

RAPPORT 766-2\*

**POSSIBILITES DE PARTAGE DES FREQUENCES ENTRE LE SYSTEME GLOBAL  
DE DETERMINATION DE LA POSITION (GPS) ET D'AUTRES SERVICES**

(Question 83/8)

(1978-1986-1990)

**1. Introduction**

Le présent Rapport se réfère au point 4 du dispositif de la Question 83/8, c'est-à-dire: «le partage des fréquences avec d'autres systèmes est-il possible et, dans l'affirmative, quels sont ces autres systèmes et dans quelles conditions le partage est-il possible?». Cette question concerne le système de radionavigation par satellite, \_\_\_\_\_ système global de — détermination de la position (GPS), \_\_\_\_\_ qui permet d'obtenir une détermination précise de la position des bâtiments et de l'heure par l'intermédiaire de deux voies de transmission satellite-Terre. Le présent Rapport étudie les possibilités de partage des bandes 1215-1240 MHz et 1559-1610 MHz entre ce système et les stations de Terre.

On trouvera dans l'Annexe I une description plus complète du système GPS et des raisons qui ont présidé au choix des fréquences d'exploitation.

**2. Considérations relatives au partage des fréquences**

La bande de fréquences 1215-1240 MHz est actuellement attribuée à titre primaire à égalité de droits aux services de radiolocalisation et de radionavigation par satellite dans les trois Régions. C'est pourquoi on a étudié en priorité les possibilités de partage avec ces stations. Il a fallu également tenir compte, de manière détaillée, des autres services ayant des attributions dans cette bande, c'est-à-dire du service fixe, du service mobile et du service de radionavigation.

**3. Partage des fréquences entre le système \_\_\_\_\_ GPS et les services de radiolocalisation et de radionavigation**

Les services de radiopérage qui fonctionnent actuellement dans la bande de radiolocalisation comprise entre 1215 et 1240 MHz ont presque exclusivement des émissions des types P0N et XXX, dont le coefficient d'utilisation se situe entre  $1 \times 10^{-2}$  et  $1 \times 10^{-3}$ .

**3.1 Brouillage subi par le système \_\_\_\_\_ GPS**

Le récepteur de base du système \_\_\_\_\_ GPS est conçu pour fonctionner en milieu pulsé. On utilise des limiteurs d'entrée à grande vitesse à rétablissement rapide pour empêcher des impulsions de haute énergie d'endommager le récepteur. De plus, des circuits d'écrêtage FI maintiennent la tension des impulsions en crête au même niveau que le bruit impulsif en crête.

La structure de la modulation et la logique du système sont telles que celui-ci ne réagit pratiquement pas aux signaux radar ordinaires. Le signal pseudo-aléatoire à décalage de phase dont le débit binaire dépasse 10 MHz est comprimé dans une bande d'information large de 50 Hz. Cela permet d'assurer un rapport de protection extrêmement élevé contre tous les types de brouillage ayant une bande plus étroite que celle des émissions GPS. Les résultats de différents travaux montrent qu'une fois synchronisé, un système de ce type peut fonctionner de manière satisfaisante dans un environnement pulsé dont le coefficient d'utilisation est très supérieur à celui de tout environnement où l'exploitation pourrait être possible [USA, 1976].

\* Le Directeur du CCIR est prié d'attirer l'attention de l'Organisation maritime internationale (OMI) et de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) sur ce Rapport.

### 3.2 Brouillage des services de radiolocalisation et de radionavigation par le système ——— GPS

Le signal émis par le satellite GPS a une puissance surfacique uniforme dans la partie visée de la Terre et se présente sous la forme d'un signal analogue au bruit dans une bande d'approximativement 20 MHz. Les équipements de radiodétection fonctionnant dans la bande 1215-1240 MHz ont, pour la plupart, des largeurs de bande FI très inférieures à 20 MHz et c'est pourquoi ils recevront un signal analogue au bruit ayant une densité spectrale de puissance uniforme dans la bande passante du récepteur. L'amplitude de ce signal sera fonction du gain d'antenne du récepteur de radiolocalisation dans la direction du satellite et les répercussions sur le fonctionnement du système de radiolocalisation dépendront du rapport entre l'amplitude de ce signal et la densité spectrale de puissance du bruit dans le récepteur ou du seuil dans le récepteur.

Les valeurs pour le gain d'antenne et le bruit dans le récepteur de l'équipement de radiolocalisation fonctionnant dans la bande comprise entre 1215 et 1240 MHz varieront considérablement selon l'objectif du système. Il conviendrait d'appliquer ici la notion de rapport gain d'antenne/température de bruit ( $G/T$ ) pour évaluer l'incidence du signal ——— GPS sur les systèmes de radiolocalisation.

