

GALILEO ET LES GNSS : INTEROPÉRABILITÉ ET FUTURES APPLICATIONS

Félix PEROSANZ

Résumé

Les programmes spatiaux GPS (USA), GLONASS (Russie) et Galileo (Europe) sont les 3 composantes des Systèmes Globaux de Navigation par Satellite (GNSS) aujourd'hui en phase de modernisation ou de développement. Les accords internationaux d'interopérabilité et le développement de systèmes d'augmentation tel EGNOS vont dans le sens d'une amélioration des performances et de la fiabilité des GNSS. Leurs niveaux de précision de positionnement s'étalent de 10 m à quelques millimètres selon le mode de traitement des données, et leur potentiel d'intégration et d'hybridation à d'autres technologies est considérable. L'ensemble de ces facteurs concoure au développement exponentiel du champ des applications et des services des GNSS représentant un marché qui dépassera le milliard de puces dès 2010. Les GNSS vont bouleverser certains grands domaines d'activités dans les secteurs de la mobilité personnelle, des services publics, de l'environnement et de la recherche scientifique.

Abstract

GPS (USA), GLONASS (Russia) and Galileo (Europe) space programs are the 3 components of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) being today in a modernization or development phase. International agreements on interoperability and compatibility and augmentation systems development like EGNOS contribute to the performance and reliability enhancement of GNSS. The accuracy level ranges from 10 meters down to few millimetres depending on the processing mode. Their capability to be integrated into other technologies systems is of very much importance too. All of these factors converge to the tremendous expansion of GNSS application that will represent a market over 1 billion chips by 2010. The GNSS will overturn several activity domains like personal mobility, public services, environment and science research.

I. INTRODUCTION

L'acronyme GNSS (Global Navigation Satellite System) désigne l'ensemble des systèmes mondiaux de radio-positionnement par satellites. Aujourd'hui le GPS (Global Positioning System) américain, fort de ses 10 ans d'opérationnalité, domine le marché ; le GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System) russe est en phase de revitalisation, tandis que le système européen Galileo lance ses premiers satellites. Chacun de ces GNSS est nominalement constitué d'une constellation d'une trentaine de satellites dédiés qui émettent de façon continue des signaux radioélectriques dont la structure est parfaitement définie. Les utilisateurs équipés de récepteurs, peuvent, si au moins 4 satellites sont en visibilité, déterminer l'heure et leur propre position, en mesurant la distance qui les sépare de ces satellites dont les coordonnées sont connues.

Le GPS, qui fut le premier de ces systèmes, était initialement conçu pour des besoins essentiellement militaires (précision de 10 mètres) ou relevant du secteur des transports civils (précision de 100 mètres). Le spectre

des applications, des services et donc des utilisateurs des GNSS, s'est peu à peu considérablement élargi. Les prévisions indiquent que le marché mondial des puces GNSS dépassera le milliard d'unités dès 2010 !

De même que l'accès au temps fut le challenge technologique du 18^e siècle, le développement d'un système permettant de connaître sa position restera une avancée majeure pour l'humanité. Ainsi, C.-H. Méchet, J.-P. Poirier, J.-C. Husson, dans la préface de l'ouvrage « Galileo un enjeu stratégique scientifique et technique » (2003) considèrent que « la construction d'un repère spatio-temporel sur la Terre et dans son environnement, en faisant appel aux techniques spatiales, n'est pas une entreprise occasionnelle ; c'est une *évolution majeure et irréversible* du système technique sur lequel repose le fonctionnement de notre société ; dans une perspective historique, c'est *la solution ultime* d'un problème auquel l'homme est confronté depuis les origines de la civilisation : connaître, dans l'espace et dans le temps, sa position et celle des engins qu'il fabrique ». Et l'on peut noter que l'impact des GNSS sur la société fait partie des préoccupations de l'ONU qui recommande « d'améliorer

la fiabilité et la sécurité des transports, de la recherche et du sauvetage, de la géodésie et des autres activités en promouvant et en améliorant l'accès universel et la compatibilité des systèmes de navigation par satellite » (Unispace III, Juillet 1999, Vienne, Autriche).

GPS, GLONASS et Galileo sont aujourd'hui une réalité et l'objet de cet article n'est pas d'exprimer, une nouvelle fois, les raisons de leur existence simultanée ou de faire un état de leurs avantages et de leurs inconvénients respectifs. Nous chercherons d'abord à mettre en avant les différents facteurs qui aujourd'hui concourent au succès des GNSS. Nous illustrerons par la suite notre propos par un panorama des applications actuelles et futures les plus remarquables dans les secteurs de la mobilité personnelle, des services publics, de l'environnement et de la recherche scientifique.

II. LES GNSS ET LES SYSTÈMES D'AUGMENTATION

A. La « modernisation » du GPS

Conçu dans les années 1970, le GPS est depuis développé sous le contrôle du département américain de la défense pour des applications militaires et civiles. Il fut déclaré opérationnel en 1995 et a successivement vécu plusieurs évolutions tant aux niveaux des segments de contrôle, spatiaux et utilisateurs que de son management.

1. La modernisation du segment spatial

La modernisation du segment spatial est un élément essentiel de l'évolution des performances du système lui-même. Si le premier satellite expérimental fut lancé en 1978, différentes générations de satellites GPS (block I, II, II-A, II-B, II-R) se sont succédées apportant chacune leur lot d'améliorations (performance du signal, qualité de l'oscillateur, allongement de la durée de vie...). Le 54^e satellite GPS, lancé le 26 septembre 2005 est le premier des 8 satellites de la génération IIR-M offrant l'accès pour la première fois à un code civil sur la deuxième fréquence L2. À l'issue de ce tir, la constellation GPS comprenait 29 satellites opérationnels. En 2007 le premier satellite du block II-F émettra sur une troisième fréquence civile L5 avec une puissance d'émission sensiblement accrue. Enfin, la troisième génération de satellites GPS (block III) devrait être déployée au delà de 2015 et proposer de nouvelles améliorations comme la fonction d'intégrité des signaux.

2. La modernisation du segment de contrôle

Le segment de contrôle a, lui aussi, suivi de nombreuses évolutions en particulier sur le plan des moyens opérationnels, des interfaces et du nombre de stations. Il en résulte par exemple, une amélioration sensible de la précision des éphémérides radiodiffusées, c'est-à-dire les

informations de position et de correction d'horloge des satellites GPS (Slater, 2005). Les utilisations courantes du GPS (utilisation autonome d'un seul récepteur) tirent directement partie de l'amélioration de la qualité de ces éphémérides.

