Distr. LIMITÉE

A/CONF.184/BP/4
27 mai 1998

FRANÇAIS
Original: ANGLAIS

TROISIÈME CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES
SUR L'EXPLORATION ET LES UTILISATIONS PACIFIQUES DE L'ESPACE EXTRA-ATMOSPHÉRIQUE

SYSTÈMES DE NAVIGATION ET DE LOCALISATION PAR SATELLITE

Document d'information n° 4

Liste des documents d'information:

1. La Terre et son environnement dans l'espace
2. Catastrophes: prévision, alerte et atténuation des effets
3. Gestion des ressources de la Terre
4. Systèmes de navigation et de localisation par satellite
5. Communications spatiales et leurs applications
6. Sciences spatiales fondamentales, recherche sur la microgravité et leurs avantages
7. Aspects commerciaux de l'exploration spatiale, y compris les retombées bénéfiques
8. Systèmes d'information pour la recherche et les applications
9. Missions de petits satellites
10. Initiation et formation aux sciences et aux techniques spatiales
11. Retombées bénéfiques sur le plan économique et social
12. Promotion de la coopération internationale

V.98-53878

TABLE DES MATIÈRES

		Paragraphes	*Page*
PRÉFACE			3
RÉSUMÉ			4
I.	HISTORIQUE SUCCINCT DES SYSTÈMES DE RADIONAVIGATION	1-3	4
II.	PRÉSENTATION DE LA NAVIGATION PAR SATELLITE	4-36	5
	A. Système mondial de localisation	4-21	5
	B. Système mondial de localisation différentielle	22-25	7
	C. Système orbital mondial de navigation par satellite	26-32	8
	D. Service complémentaire géostationnaire européen de navigation	33-36	9
III.	SYSTÈMES CONNEXES	37-55	9
	A. Système de recherche et de sauvetage	37-41	9
	B. ARGOS	42-47	10
	C. DORIS	48-50	11
	D. Satellite Laser Ranging	51-55	11
IV.	APPLICATIONS DU SYSTÈME MONDIAL DE LOCALISATION	56-97	12
	A. Applications dans l'aviation	57-58	12
	B. Applications maritimes	59-60	12
	C. Applications dans le transport routier	61-64	13
	D. Applications dans la cartographie, la géodésie et l'arpentage (pour la phase de la porteuse)	65-70	14
	E. Applications dans le domaine des sciences de la Terre	71-73	14
	F. Applications météorologiques et climatiques	74-77	15
	G. Étude et sondage de l'atmosphère	78-80	15
	H. Agriculture	81-83	16
	I. Applications dans la mesure du temps et dans les communications	84-91	16
	J. Utilisations du système mondial de localisation par les engins spatiaux	92-95	17
	K. Prospection minière	96	18
	L. Sûreté publique	97	18
V.	AVANTAGES ÉCONOMIQUES ET SOCIAUX	98-104	18
	A. Besoins	98	18
	B. Promotion de la coopération internationale	99-101	19
	C. Enjeux et problèmes	102-104	19

PRÉFACE

L'Assemblée générale, dans sa résolution 52/56, a approuvé la recommandation tendant à tenir la troisième Conférence des Nations Unies sur l'exploration et les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (UNISPACE III) à l'Office des Nations Unies à Vienne du 19 au 30 juillet 1999 en tant que session extraordinaire du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique, ouverte à tous les États Membres de l'Organisation des Nations Unies.

UNISPACE III aura pour objectifs principaux de:

a) Promouvoir des moyens d'utilisation efficaces des techniques spatiales afin d'aider à résoudre des problèmes d'importance régionale ou mondiale;

b) Renforcer les capacités des États Membres, en particulier des pays en développement, pour leur permettre d'utiliser les applications de la recherche spatiale au service du développement économique et culturel.

Les autres objectifs d'UNISPACE III seront les suivants:

a) Donner aux pays en développement la possibilité de définir leurs besoins en matière d'applications spatiales à des fins de développement;

b) Étudier les moyens de faciliter l'utilisation des applications spatiales par les États Membres en vue de promouvoir un développement durable;

c) Aborder les questions de l'éducation, de la formation et de l'assistance technique en relation avec les sciences et les techniques spatiales;

d) Offrir un cadre propice à l'évaluation critique des activités spatiales et sensibiliser davantage le grand public aux retombées bénéfiques des techniques spatiales;

e) Renforcer la coopération internationale en faveur du développement des techniques et des applications spatiales et de leur utilisation.

Dans le cadre des activités préparatoires à la tenue d'UNISPACE III, le Bureau des affaires spatiales du Secrétariat a établi plusieurs documents d'information pour aider les États Membres participant à la Conférence, ainsi qu'aux réunions préparatoires régionales, à faire le point sur l'état d'avancement de la question et sur les dernières tendances qui se dessinent en matière d'utilisation des techniques spatiales. Ces documents ont été établis à partir des éléments fournis par les organisations internationales, les agences spatiales et les experts du monde entier. Les 12 documents d'information publiés dans la même série se complètent et devraient faire l'objet d'une lecture globale.

Il serait utile pour les États Membres, les organisations internationales et les industries spatiales qui prévoient de participer à UNISPACE III de tenir compte du présent document, pour arrêter notamment la composition de leur délégation et pour formuler leurs contributions aux travaux de la Conférence.

L'Organisation de l'aviation civile internationale, l'Organisation météorologique mondiale, l'Agence spatiale européenne, l'Organisation internationale de télécommunications mobiles par satellites, le Ministère indien des questions spatiales, l'Organisation indienne de recherche spatiale et l'Agence spatiale russe ont contribué à l'établissement du présent document.

M. J. Rycroft, de l'Université internationale de l'espace, Strasbourg (France) et de l'Université de Cambridge (Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord), a prêté un concours précieux pour la rédaction technique des documents d'information n°s 1 à 10.

RÉSUMÉ

Le Système mondial de navigation par satellite (GNSS) est un système de localisation radio qui utilise les techniques spatiales et comprend une ou plusieurs constellations de satellites, dont le nombre est modulable en fonction de l'opération visée, et qui fournit vingt-quatre heures sur vingt-quatre des informations permettant à des utilisateurs dotés du matériel voulu, où qu'ils se trouvent sur la surface de la Terre ou près de celle-ci, et parfois en vol, de connaître leur position en trois dimensions, leur vitesse et l'heure. Les systèmes de navigation par satellite comprennent deux composantes essentielles: le Système mondial de localisation (GPS) (exploité par les États-Unis d'Amérique) et le Système orbital mondial de navigation par satellite (GLONASS) (exploité par la Fédération de Russie).

La navigation par satellite utilise des satellites comme points de référence pour calculer les positions à quelques mètres près ou, grâce aux techniques de pointe, au centimètre près.

L'intérêt de la navigation et de la localisation par satellite tient au faible coût des systèmes et à la qualité des services proposés. Son domaine de prédilection est le secteur des transports, mais on découvre en permanence de nouvelles applications dans toute une gamme de secteurs à mesure que la technologie progresse. L'avenir de la navigation par satellite est illimité.

Les récepteurs GNSS ont été miniaturisés en quelques circuits intégrés et sont en train de devenir très économiques, ce qui rend cette technologie accessible à pratiquement chacun. Les applications de cette technologie dépassent de loin les objectifs initiaux. Les GNSS sont aujourd'hui utilisés par des scientifiques, des sportifs, des agriculteurs, des militaires, des pilotes, des géomètres, des randonneurs, des chauffeurs-livreurs, des marins, des bûcherons, des pompiers et bien d'autres professions, pour accroître la productivité et la sécurité de leur travail et parfois pour le rendre plus facile. Voitures, navires, avions, engins destinés au bâtiment, matériel pour le tournage de films, machines agricoles et ordinateurs portables sont équipés de récepteurs GPS. Le jour est proche où la navigation par satellite deviendra universelle.

Le marché mondial des récepteurs GNSS, qui se développe rapidement, représente un chiffre d'affaires annuel d'environ 2 milliards de dollars des États-Unis et devrait atteindre 8 milliards d'ici à l'an 2000. S'agissant des marchés de services à valeur ajoutée, les scénarios prudents prévoient qu'ils seront d'ampleur au moins équivalente à celle du marché des récepteurs.

Les systèmes GPS et GLONASS ont été tous deux conçus à des fins militaires et restent sous le contrôle militaire respectif des États-Unis d'Amérique et de la Fédération de Russie. Les utilisateurs civils peuvent toutefois y accéder gratuitement. À l'heure actuelle, ni l'un ni l'autre système ne remplit les conditions voulues pour desservir l'ensemble des usagers – l'aviation civile en particulier – et tous deux doivent être renforcés; les préparatifs pour un système complémentaire sont engagés.

Si l'on peut envisager d'utiliser les systèmes existants pour mettre au point le futur système mondial de navigation par satellite, il reste encore à résoudre un certain nombre de problèmes politiques, institutionnels, juridiques et économiques avant de pouvoir déployer tout nouveau type de système.