### 3.3 Sensibilité des systèmes radar

Presque tous les équipements de radiodétection fonctionnent très près de leur niveau de bruit pour donner au système des possibilités maximales de détection. Normalement, il existe entre 5 et 15 dB au-dessus du niveau du bruit un niveau seuil qui est choisi pour obtenir le meilleur compromis possible entre la suppression des crêtes de bruit et autres réponses anormales (fausses alertes) et la détection des signaux recherchés. Dans une zone qui commence très au-dessous du niveau du bruit et se termine juste en dessus du niveau du seuil, la puissance de brouillage se manifeste sous la forme d'un nombre croissant de fausses alertes. On peut exprimer le niveau de puissance du bruit à l'entrée du récepteur du système de radiodétection par :

$$(I)_{dB} = (SPFD)_{dB} + (A_e)_{dB} + (B)_{dB} \quad (1)$$

où

$(I)_{dB}$  signifie  $10 \log I$ ,

$I$  : puissance du bruit (W),

$SPFD$  : puissance surfacique spectrale du GPS à la surface de la Terre ( $W/(m^2 \cdot Hz)$ ),

$A_e$  : ouverture équivalente de l'antenne de réception au sol dans la direction du satellite,

$B$  : largeur de bande du récepteur au sol (Hz),

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

où

$G$  : gain de l'antenne de réception au sol,

$\lambda$  : longueur d'onde GPS = 0,2444 m,

$$(I/N)_{dB} = (I)_{dB} - (kTB)_{dB} \quad (3)$$

où

$k$  : constante de Boltzman =  $1,38 \times 10^{-23}$  joule  $K^{-1}$ ,

$T$  : température du bruit dans le récepteur (K),

$B$  : largeur de bande de bruit du récepteur (Hz),

$I/N$  : rapport brouillage/bruit du récepteur qui produirait une dégradation sensible.

A partir des formules (1), (2) et (3), nous pouvons écrire :

$$(G/T)_{dB} = -205,4 + (I/N)_{dB} - (SPFD)_{dB} \quad (4)$$

où

$(G/T)_{dB}$  : rapport maximal du gain de l'antenne au sol/température de bruit du récepteur pour lequel le rapport brouillage/bruit limite ne sera pas dépassé.

On a établi que la puissance surfacique spectrale nécessaire au signal L2 du satellite (voir l'Annexe I), lorsque le système GPS fonctionne à pleine capacité, était de  $-200,0$  dB ( $W/(m^2 \cdot Hz)$ ). Cette valeur comprend une marge tenant compte du vieillissement du satellite, d'évanouissements des signaux, etc. Si l'on introduit cette valeur dans la formule (5), on peut lire:

$$(G/T)_{dB} = (I/N)_{dB} - 5,4 \quad (5)$$

La valeur de  $I/N$  varie selon le type de radar et la conception des circuits de base. Pour une valeur de  $I/N = 0$  dB, le taux de fausses alertes avec un système simple de radiodétection PPI, sans échos, ni brouillage ni circuits de suppression, subirait une dégradation de  $10^{-n}$  à  $10^{-(n/2)}$  lorsque le rapport  $G/T$  dans la direction du satellite ——— GPS dépasserait  $-5,4$  dB [Barton, 1965]. La gamme des valeurs de  $I/N$  acceptables s'étendrait de  $-10$  dB, pour des systèmes très sensibles, à plus de  $+20$  dB pour des systèmes équipés de circuits d'élimination automatique des échos et de circuits anti-brouillage intentionnel.

Pour le reste de la présente étude, nous supposons que  $I/N$  a une valeur de  $0$  dB.

### 3.4 Variation du rapport $G/T$

Dans la bande comprise entre 1215 et 1240 MHz, les dimensions des antennes varient entre 1,80 m et 12 à 15 m pour des gains de 19 dB à 35 dB. Les valeurs de bruit se situent entre quelques décibels et  $+15$  dB. On trouvera ci-dessous les valeurs de  $G/T$  pour l'éclairage par le faisceau principal du satellite pour trois systèmes représentatifs:

- un petit équipement radar transportable, avec antenne de 3 m et une valeur de 9 dB pour le bruit, aurait un rapport  $G/T$  de  $-10$  dB;
- un grand équipement de radiodétection et d'exploration ayant une antenne de 15 m et une valeur de bruit de 5 dB aurait un rapport  $G/T$  de  $+10$  dB;
- des systèmes de poursuite spatiale équipés d'un rideau d'antenne en phase de 30 m, ayant des valeurs de bruit de 1,5 dB seulement, auraient un rapport  $G/T$  atteignant  $+26$  dB.

Sur la base des exemples précités, il semble que de petits équipements radar transportables pourraient fonctionner avec une dégradation très faible ou nulle tandis que, pour des systèmes plus grands, la compatibilité dans la même voie pourrait être difficile à réaliser.

