Chapitre IX : Les résultats GNSS de calibration des délais et des tests de localisation indoor.

L'objectif de ce chapitre est de valider le système à répélites à base de fibre optique que nous avons mis en œuvre. La validation que nous proposons consiste à vérifier que les signaux transportés par voies optiques sont exploitables par l'approche GNSS basée sur la mesure de pseudodistance. Cette validation sera obtenue à travers l'évaluation des délais initiaux des signaux émis par les répélites. Ces délais seront comparés à ceux mesurés par la méthode optique.

Cette approche permet finalement de vérifier d'une part que les signaux GNSS récupérés à la sortie du système optique demeurent compatibles avec le récepteur GNSS. Elle permet d'autre part d'estimer les erreurs de l'approche de calibration GNSS.

Pour finir, on présente dans ce chapitre les premiers résultats de localisation du système à répélites.

I. Calibration par l'approche GNSS

1. <u>Principe de la méthode de calibration.</u>

Le système de retards optiques est destiné à décaler suffisamment des signaux GNSS provenant d'un satellite unique pour qu'ils n'interfèrent pas entre eux une fois réémis (*Fluerasu et al. n.d.*). La Figure IX-1 montre ce que peut être la corrélation à la réception des signaux des quatre répélites.



Figure IX-1 : Corrélation à la réception d'un signal émis par un système répélite

Comme on le voit sur la Figure IX-1, à la réception les retards ont deux composantes : une composante systémique (provenant du retard optique) et une composante liée à la propagation. Afin d'accéder au retard systémique, on doit s'arranger pour effectuer des mesures en annulant les retards liés à la propagation. Ceci est tout à fait aisé à réaliser en branchant directement le récepteur sur les trois sorties recombinées à l'aide d'un combineur placé à l'envers. Il n'y a alors plus aucune composante de propagation, et ne restent que les différences liées aux entrées/sorties du combineur qui sont soit négligeables, soit connues. La Figure IX-2 montre le montage ainsi réalisé.



Figure IX-2 : Montage de calibration du système.

Le récepteur utilisé est un récepteur logiciel IFEN SX-NSR. Il est ainsi possible de le programmer pour qu'il gère la réception un peu particulière des signaux répélites. On a également la possibilité d'enregistrer les échantillons de signal et de les rejouer à volonté : on connaît donc parfaitement le comportement du récepteur. Celui-ci est programmé pour poursuivre la procédure suivante :

- Acquisition des signaux : chaque canal de réception (4 ici) suit la même procédure d'acquisition. On s'arrange donc pour qu'ils s'accrochent tous les trois sur le même signal : le signal 0, celui qui n'est pas retardé.
- Phase de poursuite étape 1 : les quatre signaux commencent la poursuite, les boucles de poursuite se mettent en action. On a vu que, selon la procédure, les quatre canaux suivent le même signal, en conséquence les corrélateurs de chaque boucle sont centrés sur le même pic et les quatre mesures de pseudodistances sont pour l'instant égales.

- Phase de poursuite étape 2 : à un instant donné, on donne l'ordre au récepteur d'induire des déphasages approximatifs sur les canaux 1 et 2 de telle sorte que les boucles de poursuite de chaque canal puissent s'accrocher respectivement sur les signaux 1, 2 et 3. On a forcément une idée de la valeur des retards induits par le système optique, on choisit donc les déphasages que l'on induit en fonction de cette connaissance. Il faut un certain temps (quelques dizaines de secondes) pour que les corrélateurs des canaux 1, 2 et 3 s'alignent parfaitement sur leurs nouveaux pics (Figure IX-2).
- Phase de poursuite étape 3 : on laisse l'enregistrement se poursuivre pendant 15 minutes en récupérant les pseudodistances mesurées.
- Etape finale : on calcule la moyenne des différences entre les pseudodistances issues des canaux 0 et 1, 0 et 2 et 0 et 3. Ces valeurs ajoutées aux déphasages approximatifs que l'on a induits correspondent aux retards que l'on cherche à évaluer.

Dans une première étape, pour nos premiers tests, on utilise les signaux des trois premiers répélites. Ensuite, on appliquera la même procédure aux quatre signaux.

