

Le système de radionavigation "GPS-NAVSTAR"

par l'Ingénieur en Chef de l'Armement Nicolas de CHEZELLES
(Ministère de la Défense, Délégation aux Relations Internationales)

Résumé

Le système GPS-NAVSTAR est un système de radionavigation utilisant un réseau de satellites répartis sur 6 orbites circulaires à 20 000 kilomètres d'altitude.

Une constellation limitée composée de satellites de 1^{re} génération fournit dès aujourd'hui des prestations de positionnement, de navigation et de synchronisation, plusieurs heures par jour.

La constellation opérationnelle doit être mise en place progressivement à partir d'octobre 1988, en vue d'un service opérationnel total début 1991.

Cet exposé, après un bref rappel sur les caractéristiques essentielles de ce système, présentera l'état d'avancement du projet, en s'appuyant notamment sur les informations recueillies au cours du dernier Comité Directeur du programme OTAN-GPS-NAVSTAR, tenu à Londres les 15-16-17 mars 1988.

L'ICA Nicolas de Chezelles travaille au Ministère de la Défense, à la Délégation aux Relations Internationales, et assure la présidence du Comité Directeur OTAN-GPS-NAVSTAR depuis 1984.

1 - FONCTIONS ET SERVICES DU SYSTEME "GPS-NAVSTAR"

Le système "GPS-NAVSTAR" est un système de radionavigation offrant des services de positionnement, de navigation et de synchronisation.

Le Service de Positionnement Standard (SPS) est un service ouvert au grand public, sans restriction. La précision de positionnement est de l'ordre de 200 mètres dans 50 % du temps. Cette précision est modifiable par commande au sol.

Le Service de Positionnement Précis (PPS) est un service réservé aux usagers militaires autorisés. La précision de positionnement est de l'ordre de 15 mètres dans 50 % du temps. L'accès est contrôlé et astreint à des mesures de chiffrement.

Les usagers du service PPS ont accès à une information de vitesse sur Trajectoire avec une précision de l'ordre de 0,1 m/s dans 50 % du temps.

Tous les usagers ont accès à un service de synchronisation (Precise Time and Time Intervals) d'une précision de l'ordre de 100 ns, calé sur le Temps Universel Coordonné (TUC).

Par ailleurs, il convient de signaler des caractéristiques originales telles que :

- une couverture continue et globale ;
- une haute résistance au brouillage (intentionnel ou accidentel) ;

- une surveillance permanente de l'état du système ;

- une grille de référence géographique universelle et unique.

Enfin il faut signaler les possibilités d'utilisation du signal GPS pour le positionnement fin (géodésie, cartographie, science du globe,...) par intégration et traitement interférométrique.

2 - GENERALITES SUR LE SYSTEME

2.1 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une constellation de satellites est utilisée comme autant de balises en vue d'une triangulation par mesures radioélectriques.

- L'ensemble du système est synchronisé.

- Chaque satellite émet un signal numérique répétitif, déterministe, portant une information de position propre.

- Les utilisateurs font des mesures de **distance** par mesure de **temps de propagation** et exploitent les messages informationnels.

- Les utilisateurs font alors des calculs de triangulation.

2.2 - ORGANISATION DU SYSTEME

Le système est décomposé en 3 segments. Le "Segment Spatial", le "Segment de contrôle", et le "Segment Utilisateurs".

2.2.1 - Le segment spatial

Le segment spatial, pour la phase opérationnelle, est composé d'une constellation de 18 satellites (plus 3 rechanges actifs) répartis sur 6 orbites inclinées à 55°, à une altitude de 20 000 kilomètres environ. Les satellites, de 2^e génération, seront mis en orbite à partir d'octobre 1988, par les lanceurs consommables DELTA II et par la navette spatiale suivant le plan de lancement joint en annexe.

Pour valider et tester le concept, une constellation limitée de satellites de 1^{re} génération est en place depuis 1979 ; sur 11 véhicules lancés, 10 ont été mis en orbite avec succès, 6 sont encore exploitables, les 4 plus récents resteront probablement utilisables au-delà de 1990.

Chaque satellite émet en permanence des signaux de navigation à 1575 MHz (bande L₁) de 1227 MHz (bande L₂), suivant des codes pseudo-aléatoires : un code rapide, désigné P s'il n'est pas chiffré, et Y s'il est chiffré, à 10,23 M bits/seconde, et un code lent, désigné C/A à 1,023 Mbits/seconde.

Ces deux codes sont modulés par un message informationnel à 50 bits/seconde.

L'orthogonalité des codes permet de discriminer les satellites entre eux.

A titre d'ordre de grandeur, les satellites en orbite ont une masse d'environ 800 kg, une puissance électrique disponible de 700 watts en fin de vie, et une durée de vie de plus de 7 ans.