## 4. Partage avec les services fixe et mobile ainsi qu'avec d'autres types de stations à ondes entretenues

### 4.1 Brouillage de stations des services fixe et mobile par le système ——— GPS

Les limites de la puissance surfacique à la surface de la Terre ont été spécifiées pour des stations spatiales fonctionnant dans le service fixe par satellite, qui partage des bandes de fréquences avec le service fixe. Elles sont énoncées dans la Recommandation 357 pour les bandes de fréquences comprises entre 1,7 et 23 GHz. L'extrapolation de ces données à des fréquences inférieures, et par exemple à 1,2 GHz, indique qu'une densité surfacique de puissance de  $-156$  dB( $W/(m^2 \cdot 4$  kHz)) permettrait le partage entre le système ——— GPS et les services fixe et mobile. Les besoins énoncés pour le signal L2 du système ——— GPS, soit  $-164$  dB( $W/(m^2 \cdot 4$  kHz)) ne devraient pas créer de difficultés. Il est peu probable que de tels services subissent des dégradations, à moins que l'on utilise des antennes à gain élevé, comme dans le cas des systèmes à diffusion troposphérique.

### 4.2 Analyse de la compatibilité électromagnétique entre le récepteur à bande large du GPS et la correspondance publique aéronautique de Terre

Cette section étudie le brouillage d'un récepteur type du GPS, à large bande, qui utilise les deux codes de bruit pseudo-aléatoire (BPA): le code d'acquisition précise (P) et celui d'acquisition approchée (C/A). On n'examine pas le cas du brouillage d'un récepteur du GPS à bande étroite n'utilisant qu'un code de C/A.

Comme on le voit d'après le tableau des caractéristiques du récepteur du GPS qui figure dans l'Annexe I (c'est-à-dire pour un récepteur type de navigation aérienne, à faible coût), le filtrage est peu efficace de 1 593 à 1 594 MHz. Nombre des récepteurs que l'on produit actuellement ayant au plus un affaiblissement dû au filtre de 3 dB, il s'ensuit que le signal de la liaison sol-air de la correspondance publique avec les aéronefs (CPA) constitue manifestement une source de brouillage. Un complément d'étude est nécessaire pour déterminer la valeur d'affaiblissement dû au filtre RF pouvant être atteinte, d'autant qu'une telle valeur constitue un facteur critique en matière de partage des fréquences.

Le premier pas dans la détermination de la distance de séparation nécessaire entre les aéronefs et la base de CPA consiste à calculer la force du signal de CPA à l'entrée du récepteur d'aéronef du GPS, après affaiblissement par propagation en espace libre, en utilisant l'équation suivante :

$$P_R = P_T + G_T + G_R - FDR - L_p \quad (6)$$

où :

$P_R$  = puissance du signal reçu, en dBm  
 $P_T$  = puissance de sortie de l'émetteur, en dBm  
 $G_T$  = gain de l'antenne d'émission, en dBi  
 $G_R$  = gain de l'antenne de réception, en dBi  
 FDR = affaiblissement dépendant de la fréquence, en dB  
 $L_p$  = affaiblissement sur le trajet de propagation, en dB

$G_R$ , pour l'antenne du GPS, est normalement égal à 0 dBi, et FDR est égal à 3 dB. Dans l'équation ci-dessus, on suppose qu'il n'y a aucun effet d'écran dû au fuselage, et que le récepteur est en visibilité directe de l'émetteur de CPA. L'affaiblissement de propagation,  $L_p$ , est donné par l'équation (7) ci-après (seulement pour l'affaiblissement de propagation en espace libre):

$$L_p = 20 \log f + 20 \log D - 27,56 \quad (7)$$

où :

$f$  = fréquence d'émission, en MHz;  
 $D$  = distance, en mètres.

En combinant et en réécrivant les équations (6) et (7) en fonction de la distance, et en prenant un niveau de puissance reçue de 30 dBm comme critère de destruction du limiteur, on obtient l'équation (8):

$$D = \text{Log}^{-1} \{ (P_T + G_T - 20 \text{Log } f - 5,44)/20 \} \quad (8)$$

Dans l'hypothèse d'un émetteur de CPA situé au sol, d'une p.i.r.e. de 46 dBm dans la direction du récepteur du GPS, la solution de cette dernière équation est la distance nécessaire pour éviter d'endommager l'écrêteur de haut niveau. Cette distance est inférieure à un décimètre. De même, en prenant -40 dBm comme critère de saturation du limiteur, on détermine que la distance nécessaire pour éviter la saturation du récepteur du GPS est de 212 m.

