

# Le positionnement en intérieur

■ Nel SAMAMA

*Avec l'essor du nomadisme et de la mobilité, un besoin fort en localisation émerge. Ce dernier apparaît comme primordial dans le développement des télécommunications et de la mobilité, comme en témoignent par exemple les efforts américains liés à la localisation des appels d'urgence passés par le 911. L'Europe met également en place un tel système par le 112, qui nécessite des développements, en particulier en localisation en zones de non-couverture des systèmes de navigation par satellites (Global Navigation Satellite Systems – GNSS – comme le GPS américain ou le système russe GLONASS). Ce dernier point fait l'objet d'une thématique spécifique dans le programme de la future constellation européenne GALILEO. La définition d'un moyen "universel" de localisation intégrable aux systèmes actuels de "communication mobile" constitue ainsi le défi des prochaines années. Les diverses techniques proposées actuellement présentent toutes des limitations importantes, en termes de couverture ou de précision.*

**P**renons par exemple le cas de la fonction "navigation", permettant de fournir la capacité à proposer une application de guidage, et comparons deux techniques de localisation parmi les plus employées : l'identification de cellule (Cell-Id) dans le cas des réseaux de téléphonie mobile et la triangulation dans le cas des GNSS. Le tableau 1 résume la situation.

Il apparaît que la fonction en question n'est en fait réalisable avec aucune des deux techniques, pour des raisons différentes. Cela est effectivement le cas si l'on cherche à fournir un "service" de guidage à un piéton. Dans le cas de l'auto-

Technique de localisation	Cell-Id	GNSS
Intérieur	OUI	NON
Extérieur	OUI	OUI
Fonction Navigation	NON	OUI
Continuité de service	NON	NON

**Tableau 1 :** Cas particulier de la fonction "navigation".

mobile, les contraintes de fonctionnement sont plus restrictives (milieu extérieur principalement, pas de problème d'énergie, attitude constante du terminal – le véhicule –, etc.), menant à un fonctionnement globalement satisfaisant avec une technique GNSS (tout de même "augmentée" par la possibilité de coupler le positionnement avec des capteurs inertiels et une cartographie routière). Il apparaît ainsi que la localisation, brique élémentaire pour toutes les applications liées à la navigation, aux services géolocalisés ou réclamant l'utilisation de la donnée de position, devrait en fait :

- Être disponible dans des environnements très variés (zones rurales, zones urbaines, intérieur, etc.).
- Fournir une précision qui dépend assurément du contexte et de l'application envisagée.
- Permettre la gestion de la "continuité de service".

Les spécifications de cette localisation sont ainsi très différentes suivant les applications. De plus, aucune technique, dans l'état actuel des développements, ne permet réellement de couvrir de façon satisfaisante un ensemble large de besoins. Pour illustrer cette complexité sous-jacente, les tableaux 2 et 3 sont une première approche de classement, par grands domaines d'applications (tableau 2) et par lieux de mise en œuvre (tableau 3).

Ces tableaux reflètent la diversité des situations potentielles ainsi que l'étendue des besoins techniques. Il est également important de comprendre que ceci n'est en réalité qu'une petite partie de la diversité réelle. Prenons par exemple le cas des aéroports : suivant que la localisation s'adresse aux responsables de la gestion quotidienne du lieu (avions, véhicules d'intervention, logistique, personnels...) ou aux usagers en déplacement dans l'aérogare, les besoins sont fondamentalement différents en termes de cou-

DOMAINES	PRECISION	INTERIEUR	EXTERIEUR
Assistance	≈ 100 m	Pas obligatoire	Indispensable
Confort	< 100 m	Pas obligatoire	Utile
Déplacements	1 m à 100 m	Utile	Indispensable
Jeux	1 m à 100 m	Pas obligatoire	Utile
Santé	1 m à 100 m	Important	Important
Services	1 m à 100 m	Utile	Indispensable
Tourisme	1 m à 100 m	Utile	Utile
Transports	1 m à 10 m	Important	Indispensable
Urgences	1 m	Indispensable	Indispensable

**Tableau 2 :** Premier classement par "domaines".

LIEUX	PRECISION	INTERIEUR	EXTERIEUR
Aéroport Gare	environ 10 m	Indispensable	Indispensable
Campagne Montagne	< 100 m	Pas obligatoire	Utile
Centre Commercial	< quelques m	Indispensable	Pas obligatoire
Centre de Conférence	< quelques m	Indispensable	Pas obligatoire
Entrepôt	environ 1 m	Indispensable	Utile
Mer / Port	1 m à 100 m	Indispensable	Indispensable
Musée	< quelques m	Utile	Indispensable
Parc d'attraction	environ 10 m	Utile	Utile
Route	environ 10 m	Utile	Indispensable
Rue	environ 10 m	Utile	Indispensable
Zone de stockage	< 10 m	Pas obligatoire	Indispensable

**Tableau 3 : Premier classement par "lieux de déploiement"**

verture, de milieux de fonctionnement, de précision, de disponibilité, de garantie de fonctionnement, etc. Il est en fait possible de dresser de telles différences sur pratiquement toutes les lignes des tableaux précédents. Ceci constitue sans doute l'une des raisons de l'étrécissement actuel des services proposés : cette remarque est en particulier applicable au grand public.

## Les applications de la localisation

Faisant suite à ce constat, il est tout de même important de faire un point sur l'ensemble des applications et domaines dans lesquels les systèmes de localisation sont la source d'améliorations, d'optimisation ou encore d'usages nouveaux. Bien que des systèmes spécifiques existent depuis de nombreuses années, c'est avec le système GPS américain, ayant une couverture mondiale et également spatiale, que les applications se sont développées. Ce système, gratuit d'utilisation (pour la partie permettant un positionnement typique à quelques mètres dans des conditions de réception des signaux satisfaisantes), a été historiquement développé pour des besoins militaires, dans les domaines maritimes, aériens et terrestres. Ce dernier cas est toutefois plus contraignant pour la réception des signaux, surtout s'il s'agit de détecter ceux-ci dans une zone urbaine où les bâtiments sont autant de masques potentiels des signaux (de très faible puissance).

Les premières applications civiles ont donc été naturellement orientées vers le domaine maritime, puis le monde des transports de façon plus large, qui constitue selon les prévisions l'un des deux grands secteurs des futurs revenus liés à la localisation, avec les télécommunications. Les applications couramment citées sont résumées par domaine ci-après.

### Les transports routiers :

- la navigation routière,
- la gestion du trafic,

- la gestion de flottes de véhicules,
- le guidage de véhicules d'urgence et de secours,
- l'optimisation des transports publics,
- le développement des "ITS" (systèmes de transport intelligents),
- le péage "à la carte", etc.