3. La modernisation du segment utilisateur

Le segment utilisateur du GPS a considérablement bénéficié de la concurrence entre les nombreux constructeurs. Les évolutions technologiques ont contribué à l'amélioration des performances des récepteurs : nombre de canaux, stabilité des oscillateurs, électronique et algorithmes de traitement du signal. La technologie « code-less », en particulier, permet de s'affranchir du cryptage du code-P et d'accéder à des mesures de phase bi-fréquences nécessaires pour atteindre des précisions sub-décimétriques. La présence d'un code C/A sur les deux fréquences des prochains satellites GPS favorisera le développement de récepteurs bi-fréquences à bas coût et sensiblement plus précis. Enfin, l'augmentation de la puissance d'émission des satellites II-M et surtout II-F est un atout pour la réception du signal dans des environnements difficiles (intérieur, couvert végétal, canyons urbains...). La diminution de la consommation d'énergie, critique pour des équipements intégrés dans des téléphones mobiles par exemple, est elle aussi une donnée primordiale pour l'élargissement des services des GNSS.

4. La nouvelle politique de PNT américain

Le GPS est aujourd'hui géré par le comité exécutif du PNT (Positioning, Navigation and Timing) américain. Le président Georges Bush a établi une nouvelle politique du PNT le 8 décembre 2004, en remplacement du texte du 28 mars 1996 (<http://pnt.gov/>). Ce nouveau texte définit le cadre de la mise en oeuvre des systèmes de positionnement, de navigation et de datation pour les applications nationales de sécurité et les services civils, scientifiques et commerciaux. Il renforce l'idée d'un système dual militaire-civil, mentionne la volonté d'assurer la compatibilité et l'interopérabilité de GPS avec les autres GNSS et clarifie les rôles des départements américains concernés et celui des transports en particulier dans le management et le financement du GPS. Rappelons qu'en mai 2000, le président Bill Clinton a pris la décision de supprimer la dégradation volontaire des signaux civils (appelée SA, pour Selective Availability) améliorant instantanément la précision du mode basique de positionnement de 100 mètres à 10 mètres.

B. La revitalisation de GLONASS

GLONASS est la composante militaire russe des GNSS. La conception et les évolutions du système sont calquées sur le GPS américain et ses performances sont potentiellement du même niveau. Le premier satellite

expérimental fut lancé en 1982, et en 1995 une constellation de 26 satellites permettait à GLONASS d'être déclaré opérationnel. Cependant, la trop faible durée de vie des satellites des premières générations ainsi que les difficultés économiques de la Russie ont progressivement conduit à une dégradation du segment spatial. En 2001 il ne restait plus que 7 satellites GLONASS en fonction. Malgré cela, pour certaines applications spécifiques, l'utilisation de récepteurs hybrides GPS/GLONASS s'est avérée utile. C'est le cas par exemple du suivi cinématique d'engins de chantiers qui cumulent à la fois des conditions de visibilité dégradées et des besoins de grande précision. En 2000, à l'issue du déploiement d'un réseau mondial de récepteurs hybrides GPS/GLONASS dans le cadre de la campagne IGEX (<http://lareg.ensg.ign.fr/IGEX/>) le système russe a intégré l'International GNSS Service (IGS).

GLONASS est aujourd'hui en phase de revitalisation et le plan de modernisation de ses 3 segments est lui aussi très similaire à celui de GPS. Le (re)déploiement de la constellation de satellites à base de satellites GLONASS-M améliorés est en cours (6 lancements entre 2004 et 2005). Les premiers satellites GLONASS-K à trois fréquences devraient être lancés dès 2007 et le système pourrait être à nouveau opérationnel à l'horizon 2008-2010.

C. Galileo

Galileo, qui devrait être opérationnel en 2010, est le système *civil* européen de positionnement par satellite. Il représente le premier projet de cet envergure (budget de plus de 3,4 milliards d'Euros) porté conjointement par l'Union Européenne et l'Agence Spatiale Européenne. De nombreuses difficultés ont été surmontées avec succès, comme la mise en place d'un nouveau cadre administratif et juridique, les difficultés de négociations entre les états membres, ou enfin le développement de nouvelles technologies. Dès 2004 une partie de l'infrastructure Galileo a été évaluée et validée au travers de l'expérience GSTBV1. Le premier satellite expérimental GIOVE-A lancé le 28 décembre 2005, montre la voie aux 4 premiers satellites de la constellation opérationnelle qui seront mis en orbite en 2008.

Les objectifs de Galileo, souvent commentés dans la littérature, sont d'ordres sociétaux, économiques politiques et technologiques. Nous limitons ici notre discussion à l'impact sociétal des GNSS. De ce point de vue, Galileo, au travers de ses différents signaux, offre l'accès à 5 classes de services :

- Le service ouvert (ou *OS* pour *Open Service*) correspond au mode basique d'utilisation autonome de Galileo. L'accès aux signaux est gratuit et la précision de quelques mètres.
- Le service commercial (ou *CS* pour *Commercial Service*) payant offrira à ses abonnés des services à valeur ajoutée. Le système d'augmentation (cf. II-D) intégré à Galileo fournira des corrections différentielles

de précision sub-métriques et des informations d'intégrité du système.

- Le service de sûreté de la vie (ou *SOL* pour *Safety Of Life*) délivrera un service sécurisé, intègre et garanti contractuellement, en vue des applications critiques sur le plan de la sécurité de la vie (transport aérien par exemple).

- Le service public réglementé (ou *PRS* pour *Public Regulated Service*) sera prioritairement destiné à des applications sensibles du point de vue de la sécurité civile (services d'urgence et d'intervention par exemple) pour des utilisateurs habilités.

- Le service de recherche et de secours (ou *SAR* pour *Search And Rescue*) permettra de localiser les utilisateurs équipés d'une balise de détresse. Les satellites de la constellation Galileo en densifiant le segment spatial de Cospas-Sarsat amélioreront nettement les performances de ce système qui a, depuis 1982, sauvé plusieurs dizaines de milliers de vies.

Le problème de disponibilité continue et garantie du signal GNSS est critique pour bon nombre d'applications comme la navigation aérienne ou la sécurité civile. Seul Galileo est en mesure de s'engager contractuellement sur l'intégrité et la disponibilité de ses signaux. Ainsi, dès 2010, Galileo offrira ses nombreux services à l'Europe et au monde entier.

