrie des satellites, d'intégrer les résultats d'observation sur des temps longs, de mettre en œuvre systématiquement les techniques différentielles, de profiter de l'absence de mouvement du récepteur pour mettre en œuvre des techniques de traitement du signal inapplicables dans les récepteurs en mouvement, etc. Ces raisons rendent inappropriées ou abusives toute extrapolation hâtive à la topographie de comparaison de méthodes et de résultats concernant la précision du positionnement instantané et la navigation.

Par exemple, et bien que ceci paraisse très surprenant a priori, il est aujourd'hui assez clairement évident que la connaissance des moyens d'accès au code P ne s'avère pas indispensable à l'atteinte de bonnes précisions utiles à la topographie.

De même, bien que la présence d'une dégradation volontaire des éléments associés à l'usage du code C/A puisse conduire à une certaine complication des méthodes de traitement, il n'apparaît pas qu'elle puisse entacher gravement la précision ultime des applications topographiques.

Il est donc intéressant avant tout de s'intéresser aux méthodes et traitements de l'information les plus propices à la précision topographique. Il convient aussi de distinguer pour chaque méthode ce qui s'applique au positionnement absolu isolé, qui intéresse le plus souvent la géodésie, par opposition à la détermination des éléments d'une base rattachée à un point supposé connu. On doit également considérer, dans chaque cas, l'influence que peut avoir une connaissance des données orbitales plus précises que celles radiodiffusées par les satellites.

Il est utile aussi de remarquer les avantages et inconvénients des orbites hautes de NAVSTAR par rapport aux orbites basses du TRANSIT. Les satellites de NAVSTAR sont beaucoup moins assujettis aux effets de traînée et aux perturbations orbitales de toute nature. D'une part les données orbitales sont injectées à chaque orbite, mais de plus les erreurs orbitales résiduelles peuvent être réduites si un mode d'observation différentiel peut être mis en œuvre. Cette réduction est sensiblement proportionnelle au rapport reliant la longueur de la base séparant les deux points d'observation à la hauteur des satellites. NAVSTAR est, de ce point de vue, 20 fois moins sensible aux erreurs que le TRANSIT.

Les retards ionosphériques sont inversement proportionnels au carré de la fréquence, ce qui est évi-

demment favorable aux fréquences hautes de NAVSTAR. Mais de plus, les conditions géométriques associées aux altitudes très élevées entraînent une corrélation spatiale des erreurs ionosphériques très prononcée et propice à leur atténuation par les méthodes différentielles.

En revanche, si la sensibilité géométrique associée au compte doppler est améliorée 4 fois par le rapport des fréquences, elle est aussi réduite dans la même proportion du fait du rapport des vitesses projetées vers l'observateur. Il y a donc sur ce dernier point peu d'amélioration à attendre par rapport au TRANSIT.

Toutes ces considérations montrent la nécessité de caractériser les différentes méthodes possibles d'emploi de NAVSTAR en vue de l'optimisation des précisions en topographie.

3.1— Positionnement absolu, méthode pseudo-distance, méthode doppler.

Il vient naturellement à l'esprit d'utiliser des récepteurs développés pour la navigation et de tenter de les utiliser en topographie. Le positionnement absolu pourra alors être obtenu en déterminant, comme en navigation, une solution de position à 3 dimensions à partir des données de pseudo-distance des codes C/A et éventuellement P provenant de plusieurs satellites et d'intégrer les résultats sur un temps permettant d'atténuer les bruits introduits par les erreurs aléatoires. Une extrapolation des premières expériences faites avec une constellation réduite de quelques satellites montre qu'en situation définitive une précision de l'ordre de 5 mètres serait obtenue et qui pourrait être ramenée aux environs de 1 mètre dans l'hypothèse où des éphémérides réelles précises seraient disponibles, et ceci, seulement après quelques heures d'observation.