### Les transports ferroviaires :

- le contrôle des trains et la gestion du trafic,
- le suivi des marchandises,
- l'information aux passagers,
- l'optimisation de l'énergie utilisée,
- l'entretien des voies, etc.

### Les transports aériens :

- la gestion du trafic aérien,
- la simplification de certaines phases de vol, etc.

Les services "géolocalisés", ou "Location Based Services" (LBS) représentent le deuxième grand débouché. Ces services sont à la convergence de trois mondes : les télécommunications, la localisation et les contenus. Les progrès réalisés ces dernières années dans ces trois disciplines sont considérables et permettent d'envisager ces services à moyen terme. Ils se proposent, entre autres, de fournir :

- des services d'information et de navigation,
- des services d'assistance d'urgence (E 112),
- un suivi de biens ou de personnes,
- une optimisation des réseaux.

Bien sûr, d'autres domaines sont également concernés par l'essor de systèmes de positionnement, comme par exemple l'énergie, les travaux publics, la protection civile, la finance, les assurances, une référence de temps (apport très significatif des GNSS dans ce secteur), l'agriculture, la pêche, l'environnement, les loisirs, etc.

La tendance actuelle est orientée vers des systèmes mobiles, capables de détecter et de s'immerger dans leur environnement de façon transparente à l'utilisateur afin d'optimiser les ressources en particulier. Il est très probable que la connaissance, d'une façon ou d'une autre, de la position absolue ou relative, contextuelle et géoréférencée des personnes et des biens est un atout important dans le développement des systèmes futurs. En ce sens, la dynamique engendrée par le programme GALILEO est bénéfique.

## Les techniques et technologies disponibles

La communauté scientifique et industrielle semble considérer qu'il est tout à fait important de fournir une continuité à la fonction de localisation, en fonction des divers environnements susceptibles d'être rencontrés par les personnes ou les biens, et a développé quelques techniques pour y parvenir. Il est possible de citer par exemple :

- Les réseaux de capteurs.
- Les réseaux locaux sans fil (WLAN).
- Les réseaux mobiles de télécommunications (GSM, UMTS).
- Les constellations de satellites de navigation, comme le GPS ou le futur Galileo.

- Les systèmes additionnels, de type capteurs inertiels.

Les réseaux de capteurs sont clairement une approche dont les performances peuvent être excellentes mais pour lesquels l'infrastructure représente une très forte contrainte : la mise en œuvre de ces derniers est du domaine des applications de "niches". Les techniques employées sont nombreuses : ultrasons, infrarouge, capteurs de pressions ou encore étiquettes électroniques.

L'idée répandue consiste à considérer que les techniques utilisant les réseaux de télécommunication mobiles (GSM ou UMTS), ou locaux (Bluetooth, Wi-Fi ou Ultra Wide Band UWB), sont à classer dans la catégorie des systèmes "sans infrastructure" puisque cette dernière est déployée par ailleurs, pour des besoins sans lien avec la localisation. Ceci est partiellement inexact compte tenu du fait qu'il est en général nécessaire de mettre en œuvre des moyens spécifiques à la localisation (sauf, il est vrai, pour l'identification de la cellule, le "Cell-Id", qui n'est cependant pas satisfaisant en termes de précision). Ces réseaux ne permettent pas d'obtenir de bonnes précisions sans un déploiement très important et ne constituent finalement pas une alternative de qualité suffisante.

Le positionnement en milieux difficiles, et en intérieur en particulier, constitue une limitation actuelle forte des systèmes de localisation globaux de type GNSS. De nombreuses solutions tendent à voir le jour, poussées par les industriels du secteur, comme par exemple l'Assisted-GNSS (A-GPS) ou encore les HSGNSS (pour "High Sensitivity GNSS").

Les améliorations en termes de capacité à fournir une position dans des environnements auparavant non couverts par les satellites sont réelles. Cependant, il apparaît aujourd'hui de nouvelles limitations : la limite de détection n'est toujours pas suffisante pour permettre le "deep indoor" (le positionnement en intérieur profond), la précision obtenue est dégradée par rapport à l'extérieur, alors qu'il faudrait l'améliorer légèrement, et enfin le temps nécessaire à l'obtention d'une position est parfois de plusieurs secondes. Ces solutions, développées dans le domaine des systèmes de navigation par satellites, ne réclament pas d'avoir recours à une infrastructure : cependant, ici encore, ces approches ne semblent pas permettre une continuité de la fonction de localisation dans des conditions satisfaisantes. Le constat est ainsi le suivant : une solution sans infrastructure spécifique, idéale dans l'absolu, n'a pas encore pu être mise en œuvre dans de bonnes conditions, malgré les efforts importants menés par les industriels des télécommunications et de la navigation.

Les systèmes inertiels sont eux aussi à classer dans la catégorie des "sans infrastructure" : le terminal mobile est alors complexe et les modélisations nécessaires au bon fonctionnement non triviales. Cette solution semble viable pour des applications de niches (malvoyants par exemple), compte tenu du coût élevé du terminal et des très bonnes performances possibles. Une classification grossière des différents systèmes de localisation (voir tableau 4) permet de mieux comprendre les choix actuels dans le domaine de la continuité de la fonction de localisation.

	Pos	Préc	Disp	Infra	Ter	S
<b>Réseaux de capteurs</b>	R	+++	++	---	+	+3
<b>WLAN</b>	A	+	++	--	+	+2
<b>Réseaux mobiles</b>	A	--	+	++	+	+2
	A	-	+	++	+	+3
<b>Navigation par satellites</b>	A	++	+	++	++	+7
<b>Systèmes inertiels</b>	R	+	++	+++	-	+5
	R	+	+++	+++	-	+6

**Tableau 4 : Classification grossière des techniques.**

Chaque système du tableau est caractérisé par 2 lignes : la ligne supérieure caractérise le positionnement en intérieur alors que la ligne inférieure caractérise le positionnement en extérieur.

Les diverses colonnes permettent de classer les technologies en termes de :

- Pos : type de positionnement (R pour relatif, A pour absolu)
- Préc : la précision de positionnement
- Disp : la disponibilité des signaux
- Infra : la complexité de l'infrastructure nécessaire
- Ter : la complexité du terminal mobile

Ce tableau permet d'apprécier les performances respectives des solutions potentielles. Les approches actuelles cherchant à permettre une localisation en tous lieux sont de deux natures.