D. EGNOS et les systèmes d'augmentation

Les systèmes d'augmentation sont des éléments complémentaires des GNSS qui permettent d'en améliorer la *précision* et la *fiabilité*. Initialement, l'idée part d'une volonté de réduire les effets de la dégradation volontaire des signaux GPS (SA) qui affectait la précision des systèmes civils dans les années 1990. Deux récepteurs proches observant au même instant les mêmes satellites sont affectés par les mêmes erreurs de SA. Si l'un des récepteurs est placé sur un point de coordonnées connues, l'erreur instantanée du système peut être calculée et la position donnée par le deuxième récepteur peut être corrigée. Grâce à ces *corrections différentielles*, la précision de positionnement du GPS passe de 100 mètres à 1 mètre en présence de SA et de 10 mètres à 1 mètre hors SA. Ainsi, malgré la suppression de la SA en mai 2000, le mode DGPS et les systèmes d'augmentation gardent leur intérêt pour l'amélioration de la précision du positionnement. Mais cette idée peut aussi être exploitée pour identifier d'éventuelles anomalies d'émission de tel ou tel satellite en comparant la distance théorique (connaissant la position de la station de contrôle et celle du satellite) et la distance mesurée entre le satellite et le récepteur. Ainsi, un signal *d'intégrité* propre à chaque satellite peut être émis par la station de contrôle à destination des utilisateurs.

Dès le milieu des années 1990, de nombreux services publics et privés exploitent cette idée de système d'augmentation pour améliorer la précision et la fiabilité des GNSS. Rapidement, les États-Unis, l'Allemagne et

le Japon par exemple se dotent d'un réseau terrestre d'augmentation (ou GBAS pour Ground Based Augmentation System) émettant des signaux radio de correction différentielle couvrant l'ensemble de leur territoire. Parallèlement l'idée d'un « complément européen » à GPS émettant un signal d'augmentation depuis un satellite géostationnaire (ou SBAS pour Satellite Based Augmentation System) naît au CNES (Centre National d'Études Spatiales). Le projet se concrétise au niveau européen sous l'égide de l'UE et de l'ESA sous le nom d'EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System). EGNOS est en fonction depuis juillet 2005 et émet ses signaux aux normes de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (Galileo un enjeu stratégique scientifique et technique, 2003). Ainsi, tout utilisateur du GPS peut recevoir de façon complémentaire :

- une information d'intégrité des signaux GPS signalant une défaillance du système (message : « use / don't use ») ;
- des corrections différentielles améliorant de 10 mètres à 1 mètre la précision des positions ;
- des mesures de « ranging » émises par un satellite géostationnaire et similaires à des mesures GPS permettant d'augmenter le nombre de signaux disponibles.

Les récepteurs GPS en vente aujourd'hui sont, pour la plupart, compatibles avec les signaux EGNOS ainsi qu'avec ceux des autres systèmes d'augmentation par satellite géostationnaire que sont le WAAS (couvrant l'Amérique du nord) et le MSAS (pour l'Asie).

Dans l'attente de l'opérationnalité de Galileo, les systèmes d'augmentation et EGNOS en particulier offrent dès à présent de réels intérêts pour certaines classes d'applications que nous détaillerons dans le chapitre IV.

III. INTEROPÉRABILITÉ ET COMPATIBILITÉ DES GNSS

À l'horizon 2010, selon les différents plannings de modernisation de GPS et de GLONASS, et de développement de Galileo, 3 GNSS aux caractéristiques technologiques et aux applications très similaires vont « cohabiter ». Ces similitudes posent naturellement les questions de leur *compatibilité* et de leur *interopérabilité*. Dans le cas de GPS et Galileo, un accord international dont les conséquences économiques, politiques et stratégiques sont considérables a pu être conclu en juin 2004 à l'issue de longues et âpres négociations (Neilan, 2004). Nous nous attarderons sur la signification et les conséquences pratiques de la *compatibilité* et de l'*interopérabilité* des GNSS.

A. La compatibilité des GNSS

La *compatibilité* des GNSS signifie que chacun de ces systèmes peut être mis en œuvre indépendamment sans affecter le fonctionnement des autres. Cela suppose en particulier que les caractéristiques des nombreux signaux (fréquence, bande passante, structure, puissance...)

transmis par l'un des systèmes n'interfèrent pas avec ceux des autres. L'accord sur le partage de la bande L entre les nombreux signaux GNSS est particulièrement sensible pour les applications de défense et de sécurité de la navigation aérienne et fut le point dur des négociations. Ainsi, les bandes de fréquence L1 et L5 des signaux GPS et Galileo, bien qu'elle soient communes, ne devraient pas compromettre la compatibilité entre les deux systèmes.

B. L'interopérabilité des GNSS

L'*interopérabilité* signifie que l'utilisation combinée de plusieurs GNSS offre un service amélioré par rapport à ce que chacun de ces systèmes fournit indépendamment. Cela implique en particulier que ces différents systèmes donnent la même solution en un même point (ce qui n'est pas aussi trivial qu'il n'y paraît) et que les caractéristiques des signaux et de leur traitement soient suffisamment proches pour être « facilement » intégrées dans un même récepteur. Ainsi l'interopérabilité des GNSS passe par l'accord sur les 3 points suivants.

1. Le système de référence de temps

Chaque GNSS est fondé sur le principe de la définition d'un système de référence de temps qui lui est propre. Pour que la mesure du temps de propagation du signal entre le satellite et l'utilisateur ait la précision requise, il est nécessaire que, d'une part, le segment de contrôle définisse un temps de référence à partir d'une moyenne d'horloges atomiques, et d'autre part, que chaque élément du segment spatial et du segment utilisateur se synchronise sur ce temps. De plus, chaque GNSS doit, s'il veut s'assurer une validité universelle et des capacités d'interopérabilité, être en mesure de maintenir le rattachement de son système de temps de référence avec la référence internationale, en l'occurrence le Temps Atomique International (TAI), et avec les temps système des autres GNSS. Par exemple, l'écart de 19 secondes entre le temps GPS et le TAI est maintenu par le segment de contrôle avec une grande précision. De la même façon, le Galileo-GPS Time Offset (GGTO) calculé à l'aide du Time Service Provider (GTSP) sera déterminé avec une précision de 5 nanosecondes (1,5 mètre) et transmis aux utilisateurs via le message de navigation.

2. Le système de référence d'espace

Chaque GNSS doit, de façon tout aussi fondamentale, réaliser son propre système géodésique de référence. Les coordonnées des satellites, et donc celles des utilisateurs, sont exprimées dans ce système. Ici encore, la validité universelle et l'interopérabilité entre GNSS impose que, d'une part, chacun d'eux maintienne la qualité de la réalisation de son système de référence au niveau spécifié (par exemple 3 cm pour Galileo) et que, d'autre part, les paramètres de transformation vers les

standards internationaux de l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame) soient régulièrement déterminés et transmis aux utilisateurs.

3. La normalisation

D'un point de vue pratique, l'interopérabilité sous-entend aussi que les technologies (hard et software) de traitement des signaux des GNSS soient suffisamment proches pour en faciliter l'intégration dans un même récepteur sans en augmenter la complexité, le coût et le volume par exemple. Elle suppose aussi l'accord sur des standards internationaux (de formats, normes, protocoles...) facilitant l'interfaçage des GNSS avec un autre système électronique, un logiciel, ou une base de données.