2.2.2 - Le segment de contrôle

Le segment de contrôle comprend notamment un réseau de surveillance réparti sur la surface du globe, qui recueille en permanence les données issues des satellites, une station principale installée aux Etats-Unis qui établit la qualité de ces données et en déduit les ordres et corrections à envoyer aux satellites, et les stations de téléchargement.

Par ailleurs, le segment de contrôle fournit un certain support aux utilisateurs, en analysant en temps réel et en diffusant des informations sur la qualité des prestations fournies et sur l'état de santé du segment spatial.

2.2.3 - Le "segment utilisateur"

Le "Segment Utilisateur" comprend les quelques dizaines de milliers de récepteurs, civils et militaires, répartis dans le monde entier.

Chaque récepteur comprend les grands sous-ensembles suivants :

- un système antenne, plus ou moins compliqué en fonction des modes de fonctionnement envisagés (interférométrie, résistance au brouillage,...) ;
- un ensemble radio-fréquence : synthétiseur, oscillateur local, démodulateur, filtres passe-bande ;
- un ensemble de traitement vidéo-fréquence : corrélateur, analyseur de phase, boucles de poursuite, mesures Doppler...
- un ensemble de traitement numérique : comptages rapides, calculs géométriques, calculs statistiques, calculs de navigation,...
- un ensemble de gestion et de commande : séquenceurs, interfaces, commandes et visualisations, tests et surveillances.

Selon les conditions d'emploi, les récepteurs sont organisés pour recevoir et exploiter simultanément un ou plusieurs satellites (couramment 1,2 ou 5 canaux de réception).

2.3 - CALENDRIER

Les grandes lignes du calendrier figurent sur la planche jointe en annexe.

Les dates "clé", pour les utilisateurs, sont les suivantes :

- depuis 1980, disponibilité des signaux pendant quelques heures par jours ;
- fin 1989, disponibilité des services GPS dans le plan horizontal ;
- fin 1990, disponibilité des services opérationnels GPS.

2.4 - CONDITION D'ACCES AUX SERVICES

Ainsi qu'il est indiqué précédemment, le service SPS est accessible à la communauté civile sans aucune restriction.

Le service PPS est accessible aux forces armées et aux services gouvernementaux des pays alliés, et aux utilisateurs explicitement "autorisés". Certains usagers civils pourront être autorisés, au cas par cas, suivant des procédures lourdes et contraignantes.

L'accès au service PPS est protégé par des dispositifs de chiffrement suivant l'organisation suivante :

a) Le "Selective Availability (S.A.) - Ce dispositif introduit un bruit sur l'horloge de bord et un surcodage des éphémérides. Il dégrade la précision de localisation, sans perturber le fonctionnement.

b) Le "Anti Spoofing" (A.S.) - Ce dispositif chiffre le code "P" qui devient "Y". Il interdit l'accès au service PPS, sans clé.

La politique annoncée par la direction de programme est de mettre en œuvre le dispositif "S.A." en permanence, et de mettre en œuvre le dispositif "A.S." occasionnellement et sans préavis.

L'effet de ces dispositifs sur les performances finales, selon que l'utilisateur dispose ou non des clés, est donné dans la planche jointe en annexe.

2.5 - ANALYSE DES PERFORMANCES

L'analyse des performances est présentée sous forme de précision sur la mesure élémentaire de distance entre l'utilisateur et chaque satellite, précision exprimée en **mètre**. Le passage de cette précision sur une **distance** à une précision sur une **position** résulte de la résolution géométrique de la triangulation. Cette résolution est purement déterministe, et introduit un simple facteur linéaire entre ces deux types de précision, désigné "facteur géométrique", qui ne dépend que de la configuration géométrique des satellites exploités pour la triangulation (dans la littérature Américaine, "Geometrique Dilution of Precision", ou "GDOP"). Le facteur est de l'ordre de 2 ou 3 pour des géométries favorables, et peut atteindre des valeurs infinies pour des géométries défavorables. Le système est organisé pour fournir un facteur géométrique inférieur ou égal à 6, dans plus de 99 % du temps.

L'analyse systématique des budgets d'erreur est présentée sur les planches jointes en annexe (incertitude sur la mesure de distance, en mètre, à 1 sigma).