- Celles qui visent à rendre interoperables plusieurs systèmes afin d'y parvenir : par exemple GPS et WLAN ou encore GPS et systèmes inertiels, comme pour le PNS ("Pedestrian Navigation System" de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne).
- Celles qui tentent d'améliorer une technologie afin de la rendre plus versatile : GSM / UMTS ou GNSS avec des récepteurs de haute sensibilité.

L'avantage de l'utilisation d'un récepteur de navigation par satellites pour réaliser la fonction de localisation en zone de non-ouverture des signaux GNSS réside dans le fait qu'il est alors possible de parler de système de positionnement "universel", fonctionnant dans tous les environnements et n'utilisant qu'un seul moyen technique. Ces approches sont une alternative à tout ce qui vient d'être présenté et qui consiste à imaginer une infrastructure, la plus légère possible, qui permettrait à un récepteur GNSS de fournir une position, par exemple en intérieur. Deux approches sont décrites dans la littérature scientifique : les pseudolites (pour "pseudo-satellites") et les "répéteurs" GNSS.

En conclusion, dressons un nouveau tableau (tableau 5), regroupant les performances des diverses techniques et technologies possibles (non exhaustif). Il serait encore possible d'éclater ce tableau en sous-catégories afin de montrer qu'il est indispensable de faire le parallèle avec d'autres paramètres fondamentaux comme la couverture ou les complexités respectives (et les coûts) des infrastructures, à déployer ou à développer, et des terminaux.

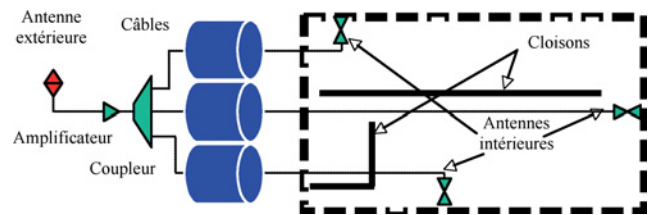
TECHNIQUES	INTERIEUR	EXTERIEUR
Réseaux de Capteurs	1 cm à 5 m	<b>Non Adapté</b>
RF ID	< 1 m	< 1 m
WLAN	quelques m	Non Adapté
UWB	environ 10 cm	Non Adapté
Cell-Id	500 m à 10 km	100 m à 10 km
E-OTD (2G) TDOA (3G)	> 200 m	< 100 m
GNSS	Non Disponible	environ 5 m ↘
A-GNSS	10 m ↔ Non Disponible	environ 5 m ↘
Pseudolites	environ 10 cm	environ 5 m ↘
Répéteurs	environ 1 à 2 m	environ 5 m ↘
Inertiel	< 1 m (si recalage)	< 1 m (si recalage)

**Tableau 5 : Premier classement par “techniques”.**

## Les techniques GNSS en intérieur à base de répéteurs

Le principe de base d'un répéteur est de rendre les signaux GPS disponibles à l'intérieur par le biais d'une amplification de ces derniers. En effet, la principale constatation sur le non-fonctionnement d'un récepteur GPS en intérieur repose sur le très faible niveau des signaux, rendant la détection très délicate. La solution décrite dans ce document utilise des répéteurs qui transmettent l'ensemble des signaux reçus sur une antenne extérieure, où la réception est de très bonne qualité (sur le toit du bâtiment par exemple), vers l'intérieur. Le schéma de principe du système déployé est exposé figure 1 (sans la machine à cycler).

Il apparaît assez clairement que l'utilisation de répéteurs conduit à une difficulté lorsqu'il faut résoudre les équations de navigation avec un récepteur actuel. En effet, le chemin de propagation est artificiellement “courbé” lors de son passage dans le répéteur. Ainsi, les temps de propagation réellement mesurés par le récepteur, fournissant les pseudo-distances, ne donnent pas la distance euclidienne séparant les satellites du récepteur intérieur, mais en fait une somme de distances : celle séparant le satellite de l'antenne de réception sur le toit du bâtiment, plus celle correspondant à la propagation entre l'antenne de retransmission en intérieur et l'antenne du récepteur intérieur. A ceci, il convient de plus d'ajouter les délais électroniques dus au système déployé (amplificateurs, coupleurs, etc.). Il est ainsi nécessaire, pour déterminer une position en intérieur, de définir une architecture matérielle du système ainsi que des algorithmes de traitement des signaux reçus afin de prendre en compte la présence des répéteurs. Notre approche technique se porte sur les données brutes, et en particulier sur les pseudo-distances : le raisonnement suivi est exposé dans la suite de ce document.



**Figure 1. Schéma de principe du système déployé.**

On récupère les signaux de l'antenne extérieure qui sont transmis par câble vers un appareil à cycler. L'appareil transmet, toujours par câble, ces signaux au répéteur 1 pendant un intervalle de temps  $\Delta t$  défini par l'expérimentateur. A la fin de ce temps, l'appareil à cycler cesse de transmettre les signaux au répéteur 1 et commence à transmettre au répéteur 2 pendant la même durée  $\Delta t$ . La même opération recommence avec le répéteur 3 puis à nouveau avec le répéteur 1 et on recommence, d'où l'expression de “cycle” qui a donc une durée de  $3\Delta t$  dans l'exemple considéré ici (qui permet un positionnement en deux dimensions). Il est bien sûr possible d'avoir davantage de répéteurs : en particulier, quatre sont nécessaires pour un positionnement en trois dimensions.

Lorsque le répéteur  $i$  émet, la distance entre le répéteur et la position à mesurer est  $d_i$ . Le récepteur GPS mesure les pseudo-distances des satellites, où une mesure de pseudo-distance dans ces conditions correspond à :

$$PR_{mesurée} = d_{Sat-AntExt} + c \times T_{Prop-Elec} + d_i + c \times \Delta t_u$$

Dans laquelle

- $d_{Sat-AntExt}$  représente la distance entre le satellite et l'antenne de réception extérieure,
- $T_{Prop-Elec}$  représente le temps de propagation dû au système électronique, en particulier les amplificateurs et câbles,
- $\Delta t_u$  représente classiquement le biais d'horloge.