La capacité d'emploi du code P, en tant que repère temporel, n'apparaît pas comme un avantage déterminant par rapport à celle du seul code C/A. L'intérêt principal du code P pour ce type de récepteur serait de pouvoir donner accès aux mesures sur la deuxième fréquence L2, s'il était librement disponible, et dans ce cas de pouvoir offrir une méthode efficace de correction ionosphérique. Il semble que la communauté civile devra abandonner l'espoir de pouvoir y parvenir avant une date assez avancée. Ceci complique le problème mais sans être rédhibitoire, d'autres méthodes d'accès à la 2^e fréquence étant possibles.

La méthode de détermination absolue de la position par l'accumulation de comptes doppler, comparable à celle mise en œuvre avec le TRANSIT, s'apparente beaucoup à celle des pseudo-distances et peut souffrir des mêmes limitations d'accès à la deuxième fréquence dans des conditions normales si le code P n'est pas disponible.

En résumé, en ce qui concerne le positionnement absolu, on peut considérer qu'une bonne précision pourra être obtenue sans contrainte de disponibilité du code P de deux façons :

1) Soit en utilisant les données de pseudo-distance du repère C/A et les données doppler associées à la seule fréquence L1. Il faudra, dans ce cas, disposer

...Premier Congrès International de l'AFT

de préférence des données orbitales vraies et d'éléments de corrections mesurés pouvant s'adapter à un bon modèle d'erreur ionosphérique. Les résultats seraient uniquement disponibles en post-calcul et la précision restera limitée à un à quelques mètres en dépendance principale des résidus de correction ionosphérique.

2) On peut envisager l'emploi de procédés de détection non linéaire des repères temporels du code P, qui seront décrits un peu plus loin dans les méthodes dites "interférométriques". Associés aux mesures doppler et C/A effectuées sur la fréquence L1, ils devraient permettre d'accéder à de bonnes mesures et également d'obtenir une correction ionosphérique de qualité.

Ces procédés conduisent à une perte de sensibilité notable de la capacité d'exploitation des signaux de NAVSTAR qui doit être compensée par un allongement des temps d'observation. Un tel allongement est de toute façon souhaitable pour atténuer les effets des dégradations volontaires des données orbitales et du repère temporel C/A.

Pour atteindre des précisions métriques, cette méthode nécessite aussi l'usage d'éphémérides et de correction des biais des repères temporels qui doivent être établis par un réseau d'orbitographie approprié. Les résultats précis ne peuvent être obtenus qu'en post calculs, comme pour la première méthode. Cependant, une précision absolue de l'ordre de 1 mètre doit être possible sur la base de quelques heures d'observation seulement ; elle serait dans ce cas essentiellement limitée par la qualité des données orbitales disponibles.

Il faut remarquer que la qualité du positionnement absolu que NAVSTAR doit permettre d'obtenir n'est pas, dans les principes, considérablement améliorée par rapport à celle que permet le TRANSIT. On attend toutefois un gain de précision de l'ordre de 2 mais surtout un gain de temps de collecte des données qui pourrait atteindre 5 à 10 lorsque la constellation opérationnelle sera sur orbite.

3.2 — Positionnement relatif, méthodes différentielles et "interférométriques"

Dans la grande majorité des cas, les travaux topographiques concernent le rattachement de points dont la position est à déterminer par rapport à un point de référence dont les coordonnées sont considérées connues dans le système considéré.

On peut alors envisager des observations des satellites NAVSTAR simultanément au point de référence, et au point dont on souhaite déterminer la position. La distance séparant les deux points peut être comprise entre 0 et plusieurs centaines de kilomètres.

Dans ce cas, la situation devient très différente car presque toutes les sources d'erreurs sont ressenties de la même façon aux deux points d'observation et leurs effets peuvent être annulés ou considérablement réduits par comparaison ou différences entre les résultats des deux récepteurs.

C'est le cas notamment pour les erreurs provenant des incertitudes de temps ou de position orbitale des

satellites, qu'elles soient naturelles ou volontairement provoquées. C'est aussi le cas, dans une large mesure, pour les retards ionosphériques.