I. HISTORIQUE SUCCINCT DES SYSTÈMES DE RADIONAVIGATION

1. L'origine de la radionavigation remonte aux années 20. Les premiers systèmes se fondaient uniquement sur l'aptitude d'un récepteur radio muni d'une antenne-cadre à déterminer le sens d'arrivée d'un signal radio et son orientation relative par rapport à l'émetteur. Par la suite, plusieurs systèmes de radionavigation se sont appuyés sur les émetteurs au sol envoyant des signaux modulés, caractéristiques de la direction de la transmission. D'autres systèmes radio déterminaient la direction et/ou la distance, à partir de matériel de navigation relié à un émetteur fixe.

2. On a aussi eu recours aux systèmes de navigation au long cours qui mesurent l'écart temporel séparant les signaux envoyés par des couples d'émetteurs synchronisés placés en différents points ou qui mesurent les différences de phase entre les ondes entretenues provenant des couples d'émetteurs.

3. Les émetteurs au sol pour la navigation utilisent toute une gamme de fréquences. Les ondes radio à basse fréquence ne sont pas faciles à moduler et sont sujettes aux erreurs en raison des perturbations ionosphériques et météorologiques. La radio haute fréquence étant limitée à une portée en visibilité directe, elle requiert l'existence d'un grand nombre de sites de transmission terrestres et les émetteurs sont impossibles à localiser en mer. Un satellite représente, quant à lui, le point d'implantation idéal pour un émetteur de radionavigation et une constellation de satellites, déployés sur des orbites appropriées, peut envoyer des signaux de navigation sur toute la planète. Les satellites ont été utilisés pour la première fois à des fins de repérage dans le cadre du système TRANSIT.

II. PRÉSENTATION DE LA NAVIGATION PAR SATELLITE

A. Système mondial de localisation

4. Le sigle GPS est l'appellation la plus répandue pour décrire les systèmes de navigation par satellite; il ne représente, toutefois, que l'un des éléments qui composent le GNSS. La navigation par satellite utilise des satellites comme points de référence pour calculer les positions à quelques mètres près. Grâce aux techniques de pointe et au renforcement des systèmes, la navigation par satellite permet d'obtenir des mesures au centimètre près.

5. Les récepteurs GNSS ont été miniaturisés en quelques circuits intégrés et sont en train de devenir très économiques, ce qui rend cette technologie accessible à pratiquement chacun. Voitures, navires, avions, engins destinés au bâtiment, matériel pour le tournage de films, machines agricoles et même ordinateurs portables sont équipés de récepteurs GPS, dont l'emploi est en passe de devenir universel.

6. La navigation par satellite consiste en un système de localisation radio qui utilise les techniques spatiales et comprend une ou plusieurs constellations de satellites, dont le nombre est modulable en fonction de l'utilisation visée, et qui fournit vingt-quatre heures sur vingt-quatre des informations permettant à des utilisateurs dotés du matériel voulu, où qu'ils se trouvent sur la surface de la Terre ou près de celle-ci, et parfois en vol, de connaître leur position en trois dimensions, leur vitesse et l'heure. Un système de navigation par satellite fournit à ses utilisateurs une information dont l'exactitude et l'intégrité sont suffisantes pour pouvoir être utilisées dans des situations critiques. Le système GPS est le premier volet du système de navigation par satellite auquel les utilisateurs civils aient largement accès. Le Système orbital mondial de navigation par satellite ou GLONASS, dont le fonctionnement est similaire, constitue le deuxième volet du GNSS.

7. Ces systèmes devraient améliorer sensiblement beaucoup d'autres systèmes ayant des répercussions sur la vie de chacun. En associant le GNSS aux techniques actuelles et futures de cartographie sur ordinateur, on pourra mieux identifier et gérer les ressources naturelles. Les systèmes intelligents de positionnement et de navigation pour les véhicules permettront aux automobilistes et aux routiers d'éviter les autoroutes encombrées et de trouver de meilleurs itinéraires pour arriver à destination, ce qui représentera une économie de carburant se chiffrant en millions de dollars et réduira notablement la pollution atmosphérique. Les déplacements à bord des navires et des aéronefs se feront dans des conditions de sécurité plus grandes, quelles que soient les conditions météorologiques. Les entreprises ayant un grand nombre d'installations en extérieur (voies ferrées et autres éléments) seront à même de gérer leurs ressources plus efficacement, d'où une baisse des prix pour le consommateur.

8. La cartographie et la topographie de précision sont aussi un domaine où le GPS se développe et les entreprises spécialisées ont largement recours à ce système. Dans le cadre de la gestion de la faune sauvage, les espèces menacées sont équipées de récepteurs GPS et de petits émetteurs qui permettent de déterminer les schémas de répartition des populations et les sources de contamination possibles.

9. Les ballons équipés de GPS surveillent les trous de la couche d'ozone au-dessus des régions polaires, la qualité de l'air étant, pour sa part, surveillée à l'aide de récepteurs GNSS. Les balises flottantes qui suivent la trace

des déversements d'hydrocarbures importants transmettent des données à l'aide du GNSS. Les archéologues et les explorateurs utilisent ce système. L'avenir du GNSS est illimité. Les nouvelles applications se multiplieront au fur et à mesure des progrès de la technologie. Comme le coût des récepteurs GNSS continue de baisser, de plus en plus de chefs d'entreprise lui trouveront de nouvelles applications.

10. Le GPS est un système de navigation par satellite conçu et exploité par le Département de la défense des États-Unis. Il permet aux utilisateurs se trouvant sur terre, en mer ou en vol de déterminer leur position en trois dimensions, leur vitesse et l'heure. Ce service est à la disposition des utilisateurs militaires et civils vingt-quatre heures sur vingt-quatre, quelles que soient les conditions météorologiques et en tout point du globe.

11. Le GPS utilise les satellites du système NAVSTAR (système de navigation utilisant l'heure et la distance). La constellation actuelle se compose de 21 satellites auxquels s'ajoutent trois satellites de rechange. Le système GPS est maintenant pleinement opérationnel. Les satellites sont placés en orbite pour des périodes d'environ douze heures, à une altitude de 20 200 kilomètres. La constellation est déployée sur six plans orbitaux, ayant chacun une inclinaison d'environ 55 degrés par rapport au plan équatorial. Un tel agencement permet qu'à tout moment, il y ait au moins quatre (et jusqu'à 12) satellites au-dessus de l'horizon et capables de fournir des mesures simultanément.

12. Les récepteurs GPS sont donc à même de résoudre instantanément quatre équations pour déterminer la latitude, la longitude, l'altitude (par rapport au niveau moyen de la mer) et l'heure. Le GPS n'est pas seulement un instrument de localisation, mais sans doute aussi le meilleur système de chronométrie existant. Les horloges atomiques placées à l'intérieur des satellites stabilisent les signaux transmis, lesquels permettent de déterminer l'heure avec une précision de 0,1 microseconde.

13. Le GPS fonctionne en séquences logiques; chacun des satellites placés en orbite envoie en continu un signal radio à la Terre, lequel est capté par un récepteur GPS qui déduit la distance le séparant du satellite en mesurant le temps de propagation du signal radio. Ce temps de propagation peut être mesuré de façon extrêmement exacte grâce aux chronomètres de haute précision embarqués à bord de chaque satellite et les corrections apportées au résultat compensent les retards qui peuvent se produire lorsque le signal traverse l'ionosphère et l'atmosphère.

14. Le signal émis par les satellites GPS contient des informations servant à identifier le satellite et à déterminer la position, l'heure, la distance, l'état du satellite et les éphémérides actualisées (paramètres orbitaux). On identifie les satellites soit par le numéro de véhicule spatial qui leur est attribué, soit par le numéro de code pseudo-aléatoire.

15. Les satellites GPS émettent sur deux fréquences en bande L: 1,57542 GHz (L1) et 1,22760 GHz (L2). Le signal L1 a une séquence codée sur la fréquence porteuse par un système de modulation à deux codes – un code de précision (P) et un code d'acquisition approximatif (C/A). La porteuse du signal L2 ne contient que le code P, qui est chiffré à l'intention des utilisateurs militaires et des utilisateurs civils agréés. La plupart des récepteurs GPS disponibles dans le commerce utilisent le signal L1 et le code C/A.

16. Les utilisateurs du code P déterminent instantanément leur position géocentrique à environ 5 mètres près, à l'aide d'un seul récepteur portable. Les militaires ont chiffré les codes P en modifiant la formule mathématique de base et les utilisateurs agréés sont les seuls à connaître en quoi consiste cette modification. Il s'ensuit que les utilisateurs civils ne peuvent pas observer directement les codes P.

17. Les codes C/A se répètent toutes les millisecondes et sont accessibles à tous les utilisateurs. On peut aussi s'en servir pour la localisation, mais leur précision est seulement de l'ordre de 20 à 30 mètres. Les militaires ont intégré un autre élément dans le système: l'accès restreint. L'effet combiné de l'accès restreint, c'est-à-dire le dérèglement délibéré de l'horloge et le truquage du message de navigation, se traduit pour les usagers munis d'un seul récepteur par une dégradation de la précision de l'ordre de 100 à 150 mètres. Cette pratique est officiellement sanctionnée.