Nous cherchons à extraire  $d_i$  de ces mesures, mais c'est assez délicat car nous n'avons aucun moyen de déterminer de façon précise les autres éléments de l'équation. C'est pourquoi nous cherchons plutôt à mesurer la variation de la distance  $d_i$  lorsque l'on change de répéteur, par exemple pour le passage du répéteur 1 au répéteur 2.

$$\begin{aligned} PR_{mesurée}(1) &= d_{Sat-AntExt} + c \times T_{Prop-Elec}(1) + d_1 + c \times \Delta t_u(t) \\ PR_{mesurée}(2) &= d_{Sat-AntExt} + c \times T_{Prop-Elec}(2) + d_2 + c \times \Delta t_u(t+\Delta t) \end{aligned}$$

La calibration de l'électronique apparaît ainsi clairement comme un élément important. Cependant, nous allons surtout faire des différences et toutes les valeurs communes à tous les répéteurs seront éliminées : subsistent les valeurs différentielles. Dans le cas présent, seuls les câbles et quelques amplificateurs sont différents d'un répéteur à l'autre. Le délai différentiel induit par les amplificateurs est ainsi tout à fait négligeable et les câbles sont identiques et ont une longueur de 100 mètres. La validité des résultats obtenus semble justifier cette hypothèse. Il est cependant évident que dans un cas réel de déploiement, ceci doit être pris en compte. En ne considérant donc aucun délai différentiel dans la structure, la différence conduit à :

$$PR_{mesurée}(2) - PR_{mesurée}(1) = d_2 - d_1 + c \times \Delta t_u(t+\Delta t) - c \times \Delta t_u(t)$$



Comme de plus  $d_2 = d_1 + \Delta 12$ , il vient :

$$PR_{\text{mesurée}}(2) - PR_{\text{mesurée}}(1) = \Delta 12 + c \times \Delta t_u(t + \Delta t) - c \times \Delta t_u(t)$$

Théoriquement on devrait pouvoir accéder de cette façon à  $\Delta 12$ , mais en pratique on préfère utiliser les variations de la mesure de pseudo-distance et repérer ensuite lors du passage d'un répéteur au suivant la variation de cette variation (qui correspond donc à une accélération). Cette méthode a plusieurs avantages dont celui de pouvoir négliger la variation du biais d'horloge, source importante d'imprécision, en jouant sur la fréquence de mesures. Si l'intervalle de temps séparant deux mesures successives est suffisamment faible, la variation du biais d'horloge, c'est-à-dire la dérive du biais d'horloge, peut être considérée comme constante sur une faible durée. Soit  $\Delta t_m$  le temps entre deux mesures et si on suppose que la mesure 1 est faite à l'instant  $t_t$  juste avant la transition de  $i$  vers  $j$  et la mesure 2 juste après, il est possible d'écrire l'équation des variations de mesures de pseudo-distances comme suit :

$$\begin{aligned} \Delta(PR_{\text{mesurée}}(t_t + \Delta t_m) - PR_{\text{mesurée}}(t_t)) = \\ \Delta(\Delta_{ij}) + c \times \Delta(\Delta t_u(t_t + \Delta t_m)) - c \times \Delta(\Delta t_u(t_t)) \end{aligned}$$

Ceci peut également s'exprimer en termes d'accélération, comme suit :

$$\begin{aligned} \Delta(PR_{\text{mesurée}}(t_t + \Delta t_m) - PR_{\text{mesurée}}(t_t)) / \Delta t_m = \\ \Delta(\Delta_{ij}) / \Delta t_m + c \times (\Delta(\Delta t_u(t_t + \Delta t_m)) - \Delta(\Delta t_u(t_t))) / \Delta t_m \end{aligned}$$

Si  $\Delta t_m$  est assez petit, on peut négliger l'accélération du biais d'horloge qui est naturellement faible. Sans forcément diminuer  $\Delta t_m$  à l'extrême, ce qui peut poser certains problèmes de bruit de mesure et se trouver limité par les performances du récepteur, on peut déjà extraire l'accélération à la transition " $\Delta(\Delta_{ij}) / \Delta t_m$ " et ensuite remonter par intégration (qui se résume ici à une multiplication) à  $\Delta_{ij}$  que nous cherchons. En résumé, nous observons ainsi les variations de pseudo-distances entre deux instants successifs de mesure relativement proches (dans les exemples suivants nous retiendrons 200 ms, ce qui correspond à un taux de mesures brutes de 5Hz), ces instants étant précisément ceux correspondant à la transition d'émission entre deux répéteurs.

Avec deux mesures de ce type, on est alors capable de calculer une position en 2 dimensions (en utilisant par exemple l'algorithme des moindres carrés classique utilisé par le GPS). Trois répéteurs sont nécessaires pour obtenir deux valeurs de transitions, quatre seraient nécessaires pour obtenir trois transitions afin de calculer une position en trois dimensions. On peut voir ci-dessous une courbe typique (figure 2). Le dispositif de cyclage était réglé sur  $\Delta t = 10$  secondes, soit un cycle complet de 30 secondes. On observe bien le cycle se répétant toutes les 30 secondes avec des variations brutales toutes les 10 secondes correspondant aux moments des transitions. Les variations sont positives ou négatives selon que la distance augmente ou diminue d'un répéteur au suivant. La fréquence de mesure est de 5 Hz soit  $\Delta t_m = 0,2$  s, valeur typique de travail. C'est pourquoi la variation de pseudo-distance visible en ordonnée est exprimée en 1/5 m/s, il faut multiplier par 5 pour retrouver la vitesse de variation de la pseudo-distance.

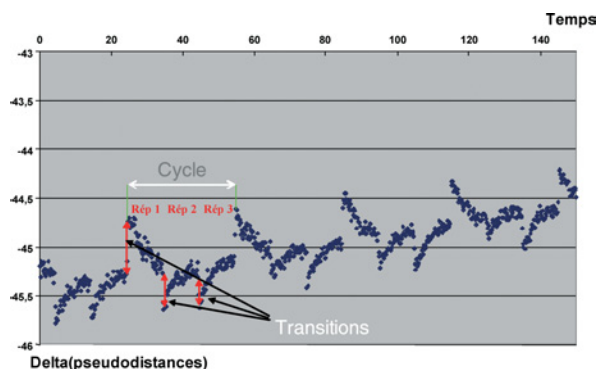


Figure 2. Courbe de résultats bruts typique.

Rappelons que nous nous intéressons pour le moment à un récepteur autonome L1 utilisant le code C/A, et que la précision de positionnement visée est de quelques mètres. Si possible, les milieux intérieurs étant de taille plus restreinte que l'extérieur, nous tenterons de faire un peu mieux : l'objectif avoué se situe ainsi dans la gamme des 1 à 3 mètres.

## Les performances de positionnement obtenus

Dans un premier temps, les trois répéteurs sont placés dans la même salle de réunion : la précision obtenue est de très bonne qualité, dans la gamme escomptée de 1 à 2 mètres. Les points calculés sont obtenus pour un ensemble de 9 cycles consécutifs (dans le cas présent représentant 9x10 secondes d'enregistrement), et pour une moyenne sur 6 satellites. Il est à noter qu'aucun choix n'est pour le moment fait sur les satellites ou les cycles : les premiers qui sont disponibles dans le fichier de résultats sont retenus. En général, de 8 à 11 satellites sont disponibles pour faire le calcul de position. Ces résultats sont intéressants lorsque l'on garde en mémoire la simplicité de déploiement de l'infrastructure ainsi que celle de traitements réalisés par le récepteur.