Par contre, certaines erreurs demeurent ou peuvent même être légèrement aggravées, par exemple celles qui concernent les sources de temps - fréquence des récepteurs d'observation, le bruit des récepteurs, les effets des ondes réfléchies sur les obstacles avoisinant les récepteurs etc... Cependant, dans la mesure où les observations sont effectuées sur de nombreux satellites et sur des temps d'observation assez longs, les effets de ces erreurs aléatoires, sans biais importants, sont aussi considérablement atténués.

On peut distinguer plusieurs procédés physiques de traitement des signaux et, indépendamment, plusieurs méthodes d'observation.

Méthodes d'observation

Les méthodes d'observation différentielles peuvent correspondre à de simples différences entre les résultats des mesures homologues effectuées par chacun des deux récepteurs sur un satellite. Elles peuvent aussi être dites doubles, si on observe plusieurs satellites simultanément et si les résultats obtenus sont associés par paires de satellites. Les mêmes paires de mesure sont formées pour chaque point d'observation et leurs résultats soustraits l'un de l'autre.

Le premier type de différence, comme déjà indiqué, permet de réduire les erreurs provenant des satellites et de la propagation alors que l'association par paires permet de réduire les erreurs instrumentales des récepteurs d'observation (défauts des horloges locales et d'étalonnage brut des récepteurs).

Dans la pratique, les récepteurs sont constitués de telle façon qu'ils présentent les résultats de mesures de base des phases ou des temps d'arrivée des signaux relativement à l'état de l'horloge locale du récepteur. Ces mesures de base sont le plus souvent enregistrées.

C'est au moment des post-calculs que l'on peut opter pour des logiciels permettant d'opérer selon des simples ou doubles différences.

Procédés de traitement

Dans les procédés physiques de traitement, on peut citer :

— Les procédés limités à la seule fréquence L1 : il s'agit essentiellement des relevés de pseudo-distance C/A associés aux mesures doppler, de préférence à l'aide de récepteurs multicanaux.

C'est le procédé le plus simple à adapter, à partir de récepteurs développés à l'origine pour la navigation, à condition qu'ils soient bien étalonnés.

Suivant les moyens et méthodes mises en œuvre (qualité des pilotes de fréquence, méthode des simples ou doubles différences, de la disponibilité ou non de données additionnelles telles que orbites précises, moyens météo au sol, etc...), les résultats peuvent être compris entre un décimètre et un mètre pour des bases de 50 à 100 km.

— Les procédés permettant de faire appel indifféremment à une ou aux deux fréquences du système.

Dans ces procédés, on exclura d'emblée l'exploitation des codes P supposés inaccessibles. On connaît par quelques résultats d'expérimentation publiés :

• Les procédés interférométriques purs

Ils consistent à échantillonner à haute cadence la mesure des signaux aléatoires en relation précise avec un repère de temps local associé à chaque récepteur et à mémoriser les données convenablement datées dans une mémoire de masse.

Ensuite, en temps différé, on procède à une corrélation optimale des signaux enregistrés par ces deux récepteurs, afin de déterminer le décalage de temps d'arrivée qui constitue la donnée de base de la solution de position.

Ce procédé est très comparable aux procédés interférométriques VLBI. Il présente l'avantage de pouvoir traiter n'importe quel type de signaux à spectre large et d'être inambigu et assez précis.

Il présente par contre l'inconvénient de nécessiter des moyens complexes, coûteux et peu propices aux usages de terrain.

Des précisions de l'ordre de 1 à quelques décimètres sont espérés.

• Les procédés interférométriques spécifiques des signaux NAVSTAR

Ces procédés mis en œuvre dans les expérimentations SERIES de la NASA et leurs dérivés dans les matériels prototypes des sociétés ISTAC et MACROMETER s'appuient sur la connaissance a priori des caractéristiques d'horloge et lois de modulation des satellites de NAVSTAR. Sans nécessiter la connaissance de la clé d'accès, ils permettent cependant de reconstituer la phase d'arrivée de l'horloge de bit des générateurs de séquence des codes P des satellites au prix d'une certaine perte de sensibilité.