4. Intérêt pour les utilisateurs

Les notions de compatibilité et d'interopérabilité des GNSS, parce qu'elles touchent au fondement des systèmes, sont techniquement complexes et politiquement délicates. Mais elles sont surtout un gage de nombreux intérêts pour les utilisateurs. Par exemple l'utilisation combinée d'au moins deux GNSS présente l'avantage majeur de la densification du segment spatial. Les coordonnées du récepteur seront déterminées avec une meilleure précision (meilleure géométrie, plus équations pour le même nombre d'inconnues) car un plus grand nombre de satellites seront en visibilité. L'hybridation de GNSS qui émettent sur différentes fréquences, présente aussi l'intérêt de prévenir les cas de « pannes » simultanées dues, par exemple, au brouillage spécifique d'une fréquence. Enfin, plus de signaux sur plus de fréquences seront disponibles ce qui a un intérêt significatif pour certains utilisateurs.

IV. PRODUITS, SERVICES ET APPLICATIONS CIVILS DES GNSS

A. Le contexte

L'explosion annoncée des applications et des services dérivés des GNSS est liée à l'évolution des performances des systèmes, aux accords de compatibilité et d'interopérabilité et enfin aux capacités d'hybridation à d'autres technologies.

1. La précision des GNSS

La modernisation des GNSS d'une part, les évolutions des équipements et des stratégies de traitement d'autre part, ont conduit à une amélioration continue du niveau de précision des coordonnées. Les différents « modes » de mise en œuvre des GNSS permettent de définir 4 grandes classes de précisions détaillées ci-après. Les valeurs de ces précisions ne sont données qu'à titre indicatif et dépendent de nombreux paramètres comme le type d'équipement, les conditions d'observations, ou les logiciels de traitement.

1.a. Le mode autonome : précision 10 m

Il s'agit du mode « basique » d'utilisation des GNSS consistant à déterminer la position d'un utilisateur en temps réel par le traitement des mesures de pseudo-distances obtenues à partir du code C/A (sur une seule fréquence). L'émission prochaine de signaux GNSS code C/A sur deux fréquences encouragera le marché des récepteurs bas coût bi-fréquences, de précision encore améliorée.

1.b. Le mode différentiel DGNS : précision 1 m

Nous avons vu dans le chapitre II-D comment l'idée des corrections différentielles avait donné naissance aux systèmes d'augmentation qui permettent aujourd'hui d'améliorer la précision de 10 mètres à 1 mètre. La disponibilité des SBAS tels que EGNOS et Galileo ainsi que la densification des GBAS va peu à peu généraliser l'usage du mode de positionnement DGNS.

1.c. Le mode différentiel RTK : précision 10 cm

L'idée originale (qui n'avait pas été envisagée au moment de la conception de GPS) d'exploiter la mesure de phase de la porteuse des signaux GNSS plutôt que la mesure de code, augmente considérablement les capacités des GNSS en terme de précision des signaux. Sur le principe, le mode Real Time Kinematic (RTK) est très similaire au mode DGNS mais inclut le traitement des mesures de phase, sur une ou deux fréquences selon la précision recherchée. Le processus opératoire du point de vue de l'acquisition et du traitement des données nécessite, de ce fait, plus d'attention. Le mode RTK permet des applications de positionnement cinématique pour le suivi de mobiles avec une précision de quelques centimètres.

1.d. Le mode statique précis : 1 cm

Enfin, le traitement des mesures de phase en mode statique précis permet d'atteindre des précisions sub-centimétriques. Quelle que soit la stratégie de traitement (double différenciation des observables ou mode Precise Point Positioning), différentes conditions doivent être réunies pour atteindre ce niveau de précision. En particulier, il est nécessaire d'utiliser les données d'un réseau de récepteurs de qualité géodésique (bi-fréquences), de stationner pendant plusieurs dizaines de minutes à plusieurs jours sur les mêmes points (selon la précision recherchée), de porter la plus grande attention aux traitements des données qui seront réalisés avec l'un des outils géodésiques du marché comme le *Bernese Software* (<http://www.aiub.unibe.ch/bernese.html>) ou *GAMIT* (<http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>). L'arrivée prochaine de signaux GNSS sur 3 fréquences va faciliter les algorithmes de résolution des ambiguïtés de phase grâce à la technique TCAR (Three Carrier Phase Ambiguity Resolution) et encore améliorer la précision

de positionnement des GNSS.

L'étendue du spectre des précisions du positionnement GNSS, de 10 m à quelques millimètres selon le mode de mise en œuvre, est naturellement un facteur essentiel de la diffusion de leur exploitation dans de nombreux secteurs d'activités.

2. Compatibilité, interopérabilité et normalisation

Les accords de compatibilité et d'interopérabilité des GNSS vont de pair avec la normalisation de leurs interfaces. La définition de protocoles de communication, de normes, de formats de données, favorise la diffusion des systèmes et de ses applications. Le succès des services et applications de GNSS dépend en grande partie de cette capacité à définir des normes et des cadres de certification facilement applicables et reproductibles dans un grand nombre de produits.

3. L'hybridation technologique

L'amélioration des performances, la miniaturisation progressive des puces et des antennes GNSS associées à la chute de leurs prix, ont considérablement facilité leur hybridation à d'autres technologies dans les secteurs de la téléphonie, de l'informatique ou de l'automobile par exemple. Les GNSS deviennent des services à valeur ajoutée dont l'usage se généralise dans une perspective de marché qui dès 2010 dépassera le milliard de puces.

4. Synthèse

Pour l'ensemble de ces raisons, le champ des applications et des services des GNSS se développe de façon exponentielle. Naturellement les retombées économiques d'un tel marché sont considérables et pourraient justifier à elles seules les investissements financiers dans le développement de Galileo et les modernisations de GPS et GLONASS. Les GNSS ont, ou vont aussi bouleverser certains domaines d'activités comme nous allons le voir sans nécessairement générer de gros bénéfices commerciaux. Sans vouloir être exhaustif, nous donnerons quelques exemples des possibilités actuelles et futures des GNSS autour de 4 grands thèmes que sont les services à la personne, les services publics, l'environnement et les sciences.

B. Les services à la personne

Il s'agit du vaste domaine des services d'aide à la mobilité d'une personne se déplaçant à pied ou à bord de son véhicule personnel par exemple. Ces applications se suffisent du mode le plus basique d'utilisation des GNSS (mode autonome) ou du mode différentiel (DGNSS). La facilité d'utilisation et la chute des prix des équipements contribuent naturellement à une très large diffusion des services incluant la fonction GNSS. Les services à la

personne devraient, à terme, représenter à eux seuls plus de 75% du marché des ventes de puces GNSS. L'implantation quasi systématique dans les téléphones portables, les PDA, les véhicules personnels, etc. des fonctions d'aide à la mobilité personnelle représentera un service qui pourrait rapidement devenir un besoin.