La Figure IX-3 résume les étapes de cette procédure de calibration.



Figure IX-3 : processus de calibration

Pour vérifier l'efficacité de cette procédure, on peut éventuellement relancer le processus en induisant cette fois les valeurs déterminées par le premier processus à l'étape de poursuite 2. Dans ce cas les valeurs de pseudodistances mesurées devraient être nulles. Ce procédé est simple et ne présente aucune difficulté d'implémentation. Dans le but de vérifier l'efficacité de l'algorithme utilisé, on applique cette étape de calibration à des signaux simulés par le

générateur Spirent. Ce générateur nous permet de simuler des trajets multiples retardés par des délais précis.

2. Validation de la méthode

Dans le paragraphe suivant, on cherche à valider cette méthodologie de calibration GNSS avec des délais connus au préalable. On utilise un générateur de signaux SPIRENT GSS6567. Ce générateur de signaux GNSS joue le rôle de notre système de répélites dans cette phase de validation. Il a la capacité de créer des scénarii, notamment pour l'étude des trajets indirects. Nous pouvons donc créer un scénario d'émission dans lequel on se trouve en présence d'un signal unique, le satellite GPS numéro 31, qui sera dupliqué deux fois comme s'il s'agissait de trajets indirects. Mais les retards choisis sont suffisants pour que les pics de corrélation ne se recoupent pas. En branchant le récepteur à la sortie du SPIRENT, on appliquera la méthode de calibration décrite précédemment. Si les retards que l'on mesure correspondent à ceux que l'on induit dans le scénario, cela signifie que la méthode de calibration est au moins aussi précise que le générateur SPIRENT. La Figure IX-4 montre le montage de la Figure IX-2 modifié.



Figure IX-4 : calibration avec GSS6567

La recombinaison des signaux sur une voie unique est assurée entièrement par le SPIRENT comme le montre la Figure IX-4. Le Tableau IX-1 donne les résultats obtenus avec le générateur SPIRENT :

Tableau IX-1 : les résultats de calibration pour la phase de validation

	Canal 0 / Canal 1	Canal 0/ Canal 2
Délais GSS 6567 (m)	732,6306	1465,2613
Délais mesurés (m)	732,6334	1465,2598
Différence (m)	0,0028	-0,0015

On a une différence entre ce qui est induit et ce qui est mesuré de quelques millimètres : c'est une précision tout à fait acceptable étant données les ambitions du système. Dans une situation réelle le récepteur GNSS a une précision de l'ordre de 50 cm. Cependant, la qualité du signal GNSS peu bruité émis par le Générateur Spirent justifie cette haute précision de quelques millimètres.

3. <u>Résultats de la calibration</u>

On procède de la même manière mais cette fois-ci avec le système à répélite à base de fibre optique. On obtient les résultats reportés dans le Tableau IX-2 pour les trois délais mesurés pour les 4 signaux des répélites :

Tableau IX-2 : les résultats de calibration du système à répélites

	Canal 0 / Canal 1	Canal 0/ Canal 2	Canal 0/ Canal 3
Délais mesurés (m)	898,539	1823,532	2437,5

II. Comparaison des résultats de calibration à ceux de l'approche GNSS

La comparaison des résultats des deux approches de calibration a pour objectif d'évaluer la compatibilité des mesures basées sur le déphasage des signaux sinusoïdaux avec les mesures GNSS. L'idée est donc de vérifier si les mesures faites par la première méthode (jugée plus précise) sont de même ordre que les mesures de différences de pseudodistances données par le récepteur GNSS. Cette étape permet de vérifier la concordance entre les deux résultats et par conséquence confirmer la compatibilité des résultats de première calibration au technique GNSS.

Dans le Tableau IX-3, on calcule les différences entre les délais obtenus par l'approche optique et l'approche GNSS. Les valeurs de différences obtenues sont de quelques dizaines de centimètres. Etant donné que l'approche GNSS de calibration est basée sur la mesure de pseudodistances, sa précision est équivalente à celle du récepteur GPS qu'on estime à 1 mètre. D'autre part les incertitudes évaluées dans le cas de l'approche optique ne dépassent pas le centimètre. Par conséquent, on peut justifier les différences obtenues entre les résultats de ces deux approches par les incertitudes du récepteur GPS.