Si ces conditions de distance nécessaire minimale sont remplies, le récepteur du GPS fonctionnera sans connaître de destruction ni de saturation; cependant, la force du signal brouilleur peut encore dépasser les seuils d'acquisition et/ou de poursuite d'un signal. Pour une acquisition normale par le signal de C/A, sur L1, le seuil précédemment établi est de -106 dBm. Mais le signal de CPA sera étalé par la réplique du code de C/A produite sur place pendant la corrélation. En admettant que le signal de CPA est une onde

entretenu à bande étroite, son spectre aura une distribution de la puissance du code de C/A du type  $\sin^2 x/x^2$ . Les points de puissance nulle, dans le spectre, se présentent à des multiples en fréquence de 1,023 MHz. La partie du spectre de son signal qui coïncide avec la bande passante de 1 kHz du circuit de détection, ou avec la bande passante de 50 Hz de la boucle de poursuite de la porteuse, correspond plus ou moins au 17ème lobe latéral, à cause du décalage relatif de fréquence par effet Doppler. Pour  $x = 17,5(\pi)$ , le niveau du signal est inférieur de 35 dB environ à celui du lobe principal. Si l'on ajoute l'affaiblissement de 3 dB dû au filtre, l'affaiblissement total dépendant de la fréquence est de 38 dB.

Dans les calculs ci-dessus, on a écarté l'affaiblissement du signal de CPA par la réduction de la bande passante, soit du circuit de détection, soit de la boucle de poursuite, puisqu'on en a déjà tenu compte dans la détermination du niveau admissible du signal brouilleur. Si l'on donne à FDR, dans l'équation (6), une valeur de 38 dB, et si l'on calcule la distance de séparation nécessaire pour l'acquisition du signal de C/A sur L1, on obtient un résultat de 7 508 m. De même, en prenant le seuil de -99 dBm, on calcule que la distance de séparation nécessaire pour la poursuite du signal de C/A sur L1 est de 3 354 m.

La réduction du signal de CPA due à l'étalement par le code de P sur L1, au cours du processus de corrélation, est de 17 dB environ. FDR n'est donc que de 21 dB, au lieu de 38 dB pour le code de C/A, sur L1. En suivant la même méthode que précédemment, et pour un seuil de -92 dBm, on calcule que la distance de séparation nécessaire pour l'exploitation, dans l'état 5 du récepteur, du signal P sur L1 est de 10 605 m.

On notera qu'il n'a pas été tenu compte, dans les calculs ci-dessus, du spectre d'émission du signal de CPA lui-même, parce qu'il est actuellement inconnu. En outre, dans l'analyse ci-dessus, on ne suppose qu'un seul signal brouilleur. Mais dans certaines conditions, plusieurs émissions de stations de CPA peuvent être présentes. Il faut une analyse plus complète pour caractériser les effets globaux des brouillages. Il peut être possible de réduire davantage les distances de séparation pour une exploitation compatible, au moyen d'un affaiblissement supplémentaire des signaux brouilleurs à 1 593 - 1 594 MHz; mais cela augmentera les dimensions, le poids et le coût du récepteur. L'émetteur de CPA situé à bord du même aéronef que le récepteur du GPS ne devrait pas causer de brouillage inadmissible en RF, du fait que sa fréquence d'exploitation (1 625,5 - 1 626,5 MHz) se situe en dehors de la bande passante du filtre RF de 45 dB. Par conséquent, on ne devrait prendre que les précautions normales pour assurer l'isolation du récepteur du GPS et de l'émetteur de CPA.

## 5. Résumé

### 5.1 Partage avec les services de radiolocalisation et de radionavigation

Certains systèmes de radiolocalisation peuvent être exploités sur la base d'un partage de fréquence avec égalité des droits avec le système ———— GPS. Toutefois, certains systèmes radars dotés de grandes antennes pourraient être affectés de brouillages provoqués par les signaux du ———— GPS.

### 5.2 Partage avec les services fixe et mobile

La puissance surfacique du signal du système ———— GPS à la surface de la Terre semble être suffisamment faible pour exclure le brouillage de ces services.

Les émissions de stations des services fixe et mobile peuvent causer une dégradation du système NAVSTAR GPS dans des zones très étendues.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARTON, D. K. [1965] *Radar System Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ., Etats-Unis d'Amérique.
- USA Electromagnetic Compatibility Analysis Center [octobre 1977] An EMC analysis of the GPS receiver in the domestic and foreign environment. USAF Systems Command Electronic Systems Division Technical Report ESD-TR-77-006.
- USA Space and Missile Systems Organization [juillet 1976] Operating frequencies for the NAVSTAR/Global Positioning System, Final Report. USAF Air Force Systems Command Report SAMSO. TR-76-197 NTIS Accession No. ADA030164. National Technical Information Service, US Dept. of Commerce, Washington, DC, USA.