Ils compriment considérablement l'information à mémoriser, laquelle permet ensuite d'opérer la corrélation interférométrique. Le résultat est une mesure assez précise, rapide et simple et faiblement ambiguë. Une solution simple à cette ambiguïté peut être obtenue à l'aide du code C/A et/ou des mesures doppler.

Ces procédés nécessitent le maintien immuable de certaines caractéristiques des signaux NAVSTAR ; ils nécessitent une connaissance a priori assez précise des lois de mouvement des satellites observés, mais par contre ils ouvrent la voie à la possibilité de mettre sur le terrain des matériels de faibles dimensions, simples et souples à mettre en œuvre.

Des précisions centimétriques à décimétriques ont été observées à des distances de l'ordre de 10 à 50 kilomètres respectivement, et pour des temps d'observation assez brefs (de l'ordre de 1 heure et moins), à condition de disposer d'éphémérides réelles précises.

• Les mesures de phase de la porteuse

Ces procédés dont les premières expériences ont été conduites avec des récepteurs mettant en œuvre le décodage des codes P paraissent prometteurs. Cependant, la communauté civile se doit de juger des

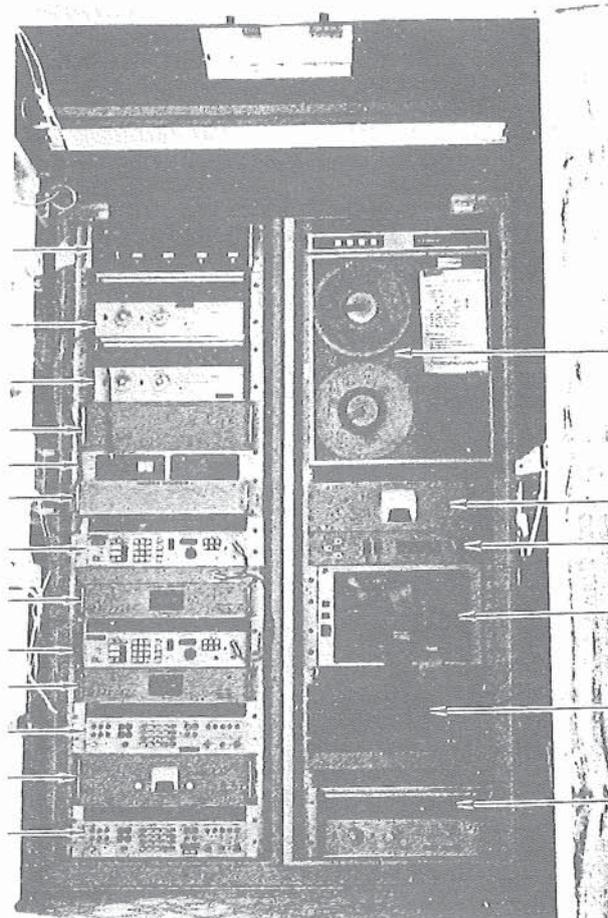
seules solutions dont elle pourra disposer et ne porter qu'un intérêt technique à ces expériences.

Une approche civile peut être envisagée sous la forme d'une reconstitution de porteuse ne nécessitant pas la connaissance des codes P. Ceci peut être obtenu par des opérations analogiques d'élevation au carré des signaux reçus. Ce procédé est susceptible de conduire aussi à une grande précision ultime, mais il entraîne une forte perte de sensibilité des signaux qui doit être compensée par une augmentation des gains d'antennes des récepteurs, et par l'allongement des temps d'observation. Ceci nuit, bien entendu, à l'encombrement et à la commodité de mise en œuvre des matériels. De plus, les résultats de mesure sont très fortement ambigus et il est nécessaire d'avoir recours à l'aide de l'un des deux procédés précédents pour résoudre cette ambiguïté.

Bien que ces procédés conduiront sans doute aux meilleures précisions (quelques centimètres à 100 kilomètres et plus), ils seront réservés au moins dans les débuts, à des applications particulières de géodésie.