	Délais mesurés entre les signaux des répélites 0 et i		
	S1 - S0	S2 - S0	S3 - S0
Délais de l'approche optique (m)	743,46	1513,68	2437,52
Délais de l'approche GNSS (m)	742,67	1513,89	2437,5
Optique–GNSS (m)	0,79	-0,20	0,02

Tableau IX-3 : Comparaison des résultats de calibration des deux approches.

On en conclue alors que les résultats de l'approche de calibration optique sont compatibles avec ceux de l'approche GNSS. Dar ailleurs, on en déduit aussi que le système optique des décalages (par propagation sur fibre) n'introduit pas de distorsion supplémentaire du signal GNSS. En effet la similitude entre les délais calculés par l'approche GNSS et ceux donnés par la méthode optique à des précisions de quelques millimètres prouve que la qualité signal GNSS récupéré à la sortie des démodulateurs ne s'est dégradée. On peut donc, suite à cette comparaison, valider le fonctionnement du système à décalage et de l'approche optique de calibration.

Puisque la méthode de calibration optique basée sur la mesure de déphasage s'avère être plus précise que l'approche GNSS, on décide de prendre ses mesures de délais comme notre référence de calibration. Ainsi lors des tests de localisation du système à répélites, on attribuera aux valeurs des délais (initiaux) systémiques fournis au récepteur, celles mesurées par l'approche optique et compatible au technique GNSS. Puisque l'incertitude de ces mesures est de quelques millimètres, l'objectif de calibrer le système à répélites avec une précision inférieure au centimètre doit être atteint.

L'étape suivante est donc d'évaluer la précision du système de positionnement en indoor pour valider cet objectif.

III. Résultats des tests de positionnement du système répélites à base de fibre optique

1. <u>Système de positionnement à répélites déployé en indoor.</u>

Dans le but de valider le fonctionnement du système des répélites à base de fibre optique, on évalue ses performances de calcul de position en indoor. Les tests se déroulent dans une salle faisant 15 mètres de long sur 10 mètres de large. Quatre répélites sont placés en hauteur dans les coins de l'espace de test. Les photos de la Figure IX-5 montrent notre environnement de test et l'antenne émettrice (répélite). Cet environnement est constitué de plusieurs fenêtres et

d'une série de radiateurs ayant une surface réflectrice pour les signaux GNSS. Un tel espace correspond à un environnement typique dans lequel le système à répélites est susceptible d'être déployé. Dans un tel espace, des signaux satellitaires sont rarement détecté. Etant donné que cette salle se trouve au sous sol, il est impossible de calculer une position même si on se place à coté des fenêtres.



Figure IX-5 : photos de l'espace de test et d'un répélite

Le référentiel choisi dans cet environnement $(o, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ est centré sur l'un des coins de la salle et ses axes \vec{x}, \vec{y} et \vec{z} sont représentés dans Figure IX-6. Les coordonnées des répélites placés proche du plafond, dans le référentiel local choisi, sont données dans le Tableau IX-4. Ces valeurs sont utilisées par l'algorithme de calcul de position.



Figure IX-6 : référentiel local

Telecom SudParis-EDITE de Paris

Tableau IX-4 : coordonnées des répélites

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Rép 0	2,73	0,09	2,80
Rép 1	12,37	0,05	2,70
Rép 2	13,06	9,22	3,22
Rép 3	0,08	8,68	3,25

L'infrastructure du système de positionnement est composée du simulateur de signaux GNSS LabSat¹⁶, du modulateur optique, du coupleur ¹/₄ et du démodulateur. Les bobines de fibres de 200 mètres sont déroulées depuis le générateur GNSS jusqu'aux positions des répélites. Ensuite la sortie du démodulateur est connectée à l'antenne émettrice du répélite. Pour équilibrer les niveaux de puissance RF, on adapte les gains des amplificateurs de chaque transmetteur optique de façon à avoir la même puissance transmise par toutes les antennes. Cette puissance respecte le seuil maximal de -50 dBm exigé par la commission Spatiale Européenne (*ECC REPORT 168 2011*).