## ANNEXE I

### CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU SYSTEME DE DETERMINATION GLOBALE DE LA POSITION (GPS)

#### 1. Le système GPS

##### 1.1 Introduction

Le Gouvernement des Etats-Unis d'Amérique met en oeuvre un système à satellites destiné au service de radionavigation par satellite. Ce système, tel qu'il est proposé, assurera la détermination précise de la position dans les trois dimensions, en tout point de la surface de la Terre ou près d'elle.

Ce système, connu sous le nom de Système global de détermination de la position ("Global Positioning System", ou GPS) comprendra, sous sa forme opérationnelle, 24 positions de satellites (21 satellites principaux et 3 satellites en réserve active sur orbite), à raison de 4 positions de satellites dans chacun des six plans orbitaux également espacés et inclinés à 55 degrés. Chaque satellite émettra sur les deux mêmes fréquences des signaux aux navigateurs. Ces signaux sont modulés par un train de bits prédéterminé, qui contient des données codées d'éphémérides et de temps, et ont une largeur de bande suffisante pour donner la précision de navigation nécessaire sans recourir à la transmission bidirectionnelle ou à l'intégration Doppler.

### 1.1.1 Besoins de fréquences

Les besoins en fréquences du système GPS sont fondés sur une évaluation de la précision nécessaire aux usagers, de la résolution du retard dû à la propagation espace-Terre, de l'affaiblissement dû à la propagation par trajets multiples, et du coût ainsi que des configurations des équipements. Deux canaux ont été choisis pour l'exploitation du système GPS: 1 575,42 MHz (L1) et 1 227,6 MHz (L2) [USA, 1976]. Le canal L1 servira à déterminer la position d'un usager, à 150 mètres près. Un second signal, émis sur les deux canaux L1 et L2, assure la diversité de fréquences et la plus grande largeur de bande nécessaires pour que l'accroissement de la précision de repérage, la résolution du retard dû à la propagation Terre-espace et la suppression de l'affaiblissement dû à la propagation par trajets multiples augmentent la précision totale dans un rapport de 1 à 10. Des signaux de télémessure et de maintenance dirigés à partir des installations de commande situées aux Etats-Unis vers le satellite, et retour, utiliseront la bande attribuée à la télémessure aux Etats-Unis d'Amérique.

Le GPS assurera un service mondial de radionavigation. Les conditions requises pour la sécurité de navigation (voir le RR, N° 953) qu'exige un tel service soulignent l'importance capitale de ce que les émetteurs de CPA ne provoquent pas de brouillage préjudiciable aux récepteurs du GPS.

### 1.2 Vue d'ensemble du système

Le GPS est un système spatial, fonctionnant par tous les temps, de radionavigation continue, de détermination de la position et de transfert de temps, qui assurera avec une extrême précision la détermination de la vitesse et de la position dans les trois dimensions, ainsi qu'une référence de temps précise et commune à l'intention des usagers dotés des équipements appropriés, en tout point de la surface de la Terre ou près d'elle.

Le système fonctionne d'après le principe de la triangulation passive. L'équipement de l'utilisateur du GPS mesure d'abord les pseudo-distances à quatre satellites, calcule leur position, et synchronise son horloge avec le GPS au moyen des paramètres d'éphémérides et de correction d'horloge qu'il reçoit. Il détermine alors la position de l'utilisateur dans un espace à trois dimensions, dans un système de coordonnées cartésiennes WGS-84 centré et fixé sur la Terre, et le décalage de l'horloge de l'utilisateur relativement à l'heure du GPS, essentiellement par le calcul des solutions simultanées de quatre équations de distance.

De même, on peut estimer la vitesse dans les trois dimensions de l'utilisateur et le décalage du rythme de son horloge en résolvant quatre équations de variation des distances, étant données les mesures de la variation des pseudo-distances à quatre satellites. Les mesures sont qualifiées de "pseudo" parce qu'elles sont faites par une horloge d'utilisateur imprécise et contiennent des éléments d'erreur fixes dus aux décalages de l'horloge de l'utilisateur par rapport à l'heure du GPS.

Le GPS assure deux niveaux de précision de navigation: le service de détermination précise de la position ("Precise Positioning Service", PPS) et le service de détermination normale de la position ("Standard Positioning Service", SPS). Pour le PPS, les précisions horizontale, verticale et temporelle sont, dans 95% des cas, de 18 mètres, 30 mètres et 170 ns, respectivement. Les précisions correspondantes dans le SPS sont de 100 mètres, 166 mètres et 330 ns. La précision de la mesure de vitesse déduite du PPS est presque entièrement fonction de la conception du récepteur et de la dynamique de l'utilisateur, mais on peut obtenir une précision type de 0,2 m/s par axe dans 95% des cas.