18. À l'heure actuelle, le GPS est totalement financé et exploité par l'armée, mais c'est le secteur civil qui est à l'origine d'un grand nombre d'innovations technologiques. En général, les utilisateurs civils cherchent à obtenir l'indication de position la plus précise possible. Certaines techniques reposent sur deux stations qui observent

conjointement les satellites GPS de façon simultanée et permettent d'obtenir une précision presque incroyable de l'ordre d'un centimètre pour 10 000 kilomètres. Une telle précision intéresse surtout les scientifiques qui étudient, par exemple, les déformations de la croûte terrestre et les mouvements des plaques tectoniques.

19. Si les méthodes statiques avec récepteurs stationnaires s'avèrent d'une grande utilité dans bien des cas, le GPS fonctionne tout aussi bien avec un ou deux récepteurs mûs par des techniques cinématiques. Les applications de la localisation cinématique de précision sont illimitées.

20. Le segment de contrôle du GPS se compose d'un système mondial de stations de poursuite et de surveillance. Les stations de surveillance mesurent les signaux provenant des satellites GPS et transmettent l'information reçue au centre de contrôle principal. Ce dernier utilise les données obtenues pour calculer des modèles orbitaux précis pour l'ensemble de la constellation GPS. L'information est ensuite présentée sous forme de messages de navigation actualisés pour chaque satellite.

21. Le segment utilisateur se compose de récepteurs GPS, de processeurs et d'antennes servant à indiquer la position et l'heure. Le récepteur de l'utilisateur mesure le temps de propagation du signal émis. En connaissant la distance par rapport à quatre points (les satellites) dans l'espace, le récepteur GPS est capable d'effectuer une triangulation pour déterminer une position en trois dimensions (latitude, longitude et altitude).

B. Système mondial de localisation différentielle

22. Un système a été conçu en vue d'affiner encore davantage la précision du GPS. Le GPS différentiel (DGPS) est un GPS auquel a été incorporé un système de correction des signaux. Le DGPS utilise une station de référence située en un point connu pour calculer et corriger les erreurs systématiques. Cette station de référence calcule les corrections pour chaque signal émis et renvoie les corrections effectuées au récepteur à distance du GPS. Ce dernier applique ensuite les corrections à chaque satellite utilisé pour calculer son repère position.

23. Le DGPS permet d'obtenir une précision de l'ordre du mètre pour des objets mobiles et une précision encore plus grande pour des objets fixes. Cette précision accrue confère au GPS un intérêt capital. Grâce à elle, le GPS n'est plus seulement un système d'assistance à la navigation maritime et spatiale à travers le monde. Il devient un système de mesure universel capable de localiser des objets à une échelle très précise.

24. Le GPS différentiel en temps réel a recours à une station fixe qui se trouve en un point de contrôle donné où est calculée continuellement la différence entre la position connue et la position notifiée environ toutes les secondes. Cette correction est ensuite envoyée à un émetteur radio qui diffuse l'information sur une fréquence existante. Le récepteur GPS de l'utilisateur doit être équipé d'un deuxième récepteur radio qui va recevoir la diffusion différentielle, puis corriger la position enregistrée par rapport à celle enregistrée une ou deux secondes auparavant. Comme les erreurs dans la partie mobile du système ne surgissent pas soudainement de façon aléatoire, mais correspondent à un évanouissement du signal dans chaque configuration directionnelle, les systèmes sont à même d'indiquer une position en temps réel avec la précision requise de 2 à 5 mètres.

25. Le GPS à phase de porteuse est la deuxième méthode de localisation au centimètre près et il est largement utilisé par les topographes et les spécialistes de la géodésie pour procéder au levé des monuments et à des contrôles géodésiques. Ce GPS suit et enregistre les ondes radio de 19 centimètres correspondant à la fréquence porteuse L1, transmise à partir de satellites. Ces récepteurs sont beaucoup plus complexes et plus onéreux que les récepteurs GPS portables et codés. Un premier récepteur est placé sur une balise géodésique connue, tandis qu'un deuxième est installé à l'endroit nécessitant le nouveau point de contrôle ou la nouvelle balise. Cette technique est en train de s'imposer afin d'obtenir un relevé au centimètre près pour toute une gamme d'applications pratiques et scientifiques, y compris la photogrammétrie, les contrôles de relevés aériens, voire les mesures des mouvements minute par minute des plaques tectoniques ou des dômes de lave volcanique.

C. Système orbital mondial de navigation par satellite

26. Le système GLONASS a beaucoup de points communs avec le système GPS pour ce qui est de la constellation satellitaire, des orbites et de la structure des signaux. Tous deux transmettent des signaux à large spectre sur deux fréquences dans la bande L (1,2 GHz et 1,6 GHz) et ont annoncé que, pour la prochaine décennie du moins, ils mettraient gratuitement à la disposition des civils un ensemble partiel de signaux. Les satellites GLONASS sont déployés sur trois plans orbitaux. Les satellites GPS transmettent sur la même fréquence porteuse en utilisant des codes orthogonaux; les satellites GLONASS transmettent le même code mais sur des fréquences différentes.

27. Contrairement au GPS, le système GLONASS n'altère pas intentionnellement les signaux destinés aux utilisations civiles. Les différences observées concernant la qualité des estimations de la position que fournissent le système GPS ou le système GLONASS tiennent essentiellement à cette pratique délibérée d'altération des signaux GPS, dite accès restreint. Comme le GPS, le système GLONASS offre deux niveaux de service. La norme de précision qui est disponible pour tous les utilisateurs civils est de 60 mètres à l'horizontale et de 75 mètres à la verticale. La haute précision n'est accessible qu'aux utilisateurs agréés.

28. Le système GLONASS est en cours de perfectionnement. En janvier 1996, il a pour la première fois disposé d'une constellation complète de 24 satellites opérationnels. Cette année-là, de nouveaux récepteurs GLONASS ont aussi fait leur apparition sur le marché. Aucun satellite n'a toutefois été lancé en 1996 et en 1997 et le nombre de satellites opérationnels dans la constellation au début de l'année 1998 s'établissait à 13.

29. La constellation du système GLONASS est commandée par une unité au sol. Celle-ci se compose d'un centre de contrôle et de plusieurs stations de poursuite spatiale qui sont disséminées sur une vaste partie du territoire de la Fédération de Russie. Ces stations de poursuite spatiale suivent à la trace les satellites du système GLONASS qui sont visibles et accumulent les mesures de distance et les télémesures obtenues à partir des signaux des satellites. L'information dont dispose la station de poursuite est traitée par le centre de contrôle du système afin de déterminer le statut de l'horloge et de l'orbite des satellites et d'actualiser le message de navigation de chaque satellite. Cette information mise à jour est transmise aux satellites par l'intermédiaire des stations de poursuite spatiale qui servent également à transmettre les informations de guidage.

30. Les utilisateurs du GPS pourraient tirer largement profit des signaux supplémentaires offerts par un système GLONASS opérationnel. Le principal avantage découlerait de la robustesse d'un système combiné, en ce sens où il est peu probable que de légères perturbations affectant soit le système GPS, soit le système GLONASS aient des répercussions importantes sur un utilisateur en particulier. C'est au nombre accru de satellites visibles que cet avantage peut être attribué. Même en partant de l'hypothèse prudente selon laquelle le GPS et le GLONASS disposeraient chacun d'une constellation de 21 satellites, tous les utilisateurs seraient assurés de disposer au minimum de 8 satellites visibles au-dessus d'un angle de site de 7,5; 99 % des usagers du monde entier seraient assurés de disposer de 10 satellites visibles et la moitié des usagers de 14 satellites visibles ou plus.

31. Un système GLONASS opérationnel contribuerait à rassurer les utilisateurs du GPS qui redoutent la moindre défaillance technique ou politique. Les deux systèmes émettent sur des fréquences différentes, ce qui les protège mieux du brouillage délibéré ou fortuit des fréquences radio. Cette immunité est par ailleurs renforcée par la diversité de fréquence des signaux du GLONASS. La notion de robustesse est d'une importance cruciale pour l'exploitation de tout système opérant de façon courante et répétée, surtout lorsque des questions de sécurité sont en jeu. Cette robustesse peut notamment se caractériser par l'intégrité des estimations de la position, la continuité et la disponibilité des services du GNSS sur la base d'hypothèses prudentes concernant les perturbations du fonctionnement du système.

32. Dans le but d'améliorer les performances du système GNSS de façon qu'il soit conforme aux normes de sécurité les plus rigoureuses, on procède actuellement au renforcement des satellites et des stations au sol. Pour réaliser ce renforcement à couverture étendue, on peut, par exemple, utiliser des satellites en orbite géostationnaire qui transmettent aux utilisateurs des corrections différentielles et/ou des messages non dénaturés. Participent à ce

renforcement le Service complémentaire géostationnaire européen de navigation (EGNOS) de l'Union européenne, le Système de renforcement à couverture étendue (WAAS) des États-Unis et le Système satellitaire de complément multitransport (MSAS) du Japon.