La question suivante est de connaître l'effet de la traversée d'une cloison sur les résultats ci-dessus. En effet, il est possible de considérer que seuls quelques trajets multiples sont susceptibles de provoquer des troubles dans les mesures dans un environnement similaire à celui d'une grande salle. Nous avons décidé d'avancer pas à pas, et ainsi de ne déplacer que le répéteur 1 et de le positionner dans la pièce adjacente (elle aussi de très grande dimension). Aucune différence notable n'est observable, excepté pour un point proche du répéteur 3 pour lequel la précision se dégrade à environ 1,2 mètre. Dans tous les cas, ceci montre encore une fois d'excellentes valeurs de précision, sachant que nous parlons ici de précision réelle, c'est-à-dire entre le point calculé et le vrai point de mesure. Il est à noter que des structures métalliques incorporées dans les murs de séparation entre les deux salles de réunion sont présentes, qu'il s'agisse de gaines techniques, de plinthes métalliques ou encore de descentes de câbles électriques (l'alimentation principale arrive par les faux plafonds et les prises sont implantées "normalement", au sol).

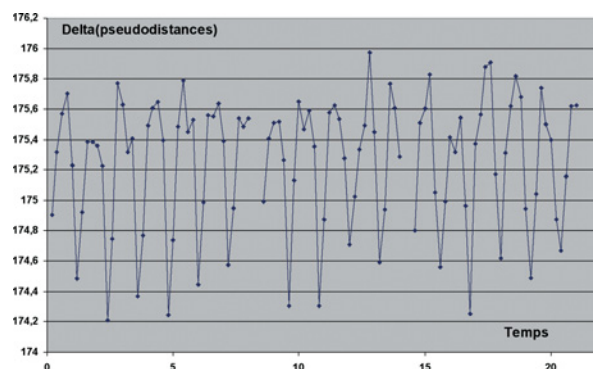
Afin de pousser plus avant les données expérimentales, nous avons alors décidé de faire quelques tests à l'étage inférieur.

Seuls trois points ont été réalisés afin de conserver le même jeu qu'à l'étage supérieur (les autres points se trouvent dans les murs). La légère mais notable dégradation de la précision, est principalement due au caractère plus bruité des courbes montrant les transitions (et de fait une détermination des transitions de moins bonne qualité). Il est intéressant de remarquer qu'en général, lorsque l'on descend d'un étage, les distances ne s'accroissent pas (au contraire), mais les structures à traverser, pour les ondes radio, sont sensiblement plus consistantes. Il s'agit en effet de chapes, souvent en béton armé dans des bâtiments collectifs, et sur lesquelles un ensemble de servitudes est déployé: rails techniques de passage de câbles, faux plafonds, éclairages de tous types, etc. Nous n'avons pas mené de mesures spécifiques sur les multi-trajets, et il est bien évident que de telles perturbations existent. Force est de constater que les résultats ne traduisent pas un impact rédhibitoire pour la méthode employée. Précisons également que pour les raisons de rebouclage potentiel déjà évoquées dans ce document, nous n'avons pas modifié la puissance du signal émis, qui demeure à environ -60dBm.

Il y a un point qui n'a pas encore été abordé, et qui est tout à fait primordial dans le cadre d'un système réel: le temps nécessaire au cyclage afin de calculer une position. La très grande majorité des expériences a été menée avec un temps passé sur chaque répéteur de 10 secondes, ce qui implique un rafraîchissement de la position toutes les 30 secondes. Bien évidemment, le fait de rester statique durant près de 30 secondes pour permettre au récepteur de faire un point est tout à fait irréaliste dans un cas réel. De plus, la notion de continuité de service de localisation, un des objectifs de nos travaux, s'en trouverait alors fort mise à mal.

Les quelques expériences réalisées dans la suite ont eu pour but de définir le comportement des répéteurs et du récepteur lorsque ce temps de cyclage était progressivement réduit à 5, puis 2, puis 1 et enfin 0,4 seconde. Il faut relier ce dernier temps de 400 ms au taux de fonctionnement du récepteur, qui est ici de 5 Hz: cela signifie que le récepteur fait 2 points pour chaque répéteur (le cyclage est en effet alors à 2,5Hz). Bien que les meilleurs résultats aient été réalisés avec un temps de 2 secondes sur chaque répéteur, ceci n'est ici encore pas significatif: nous restons dans le cercle de 1 mètre de rayon, avec le cyclage à 2,5 Hz également. Ces résultats sont là encore très encourageants par rapport aux approches proposées: il n'y a pas de difficulté majeure qui émerge de l'ensemble des travaux menés, même si le développement nécessaire est encore important. Cependant, si les résultats de positions finales sont très proches, les formes des courbes de pseudodistances diffèrent beaucoup en fonction du temps de cyclage. Pour illustrer ceci, la figure 3 ci-dessous montre une courbe typique obtenue dans le cadre d'un cyclage à 2,5 Hz.

Rappelons que le récepteur fait alors un maximum de 2 points par répéteur. On constate en effet que nous ne voyons plus apparaître les pics de façon aussi claire que pour des cyclages longs, bien qu'une observation fine de cette dernière courbe montre bien, si on groupe les points par deux, un fonctionne-



**Figure 3. Influence du temps de cyclage sur la courbe typique des données brutes.**

ment conforme aux attentes: un pic important vers le bas suivi d'un pic d'amplitude comparable vers le haut (première transition du répéteur 2 vers le répéteur 3 et deuxième du répéteur 3 vers le 1), puis enfin une variation quasi inexistante (le point est à peu près à égale distance des répéteurs 1 et 2). Faisons un commentaire sur la cohérence de l'approche à base de répéteurs, en fonction de ces résultats: le temps de cyclage atteint correspond à un rafraîchissement de la position à un taux de 1 Hz environ, c'est à dire comparable à ce qu'un récepteur en extérieur est capable de fournir actuellement. Mais surtout, dans l'optique de réaliser du positionnement dynamique, ce qui est clairement la prochaine étape, il faut mettre ce taux en relation avec la vitesse de déplacement du piéton, d'environ 1 m/s, ainsi qu'avec la précision de positionnement obtenu, typiquement d'un mètre. Cela concorde de façon très satisfaisante: 1 Hz, 1 m/s et 1 m de précision!