### 1.3 Description du système

Le système se compose de trois segments principaux: le segment spatial, le segment de commande et le segment de l'utilisateur. La fonction principale de chaque segment est comme suit:

#### 1.3.1 Segment spatial

Le segment spatial comprend les satellites GPS, qui ont la fonction de points de référence "célestes", et émettent depuis l'espace des signaux de navigation avec un codage horaire précis. Selon le projet actuel, la constellation opérationnelle de 21 satellites principaux et de 3 satellites en réserve active fonctionnera sur des orbites de 12 heures avec un demi-grand axe de 26 600 km environ. Les satellites seront placés dans six plans orbitaux, inclinés de 55 degrés sur l'équateur. Il y aura 4 satellites dans chaque plan. On optimisera la phase des satellites pour assurer que cinq d'entre eux au moins soient visibles des usagers, à 5 degrés sur l'horizon.

Le satellite est un engin stabilisé sur les trois axes. Les principaux éléments de sa charge utile principale de navigation sont l'étalon de fréquence atomique pour la précision horaire, le processeur pour la mise en mémoire des données de navigation, l'ensemble de signal de bruit pseudo-aléatoire (BPA) pour produire le signal de mesure de distance, et l'antenne d'émission dans la bande L, dont le diagramme de gain, à faisceau conformé, diffuse des signaux d'une puissance quasi uniforme sur les deux fréquences de la bande 1,5/1,6 GHz vers les usagers situés sur la surface de la Terre ou près d'elle. L'émission sur deux fréquences permettra la correction des retards ionosphériques dans la propagation du signal.

#### 1.3.2 Segment de commande

Le segment de commande assure les fonctions de poursuite, de calcul, de réactualisation et de contrôle nécessaires à la commande quotidienne de tous les satellites du système. Il se compose d'une station directrice maîtresse ("Master Control Station", MCS) située à Colorado Springs, où a lieu le traitement de toutes les données, et de cinq stations de contrôle largement espacées, situées à l'île de l'Ascension, à Diego Garcia, à Kwajalein, à Colorado Springs et à Hawaï. Au site de trois de ces stations de contrôle, se trouvent les antennes au sol pour le transfert des signaux de maintenance des satellites.



Les stations de contrôle poursuivent passivement tous les satellites en vue et accumulent les données de mesure de distance et les données Doppler. Ces données sont traitées à la MCS pour calculer les éphémérides, la dérive des horloges des satellites, et les retards par propagation du satellite, et utilisées ensuite pour produire des messages destinés aux satellites. Trois fois par jour, au moins, ces informations réactualisées sont transmises aux satellites pour y être mises en mémoire et être transmises ensuite par les satellites comme partie intégrante des messages de navigation destinés à l'utilisateur.

### 1.3.3 Segment de l'utilisateur

Le segment de l'utilisateur est l'ensemble de tous les équipements des usagers et des équipements de soutien. L'équipement type de l'utilisateur se compose d'une antenne, du récepteur-processeur du GPS, d'un ordinateur et des dispositifs d'entrées/sorties. Il acquiert et poursuit le signal de navigation provenant de quatre satellites en vue - ou davantage -, mesure les temps de transfert des RF et les décalages de fréquence par effet Doppler, les convertit en pseudo-distances et pseudo-vitesses, et en déduit la position dans les trois dimensions, la vitesse et l'heure du système. Les équipements des usagers iront du récepteur relativement simple, léger et portable jusqu'à des récepteurs perfectionnés, intégrés à d'autres capteurs ou systèmes de navigation pour un fonctionnement précis dans des conditions de dynamique élevée.

### 1.4 Structure du signal du GPS

Le signal aux navigateurs du GPS, émis depuis les satellites, se compose de deux porteuses modulées: L1, à une fréquence centrale de 1 575,42 MHz ( $154 f_0$ ), et L2, à une fréquence centrale de 1 227,6 MHz ( $120 f_0$ ), où  $f_0 = 10,23$  MHz.  $f_0$  est la sortie de l'étalon de fréquence atomique du satellite, auquel tous les signaux produits sont rapportés de façon cohérente.

Le signal sur L1 est modulé par un code de bruit pseudo-aléatoire (BPA) d'acquisition précise (P) et par un code de bruit pseudo-aléatoire d'acquisition approchée (C/A), chacun desquels est additionné en modulo 2 à un train de données binaires de navigation à 50 bit/s, avant la modulation en phase. Le code de P est une longue séquence binaire pseudo-aléatoire de 0 et de 1, avec une cadence d'horloge de 10,23 MHz et une période d'une semaine, exactement. Chaque samedi à minuit, il est réinitialisé, et sert d'indicateur permanent du temps hebdomadaire à bord de l'engin spatial. Le code de C/A est un code court, d'une cadence d'horloge de 1,023 MHz et d'une période de 1 ms exactement.