4 — Quelques exemples de matériels américains

La FIGURE 7 représente les matériels expérimentaux destinés aux premières expériences de GÉODÉSIE par le GPS, conduites par le Naval Surface Weapons Center. Ce matériel utilise la méthode des mesures de phase sur les deux fréquences du système par intégration continue des variations de phase obser-

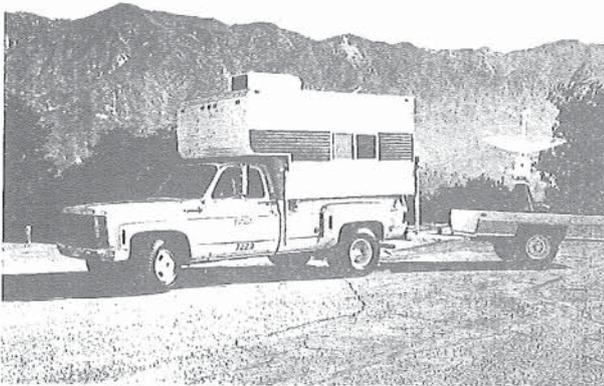


— Figure 7 : Récepteur de géodésie NAVSTAR du N5WC.

...Premier Congrès International de l'AFT

vées du fait de l'effet doppler. L'ambiguïté des mesures de phase est levée à l'aide des observations sur les deux fréquences et à l'aide des codes P et C/A, moyennant l'intégration d'au moins 6 heures de mesures consécutives. Des précisions de l'ordre de 5 cm ont été obtenues à 100 kilomètres en utilisant des modèles simples de correction de propagation. En utilisant des radiomètres à vapeur d'eau permettant de déterminer le gradient vertical d'indice de réfraction à chaque extrémité de la base, la précision peut atteindre 1 à 2 centimètres, toujours pour 6 heures d'observations accumulées. ($1 \text{ à } 2 \cdot 10^{-7}$).

La FIGURE 8 montre un matériel "mobile" utilisé par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) lors d'expériences du procédé SERIES* équivalentes aux méthodes interférométriques appli-



— Figure 8 : Matériel de la NASA pour l'expérimentation du système SERIES.

quées aux signaux NAVSTAR. Les résultats montrent une précision de l'ordre de 3 cm à 20 km meilleure que 10 centimètres à 170 kilomètres (environ $5 \cdot 10^{-7}$). Ces matériels très performants sont encore en cours de perfectionnement mais leur complexité, leur encombrement, leur poids, les confinent actuellement à des expériences particulières de géodésie.

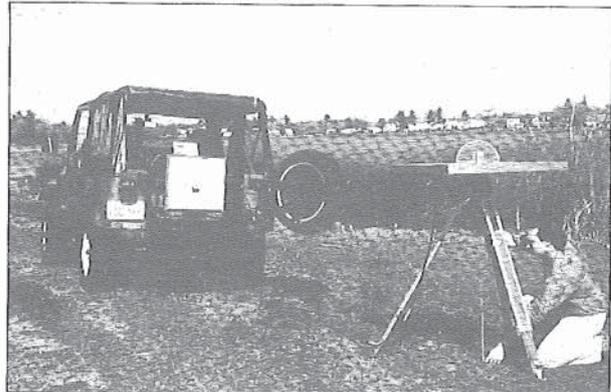
La FIGURE 9 présente un matériel de série de TEXAS INSTRUMENTS destiné au positionnement précis et à la topographie. Ce récepteur est apte à traiter les données du code C/A et des codes P ainsi que les données doppler. Ses dimensions lui permettent de



— Figure 9 : Matériel de positionnement et navigation précise de T.I.

le mettre en œuvre assez facilement sur des véhicules ou des navires. Son organisation interne correspond à un seul canal de mesure opérant successivement sur les signaux des différents satellites en vue du point d'observation, ce qui simplifie le récepteur mais conduit à une légère perte d'information. Néanmoins, il peut être utilisé en topographie où les premières expériences de terrain indiquent des résultats prometteurs.