1. Le LBS

Au delà de leur simple utilisation dans le cadre de nos loisirs (promenades, randonnées) l'avenir des GNSS est par exemple dans le « Location Based Service » (LBS), en d'autres termes le large domaine des services à la personne incluant l'information de localisation : se positionner (sur une carte, dans quelle rue), communiquer sa position, connaître la position de l'autre, d'une personne « sensible » (enfant, malade, détenu en liberté conditionnelle...), lancer un appel de détresse, guider un malvoyant, localiser la pharmacie la plus proche, se guider ou retourner sur un lieu (dont on a enregistré la position). Le marché de la téléphonie mobile représente à lui seul un potentiel de 2 milliards d'utilisateurs dès 2015. Le LBS devrait prochainement s'étendre à la localisation dans les endroits couverts grâce aux développements technologiques en cours et à l'augmentation du nombre et de la puissance d'émission des futurs satellites GNSS.

2. Les véhicules personnels

Le secteur des véhicules personnels offre des possibilités considérables : l'aide à la navigation des véhicules (connaître sa position dans une ville, quelle route suivre pour atteindre telle adresse...) est aujourd'hui très répandue et se banalisera bientôt. La disponibilité des signaux GNSS, y compris dans le cas des canyons urbains (cf. III-B-4), leur précision toujours croissante, la continuelle baisse des prix des équipements, contribueront à cette tendance. Mais, là encore, l'association à d'autres technologies multipliera les services : localiser la station service la plus proche, appel automatique des secours en cas de déclenchement des airbags, optimisation des trajets en fonction des paramètres de circulation (embouteillages, états des routes, déviations...), message de dépassement de la vitesse autorisée, signalisation de la proximité d'un objet « remarquable » (site touristique, radar de contrôle de vitesse...) ou suivi des véhicules volés. La multiplication du nombre de satellites GNSS et la densification des systèmes d'augmentation terrestres vont largement améliorer la qualité du service de navigation dans une situation de canyon urbain.

C. Les services aux pouvoirs publics et aux professionnels de la géométrie

Les GNSS offrent de nouveaux services pour de très nombreux secteurs d'activités relevant des pouvoirs publics comme ceux des transports ou de la sécurité.

Certains métiers vivent l'arrivée de ces services innovants, comme de véritables fractures technologiques. Dans la plupart des cas, la précision des GNSS en mode basique autonome ne suffit pas. La mise en œuvre d'un mode différentiel de positionnement (DGNSS ou RTK) est nécessaire. Cela peut entraîner une augmentation du coût des équipements et exiger certaines précautions de mise en œuvre.

1. Le transport aérien

Les besoins de l'aviation civile ont été les moteurs des développements des GNSS, pour les usages civils. Les enjeux pour la sécurité du transport aérien sont évidents. Ils ont motivé le développement de systèmes d'augmentation incluant la fonction d'intégrité et ont pesé dans les discussions sur la compatibilité, l'interopérabilité et la normalisation des signaux GNSS. La mise au point d'outils d'aide à la décision intégrant la fonction GNSS pour fournir aux pilotes des moyens nouveaux de gestion sécurisée des paramètres de l'appareil en phase d'approche et d'atterrissage est un exemple de contribution tout à fait significatif.

2. Le transport naval

Le secteur de la navigation maritime est précurseur des utilisations des GNSS pour ses besoins de navigation et de gestion du trafic. En France par exemple, depuis les années 1990, le *Service des Phares et Balises* assure la diffusion radio de corrections différentielles de précision métrique le long des côtes les plus fréquentées et les plus dangereuses. L'amélioration de la gestion et de la sécurité du trafic maritime et fluvial mondial bénéficiera des évolutions des GNSS.

3. Les véhicules terrestres

Les services de gestion de flottes de véhicules terrestres professionnels à base de GNSS se sont énormément développés avec, aujourd'hui, un niveau d'amélioration des services et de rentabilité très favorable. Par exemple, les délais d'attente pour les usagers des taxis ou des bus ont été réduits, les sociétés de transport routier peuvent « suivre » et optimiser les déplacements de leurs camions, chaque wagon d'une gare de triage peut être localisé. De la même façon, un conteneur de matières dangereuses peut être suivi. En matière de sécurité civile, la gestion des équipes et des véhicules d'intervention peut être critique lors de catastrophes naturelles ou industrielles, d'attentats ou d'émeutes. Là encore, les évolutions des GNSS avec, par exemple, le service « public réglementé » de Galileo vont dans le sens d'une amélioration des performances.

4. Les métiers de la géométrie et du BTP

Les capacités des GNSS pour les métiers de géomètre,

de topographe, de cartographe, de géomaticien, etc., représentent une réelle rupture technologique. Les méthodes de travail ont largement été modifiées : le relevé cadastral, la mesure des surfaces agricoles, l'implantation d'un tracé autoroutier, exploitent les GNSS. À titre d'illustration, l'ordre des géomètres-experts associé à l'IGN (Institut Géographique National) déploiera en 2006 à l'échelle nationale française le réseau TERIA (<http://www.reseau-teria.com>). Cet ensemble de 100 récepteurs GPS, en diffusant par voie hertzienne les corrections différentielles de phase bi-fréquences, permettra à un opérateur d'effectuer seul, un relevé cadastral avec une précision sub-décimétrique en temps réel. Mais les services de TERIA seront aussi accessibles à de nombreuses autres activités exigeant ce niveau de précision.

Le secteur de la construction ou de l'exploitation minière fourmille d'exemples de service à base de GNSS : gestion du parc d'engins, localisation précise d'un point de forage, guidage assisté d'une pelle mécanique... Pour certaines de ces applications, qui cumulent souvent les inconvénients de nécessiter une grande précision et d'une mauvaise visibilité du ciel, l'expérience a montré le gain d'une utilisation de récepteurs hybrides GPS/GLONASS. L'arrivée de Galileo ira dans le sens d'une amélioration des services.

5. Les services aux collectivités territoriales

Le développement de SIG (Système d'Information Géographique) et de modèles urbains texturés en 3D avec une précision décimétrique ouvre la porte à une infinité d'applications relevant des collectivités territoriales : la gestion des travaux de voirie ou d'entretien du mobilier urbain, le géoréférencement des différentes bases de données, la définition de zones inondables, l'optimisation de la collecte des déchets, etc. Naturellement, comme dans le cas des véhicules terrestres (cf. IV-C-3), la contribution des GNSS en matière de sécurité civile (assistance à la personne, intervention d'urgence...) est tout à fait essentielle.