Le signal sur L2 est modulé en phase à 2 états, soit par le code de P, soit par le code de C/A, selon l'ordre de la station au sol. Le même train de données à 50 bit/s est additionné en modulo 2 au code, avant la modulation en phase, comme pour le signal sur L1. En exploitation normale, le code de P sera transmis sur L2.

L'application à la porteuse de la modulation en phase à 2 états transforme les séquences binaires de code BPA en séquences de +1 et -1, et transforme l'addition modulo 2 en multiplication. On peut ainsi décrire les signaux L1 et L2 émis par le satellite comme une fonction du temps.

Les fonctions des codes BPA sont doubles: 1) ils assurent de bonnes caractéristiques d'accès multiple à des satellites différents, puisque tous les satellites émettent sur les deux mêmes fréquences porteuses et ne se différencient entre eux que par le couple unique de codes P et C/A qu'ils transmettent; et 2) leurs caractéristiques de corrélation permettent la mesure précise du temps d'arrivée, de l'affaiblissement des signaux dû à la propagation par trajets multiples et des signaux brouilleurs.

Le train de données à 50 bit/s fournit le message de navigation, qui est formaté en cinq sous-trames d'une durée de six secondes. Chaque sous-trame, qui se compose de dix mots de 30 bits, commence par un mot de télémessure (TLM) et par le mot de passage du code C/A au code de P (HOW). Ce dernier permet que le transfert de C/A à P se fasse à la fin de toute sous-trame de six secondes. Les trois premières sous-trames contiennent les données d'éphémérides et de correction d'horloge du satellite particulier que l'on poursuit. Ces messages sont normalement valables pendant une période de 4 heures.

Les sous-trames 4 et 5 contiennent les informations d'almanach qui définissent les éphémérides moins précises de tous les satellites de la constellation, ainsi que l'état général du satellite, des messages spéciaux, le décalage du temps du GPS relativement au temps universel coordonné (UTC), etc. Les deux sous-trames 4 et 5 disposent de 25 pages de données chacune, qui sont transmises de façon cyclique. Il faut donc 6 secondes pour recevoir une page, et 2,5 minutes pour recevoir l'ensemble des 25 pages de données.

### 1.5 Puissance et spectres du signal

Les satellites du GPS utilisent une antenne à faisceau conformé qui diffuse une puissance quasi uniforme aux usagers du système. Les signaux émis sont polarisés circulairement vers la droite, avec une ellipticité qui n'est pas pire que 0,7 dB pour L1, et que 2,0 dB pour L2, pour une plage angulaire de  $\pm 14,3$  degrés par rapport à la ligne de visée. Pour un angle de site du satellite  $\geq 5$  degrés, la spécification de puissance minimale garantie est de -133 dBm pour la composante de code P sur L1, et de -130 dBm pour la composante de code C/A sur L1. Le niveau de puissance correspondant pour L2, qui ne porte que le code P, est de -136 dBm au moins. La puissance effective reçue des satellites est normalement supérieure de 4-5 dB aux valeurs spécifiées.

### 2. Fréquence d'exploitation

L'exploitation principale (L1) se situe dans un segment de la bande de fréquences 9, attribuée à la radionavigation par satellite.

### 3. Fonctions de télémessure

Le GPS est un système passif. Il ne nécessite pas de liaison montante pour les navigateurs. On économise donc le spectre en plaçant les fonctions de télémessure et de télésurveillance dans les bandes attribuées à cet usage.



#### 4. Caractéristiques du récepteur

Différentes configurations de récepteur du GPS conviennent à des applications différentes, selon la dynamique des véhicules et l'environnement de brouillages. On utilise, pour cette analyse de compatibilité électromagnétique entre CPA et GPS, les caractéristiques types d'un récepteur peu coûteux et peu perfectionné (voir le Tableau I).

Un équipement type d'utilisateur du GPS comprend quatre composants principaux: l'antenne, le récepteur-processeur, l'ordinateur et l'élément de commande et d'affichage. L'antenne est, dans la plupart des cas, un élément relativement simple qui assure la couverture hémisphérique des deux fréquences L1 et L2. Il ne sera pas nécessaire de pointer cette antenne omnidirectionnelle pour recevoir les signaux de tous les satellites visibles, mais elle n'aura aussi qu'une faible capacité de discrimination spatiale contre les brouillages.

L'étage d'entrée RF du récepteur type se compose d'un filtre de bande, d'un préamplificateur, et d'un changeur-abaisseur de fréquence multi-états. Le filtre de bande doit assurer l'affaiblissement hors bande. Pour empêcher que des brouillages de forte puissance n'endommagent le récepteur, l'ensemble préamplificateur-filtre sera également muni d'un limiteur à diodes.