La FIGURE 10 montre un matériel développé spécialement pour les opérations de topographie : le MACROMETER (TM) développé par MACROMETRICS INC. aux États-Unis.



```

EMPEROR AND CURVE DATA FILES          MAZAMU, AZ          1978-00  1000000
TIME 0.000          0.000000000
DATE 0.000          0.000000000
TIME 0.000          0.000000000
INTEP FILES 020000000

*** SQUARE = 0.100000000 FOR 100 OBSERVATIONS  EPOCHS  1.00
APPROX STANDARD DEVIATION OF MEASUREMENT ERROR =  3.00 MILLIMETERS

EMPEROR COORDINATION MATRIX
1.00000
0.00000  0.00000
0.00000  0.00000  1.00000

LABEL  UNIT  VALUE          ADJUSTED  ADJUSTMENT  UNCORRECTED  REFERENCE  PROFIT
1 SITE 1 LAT.  (DEG)  01040510.17480  0.000000000
2 SITE 1 LONG. (DEG)  05714428.14770  0.000000000
3 SITE 1 ELLIPSOID (M)  0.000000000
4 SITE 1 EPOCH (SECS)  00000000.00000  0.000000000
5 SITE 1 EPOCH (SECS)  00000000.00000  0.000000000
6 SITE 1 EPOCH (SECS)  00000000.00000  0.000000000
7 CLAS 1 EPOCH (SECS)  00000000.00000  0.000000000
8 CLAS 1 RATE  0.000000000  0.000000000
9 CLAS 1 RATE  0.000000000  0.000000000
10 CLAS 2 EPOCH (SECS)  00000000.00000  0.000000000
11 CLAS 2 RATE  0.000000000  0.000000000
12 CLAS 2 RATE  0.000000000  0.000000000
13 CLAS 1 TOU (SECS)  00000000.00000  0.000000000
14 CLAS 1 TOU (SECS)  00000000.00000  0.000000000
    
```

— Figure 10 : Récepteur de topographie MACROMETER en position sur le terrain.

Ces matériels mettent en œuvre, en les simplifiant, les méthodes employées dans le procédé interférométrique "SERIES", et surtout en limitant le plus possible la complexité des matériels à mettre en œuvre sur le terrain et en réservant les fonctions et calculs complexes à un centre de traitement en différé des données enregistrées. Même en utilisant les données d'une seule fréquence du GPS, le MACROMETER a permis d'atteindre des précisions de l'ordre de quelques centimètres pour des bases de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres, en utilisant des données d'éphémérides précises et des corrections de propagation simples en post-calculs.

D'autres constructeurs américains, tels que MAGNAVOX et d'autres, ont en préparation des matériels destinés particulièrement aux opérations de topographie, dont on peut penser qu'ils seront mis prochainement sur le terrain pour expérimentation.

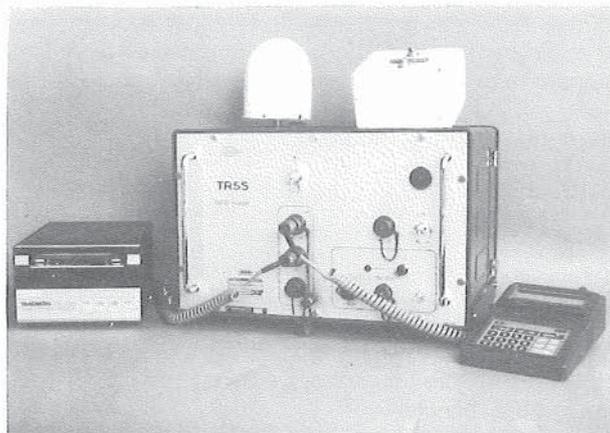
* Satellite Emission Range Interfered Earth Survey.

5 — Un matériel français : le récepteur NAVSTAR TR5S de SERCEL

Il s'agit d'un matériel récepteur expérimental construit en petite série. (Voir FIGURE 11).

5.1 — Description générale

— Récepteur mono-fréquence 1575,42 Mhz (L1), exploitation des données de pseudo-distance et doppler dans 5 canaux indépendants traitant totalement l'information de 5 satellites simultanément.