6. Les services de datation

Les récepteurs GNSS par principe se recalent sur le temps de référence du système lorsqu'ils fonctionnent. Les récepteurs GNSS d'un réseau sont donc intrinsèquement synchronisés. De nombreuses classes d'applications tirent profit de ce principe. À titre d'illustration, nous citerons la synchronisation des réseaux de télécommunications, l'optimisation des systèmes de distribution d'énergie électrique ou l'horodatage (sécurisation) des opérations bancaires en ligne.

7. Les services de positionnement « indoor »

Enfin, des efforts importants de développements technologiques sont en cours pour proposer des solutions

de positionnement « indoor ». Dans la perspective d'un plus grand nombre de signaux disponibles et d'une puissance d'émission accrue, les GNSS pourront, dans certains cas, apporter une contribution significative aux problèmes, par exemple, du suivi de véhicules, de la gestion de stocks et de la sécurité d'agents à l'intérieur de bâtiments.

D. Les services pour l'environnement, la prévention des risques naturels et le développement durable

La préservation de notre environnement, la prévention des risques naturels et le développement durable représentent des enjeux sociétaux majeurs pour lesquels les GNSS sont un réel potentiel encore sous exploité.

1. Les risques sismiques et les glissements de terrains

Les GNSS ont, par exemple, la capacité de pouvoir mesurer avec une précision sub-centimétrique, les déformations d'une zone géographique dues à des glissements de terrains ou à l'activité tectonique dans le but d'alerter les populations face à ce type de risque naturel responsable de dizaines de milliers de victimes chaque année. Plusieurs réseaux denses de centaines, voire de milliers de récepteurs équipent de nombreuses régions du monde, où, à la fois, le risque et la densité de population sont importants (faille de San Andreas en Californie, le Japon en général...). De la même façon, les déformations des ouvrages d'art à risques (ponts suspendus, barrages...) peuvent être surveillées en temps réel grâce aux données centralisées de réseaux de récepteurs GNSS repartis en différents points stratégiques de la construction.

2. Les risques météorologiques

Les signaux GNSS en traversant les couches basses de l'atmosphère (troposphère) sont affectés par le phénomène de réfraction qui introduit un biais dans la mesure de la distance satellite-récepteur qui est fonction des conditions météorologiques (température, pression, humidité). Dans le cas particulier où un récepteur est placé sur un point de coordonnées connues, les mesures GNSS permettent de déterminer ce biais troposphérique et donc de caractériser les conditions météorologiques au niveau du récepteur. Sur ce principe, un réseau dense de récepteurs installés sur des points de coordonnées connues, permet de réaliser une tomographie de la troposphère (Ducic *et al.*, 2003a ; Bastin *et al.*, 2005). Ainsi des données GNSS peuvent être assimilées dans des modèles de prévisions météorologiques. Elles permettent aussi d'anticiper les quantités d'eau précipitable lors d'événements pluvieux intenses et de prévenir les inondations (Chadwell & Bock, 2001 ; Duan *et al.*, 1996) ou la détermination d'index de prévision des impacts de foudre (Mazany *et al.*, 2002). Les récepteurs GNSS sont clairement identifiés aujourd'hui comme des senseurs

météorologiques (Van Baelen *et al.*, 2005).

3. L'agriculture de précision

L'agriculture de précision est née de l'utilisation des GNSS pour le positionnement d'engins agricoles. Associées à un SIG, les données fournies par le récepteur GNSS contribuent par exemple à la mesure des surfaces agricoles (conformément à la Politique Agricole Commune), à la cartographie du rendement ou à l'optimisation des épandages d'engrais et de pesticides. L'avenir de l'agriculture de précision serait dans la traçabilité des produits agricoles (date et lieu de récolte, traitements subis...) qui pourrait, à l'image du marché des viandes d'élevage, devenir prochainement une exigence des consommateurs (Viau *et al.*, 2005).

4. La gestion des ressources halieutiques

Dans les situations souvent conflictuelles d'application des réglementations en matière de zones et de quotas de pêche, les GNSS contribuent aujourd'hui à apporter une solution. Par exemple, le système Argonet (http://www.cls.fr/html/argos/peche/argonet_fr.html), est basé sur une utilisation hybride de GPS et d'ARGOS, et assure la surveillance des bateaux de pêche et de leurs prises dans le monde entier. Ce système est une solution aux exigences de la réglementation internationale qui impose aujourd'hui le « Vessel Monitoring System » (VMS, c'est-à-dire un système de suivi par satellite) à chaque navire de pêche. L'essentiel des pays les plus gros pêcheurs du monde, ont adhéré à Argonet.

5. Le niveau des océans et le réchauffement global

La mesure de l'évolution séculaire du niveau moyen de la mer liée au réchauffement global est une priorité. Mais les mesures des marégraphes sont entièrement corrélées au mouvement vertical (tectonique, isostatique...) de la station. La surveillance du niveau absolu de la mer nécessite donc de pouvoir mesurer ces déplacements. La technique aujourd'hui recommandée consiste au « rattachement » du marégraphe à l'ITRF en installant à sa proximité un récepteur GNSS permanent (Neilan *et al.*, 1998 ; Bevis *et al.*, 2002). Les GNSS, au travers du déploiement de récepteurs continus co-localisés avec des stations marégraphiques (dans le cadre de programmes internationaux comme TIGA ou GLOSS), apportent ainsi leur contribution au problème critique du réchauffement global.

E. Les services pour la recherche scientifique et technologique

Ces applications nécessitent l'utilisation des récepteurs les plus performants (bi ou tri fréquences), des précautions de mise en œuvre et d'utilisation (qualité de la monumentation, de l'environnement radioélectrique...)

et des logiciels incluant des algorithmes raffinés de traitement des données. Dès le début des années 1980, les techniques de différentiation des observables de phase permettaient d'atteindre des précisions de positionnement centimétriques. Cette capacité des GNSS est largement exploitée et continue d'alimenter de nouvelles idées d'application. Dans le domaine de la recherche, les fondements même d'une discipline scientifique ou technique (outils, méthodes, compétences) ont parfois été bouleversés du fait des nouvelles possibilités offertes par les GNSS.

1. La géophysique

Les mesures de GNSS sont devenues la source d'information essentielle des géophysiciens qui cherchent à mesurer les déformations de la Terre aux différentes échelles spatiales et temporelles : déplacements horizontaux intercontinentaux dus à la tectonique des plaques, déformations co-sismiques et post-sismiques, déformations verticales liées aux phénomènes d'isostasie (point chaud d'Hawaï) ou de charge hydrologique (rebond post-glaciaire, crues de l'Amazone). Peut-être un jour, notre compréhension des mécanismes en jeu permettra de les modéliser avec une fiabilité suffisante pour anticiper par exemple, des phénomènes sismiques majeurs.