D. Service complémentaire géostationnaire européen de navigation

33. Compte tenu des investissements réalisés par une large gamme d'utilisateurs et visant à développer l'utilisation des signaux de navigation, l'Europe a décidé de mettre en œuvre un système mondial de navigation par satellite reposant sur le renforcement au niveau régional des systèmes GPS et GLONASS et d'entreprendre, parallèlement, des travaux préparatoires en vue de la mise en place d'un système complémentaire.

34. La contribution européenne au GNSS se fonde sur l'utilisation des charges utiles de navigation sur les satellites géostationnaires (deux Inmarsat-3 et Artemis de l'Agence spatiale européenne) et est désignée par le sigle EGNOS. Le système EGNOS répondra notamment aux prescriptions en matière de navigation pour l'aviation civile et ce pour toutes les phases de vol, depuis la phase de croisière jusqu'à l'approche de précision et l'atterrissage.

35. Les satellites Inmarsat-3 sont munis de répondeurs de navigation qui reçoivent à la fois les signaux des systèmes GPS et GLONASS depuis une station au sol, lesquels signaux sont ensuite diffusés aux utilisateurs. Le progiciel de navigation offrira quatre services: i) contrôle d'intégrité; ii) complément de la mesure de distance par satellite géostationnaire; iii) corrections différentielles sur zone étendue; et iv) système garde-temps. L'Organisation internationale de télécommunications mobiles par satellites (Inmarsat) entend proposer une capacité de navigation similaire, mais renforcée, avec ses futures générations de satellites.

36. Le système GNSS de la deuxième génération devrait être sous contrôle civil, adapté aux besoins à long terme des usagers civils et conçu pour améliorer les performances en matière de navigation, tout en conservant une compatibilité en amont avec les systèmes GPS et GLONASS. D'un point de vue technique, le système GNSS de la deuxième génération représentera une amélioration notoire pour les utilisateurs civils. Il faudra qu'il puisse répondre aux besoins de ces utilisateurs civils dans les années 2005-2020 et l'on prévoit une demande accrue en matière d'intégrité, de précision et de disponibilité. Le futur GNSS devra prendre en compte les besoins de tous les moyens de transport – terrestre, ferroviaire, maritime ou aérien – ainsi que ceux des systèmes spatiaux. Il verra très probablement ses capacités de radiodiffusion renforcées et il lui sera associé des fonctions de communication complémentaires nécessaires aux applications télématiques (état et prévision de la circulation routière et systèmes de gestion du parc), sans oublier la surveillance dépendante automatique pour le contrôle du trafic aérien. Plusieurs options peuvent être envisagées pour le système GNSS-2: une constellation de satellites à orbite terrestre basse ou à orbite moyenne, complétée ou non par des satellites à orbite géostationnaire. Le système GNSS de la deuxième génération pourrait être lancé entre 2005 et 2010 à titre d'aide à la navigation supplémentaire puis devenir, entre 2010 et 2015, le système de navigation principal pour toutes les phases de vol. D'un point de vue institutionnel, le système GNSS pourrait être mis au point par quelques-uns ou par l'ensemble des principaux partenaires (à savoir les États-Unis d'Amérique ou la Fédération de Russie) ou bien de façon indépendante par l'Union européenne, que ce soit à l'échelle régionale ou mondiale.

III. SYSTÈMES CONNEXES

A. Système de recherche et de sauvetage

37. Le Système international de satellites de recherche et de sauvetage (COSPAS-SARSAT) se compose d'une constellation de satellites en orbite polaire et d'un réseau de stations réceptrices au sol qui fournissent des informations sur les appels de détresse et sur la position des personnes en détresse aux services appropriés afin qu'ils puissent secourir les usagers se trouvant en mer, sur terre ou en vol.

38. Le système COSPAS-SARSAT transmet les données relatives aux appels de détresse et à la position des personnes en détresse aux centres de coordination des secours, aux balises sur la fréquence de 121,5 MHz dans la zone de couverture des stations au sol du COSPAS-SARSAT (terminaux pour usagers locaux) et aux balises

fonctionnant sur 406 MHz et pouvant être activées n'importe où dans le monde. Il est possible de couvrir l'ensemble de la Terre, y compris les régions polaires, avec de simples balises de détresse.

39. Il existe trois catégories de radiobalises, à savoir les émetteurs de localisation d'urgence utilisés dans l'aviation, les radiobalises de localisation en cas de sinistre utilisées dans la marine et les radiobalises de localisation personnelle. Les balises transmettent des signaux qui sont détectés par le véhicule spatial placé en orbite polaire du système COSPAS-SARSAT, lequel est équipé des récepteurs appropriés. Les signaux sont relayés aux terminaux pour usagers locaux qui les traitent afin de déterminer l'emplacement de la balise. Les signaux de détresse, ainsi que les données relatives à la position, sont ensuite relayés par l'intermédiaire d'un centre de contrôle de la mission soit vers un autre centre, soit vers le point de contact pour la recherche et le sauvetage ou encore un centre de coordination des opérations de secours.

40. Le déplacement Doppler (fondé sur le décalage entre le véhicule spatial et la balise) permet de localiser ces dispositifs extrêmement simples. La fréquence porteuse transmise par la balise est raisonnablement stable pendant la période de visibilité mutuelle balise-satellite. Les fréquences les plus courantes sont la fréquence aéronautique de secours, qui est de 121,5 MHz et qui correspond également aux balises de détresse, et les fréquences de la bande 406,0-406,1 MHz, qui sont exclusivement réservées aux balises de détresse fonctionnant avec les systèmes satellitaires.

41. Depuis 1982, ce système a permis d'effectuer 2 000 opérations de recherche et de sauvetage et de sauver 7 000 personnes dans le monde. Le système COSPAS-SARSAT envisage actuellement d'utiliser la capacité d'un satellite géostationnaire placé en orbite terrestre pour le sauvetage et la recherche (GEOSAR) en vue de renforcer le système existant en orbite polaire. Ces dernières années, les participants au système COSPAS-SARSAT ont expérimenté des charges utiles de 406 MHz sur des satellites géostationnaires couplés à des stations pilotes au sol. Ces expériences ont montré qu'il était possible d'avoir des signaux de détresse quasi immédiats sur une fréquence de 406 MHz. Le système COSPAS-SARSAT a mis au point un plan de démonstration et d'évaluation du GEOSAR.

B. ARGOS

42. ARGOS est un système de localisation et de collecte de données par satellite pour la surveillance et la protection de l'environnement. Il donne la position de toute plate-forme équipée d'un émetteur approprié, où qu'elle se trouve dans le monde et avec une précision de 150 à 1 000 mètres. Les données peuvent également être recueillies à partir de capteurs connectés à l'émetteur. Ce système, qui fonctionne depuis 1978, dispose de plus de 5 000 émetteurs ARGOS en usage dans le monde. Il a été mis en place en vertu d'un accord conclu entre l'Administration nationale des océans et de l'atmosphère (NOAA), l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace des États-Unis et le Centre national d'études spatiales de France.

43. Pour accomplir sa mission, le système utilise aussi bien des ressources au sol que des ressources embarquées à bord des satellites. Il s'agit notamment d'instruments embarqués à bord des satellites opérationnels d'observation de l'environnement en orbite polaire, de stations réceptrices dans le monde entier et des principales installations de traitement en France et aux États-Unis. Ce système pleinement intégré localise convenablement et livre à l'ordinateur de l'usager, souvent en temps quasi réel, des données provenant des plates-formes les plus éloignées.

44. ARGOS est facile à utiliser. L'émetteur commence à envoyer des signaux dès qu'il est allumé. Un des satellites du système recueille les données et les retransmet aux centres de traitement ARGOS. L'accès aux données est tout aussi simple. Les résultats peuvent être extraits partout dans le monde par des réseaux publics de données, souvent dans les vingt minutes qui suivent la transmission.

45. La petite taille des émetteurs est un autre aspect intéressant du système ARGOS: rien que quelques milliampères en moyenne par jour pour la consommation de courant électrique; les modèles miniaturisés peuvent être aussi compacts qu'une petite boîte d'allumettes et peser seulement 20 grammes. Avec de telles caractéristiques, ARGOS peut servir à suivre de petits animaux.

46. ARGOS sert à recueillir des données et à repérer les emplacements pour de multiples applications englobant la protection de l'environnement, y compris la poursuite des flottes de bateaux de pêche partout dans le monde, la surveillance du mouvement des substances toxiques ou dangereuses, la surveillance des réseaux d'oléoducs pour les cas de fuite ou de défaillance des systèmes de protection, la prévision des mouvements des nappes de pétrole déversées ou la surveillance des marées noires et d'autres types de pollution.