SIGNAUX EMIS PAR LES SATELLITES DU SYSTEME GPS

BANDES D'ÉMISSION		MODULATION			NIVEAU DU SIGNAL RF MINIMUM RECU	
FREQUENCE	MHz	CODE P	CODE C/A	DONNEES	SIGNAL P	SIGNAL C/A
L ₁	1575,42	10,23 Mb/s	1,023 Mb/s	50 bps	-163 dBW	-160 dBW
L ₂	1227,60	10,23 Mb/s	N/A	50 bps	-166 dBW	N/A

3 - CONCLUSION

Le système GPS-NAVSTAR introduit de nouvelles dimensions dans la communauté de la navigation et du positionnement :

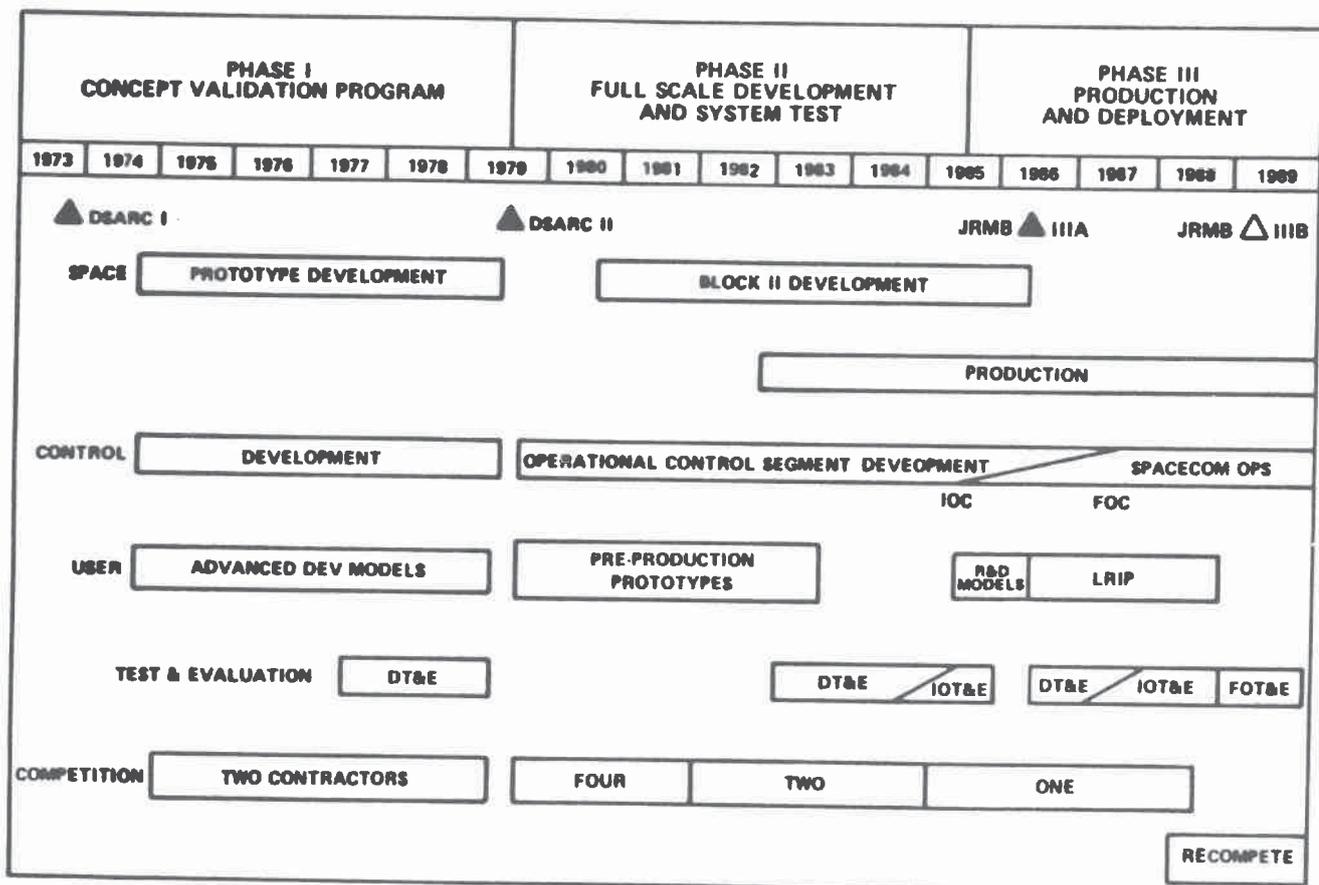
- une dimension de "système de navigation" où l'utilisateur attend un service, sans avoir à se préoccuper des moyens pour l'obtenir ;
- une complexité inégalée, qui s'appuie sur une infrastructure spatiale très importante ;
- des questions nouvelles sur les relations entre les communautés civiles et militaires, liées aux

affaires de sécurité, de disponibilité et de fonctionnement ;

— l'amorce d'une globalisation des systèmes, au niveau planétaire et à finalité multifonction, avec une forte interdépendance dont les vulnérabilités induites devront être analysées ultérieurement.