Les méthodes de calcul de position à partir des valeurs des transitions est tout à fait similaire à ce qui se passe dans un récepteur GPS actuel. Nous avons mis en œuvre la méthode classique de linéarisation des équations de navigation. D'autres méthodes permettraient cependant d'améliorer la méthode, en particulier pour le calcul en 3-D. Notons enfin que ce dernier calcul en 3-D, nécessitant la mise en œuvre de quatre répéteurs, fourni également une précision de l'ordre d'un mètre tant en horizontal qu'en vertical. Pour atteindre ce résultat, en particulier pour la composante verticale, il est nécessaire d'avoir recours à un déploiement optimisant les valeurs de Dilution de Précision (DOP) horizontale et verticale. Pour cette dernière, il est ainsi utile de positionner un répéteur sous le récepteur, en particulier à l'étage inférieur lorsque cela est possible. Notons que ceci n'est pas possible dans le cas de la constellation GPS en extérieur, pour laquelle l'ensemble des satellites visibles se trouvent au dessus de l'horizon (pour un récepteur placé sur terre), ce qui limite la DOP verticale.

## Perspectives avec les futurs signaux GNSS modernisés (GPS et GLONASS)

Dans ce chapitre, nous allons décrire la façon d'utiliser les capacités multi-fréquences des constellations actuelles (ou disponibles dans un très proche futur, comme par exemple la

■ ■ ■ seconde fréquence civile L2C de GPS et GLONASS). Le cas de Galileo est traité dans le chapitre suivant.

Au lieu de conserver une unique fréquence L1, puis de procéder au cyclage déjà décrit, nous allons maintenant émettre sur chaque répéteur un signal différent. Ceci nous rapproche du mode de fonctionnement des "pseudolites", mais nous allons conserver l'originalité de l'approche à base de répéteurs en transmettant non pas le signal d'un satellite (ou d'un ensemble de satellites) sur un répéteur donné, mais l'ensemble des signaux reçus sur une fréquence donnée, pour une constellation donnée. Ceci peut ainsi être, par exemple, la combinaison de départ suivante (cas de l'utilisation des constellations GPS et GLONASS et de quatre répéteurs - voir figure 4) :

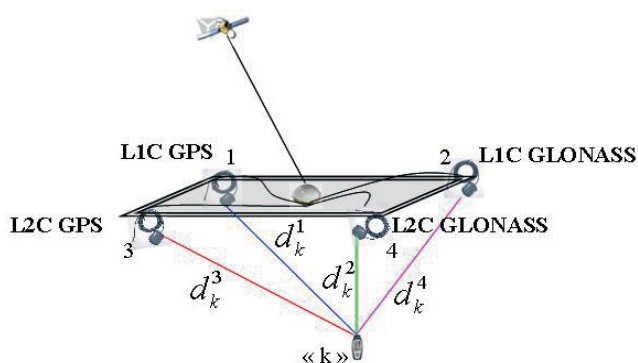
Répéteur n°1 : Signaux GPS-L1

Répéteur n°2 : Signaux GLONASS- L1

Répéteur n°3 : Signaux GPS- L2

Répéteur n°4 : Signaux GLONASS- L2

Avec deux mesures, on est alors capable de calculer une position en 2 dimensions (en utilisant par exemple l'algorithme de linéarisation classique utilisé par le GPS). Trois répéteurs sont nécessaires pour obtenir deux valeurs de transitions, quatre seraient nécessaires pour obtenir trois transitions afin de calculer une position en trois dimensions. Le schéma de principe du système déployé est exposé figure 4. Nous rappelons que l'objectif est de fournir une précision de positionnement typique identique à celle qu'il est possible d'obtenir aujourd'hui à l'extérieur, afin de permettre une gestion simplifiée de la continuité de la fonction "localisation". Nous faisons ici état de signaux de modernisation des constellations qui se proposent de fournir des fréquences "civiles" sur L2 également (L2C). Bien sûr, l'extrapolation à tous les types de signaux est possible, et en particulier à ceux qui seront disponibles de la constellation Galileo, comme nous allons le voir dans la suite. Il est important également de signaler que l'intérêt primordial du cyclage repose sur la minimisation des erreurs de pseudo distances. En effet, le fait d'utiliser le système sans prendre en compte le cyclage est tout à fait possible et entraîne alors des erreurs identiques à celles observables en extérieur sur des systèmes de réception autonomes. Le cyclage permet, comme cela est décrit dans la première partie de ce chapitre, de réali-



**Figure 4. Principe de la retransmission multi-porteuse indoor dans le cas de GPS et GLONASS.**

	t1	t2	t3	t4	t'1
Répéteur n°1	L1 GPS	L1 GLO	L2 GPS	L2 GLO	...
Répéteur n°2	L1 GLO	L2 GPS	L2 GLO	L1 GPS	...
Répéteur n°3	L2 GPS	L2 GLO	L1 GPS	L1 GLO	...
Répéteur n°4	L2 GLO	L1 GPS	L1 GLO	L2 GPS	...

**Tableau 5 : Exemple de cyclage multi constellation et multi fréquence.**

ser un calcul différentiel temporel, ce qui réduit les erreurs à des erreurs différentielles à très court terme (typiquement inférieur à la seconde). Le principe repose donc sur l'utilisation combinée de trois concepts : le multi-constellation, le multi-fréquence et le cyclage. Ces trois concepts peuvent être représentés schématiquement par l'intermédiaire du tableau 3 suivant, présentant un cyclage complet de quatre répéteurs (pour un positionnement en 3D), reprenant le cas d'exemple des signaux GPS et GLONASS sur L1 et L2.

Dans une telle configuration, il est alors possible d'obtenir les variations de distances, lors d'une transition d'un répéteur vers le suivant, des quatre répéteurs. Le calcul de position est ainsi possible à chaque transition. Afin d'illustrer le concept, regardons ce qui se passe à la transition entre t1 et t2 (c'est-à-dire en considérant deux instants très proches, l'un juste avant t2 et le second juste après). En désignant par  $d_i$  la distance entre le répéteur "i" et le récepteur intérieur, nous obtenons :

- $d_2 - d_1$  par l'intermédiaire de L1 GLONASS,
- $d_3 - d_2$  par l'intermédiaire de L2 GPS,
- $d_4 - d_3$  par l'intermédiaire de L2 GLONASS,
- $d_1 - d_4$  par l'intermédiaire de L1 GPS.

Cette approche nous permet donc, en utilisant plusieurs constellations et plusieurs fréquences dans le but de ne pas créer d'interférence entre les signaux, tout en conservant un mode de retransmission ne nécessitant aucun traitement complexe (de type séparation de canaux), de calculer un point en 3D à chaque transition avec une précision "différentielle" (typiquement de l'ordre du mètre).