47. L'Inde exploite les plates-formes de son propre satellite national (Indian National Satellite – INSAT) pour obtenir des données météorologiques à partir d'emplacements automatiques éloignés grâce à un répéteur-relais de transmission de données à bord de ses satellites géostationnaires. Récemment, l'utilisation des plates-formes de collecte de données a été également étendue à la surveillance des niveaux de certains des grands fleuves du pays.

C. DORIS

48. Le système DORIS (détermination Doppler d'orbite et radiolocalisation intégrées par satellite) (France) comprend un ensemble embarqué, un réseau de balises et un centre de contrôle et de traitement de données, qui lui permettent d'effectuer sa mission double de définition de l'orbite des engins spatiaux et de localisation par radiobalise. Il repose sur la mesure précise des écarts provoqués par l'effet Doppler dans les signaux radioélectriques émis par les balises au sol et reçus à bord de l'engin spatial. Les mesures sont effectuées sur deux fréquences, 2 036, 25 MHz pour la mesure précise Doppler et 401,25 MHz pour la correction ionosphérique. La fréquence de 401,25 MHz sert également pour les mesures à l'aide de repères de temps et la transmission de données auxiliaires.

49. Le choix d'un système à liaison montante permet un fonctionnement pleinement automatisé des radiobalises et facilite les liaisons de communications pour tout le système, les données étant centralisées grâce au satellite et à son segment terrien vers le centre de traitement de données DORIS. Le système DORIS embarqué est actuellement à bord des satellites d'observation de la Terre SPOT-2 et SPOT-3 et du satellite océanographique TOPEX, et il sera en principe à bord de SPOT-4 en 1998 et d'ENVISAT, de SPOT-5 et des satellites TOPEX de la prochaine génération.

50. L'ensemble des missions DORIS se partage le segment terrien. Les balises de définition de l'orbite occupent un réseau mondial dense. Pour la mission DORIS de positionnement par point unique, des radiobalises spécifiques sont disponibles et sont installées en fonction des besoins des utilisateurs. Elles sont prêtes à servir sur le terrain et sont équipées de sources d'énergie autonomes.

D. Satellite Laser Ranging

51. Le système Satellite Laser Ranging (SLR) est une technique de mesure de la distance entre une station laser sur Terre et un satellite à défilement équipé de miroirs spéciaux (retroréflecteurs), avec une précision de moins d'un centimètre. Lorsque de multiples stations laser sont disséminées dans le monde et recueillent des données provenant du même satellite, il est possible de déterminer la position précise du satellite ainsi que les positions des stations laser. Cette technique est qualifiée de définition de précision de l'orbite. La poursuite de satellites pendant plusieurs années permet non seulement de calculer la distance entre les stations laser à quelques millimètres près, mais aussi de suivre avec la même précision le déplacement du continent concerné par rapport à d'autres. Les données SLR servent également dans de nombreuses autres applications scientifiques, notamment les études du système Terre/atmosphère/océans, la géophysique et le transfert des normes de temps entre continents.

52. La précision des mesures est fonction du système de poursuite à laser et de la batterie de retroréflecteurs du satellite et elle peut être de l'ordre d'un à trois millimètres, comme c'est le cas du Laser Geodynamic Satellite (LAGEOS). Une telle précision est réalisée grâce à la compression statistique des données.

53. Les applications des données SLR provenant de satellites géodésiques englobent: la détection et la surveillance des mouvements des plaques tectoniques, de la déformation de la croûte terrestre, de la rotation de la Terre et de la précession de Chandler; la modélisation des variations spatiales et temporelles du champ de gravitation de la Terre; la détermination des marées océaniques à l'échelle du bassin; la surveillance des variations millimétriques dans l'emplacement du centre de masse de l'ensemble du système terrestre (croûte

terrestre/atmosphère/océans); la mise en place et l'exploitation de l'International Terrestrial Reference System (système international de référence terrestre); la détection et la surveillance du rebond et de la subsidence postglaciaires; et la surveillance de la réaction de l'atmosphère aux variations saisonnières dans le chauffage solaire.

54. Combinées avec des données provenant de plusieurs autres techniques de poursuite, les données SLR recueillies par les satellites de télédétection produiront des cartes topographiques exactes des bassins des océans. Ces données permettront des études quantitatives des changements intervenant dans les courants océaniques, dont la connaissance est cruciale pour comprendre les changements climatiques à l'échelle planétaire. Les données SLR serviront également à étalonner les altimètres radar embarqués à bord de l'engin spatial. En outre, elles se sont révélées être un moyen efficace par rapport à son coût de dédoubler, avec sécurité intégrée, les systèmes de poursuite radiométriques embarqués tels que le GPS, DORIS et l'Équipement de mesure précise de distance et de la vitesse radiale (PRARE).

55. Les données SLR provenant des satellites de localisation servent à améliorer la précision du réseau international de services GPS et le transfert de temps entre les satellites GPS et GLONASS ainsi que les récepteurs GPS et GLONASS.

IV. APPLICATIONS DU SYSTÈME MONDIAL DE LOCALISATION

56. La première application du GPS – qui est aussi la plus évidente – est la détermination pure et simple de la position ou de la localisation. Le GPS est le premier système de positionnement à offrir des données de localisation hautement précises pour tout point situé sur la planète, par quelque temps que ce soit. Cela suffit en soi à en faire un système majeur mais, en raison de son exactitude et de la créativité de ses utilisateurs, il est entraîné dans certains domaines insoupçonnés.

A. Applications dans l'aviation

57. Le Système mondial de navigation par satellite (GNSS) est le principal élément du système de communication, de navigation, de surveillance et de gestion du trafic aérien de l'Organisation de l'aviation civile internationale, et est une aide à la navigation à l'échelle mondiale dans toutes les phases du vol. Fort de systèmes de renforcement appropriés, le GNSS offrira à tout aéronef doté de l'équipement prévu les moyens de naviguer d'un point représentant un aéroport à un autre et de fonctionner en toute saison. Dès que le GNSS sera pleinement mis en œuvre, on pourra démanteler certains sinon la totalité des systèmes aéronautiques terrestres existants.

58. En offrant des outils de navigation et des systèmes d'atterrissage plus précis, le GNSS rend les vols non seulement plus sûrs, mais aussi plus efficaces. Grâce à la navigation précise d'un point à l'autre, il permet d'économiser le carburant et d'étendre le rayon d'action d'un aéronef en faisant en sorte que les pilotes ne quittent pas les itinéraires les plus directs menant à leur destination. Par sa précision, le GNSS permettra également un espacement plus proche des aéronefs sur des itinéraires plus directs, d'où une exploitation plus efficace de l'espace aérien. L'Administration fédérale de l'aviation des États-Unis œuvre activement à la mise au point de balises du DGPS (GPS différentiel) à utiliser dans la navigation en route, l'approche et l'atterrissage de précision, ainsi que pour la cartographie de la localisation précise des aéronefs au sol lorsqu'ils roulent lentement sur la piste ou dans l'aérodrome.

B. Applications maritimes

59. En général, les marins utilisent le GPS soit pour la navigation, soit pour la localisation, bien que ce système ait récemment été appliqué à la surveillance aussi. Le GPS et le DGPS sont des moyens de fournir des données de localisation précises s'ajoutant aux autres techniques de localisation, de communications et de calcul.

60. La gendarmerie maritime des États-Unis met en place actuellement un DGPS maritime en temps réel se composant d'une série de stations de base DGPS qui transmettent en ayant recours à un système existant de radiophares de rappel. Il est envisagé d'implanter une série complète de 45 de ces radiophares DGPS dans tous les

États-Unis. Un système de radiophares de rappel DGPS fonctionne déjà dans les pays scandinaves et on en met en place d'autres, certains utilisant les bandes latérales radioélectriques FM pour porter les données, ce qui permet d'en finir avec les balises spécialisées.

C. Applications dans le transport routier

61. De nombreuses applications du GPS dans le transport routier répondent au qualificatif de systèmes de transport intelligents. Ces systèmes visent à: i) améliorer la sécurité du voyageur; ii) améliorer l'efficacité du déroulement du voyage en réduisant l'engorgement; iii) faire des économies d'énergie en réduisant les besoins en essence; et iv) amoindrir l'impact des voyages sur l'environnement.

62. Les applications dans la circulation automobile aident le conducteur à prendre les décisions les plus rationnelles en matière d'itinéraires. Certains constructeurs d'automobiles proposent, comme option dans les nouveaux véhicules, un système de visualisation cartographique mobile orienté par des récepteurs GPS. Ce système de visualisation peut être démonté et emporté à la maison afin de planifier un voyage.

63. Une tendance relativement récente est l'utilisation du système GPS en rapport avec les téléphones cellulaires d'automobile afin de localiser automatiquement les voitures en cas d'accident. Dans ce système, un micro-ordinateur surveille le déploiement du sac gonflable dont sont équipées les nouvelles voitures. S'il détecte le déploiement du sac, l'ordinateur appelle un centre de dépannage au moyen du téléphone cellulaire de la voiture, lui communique la dernière localisation de la voiture telle qu'elle a été déterminée par le récepteur GPS. Le service de dépannage passe alors l'information aux services d'urgence locaux pour qu'ils prennent des dispositions.