2. La géodésie

La tâche du géodésien s'est depuis l'antiquité sensiblement complexifiée. Aujourd'hui, via le service international de l'IERS (International Earth Rotation Service), il a la charge de réaliser des systèmes géodésiques de référence et de fournir les paramètres de rotation de la Terre qui sont les fondements même de tout GNSS et sont nécessaires à nombre de disciplines. Mais le système Terre est très complexe car sous les effets de l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil, des interactions avec les océans et l'atmosphère, de la tectonique des plaques lithosphériques... la Terre se déforme et son axe et sa vitesse de rotation varient (Cazenave & Feigl, 1994). Parmi les différentes techniques d'observation géodésique, les GNSS, par la densité et la qualité de leurs mesures, occupent aujourd'hui une place de tout premier plan.

3. La météorologie spatiale

La météorologie spatiale a pris une nouvelle dimension avec l'avènement des GNSS. L'accès aux mesures bifréquences permet d'accéder au contenu électronique de l'ionosphère (TEC pour Total Electron Content), lui-même corrélé à l'activité géomagnétique. Au-delà de l'étude des interactions Soleil - Terre, ces activités de recherche ont un intérêt pour prédire les performances des GNSS mono-fréquence, dont les erreurs peuvent sensiblement augmenter avec le TEC, et prévenir les phénomènes de scintillation. De plus, de récents travaux

(Artru *et al.*, 2001 ; Ducic *et al.*, 2003b) ont montré qu'un réseau dense de récepteurs GNSS permet de réaliser une tomographie de l'ionosphère avec une résolution spatiale et temporelle suffisante pour mettre en évidence la propagation d'ondes gravitationnelles succédant à un séisme, un tsunami, ou une explosion nucléaire par exemple.

4. Les applications spatiales

La spatialisation de récepteurs GNSS sur des lanceurs ou des satellites à de nombreuses applications technologiques ou scientifiques.

- Dans la perspective d'une plus grande autonomie du contrôle de leur trajectoire (mise et maintien à poste, rentrée atmosphérique contrôlée), les futurs satellites pourraient exploiter des navigateurs GNSS embarqués comme par exemple le système DIOGENE (Lamy *et al.*, 2004) développé par le CNES.

- La capacité des GNSS à assurer un suivi continu des satellites en orbite basse est un atout majeur pour l'analyse des perturbations d'orbites et l'inversion de modèles de champ de gravité (Reigber *et al.*, 2002) et pour la mise en œuvre de méthodes nouvelles (dynamique-réduite ou cinématique) permettant de restituer la trajectoire avec une précision accrue.

- Les GNSS devraient jouer un rôle essentiel dans le suivi des trajectoires des satellites des futurs projets de vol en formation (en orbite terrestre).

- Si, à présent, l'antenne GNSS n'est plus dirigée vers le zénith local du satellite mais selon sa vitesse, le récepteur reçoit des signaux rasants dont l'analyse permet d'observer certains paramètres de atmosphère. Cette technique de « sondage au limbe » gagnera en performance avec la multiplication du nombre de satellites GNSS en orbite et donc de profils de mesure.

5. L'altimétrie par réflexion des signaux GNSS

Si, au lieu d'orienter l'antenne d'un récepteur GNSS dans la direction zénithale, on l'incline de 45 degrés en direction d'une étendue d'eau, des signaux émis par les satellites et réfléchis à la surface de l'eau vont atteindre le récepteur. La mesure du délai de réception entre le signal direct et le signal réfléchi permet de faire une mesure altimétrique des mers, lacs et rivières avec une précision de quelques centimètres. De plus, les points de réflexion où s'effectue la mesure sont distribués autour du récepteur dans un rayon de plusieurs kilomètres, si le récepteur est placé en hauteur. Ils permettent ainsi d'accéder à une mesure altimétrique côtière permanente, par tout temps, en complément des techniques traditionnelles (Cardellach *et al.*, 2003 ; Helm *et al.*, 2005). D'autre part, l'analyse de la distribution du signal reçu renseigne sur l'état de surface de la mer et peut donc contribuer à la mesure des vents. Enfin, la sensibilité des signaux électromagnétiques GNSS aux propriétés diélectriques de la surface réfléchissante pourrait permettre de caractériser certaines de ses propriétés comme la salinité.

Cette technique est très prometteuse et devrait gagner sensiblement en précision grâce à l'augmentation de puissance des futurs signaux GNSS.

6. Le transfert de temps

Le concept de transfert de temps par GNSS est fondé sur l'idée qu'un réseau d'au moins deux récepteurs dont la position est parfaitement connue, observent aux mêmes instants les mêmes satellites. Cette méthode dite de «common view» permet, par exemple, de définir et de disséminer un temps de référence avec une précision de quelques nanosecondes (Defraigne & Bruyninx, 2002). C'est de cette façon qu'une quarantaine de laboratoires de temps dans le monde contribuent à la réalisation du Temps Atomique International (TAI) par le Bureau International des Poids et Mesures. Cette technique est aussi mise en œuvre pour réaliser et maintenir les échelles de temps des différents GNSS.

7. L'International GNSS Service (IGS)

L'International Association of Geodesy a créé en 1995 l'IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov/>) dans le but de fédérer les acteurs des géosciences autour de la thématique des GNSS. Aujourd'hui, plus de 200 agences dans le monde contribuent au succès de ce service qui délivre librement les données d'un réseau mondial de plus de 330 stations permanentes, ainsi que les éphémérides prédites, rapides et précises (5 cm) des satellites GPS, GLONASS, et bientôt Galileo. L'ensemble de la communauté des géosciences, unie dans une volonté de tirer la plus grande précision des mesures des GNSS, a fait bénéficier l'ensemble des utilisateurs de nombreux progrès en proposant des algorithmes et des logiciels de traitement, en définissant des formats standard d'échange (RINEX, SP3...), et en organisant des groupes de travail, des forums de discussions, etc. L'IGS contribue de façon considérable à la promotion des GNSS et ses services sont incontournables pour de très nombreux utilisateurs. L'arrivée de Galileo est attendue avec impatience.

V. SYNTHÈSE

Les facteurs qui concourent au développement exponentiel du champ des applications et des services des GNSS sont :

- la modernisation de GPS, la revitalisation de GLONASS et le développement de leurs systèmes d'augmentation qui poursuivent les 10 années d'efforts de pérennisation et d'amélioration des performances ;
- le développement de Galileo dont la disponibilité et l'intégrité des signaux peuvent être engagés contractuellement ;
- l'interopérabilité et la compatibilité de ces systèmes entre eux dont l'hybridation devient « transparente » et gage d'un service amélioré pour les utilisateurs ;
- l'étendue du spectre des précisions du positionnement

GNSS de 10 m à quelques millimètres, selon le mode de mise en œuvre ;

- leurs capacités d'intégration et d'hybridation à d'autres technologies.