## Perspectives avec les futurs signaux Galileo

Il est également possible de décrire le concept dans le cadre de la future constellation Galileo, avec un intérêt encore plus marqué. Considérons le schéma de la figure 8. Dans ce cas, il apparaît que nous utilisons quatre signaux (L1, E5a, E5b et E6) issus d'un même satellite, afin de reconstituer une constellation artificielle locale. Dans un tel cas, l'écriture du système d'équations de navigation à une forme identique à celui du GPS actuel par exemple.

Le système d'équation est donné à titre indicatif ci-après dans lequel les grandeurs sont identiques à celles utilisées dans le chapitre précédent. Ce système peut également s'écrire sous la forme classique suivante (x, y et z sont les coordonnées du point intérieur cherché,  $x_i$ ,  $y_i$  et  $z_i$  celles des répéteurs – associés à la fréquence d'émission "i" – dans un référentiel local,

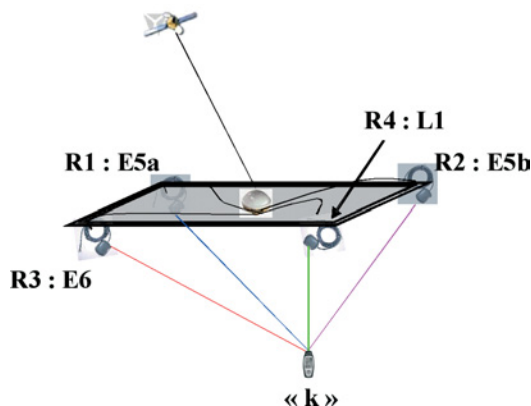
et regroupant les dérives des horloges du satellite et du récepteur,  $P_{k,i}$  la pseudo-distance mesurée sur le récepteur intérieur "k" pour le satellite "j" à la fréquence d'émission "i") :

$$\begin{cases} P_{k,E5a}^i(t) = \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + (z-z_a)^2} + c\Delta T \\ P_{k,E5b}^i(t) = \sqrt{(x-x_b)^2 + (y-y_b)^2 + (z-z_b)^2} + c\Delta T \\ P_{k,L1}^i(t) = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + c\Delta T \\ P_{k,E6}^i(t) = \sqrt{(x-x_{E6})^2 + (y-y_{E6})^2 + (z-z_{E6})^2} + c\Delta T \end{cases}$$

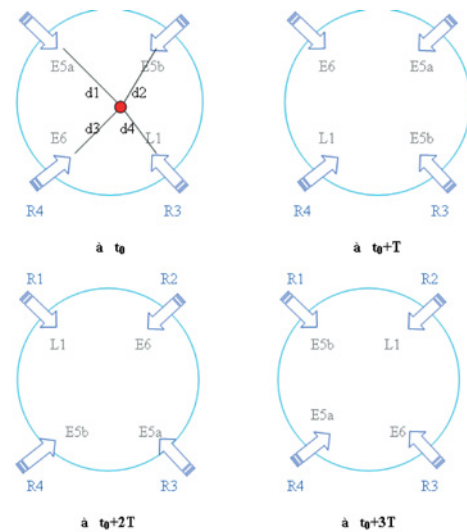
Une telle approche permet de mettre à profit la diversité des signaux Galileo, et autorise l'obtention d'une position en 3D en intérieur à l'aide d'un seul satellite avec une précision de l'ordre de grandeur de celle possible en extérieur. Il est cependant possible d'aller un peu plus loin, en faisant intervenir le cyclage qui, comme on l'a vu, permet d'améliorer sensiblement la précision de positionnement en introduisant un mode différentiel temporel, réduisant de fait les erreurs à quelques décimètres. La représentation schématique de ceci est donnée figure 6.

Dans cette figure, les répéteurs sont symbolisés par des flèches et la fréquence émise est écrite en bout de flèche. Cette fréquence change à chaque transition, comme le montre la figure (instants  $t_0$ ,  $t_0+T$ ,  $t_0+2T$  et  $t_0+3T$ ). Les nouvelles équations de navigation ont maintenant une forme similaire à celle décrite au paragraphe 4, typiques d'un mode de fonctionnement classique des répéteurs. Le principe consiste alors à appliquer la même approche que celle développée succinctement lors du chapitre 4. Ceci permet, par l'intermédiaire du calcul des différences de variation de pseudo-distances entre deux instants consécutifs encadrant une transition, d'améliorer la précision de positionnement, au détriment d'une complexité accrue due au cyclage. Cependant, ici encore, il est alors possible d'obtenir une position en 3D (avec 4 répéteurs), à l'aide d'un seul satellite Galileo, à chaque instant de cyclage.

Il est enfin possible d'imaginer, dans ce dernier cas relatif à Galileo, un fonctionnement très libre : nous avons vu qu'il est possible d'obtenir une continuité de la précision, entre extérieur et intérieur, à l'aide d'un système sans cyclage, et qu'il est également possible d'améliorer la précision en utilisant le cyclage. Un mode mixte est également très simple à mettre



**Figure 5 : Principe de la retransmission multi-porteuse indoor dans le cas de Galileo.**



**Figure 6 : Ajout du cyclage multi-porteuse indoor (Galileo).**

en place : soit le récepteur ne fonctionne qu'en mode "non cyclé", soit il utilise le mode "cyclé" pour faire des points de recalage précis. Il est ainsi possible de concevoir un cycle ayant une période de répétition à la demande, suivant les besoins réels : soit à chaque instant de calcul d'une position (pour un positionnement continuellement précis), soit de loin en loin afin de procéder à des recalages, le récepteur fonctionnant en mode "non cyclé" le reste du temps.

## Conclusion

Les approches à base de répéteurs GPS (ou Galileo) nous semblent une alternative tout à fait intéressante aux systèmes de type Assisted-GPS ou GPS haute sensibilité. Toutes ces techniques présentent l'avantage d'un degré de maturité et de développement bien plus avancé que les techniques répéteurs, mais avec des performances moindres. De là, il nous semble très important de poursuivre dans cette voie afin d'évaluer dans des conditions satisfaisantes cette solution. Ceci d'autant plus que dans certains environnements très "sévéres", les autres solutions citées ne permettent pas de trouver une position : les répéteurs seront peut-être la dernière solution possible, tout en conservant un unique récepteur. Les avantages de ce système sont liés principalement aux points suivants :

- La simplicité de l'infrastructure,
- Uniquement des modifications logicielles des récepteurs,
- L'efficacité démontrée de l'approche.