64. Nombre de compagnies disposent d'importants parcs de véhicules et leur exploitation pose deux problèmes dont se préoccupent les systèmes de poursuite pour parcs de véhicules: connaître la localisation et l'état physique de tout véhicule donné. Un système de poursuite pour parcs de véhicules automobiles comprend les éléments suivants:

a) Un dispositif de localisation des véhicules. Dans certains systèmes, les récepteurs GPS accomplissent cette fonction, qui peut être confiée à d'autres systèmes tels que Loran. Des systèmes comme Omnitracs font appel aux systèmes brevetés de localisation par satellite fournis par Qualcomm;

b) Un dispositif de communications installé à bord du véhicule. Le véhicule à poursuivre doit être en mesure de transmettre sa localisation au centre de contrôle du parc par certains moyens. Quelques systèmes nationaux de gestion des parcs utilisent des réseaux de transmission de données par satellite à faible débit binaire. D'autres peuvent utiliser une forme ou une autre de téléphonie cellulaire. Les parcs de véhicules opérant dans de petites zones géographiquement contiguës peuvent avoir recours à des systèmes radio duplex VHF ou UHF. Le module de communication peut disposer d'éléments supplémentaires permettant la surveillance de l'état du véhicule ainsi que la communication avec le conducteur par de courts messages;

c) Un réseau de communication. Les données transmises à partir du véhicule peuvent être relayées au service de gestion du parc par l'un quelconque des nombreux moyens possibles. L'exploitation de systèmes brevetés de communications par satellite peut nécessiter la location auprès du fournisseur de services par satellite de lignes de données spécialisées. Les systèmes centrés sur le téléphone cellulaire peuvent utiliser le téléphone public. Les systèmes radio VHF et UHF utilisés par la police, la compagnie des sapeurs-pompiers et les ambulances peuvent faire appel à des réseaux de données municipaux, ou éventuellement des récepteurs numériques;

d) Un système d'information automatisé. L'information sur la localisation et l'état du véhicule est transférée dans un système informatique qui peut être conçu pour surveiller le véhicule de façon autonome et alerter le gestionnaire du parc en cas d'anomalies.

D. Applications dans la cartographie, la géodésie et l'arpentage (pour la phase de la porteuse)

65. Le recours au GPS pour effectuer une cartographie et un arpentage précis fait gagner du temps et de l'argent dans cette application qui est la plus rigoureuse de toutes. De nos jours, l'équipement GPS permet à un seul arpenteur d'accomplir en une journée ce qu'une équipe entière faisait en plusieurs semaines. Et le travail peut être accompli avec un degré d'exactitude plus élevé que jamais auparavant.

66. Des centaines d'années durant, les arpenteurs ont fait fond sur des instruments optiques et des dispositifs physiques de mesure. Les instruments optiques (et les instruments électroniques plus récents de mesure de la distance) nécessitent une ligne de site de l'instrument à la cible. Les rubans ou chaînes d'arpentage exigent que l'équipe d'arpentage passe physiquement par tout le terrain intermédiaire afin de mesurer la distance entre deux points. Le gros avantage du GPS est que la ligne de site n'est pas indispensable entre deux stations. De ce fait, l'arpentage est possible dans la quasi-totalité des conditions météorologiques ou sur des flancs opposés d'une montagne. Un autre avantage est que l'exactitude des données recueillies ne dépend pas autant qu'auparavant de l'habileté de l'arpenteur.

67. La ligne de site n'étant pas indispensable entre deux stations GPS, d'importantes économies peuvent être réalisées dans les grands projets faisant appel à un grand nombre d'équipes d'arpentage sur une zone limitée. Un seul récepteur GPS peut servir de station de référence utilisable par n'importe quel nombre d'arpenteurs, dont chacun peut faire un travail distinct. Cette situation contraste avec le cas du matériel d'arpentage classique, pour lequel il fallait au moins deux personnes (une à chaque extrémité) pour faire le même travail.

68. La poursuite de la phase de la porteuse par des signaux GPS a entraîné une révolution de l'arpentage. La ligne de site sur le terrain n'est plus nécessaire pour un positionnement précis. Les positions peuvent être mesurées jusqu'à 30 kilomètres d'un point de référence sans points intermédiaires. Une telle utilisation du GPS nécessite des récepteurs de poursuite de la porteuse dotés d'un équipement spécial.

69. Les signaux de porteuse L1 et/ou L2 servent à contrôler la phase de la porteuse. Les cycles de la porteuse L1 ont une longueur d'onde de 19 centimètres. Poursuivis et mesurés, les signaux de porteuse peuvent fournir des données de télémétrie avec des précisions relatives de l'ordre de quelques millimètres dans des circonstances spéciales.

70. La poursuite des signaux de porteuse ne fournit aucune information sur le temps de transmission. Tout en étant modulés par des codes binaires affectés de repères de temps, les signaux de porteuse ne portent aucun repère de temps propre à distinguer un cycle d'un autre. Les mesures utilisées dans la poursuite de la phase de la porteuse sont les différences dans les cycles de la phase et les fractions de cycle dans le temps. Deux récepteurs au moins poursuivent les signaux de porteuse en même temps. Les différences de retard ionosphérique dans les deux récepteurs doivent être assez réduites pour que les cycles de la phase de la porteuse puissent se justifier. D'ordinaire, pour ce faire, les deux récepteurs doivent être à environ 30 kilomètres l'un de l'autre.

E. Applications dans le domaine des sciences de la Terre

71. Un objectif communément admis dans les sciences de la Terre consiste à comprendre les processus dynamiques et souvent complexes. Tandis que certains axes de recherche sur les sciences de la Terre visent à dresser un état descriptif exact du passé, le GPS offre un moyen exceptionnel de mesurer les processus en cours sur la Terre dans divers environnements. Au cours de la décennie écoulée, il a fait évoluer les sciences de la Terre de façon spectaculaire.

72. Les spécialistes des sciences de la Terre avaient pour objectif initial d'utiliser le GPS pour tester les modèles de cinématique des plaques prévus par la tectonique des plaques. Ces prévisions étaient fondées sur l'interprétation du magnétisme marin, des traces de points chauds et des mécanismes focaux des séismes, et elles constituent le fondement d'une bonne partie de la recherche géoscientifique actuelle. Les études de la cinématique des plaques au moyen du GPS ont donné des observations détaillées des mouvements des plaques, en confirmant les modèles géologiques et en les étendant à des régions pour lesquelles les données géologiques étaient insuffisantes.

73. Les efforts des spécialistes des sciences de la Terre tendent actuellement à utiliser la résolution améliorée obtenue par le GPS afin de documenter des phénomènes de plus en plus complexes du système terrestre. Il aurait été impossible d'atteindre bon nombre des objectifs scientifiques d'aujourd'hui au tout début des études GPS. Au nombre des problèmes traités figurent les variations de la déformation durant tout le cycle du séisme, les processus volcaniques, la dynamique des glaces et les variations du niveau de la mer ainsi que la géodésie du plancher océanique.

F. Applications météorologiques et climatiques

74. Le GPS a apporté une contribution énorme aux aspects météorologiques et climatiques de la surveillance de l'environnement et il peut être encore d'une utilité beaucoup plus grande. Dans le domaine de la météorologie d'exploitation, il est déjà le système privilégié pour donner des informations sur la position en vue des sondages par ballon et, partant, pour mesurer la hauteur du ballon et obtenir des informations sur la vitesse du vent. Les récepteurs GPS basés au sol peuvent fournir une estimation de la quantité totale de précipitations de la colonne au-dessus du récepteur et, partant, la chaleur latente totale disponible.

75. Les récepteurs embarqués peuvent mesurer les profils verticaux de la température sur une distance de 5 à 40 kilomètres et plus au moyen de la technique dite de radio-occultation dans laquelle la réfraction du signal GPS par le limbe atmosphérique est déterminé deux fois par orbite de récepteur pour chaque satellite GPS. Cette technique peut donner jusqu'à 500 profils par jour, répartis uniformément autour de la Terre, et offre ainsi la stimulante promesse d'une couverture mondiale complète dans l'espace et dans le temps à partir d'une constellation de récepteurs utilisés en association avec un sous-ensemble du système de radiosondage, dont le coût est actuellement élevé. Cette application spatiale du GPS a été nommée GPS/MET, et les travaux de recherche qui se poursuivent porteront ses possibilités au-delà des résultats hautement prometteurs d'aujourd'hui.

76. La surveillance du climat bénéficiera également grandement du GPS/MET qui peut fournir des mesures à long terme exactes et cohérentes des températures moyennes à l'échelle régionale aussi bien que mondiale, mesures qui sont très difficiles voire impossibles à obtenir à partir des capteurs au sol. Les mesures des températures stratosphériques contribueront à faire comprendre le problème de l'ozone, en particulier en ce qui concerne la prévision de la formation de nuages stratosphériques polaires dans des conditions de froid extrême. Les données obtenues par limbosondage GPS peuvent également se révéler utiles dans l'étude des ondes de gravité qui transportent l'énergie et le moment à travers l'atmosphère moyenne, ce qui tend à faciliter la recherche sur le changement climatique mondial.