Les services de la mobilité personnelle devraient à terme représenter à eux seuls plus de 75% du marché grâce à leur implantation quasi systématique dans les téléphones portables, les PDA et les véhicules personnels. Pour de nombreux secteurs d'activités relevant des pouvoirs publics (transport, sécurité) ou de certains métiers (géomètre, topographe, cartographe, géomaticien) les capacités des GNSS représentent une réelle rupture technologique. Les GNSS ont aussi un réel potentiel encore sous exploité pour la préservation de notre environnement, la prévention des risques naturels et le développement durable. Enfin l'impact des GNSS dans le domaine de la recherche scientifique et technologique ne cesse de croître dans les disciplines des géosciences, du transfert de temps, de l'altimétrie par signaux réfléchis ou dans le cadre d'une spatialisation de récepteurs pour la trajectographie des lanceurs, l'autonomie des satellites ou le sondage au limbe par exemple.

La décennie en cours marque donc l'arrivée irrésistible et irréversible des GNSS dans la société en les rendant accessibles à tous et indispensables à de nombreuses classes d'utilisateurs.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie chaleureusement Dominique Zobler (CNES) et Marie-Noëlle Garcia (MNG Conseil) pour la pertinence de leurs commentaires.

BIBLIOGRAPHIE

- ARTRU J., LOGNONNÉ P. & BLANC E., 2001. Normal modes modeling of post-seismic ionospheric oscillations. *Geophysical Research Letters*, 28, p. 697.
- BASTIN S., CHAMPOLLION C., BOCK O., DROBINSKI P. & MASSON F., 2005. Diurnal cycle of water vapor as documented by a dense GPS network in a coastal area during ESCOMPTE-IOP2. *Journal of Applied Meteorology* (article soumis et en revision).
- BEVIS M., SCHERER W. & MERRIFIELD M., 2002. Technical issues and recommendations related to the installation of continuous GPS stations at tide gauges. *Marine Geodesy*, 25, pp. 87-99.
- CARDELLACH E., TREUHAFT R.N., CHAO Y., LOWE S.T., YOUNG L.E. & ZUFFADA C., 2003. Coastal GPS altimetry for Eddy monitoring. *Geophysical Research Abstracts*, 5, p. 13820.
- CAZENAVE A. & FEIGL K., 1994. *Formes et mouvements de la Terre : satellites et géodésie*, CNRS Éditions, Belin, Paris.
- CHADWELL C.D. & BOCK Y., 2001. Direct estimation of absolute precipitable water in oceanic regions by

- GPS tracking of a coastal buoy. *Geophysical Research Letters*, 28 (19), pp. 3701-3704.
- DEFRAIGNE P. & BRUYNINX C., 2002. Time transfert with geodetic GPS receivers. Actes des *Journées Systèmes de Référence 2001* (<http://www.gps.oma.be/publications/2003/jsr2001.pdf>).
- DUAN J., BEVIS M., FANG P., BOCK Y., CHISWELL S., BUSINGER S., ROCKEN C., SOLHEIM F., VAN HOVE T., WARE R., MCCLUSKY S., HERRING T.A. & KING R.W., 1996. GPS Meteorology : Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water. *Journal of applied Meteorology*, 35, p. 830.
- DUCIC V., ARTRU J., & LOGNONNÉ P., 2003a. Ionospheric remote sensing of the Denali Earthquake Rayleigh surface waves. *Geophysical Research Letters*, 30 (18), p. 1951.
- DUCIC V., LOGNONNÉ P., MURAKAMI M., KLAPISZ C., 2003b. Tomography of the troposphere using dense GPS networks. Proceedings of *International Union of Geodesy and Geophysics 2003, Sapporo* (<http://ganymede.ipgp.jussieu.fr/dgsp/Ducic.IUGG-poster-troposphere.pdf>)
- 2003. *Galileo un enjeu stratégique scientifique et technique*. Académie de marine, Bureau des longitudes, Académie nationale de l'air et de l'espace Éd.
- HELM A., BEYERLE G., REIGBER C. & ROTHACHER M., 2005. *Remote monitoring of ocean heights in coastal areas by ground-based observations of reflected GPS signals*, Vienna, EGU, Session G5.
- LAMY A., CHARMEAU M.C., LAURICHESSE D., GRONDIN M. & BERTRAND R., 2004. Experiment of autonomous orbit control on the DEMETER satellite. Proceedings of the *18th International Symposium on Space Flight Dynamics*, Munich, Germany, 11-15 October.
- MAZANY R.A., BUSINGER S., GUTMAN S.I. & ROEDER W., 2002. A Lightning Prediction Index that Utilizes GPS Integrated Precipitable Water Vapor. *Weather and forecasting*, 17, p. 1034.
- NEILAN R., VAN SCOVY P.A. & WOODWORTH P.L. (Eds), 1998. *Proceedings of the Workshop on methods for monitoring sea level : GPS and tide gauge benchmark monitoring, GPS altimeter calibration*. Workshop organised by the IGS and PSMSL, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 17-18 March 1997.
- NEILAN R., 2004. *International GNSS Service Electronic, IGS Mail #4960*.
- REIGBER C., BALMINO G., SCHWINTZER P., BIANCALER R., BODE A., LEMOINE J.M., KOENIG R., LOYER S., NEUMAYER H., MARTY J.C, BARTHELMES F. & PEROSANZ F., 2002. New global gravity field models from selected CHAMP data sets, Proceedings of the *First CHAMP Science Meeting*, Potsdam, Springer-Verlag.
- SLATER J., 2005. *International GNSS Service, IGS Electronic Mail #5209*.
- VAN BAELEN J., AUBAGNAC J.-P. & DABAS A., 2005. Comparison of near real-time estimates of integrated water vapor derived with GPS, radiosondes, and microwave radiometer, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(2), pp. 201-210.
- VIAU A.A., DEBORD M., OGER R., TYCHON B., CHAUCHARD A. & DANET V., 2005. Geotraccia- bility: an innovative concept for the qualification of crop production. Peer reviewing Final Project Report (GTA), IST-2001-34281 (http://www.geotracciaagri.net/doc/GeoTraceAgri_Finalreport_EN.pdf).

Adresse de l'auteur :

Félix PEROSANZ
 CNES/CRGS
 18, Avenue Édouard Belin
 F-31401 Toulouse, Cedex 9
 France
 Felix.Perosanz@cnes.fr