Les premières expériences de validation du concept sont tout à fait satisfaisantes et rien n'indique de véritable difficulté à venir dans les développements futurs. Cependant, il reste beaucoup à faire avant de pouvoir proposer une solution "industrielle". Parmi les questions qu'il reste à analyser, on peut citer :

- Combien faut-il de répéteurs pour couvrir un bâtiment complet typique (centre administratif, musée, centre commercial, palais des expositions, tour de bureaux...)?
- Quel est l'impact sur l'environnement extérieur?
- Comment savoir si on se trouve en intérieur?...



Une autre piste concerne les signaux retransmis : la théorie exposée dans ce document montre clairement que si 3 ou 4 répéteurs sont nécessaires pour un positionnement en 2-D / 3-D, un seul signal peut tout à fait suffire si ce dernier est de bonne qualité. Cette caractéristique ouvre des perspectives intéressantes : par exemple, les signaux d'un satellite géostationnaire pourraient permettre le positionnement par cette méthode (EGNOS – European Geostationary Navigation Overlay System – par exemple). En fait, le récepteur GPS est utilisé ici comme un capteur de signaux de navigation, quels qu'ils soient. De la même façon pourquoi ne pas désigner quelques satellites d'une ou de plusieurs constellations (GPS, Galileo ou même GLONASS) comme "réservés" pour l'intérieur. Un simulateur de signaux pourrait également proposer des constellations volontairement "artificielles" qui permettraient la distinction évidente entre le cas intérieur et le cas extérieur. Ce dernier cas, bien qu'intéressant, nous rapproche en termes de coût des solutions à base de pseudolites et réclame encore quelques réflexions. Enfin, Galileo offre quelques perspectives nouvelles, tant dans l'exploitation des signaux que dans celle du "pilot tone", signal sans données de navigation permettant des performances en acquisition des signaux supérieures à ce qu'autorise le GPS. Cependant, des dires des officiels du programme, les améliorations réalisées ne seront sans doute pas suffisantes pour permettre un fonctionnement en intérieur de qualité suffisante : ceci permet d'envisager quelques perspectives à la technique des répéteurs ...

Nous pensons que la direction la plus prometteuse est l'utilisation combinée de plusieurs constellations et de plusieurs fréquences (afin d'émettre de façon simultanée). En particulier, le cas de Galileo est remarquable car cette constellation propose au moins quatre signaux par satellite, dont trois sont d'accès ouvert (GPS et GLONASS proposeront également une telle configuration au cours de leurs modernisations). A partir de ceci, il est possible d'imaginer une infrastructure à base de répéteurs qui, avec un seul satellite Galileo, autorise le positionnement en intérieur en 3D. Notons que la démonstration partielle d'un tel concept est d'ores et déjà possible avec GIOVE-A (le premier satellite Galileo lancé en décembre 2005 avec succès afin de sécuriser les fréquences et d'expérimenter quelques concepts), sous réserve de disposer d'un récepteur adéquat. De plus, nous pouvons alors envisager deux types de fonctionnement : dans le premier, nous utilisons les répéteurs comme transmetteurs de signaux et obtenons un positionnement identique à ce qui se passe en extérieur. Dans le second, nous mettons en œuvre un cyclage afin de réaliser un positionnement différentiel en temps, et ainsi améliorer la précision (nous pensons qu'il serait alors possible d'obtenir l'ordre du mètre, comme dans le cas des positionnements obtenus avec une infrastructure utilisant des répéteurs). ●

## Contact

**Nel SAMAMA**

Groupe Navigation - Département Electronique et Physique  
Institut National des Télécommunications  
nel.samama@int-edu.eu

## Références

- [1] Ada Pateli, Kostas Fouskas, Panos Kourouthanassis, Argiris Tsamakos, "On the Potential Use of Mobile Positioning Technologies in Indoor Environments", 15th Bled Electronic Commerce Conference, June 2002, Bled, Slovenia.
- [2] G. Heinrichs, "Personal Localisation & Positioning in the Light of 3G Wireless Communications and Beyond", IFEN, Allemagne, IAIN2003, Berlin, Germany.
- [3] Yohei Takada et AL., "An Information Service System using Bluetooth in an Exhibition Hall", Annales des Telecommunications, Tome 58, N-3-4, pp. 507-530 (2003.3/4).
- [4] Robert J. Fontana, Steven J. Gunderson, "Ultra-WideBand precision asset location system", IEEE Conference on UWB Systems and Technologies, May 2002.
- [5] Frank van Diggelen and Charles Abraham, "Indoor GPS Technology", Global Locate, Inc. [www.gmat.unsw.edu.au/cr/gmat4910/globallocate.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/cr/gmat4910/globallocate.pdf)
- [6] Changdon Kee, Doohee Yun, Haeyoung Jun, Bradford Parkinson, Sam Pullen, Tom Lagenstein "Centimeter-Accuracy Indoor Navigation Using GPS-Like Pseudolites", [www.tik.ee.ethz.ch/~beutel/projects/picopositioning/gps\\_pseudolites.pdf](http://www.tik.ee.ethz.ch/~beutel/projects/picopositioning/gps_pseudolites.pdf)
- [7] G.I. Jee, J.H. Choi, S.C. Bu, "Indoor Positioning Using TDOA Measurements from Switched GPS Repeater", ION GNSS 2004, September 2004, Long Beach, USA.
- [8] Julien Caratori, Marc François, Nel Samama, Alexandre Vervisch-Picois, "Upgrade RnS Indoor Positioning System in an Office Building", ION GNSS 2004, September 2004, Long Beach, USA.

## ABSTRACT

*With the advent of greater mobility, a heavy need for localization has emerged. This is true not only for automotive applications, but also for personal needs, thus leading to the necessity of having a technical solution to indoor positioning. This latter point appears as of prime importance for telecommunication related applications, as revealed by the United States' efforts concerning the Emergency call E911. The European Union provides such an Emergency Call, the E112, but has decided not to put any legal constraints on the call localization: operators are asked to make their best effort to provide a good location. These regulations require developments, specifically in the areas not covered by GNSS. As a confirmation of this, the Galileo program includes a specific domain called the "local elements" that includes specifically the indoor domain. It is then quite clear that indoor positioning is a challenging future technical aspect of global navigation. If it is clear that GNSS are the right candidates for global positioning in the places it works well, i.e. where the sky is free enough for the receiver to acquire enough satellites, a lot of possibilities exist concerning both urban canyons and indoor environments. There are typically two directions taken: the first one relies on the use of satellite navigation constellation signals in order to reduce the number of different electronic systems required to achieve the positioning function (and is described with the so-called repeater approach). The second one tries to implement a different technique indoors and the final system will be made up of the integration of GNSS for outdoors and this newly developed one indoors.*