77. En matière de collecte de données, le système ARGOS utilisé sur les satellites en orbite polaire ainsi que les moyens de transmission de données des satellites géostationnaires sont indispensables pour la collecte de données sur l'environnement et la localisation pour toute une gamme d'applications à partir de plates-formes fixes et mobiles dans le monde entier.

G. Étude et sondage de l'atmosphère

78. Le signal GPS est sensible à l'indice de réfraction de l'atmosphère, lequel est fonction de la pression, de la température et de l'humidité. C'est pourquoi le GPS peut servir à étudier les propriétés de l'atmosphère. Comme de petites quantités de vapeur d'eau atmosphérique affectent considérablement les vitesses de propagation du signal GPS, ce système est tout particulièrement indiqué pour étudier la vapeur d'eau atmosphérique, dont le rôle est très important dans des processus atmosphériques allant du changement climatique mondial à la micrométéorologie.

79. Si les techniques d'étude de l'atmosphère par le GPS ont été développées afin de parvenir à une plus grande exactitude dans les levés verticaux, la recherche future sur l'utilisation du GPS pour surveiller la vapeur d'eau atmosphérique peut contribuer également à l'étude de la croûte terrestre. Des stations GPS permanentes pour la surveillance météorologique sont actuellement en cours d'implantation. Elles renforceront les réseaux actuels d'étude de la déformation de la croûte terrestre, et une meilleure compréhension de la vapeur d'eau atmosphérique peut améliorer davantage les levés GPS. Les données provenant de stations atmosphériques seront fournies pour la

définition de l'orbite des satellites GPS avec une grande précision et pourront donner des orbites plus précises des satellites GPS.

80. Les techniques GPS de mesure cinématique peuvent servir à localiser avec précision des aéronefs en vol. S'il est possible de suivre au moyen du GPS la position de l'avion, et surtout son accélération verticale et son inclinaison, les mesures gravimétriques dans l'atmosphère peuvent être corrigées pour des accélérations non gravitationnelles. Une fois qu'il sera possible de corriger les mesures gravimétriques dans l'atmosphère de l'ordre d'un milligal avec une résolution d'un kilomètre, les données gravimétriques provenant de mesures dans l'atmosphère deviendront un moyen extrêmement utile et puissant de la recherche scientifique et de l'exploration des ressources naturelles.

H. Agriculture

81. Récemment, les agriculteurs ont eu, au moyen du GPS, accès à des techniques appropriées à des sites pédologiques. Le GPS peut déterminer l'emplacement du matériel agricole dans un champ avec une précision d'un mètre. La connaissance des emplacements précis à quelques centimètres près comporte les avantages suivants: l'emplacement des échantillons pédologiques et les résultats des analyses de laboratoire peuvent être mis en regard d'une carte pédologique; les engrais et les pesticides peuvent être prescrits en fonction des propriétés pédologiques (caractère argileux et teneur en matière organique) et de la configuration du champ (relief et drainage); les travaux des champs peuvent être ajustés en fonction de la variation des conditions dans le champ; et il est possible de consigner les données sur le rendement dans le champ et d'en suivre l'évolution.

82. Au moyen d'un tracteur équipé d'un ordinateur affichant une carte pédologique informatisée du champ et à l'aide du GPS, les agriculteurs peuvent savoir où ils se trouvent dans le champ et avoir la possibilité d'ajuster la densité de semis à mesure qu'ils le parcourent. Le GPS, utilisé parallèlement à une carte de drainage numérique, permet aux agriculteurs d'appliquer avec plus de sûreté les pesticides. Le matériel d'épandage peut être préprogrammé afin de s'éteindre automatiquement à une distance donnée, ou à un aspect déterminé de la zone de drainage. De plus, les agriculteurs peuvent préprogrammer le taux de pesticides ou d'engrais à appliquer afin de se borner à la quantité nécessaire déterminée par les conditions pédologiques; le taux peut varier d'une zone du champ à une autre, d'où une économie d'argent et une utilisation plus sûre du matériel.

83. Le recours au GPS pour ajuster l'équipement aux différents types de sol déboucherait sur des rendements plus élevés ainsi qu'une production plus sûre à moindres frais. Cette partie de l'agriculture de précision en est toujours à ses balbutiements. Les sociétés de fabrication de matériel annonceront dans le proche avenir du matériel agricole faisant usage du GPS ainsi que certaines commandes adaptées à l'agriculture de précision.

I. Applications dans la mesure du temps et dans les communications

84. En tant que repère universel, le temps indique quand les choses se sont passées ou quand elles se passeront. En tant que moyen de synchroniser les activités des personnes, les événements, voire d'autres types de signaux, il aide le monde à tenir son cap. Et en tant que moyen d'évaluer la durée des choses, il fournit une mesure exacte et sans équivoque.

85. Les satellites GPS portent des horloges atomiques extrêmement précises. Pour que cet ensemble marche, les récepteurs GPS au sol se synchronisent avec ces horloges. C'est dire que chaque récepteur GPS est, par définition, une horloge atomique de précision. Les astronomes, les compagnies de production d'électricité, les réseaux informatiques, les systèmes de communications, les banques ainsi que les stations de radio et de télévision peuvent tirer parti de ces possibilités de mesures précises du temps.

86. La pseudo-télémétrie qu'il utilise afin de déterminer les localisations en trois dimensions exigeant une norme de temps extrêmement précise, le GPS est idéal pour les applications qui nécessitent un minutage et un transfert de temps précis. Les mesures GPS données par la pseudo-télémétrie reposent sur le transfert de temps du signal entre le satellite GPS et l'usager. De ce fait, si les localisations du satellite et de l'observateur sont connues, la différence de décalage des horloges de l'utilisateur et du satellite peut être aisément calculée.

87. Les spécialistes du transfert de temps ont été les premiers à se rendre compte des avantages du GPS, car une constellation complète de satellites n'est pas requise pour la plupart des techniques de transfert de temps. En fait, la technique de transfert de temps la plus précise à ce jour – celle d'observation identique – repose sur la faculté pour deux usagers sur le globe d'observer le même satellite GPS simultanément, en dépit de la grande distance qui les sépare sur le plan géographique. Ladite technique est actuellement utilisée par 55 centres internationaux de chronométrie chargés de maintenir le temps atomique international et le temps universel coordonné (TUC) dans le monde entier.

88. Bon nombre de sociétés de télécommunications utilisent de plus en plus également le GPS pour synchroniser leurs réseaux de télécommunications numériques au sol. La plupart du temps, ces utilisateurs comparent directement le temps de l'horloge de référence au temps GPS en consultant un ou plusieurs satellites, plutôt qu'en transférant le temps d'une horloge de référence à une autre.

89. On peut également considérablement améliorer les communications cellulaires mobiles au moyen de techniques GPS précises de chronométrie. À l'heure actuelle, la plupart des réseaux téléphoniques cellulaires subissent une dégradation de la transmission à mesure qu'un appel est transféré d'un canal de cellule à un autre; ce problème serait éliminé si toutes les cellules d'un réseau utilisaient le même canal. Pour y parvenir, il faut fournir à chaque cellule un code unique plutôt qu'une fréquence unique au moyen d'une technique connue sous le nom d'accès multiple par code de répartition (AMCR). Les grands fabricants d'appareils faisant appel à AMCR par code de répartitions ont reconnu dans le GPS un moyen efficace d'assurer la synchronisation temporelle précise requise par leurs systèmes. Les précisions en matière de temps semblables à celles requises pour les réseaux numériques suffisent pour cette application.

90. Les signaux cellulaires sont aussi assujettis aux conditions locales dans chaque cellule, telles que le temps ou la topographie, conditions qui peuvent varier d'une cellule à l'autre. Si le récepteur mobile est doté de la capacité GPS et si les informations concernant la position sont transmises au centre mobile de contrôle et d'opération du système mobile, l'emplacement de l'usager et la direction de propagation pourraient être déterminés dans les opérations de contrôle du réseau. En disposant de ces informations, le contrôleur du réseau peut assurer des transferts optimaux ainsi qu'une performance dynamique optimale en temps réel pour chaque emplacement. Lorsqu'il s'agit toutefois de petites cellules à forme non normalisée ou lorsqu'on s'efforce de tracer des courbes de signaux ou des diagrammes de propagation au sein d'une zone complexe telle qu'un "canyon urbain", une précision de l'ordre de quelques mètres dans trois dimensions peut être requise.

91. Dans l'avenir, de nombreux services d'information pourront exiger les informations les plus récentes avec un degré de précision beaucoup plus grand que ce n'est le cas aujourd'hui. Ce serait par exemple le cas des services universels de communications personnelles et des réseaux numériques de services intégrés à large bande en vue de la communication avec plusieurs types de systèmes de communications pour transmettre des quantités énormes d'informations numériques organisées en paquets. Il faudrait probablement des précisions de 100 à 300 nanosecondes eu égard au TUC.