Enfin, il convient de noter que le système GPS-NAVSTAR constitue un défi à l'industrie face à un produit promis à un très large avenir commercial, mais dépendant de techniques sophistiquées et d'investissements technologiques élevés, dans un contexte concurrentiel débridé.

GPS PROGRAM EVOLUTION



- UNCLASSIFIED -

EFFECTS OF SA/A-S ON GPS (U)

SA	A-S	PRN CODE		NAV MSG	UE PERFORMANCE (SEP)*	
		P(Y)	C/A		KEYED	UNKEYED
Off	Off			Full Accuracy	P - 16M	P - 16M C/A - 30M
Off	On	Encrypted (Y-Code)		Full Accuracy	Y - 16M	C/A - 30M
On	Off			Degraded Accuracy	P - 16M	P - 72M C/A - 76M**
On	On	Encrypted (Y-Code)		Degraded Accuracy	Y - 16M	C/A - 76M**
					PPS	SPS

* Actual performance dependent on SA level Invoked
 ** 76M SEP = 100M 2 DRMS = 44M CEP

UNCLASSIFIED

DELTA II SCHEDULE				SHUTTLE	SCHEDULE
VEHICULE	LAUNCH DATE			VEHICLE	LAUNCH DATE
1	15 OCT. 88			1	5 OCT. 89
2	15 JAN. 89			2	5 OCT. 89
3	1 ^{er} APR. 89			3	1 ^{er} MAR. 90
4	1 ^{er}	JUN.	89	4	1 ^{er} MAR. 90
5	15	JUL.	89	5	6 SEP. 90
6	1 ^{er}	SEP.	89	6	10 JAN. 91
7	15	OCT.	89	7	10 APR. 91
8	15	JAN.	90	8	8 JUL. 91
9	1 ^{er}	MAR.	90		
10-20	1 JUN. 90-1 JUL. 91				
NAVSTAR G PS	UNCLASSIFIED			AS OF : 24 JUL. 87	

GPS SCHEDULE

	FY - 87	88	89	90	91	92	93	94	2D CAPBLTY	3D CAPBLTY	21 SATS
PRE 51L BASELINE	6	7	7	4	4				JUN. 88	JUN. 89	OCT. 89
STS MANIFEST, 2 OCT. 86			4	2	2						
MLV CONTRACT BASELINE			6	6	8						
STS AND MLV			10	8	10				DEC. 89	SEP. 90	NOV. 90

NAVSTAR GPS

UNCLASSIFIED

AS OF : 12 MAR. 87

DIFFERENTIAL GPS SYSTEM ERROR BUDGET

Segment Source	Error Source	Error (1 σ)m	Differential Mode	
			Near	Far
Space	Clock & Nav Subsystem Stability	3.4	0	0
	Predictability of SV Perturbations	1.0	0	0
	Other	0.5	0	0
Control	Ephemeris Prediction Model Implementation	4.2	0	0
	Other	0.5	0	0
User (P-Code)	Iono Delay Compensation	2.3	0	2.3
	Tropo Delay Compensation	2.0	0	2.0
	RCVR Noise and Resolution	1.5	2.1	2.1
	Multipath	1.2	1.7	1.7
	Other	0.5	0.5	0.5
1σ UERE		6.6	2.75	4.1

NAVSTAR/GPS SPACE VEHICULE NUMBERING

The following is a listing of navstar/GPS satellites and their respective identification numbers :

SV*	PRN**	IRON***	REMARKS
1	4	5111	
2	7	5112	UNHEALTHY
3	6	5113	
4	8	5114	CRYSTAL CLOCK DEAD
5	5	5115	
6	9	5118	
7			LAUNCH FAILURE
8	11	9794	
9	13	9521	
10	12	9783	
11	3	6374	

* Space Vehicle number.

** Pseudo Random Noise Code number.

*** Inter Range Operational number.

SYSTEM ERROR BUDGET

SEGMENT SOURCE	ERROR SOURCE	ERROR (1σ)M	
		P-CODE	C/A-CODE
SPACE	CLOCK & NAV SUB-SYSTEM STABILITY	3.4	3.4
	PREDICTABILITY OF SV PERTURBATIONS	1.0	1.0
	OTHER	0.5	0.5
CONTROL	EPOCHERIS PREDICTION MODEL IMPLEMENTATION	4.2	4.2
	OTHER	0.5	0.5
USER	IONO DELAY COMPENSATION	2.3	5.0 to 10
	TROPO DELAY COMPENSATION	2.0	2.0
	RCVR NOISE AND RESOLUTION	1.5	7.5
	MULTIPATH	1.2	1.2
	OTHER	0.5	0.5
1σ UERE		6.6	10.8 to 13.9