— Figure 11 : Récepteur NAVSTAR TR5S de SERCEL.

— Regroupement des données de pseudo-distance et doppler prétraitées et comprimées au niveau de 0,6 seconde, avec les données des messages des satellites, dans une organisation de blocs de messages de sortie selon un format normalisé.

— Estimation des données de position : latitude, longitude, altitude et écart de temps en employant les données de pseudo-distance et doppler, renouvellement complet des calculs à une cadence de l'ordre de 1 seconde.

— Modes de fonctionnement :

- Altitude prédéterminée ou non
- Horloge externe
- Pseudo-distances ou PD et doppler, etc ...

— Organe de conversation : clavier et moniteur vidéo couleur.

— Ce modèle qui incorpore tous les moyens de traitement permettant d'assurer les fonctions ci-dessus est particulièrement destiné aux missions expérimentales de topographie ou de positionnement de navires ou de véhicules en temps réel.

Il peut éventuellement être raccordé à des moyens d'enregistrement.

5.2 — Caractéristiques techniques principales.

— Antenne de diagramme hémisphérique, préamplificateur associé.

— Récepteur :

- Facteur de bruit : 4 dB.
- Sensibilité : — 136 dBm (C/No = 34 dB — Hz)
- 3 changements de fréquences

- Désignation doppler
- 5 canaux d'observation permanente.

— Canaux :

• Exploitation des pseudo-distances :

- Résolution des mesures : 0,12 mètre.
- Bruit type des mesures : T = 3 mètres (C/No = 40 dB, T = 0,6 sec)
- Etalonnage intervoie : T = 1 mètre.
- Etalonnage absolu : T = 1 mètre.
- Bruit intervoie : T = 1,5 mètre (C/No = 40 dB, T = 0,6 sec).
- Exploitation doppler :
- Résolution doppler intégré : $1,5 \cdot 10^{-3}$ mètre (0,6 sec.)
- Bruit type : T = $3 \cdot 10^{-3}$ mètre (C/No = 40 dB, T = 0,6 sec.)
- Bruit intervoies : T = $2 \cdot 10^{-3}$ mètre (C/No = 40 dB, T = 0,6 sec.)
- Etalonnage intervoies : T = $5 \cdot 10^{-3}$ mètre.

— L'estimation et filtrage des données de position et d'écart de temps sont faits à l'aide d'un filtre de Kalman. (Renouvellement complet des données aux environs de 1 seconde).

— Tenue à jour des almanachs et présentation graphique des prévisions de passage.

— Etablissement de paramètres de navigation (points tournants, profils, écarts, angle et distance, vecteurs vitesse etc ...).

— Présentation graphique des résultats et éléments de dialogue avec le système.

Dans les applications de topographie en différé, les messages des données de base (pseudo-distances C/A, doppler, qualité des mesures etc ...) peuvent être enregistrés à une cadence de 0,6 seconde.

Le calcul en temps différé permet alors d'opter pour des méthodes de traitements variées (double différence, doppler intégré, doppler intégré recalé par les pseudo-distances etc ...).

5.3 — Composition du matériel

Le matériel comprend les éléments suivants :

- Une antenne sous radôme étanche à l'aspersion.
Dimensions : diamètre : 130
 hauteur : 175
Poids : 0,6 kg
- Un préamplificateur en coffret étanche à l'aspersion.
Dimensions : Hauteur : 100
 Largeur : 160
 Longueur : 160
Poids : 2,2 kg.
- Un coffret récepteur protégé du ruissellement :
Dimensions : Hauteur : 340
 Largeur : 520
 profondeur : 500
Poids : 23 Kg.
- Un organe graphique de conversation et d'affichage (non étanche)
- Moniteur couleur 14" :
Dimensions : hauteur : 335
 (image 240 X 166) largeur : 360
 profondeur : 390
Poids : 13 kg.

...Premier Congrès International de l'AFT

- Clavier associé :
Dimensions : hauteur : 50
 largeur : 490
 Profondeur : 235
Poids : 1 Kg.