Après l'amplification et l'abaissement à une fréquence intermédiaire adéquate, le récepteur produit un schéma de code qu'il essaie d'apparier au schéma de code entrant pour reconnaître un satellite particulier. On appelle ce processus corrélation, ou contraction du code. Après la contraction du code, la bande passante du récepteur est réduite, tandis que tout signal brouilleur sera étalé par la réplique de code produite sur place. L'acquisition normale consiste à synchroniser avec le signal de C/A et à transférer ensuite à P. C'est là la phase de fonctionnement du récepteur la plus vulnérable (état 1) aux brouillages extérieurs, parce qu'il ne s'est pas encore verrouillé sur le code.

Une fois le code acquis, l'alignement, ou synchronisation du signal entrant et de la réplique produite sur place est maintenu tant par la boucle de poursuite du code que par la boucle de poursuite de la porteuse. Une fois verrouillées les boucles de porteuse et de code, le récepteur peut démoduler les données, mesurer la pseudo-distance et la variation de pseudo-distance. Cet état de fonctionnement du récepteur (état 5) peut être maintenu si le niveau du signal brouilleur est plus élevé de 41 dB que l'un ou l'autre des signaux P, L1 ou L2, et plus élevé de 31 dB que le signal de C/A, L1. La plupart des types de récepteurs transforment les signaux de sortie de leurs corrélateurs en signaux numériques et effectuent leurs boucles de poursuite, ainsi que les autres fonctions logiques de commande du récepteur, au moyen de logiciels.

## 5. Seuils de brouillage

Le récepteur du GPS est sensible à deux formes de brouillage. Le premier mécanisme de brouillage agit sur la diode de haut niveau du limiteur de l'étage d'entrée RF. La diode sera saturée et empêchera la mise hors d'état des étages suivants du récepteur lorsque le niveau de crête de puissance RF à l'entrée du récepteur sera égal ou supérieur à -40 dBm, provoquant une perte temporaire de signal. Si la puissance moyenne de RF à l'entrée du récepteur dépasse 1 watt, ou si la puissance de crête de RF dépasse 10 watts, la diode de haut niveau de l'écrêteur peut cesser de fonctionner pour cause de destruction.

Le second mécanisme de brouillage touche le processus de détection du récepteur du GPS. Lorsque les brouillages ajoutent du bruit au récepteur, cela agit sur les caractéristiques d'acquisition et de poursuite en abaissant le rapport signal/bruit dans les circuits de détection ou dans les dispositifs de poursuite. Le niveau maximal de brouillage que peut tolérer la caractéristique de poursuite sans augmenter de façon appréciable son temps d'acquisition est supérieur de 24 dB au niveau du signal de C/A, L1. En comparant ce niveau de brouillage à la puissance minimale spécifiée du signal reçu de C/A, L1, on détermine que le seuil de brouillage pour une acquisition normale est de -106 dBm. A des niveaux supérieurs, le temps d'acquisition se dégrade. De même, les seuils de brouillage pour un fonctionnement dans l'état 5 sont de -92 dBm pour le signal P, sur L1, et de -99 dBm pour le signal de C/A, sur L2.

## 6. Travaux du CCIR

Le CCIR étudie attentivement la mise au point de tels systèmes depuis un certain nombre d'années et plusieurs Rapports et Recommandations ont été approuvés.

## TABLEAU I

Caractéristiques du récepteur du GPS

(Pour un récepteur type de navigation aérienne, de coût modique)

Fréquence porteuse de L1	1 575,42 MHz
Fréquence porteuse de L2	1 227,6 MHz
Débit binaire du circuit de code de P	10,23 Mitb/s
Débit binaire du circuit de code C/A	1,023 Mbit/s
Débit binaire de données pour la navigation	50 bit/s
Taux d'erreur résiduelle sur les bits	$10^{-5}$
Niveau minimal de puissance reçue (L2, P)	-136 dBm
Niveau minimal de puissance reçue (L1, P)	-133 dBm
Niveau minimal de puissance reçue (L1, C/A)	-130 dBm
Niveau de limitation du préamplificateur	-40 dBm
Niveau de mise hors d'état du préamplificateur	30 dBm (moyenne) 40 dBm (crête)
Temps de récupération après surcharge	1 s
Bande passante du filtre RF, 3 dB	$\pm 17$ MHz
Bande passante du filtre RF, 45 dB	$\pm 50$ MHz
Isolement de L1 et L2	40 dB
Facteur de bruit du récepteur	3 dB
Marge normale du rapport brouillage/signal en acquisition (L1, C/A)	24 dB
Marge du rapport brouillage/signal en poursuite, état 5 (L1, C/A)	31 dB
Marge du rapport brouillage/signal en poursuite, état 5 (L1, P)	41 dB

---