J. Utilisations du système mondial de localisation par les engins spatiaux

92. L'application du GPS à la navigation et au contrôle des engins spatiaux, susceptible de réduire les coûts de fonctionnement des engins spatiaux et les missions, fait son entrée dans les systèmes spatiaux aussi bien publics que commerciaux. Le GPS est actuellement à l'essai ou en usage pour plusieurs applications dans l'industrie aéronautique, y compris la définition de l'orbite, la définition de l'assiette, la localisation du lanceur et du corps de rentrée et la détermination de la trajectoire, ainsi que la synchronisation temporelle.

93. Le recours au GPS pour la définition en temps réel des paramètres orbitaux constitue un moyen économique de définir de façon très précise l'orbite d'un engin spatial. Bien conçu, un récepteur GPS embarcable peut remplacer plusieurs capteurs embarcables classiques de positionnement orbital, réduisant, ce faisant, le poids comme le coût et jugulant dans certains cas le besoin de stations au sol à l'échelle mondiale chargées de repérer les positions orbitales. En outre, les paramètres orbitaux définis au moyen du GPS peuvent parfois renforcer le système

informatique de contrôle et de propulsion embarqué pour assurer un maintien à poste autonome. Ainsi serait éliminée ou réduite la nécessité de disposer d'un personnel chargé des opérations de mission et requis pour contrôler la position orbitale d'un engin spatial à partir du sol.

94. Ces dernières années, plusieurs fabricants de récepteurs GPS ont commencé à collaborer avec des concepteurs d'engins spatiaux afin de mettre au point des récepteurs GPS devant servir de détecteurs d'assiette à bord des engins spatiaux. La définition de l'assiette à bord est une nécessité pour presque tous les engins spatiaux modernes, dont la plupart exigent aussi un système automatique de contrôle d'assiette. La panoplie traditionnelle de capteurs utilisés pour calculer l'assiette va des magnétomètres et des détecteurs d'horizon à coût relativement faible aux gyroscopes précis, aux détecteurs de direction du soleil et aux détecteurs d'étoiles. Le GPS peut représenter un complément rentable de la plupart de ces systèmes existants, voire s'y substituer.

95. Grâce aux capteurs utilisés dans le système de navigation des véhicules spatiaux et à la fourniture d'informations sur la position aux contrôleurs au sol à des fins de sécurité du champ de tir, les applications du GPS s'étendent également aux véhicules de lancement. Une bonne partie des opérations de suivi de la sécurité du champ de tir pour les lancements emploient un système plutôt complexe et coûteux de radars de poursuite et d'équipement connexe basé au sol, et les données GPS concernant la trajectoire pourraient être plus rentables.

K. Prospection minière

96. Le GPS est de nos jours largement utilisé dans la prospection minière aérospatiale, effectuée sous forme de levés aériens à une altitude de 100 mètres ou moins et avec un espacement proche de quelques douzaines de mètres entre les vols successifs, au moyen de techniques électromagnétiques, magnétoscopiques et gravimétriques hautement perfectionnées. Il est nécessaire de repérer avec précision la trajectoire de vol pour évaluer l'importance, la profondeur et l'emplacement des gisements miniers sur toute leur étendue.

L. Sûreté publique

97. Le GPS utilisé en association avec les liaisons de communications et les ordinateurs peut constituer l'ossature de systèmes se prêtant à des applications dans la livraison en milieu urbain, la sûreté publique ainsi que la poursuite des navires et des véhicules. Aussi la police, les ambulances ainsi que les sapeurs-pompiers adoptent-ils les systèmes GPS afin de signaler aussi bien le théâtre des situations d'urgence que l'emplacement du véhicule de dépannage le plus proche sur une carte informatique. À l'aide d'un tel tableau visuel clair de la situation, les régulateurs peuvent réagir immédiatement et avec assurance. Le GPS aide à sauver des vies humaines.

V. AVANTAGES ÉCONOMIQUES ET SOCIAUX

A. Besoins

98. La communauté mondiale devrait jouer un rôle actif dans les services de navigation et de localisation par satellite en participant à la réalisation et à l'exploitation d'un système mondial qui réponde aux besoins de l'ensemble des utilisateurs civils. À cela, trois types de raisons:

a) *Raisons sociales et économiques.* Le marché potentiel des signaux en navigation est énorme et, même si l'intérêt porté actuellement à la navigation par satellite s'explique pour l'essentiel par le transport aérien, d'autres secteurs, en particulier le transport routier, la gestion du trafic et l'agriculture, auront à leur actif le gros des recettes dans le court et le moyen terme. Un avantage d'un système mondial de navigation par satellite est la simplification grâce à l'utilisation d'un système unique qui pourrait satisfaire les besoins de tous les utilisateurs et couvrir le monde entier vingt-quatre heures sur vingt-quatre. Un système spatial signifie également une précision améliorée des mesures de la localisation et de la vitesse, ce qui entraînera à son tour une réduction des délais d'attente, des économies de carburant, une meilleure protection de l'environnement et un recul du nombre des accidents;

b) *Raisons industrielles.* Étant donné que les satellites n'ont qu'une durée de vie limitée, les segments spatiaux doivent être continuellement exploités et mis à jour. Les segments terrestres doivent être étendus afin d'assurer une couverture géographique plus grande et de meilleurs services. Ces deux tâches reviennent à l'industrie. Les nouveaux services découlant de l'utilisation des signaux en navigation comprennent les applications aux transports, l'agriculture de précision, la sûreté publique, les sciences de la terre et les activités récréatives. Actuellement évalué à plus de 2 milliards de dollars, le marché des récepteurs GPS atteindra entre 8 et 9 milliards de dollars en 2000, et 50 milliards en 2005. Il est escompté que les parts seront de 92 % pour les applications terrestres (principalement la circulation automobile ainsi que les applications au service du consommateur et les applications cellulaires), 4,5 % pour les applications aéronautiques, 2 % pour les applications maritimes et 1,5 % pour les applications militaires;

c) *Raisons réglementaires.* L'homologation d'un système spatial pose de nouveaux défis aux responsables de la réglementation, en particulier à ceux qui sont chargés des services s'occupant de la protection de la vie. Les autorités compétentes doivent décider de leur politique en matière d'homologation pour le GNSS futur.

B. Promotion de la coopération internationale

99. De par sa nature, la navigation par satellite se prête à la coopération régionale et mondiale. En effet, une coopération très poussée est indispensable si l'on veut réaliser dans le monde entier un système multimodal de radionavigation et de positionnement par satellite, qui soit sans coupure. La transition de systèmes terrestres et spatiaux divers à un système de navigation par satellite nécessitera une coopération poussée entre les autorités civiles internationales, les gouvernements et les représentants de l'industrie.

100. Les étapes de la réalisation du GNSS-2 sont éventuellement les suivantes: réalisation isolée d'un système mondial par un seul pays ou une seule entité (comme c'est le cas aujourd'hui); réalisation conjointe avec certains ou la totalité des principaux protagonistes (Inde, Japon, Fédération de Russie, États-Unis et Union européenne); ou réalisation isolée de plusieurs systèmes régionaux pouvant être associés et transformables en un système mondial. De nombreux États s'intéressent au développement des technologies GNSS. En vue d'étendre les avantages du GPS à l'échelle internationale ainsi que d'accroître les progrès vers la mise en œuvre du GNSS, certaines organisations ont très activement aidé à mettre en œuvre le GPS et ses renforcements respectifs.

101. Il faudra une compétence considérable et une grande coordination pour intégrer à la fois le GPS et le GLONASS dans les travaux actuels en matière d'applications à l'échelle mondiale (et au futur GNSS). Les États Membres commencent à se rendre compte des avantages découlant du renforcement du GPS et prennent les mesures qui s'imposent pour mettre au point une capacité analogue, à l'échelle nationale ou régionale.

C. Enjeux et problèmes

102. Dans les années à venir, la communauté internationale devra œuvrer à l'unisson pour qu'un système mondial de navigation sans coupure basé sur le renforcement du GPS/GLONASS devienne réalité. Dans le long terme, de nouveaux cadres pour la législation, la réglementation, l'homologation, la normalisation et le recouvrement des coûts seront nécessaires

103. Les organisations internationales de même que diverses nations voudront probablement exercer un contrôle indépendant sur les renforcements du GPS qu'ils ont mis en œuvre. Ce contrôle peut être prévu dans des accords internationaux ou régionaux.

104. Bien que les avantages de la navigation par satellite soient bien compris et acceptés, on ne sait pas si toutes les catégories d'utilisateurs (aviation, marine, véhicules de transport routier, chemins de fer, etc.) arriveront à faire entrer leurs besoins en ligne de compte dans la conception d'un système de la deuxième génération. Une autre préoccupation majeure consiste à savoir comment répartir équitablement entre les différents utilisateurs le coût de la mise en place et du fonctionnement du système.