6— Conclusions :

Le système de satellites américains NAVSTAR devrait être opérationnel vers 1988/1990. Les caractéristiques des orbites et des signaux de ces satellites les rendent particulièrement intéressants pour les applications de géodésie et de topographie.

Les différentes méthodes expérimentées : intégration des mesures doppler, mesures de phase et interférométrie ont permis aux matériels scientifiques d'essais d'atteindre des précisions centimétriques jusqu'à des distances supérieures à 100 kilomètres.

Ces matériels d'essais constituent, pour les utilisateurs potentiels, des curiosités scientifiques assez éloignées de leurs préoccupations de tous les jours. Cependant, de premières approches d'appareils légers et déjà aisément transportables sur le terrain existent, montrent des résultats prometteurs, et préfigurent les appareils de demain.

Ils vont permettre, dès à présent, d'obtenir un service équivalent ou meilleur que celui offert par le système TRANSIT dont la fin de vie approche.

Ces matériels ou leurs successeurs en cours de gestation permettront, dans un futur proche et à l'aide de données issues de réseaux d'orbitographie et d'évaluation des gradients d'erreurs de propagation, d'atteindre des précisions centimétriques avec des appareils suffisamment simples et légers pour que les topographes puissent les utiliser efficacement dans leurs missions traditionnelles.

Références

- (1) "Global Positioning System" Vol. 1 et 2. The institute of navigation Washington D.C.
- (2) "Le point sur NAVSTAR GPS" - C. Boucher IGN. Journées SEE IFN du 17 octobre 1984.
- (3) "Un récepteur français de NAVSTAR" - G. Bonin SERCEL. Journées SEE IFN du 17 octobre 1984.
- (4) "Positioning By Satellites, Transit and G.P.S." Pr. V. Ashkenazi - University Nottingham. Hydrographic Society Nov 82.
- (5) "Series" P.F. Mac Doran JPL 3^e Int. Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning - Las Cruces Feb. 82.
- (6) GPS Satellite Positioning" J. Collins - ACMS bulletin février 84.
- (7) "GPS Control For Hydrographic Surveys, our Overviem" M.C. Grunthal Geo/Hydro INC.
- (8) "Report on test and demonstration of Macrometer (TM) Model V - 1000

Interferometric surveyor" F.G.C.C. Report IS-83.2. Rockville Maryland 20852.

(9) "The Naval Observatory - Silent Partner in Surveying and Navigation" CDR J.L. Hammer - U.S.N.O.

(10) "U.S. Navy Activities in Marine Geodesy" J.B. Mooney USN.

(11) "Ionospheric Measurements From Navstar Satellites" P.S. Jorgensen Aerospace Corporation.

(12) "Erreur ionosphérique résiduelle dans les systèmes de radiolocalisation spatiale bifréquences" J. Saint-Etienne CNES - Annales de Géophysique 1-1981.

(13) "Precise Measurements with GPS" P.S. Jorgensen Plans 84.

(14) "GPS Satellite Surveying - Practical Aspects" L.D. Hothorn National Geodetic Survey Nos-Noaa. May 84.

(15) "On Satellite Signal Processing Techniques Applicable To GPS Geodetic Equipment". P.J. Hui - CMC March 82.

(16) "The Synergism Of GPS Code And Carrier Measurements" - R. Hatch - Janvier 1982. Magnavox MXTM 3353-82.

REPRODUCTION PHOTOGRAPHIQUE

- agrandissements
- réductions
- remises à l'échelle en tous formats
- réductions/assemblages de plans à échelle imposée
- confection
- reproduction
- travaux spéciaux sur mosaïques topographiques
- travaux sur supports polyester
- typons offset tramés ou trait

HAUTE PRECISION

LART

PHOTO-REPROGRAPHIE PHOTO-CARTOGRAPHIE

LES APPLICATIONS DE LA REPRODUCTION TECHNIQUE

5, rue de la Véga
75012 PARIS

 **347.15.92**