Avant de commencer les tests de localisation, on calibre le système en utilisant l'approche détaillée dans le chapitre II. Les valeurs des délais systémiques estimées sont rentrées comme données à l'algorithme de localisation implémenté sur le récepteur IFEN SX-NSR.



Récepteur optique

Figure IX-7 : montage du système de localisation

¹⁶ Le LabSat permet d'enregistrer et de rejouer des signaux GNSS (GPS et Glonaas). Ici il remplace le génértaeur Spirent.

2. <u>Résultats des tests de positionnement en indoor</u>

L'objectif de ces tests de localisation est de valider le fonctionnement du système à base de fibre optique. L'algorithme de calcul de position utilisé est basé sur un programme standard du récepteur GNSS. Ce programme est adapté (par M. Vervisch Picois) aux spécificités du système à répélites à savoir un code unique émis par tous et un délai initial associé à chacun. L'algorithme d'acquisition commence par détecter un seul signal sur tous les canaux qu'on associe aux quatre répélites. Ensuite, l'algorithme définit une zone de recherche pour chaque canal en fonction de la position du premier signal détecté et des délais initiaux mesurés dans la phase de calibration. Chaque délai est attribué à un répélite dont les coordonnées sont données dans l'algorithme. Au moyen de cette correspondance (entre les délais et les répélites), on associe à chaque signal le répélite émettant. Ceci nous permet de mesurer les pseudodistances associées à chaque répélite. On déduit alors par la méthode standard de calcul de coordonnées (x,y,z) (*D.Kaplan & J. Hegarty 2006*) la position du récepteur GNSS.

Dans un premier temps, on procède à des tests pour des positions fixes du récepteur. Dans ce cas l'antenne réceptrice est positionnée dans un point dont on veut calculer les coordonnées dans le repère local. Dans ce cas on applique la méthode du localisation absolu se basant sur les mesures de pseudodistance (phase du code). En comparant les résultats obtenus aux coordonnées réelles, on constate que les différences varient de 50 cm dans certaines positions à quelques mètres pour d'autres. Ces résultats sont donc insuffisants pour tirer une conclusion définitive sur le fonctionnement et les performances de notre système. Ces erreurs de localisation sont dues en partie aux effets des multi-trajets et du problème d'éblouissement. Pour réduire l'influence de ces phénomènes, on peut utiliser les techniques développer dans ce but notamment la SMICL et la DTT. Néanmoins pour ces premières expériences, on préfère valider le fonctionnement du système et on implémentera la SMICL et la DTT dans une deuxième phase pour améliorer ses performances.

Une deuxième solution consiste à faire des tests de localisation durant un déplacement du récepteur. Dans ce cas le récepteur prend en données sa position initiale. Ensuite il suit l'évolution de la phase de la porteuse des signaux des répélites pour déterminer sa position au cours de son déplacement. L'influence des multi-trajets sur la mesure de phase de porteuse est faible. Il est donc possible d'évaluer l'efficacité de notre système à travers cette approche en comparant la forme de la trajectoire réelle à celle tracée par le récepteur.

Pour déplacer l'antenne réceptrice suivant des trajectoires linéaire ou circulaire, on utilise un robot téléguidé. Ce robot porte le boitier du récepteur connecté à son antenne et à l'ordinateur portable qui permet de le piloter. Une photo du robot est présentée dans la Figure IX-8.



Figure IX-8 : robot téléguidé portant le récepteur GNSS et l'antenne réceptrice

Avant de commencer les tests, on délimite la zone où tous les signaux sont reçus à des niveaux de puissances proches. Si le rapport de puissance entre deux signaux reçus dépasse 15 dB, le signal le plus faible est noyé dans le bruit. Ceci est la conséquence du phénomène d'éblouissement. Dans ce cas le récepteur GNSS ne le détecte plus. Quand on se place dans la zone délimitée précédemment, on garantit la réception des signaux des quatre répélites. Cette zone est délimitée par les quatre points donnés dans le Tableau IX-5.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Point 1	9,91	5,55	0,02
Point 2	6,11	6,18	0,02
Point 3	4,88	3,43	0,02
Point 4	8,19	1,9	0,23

Tableau IX-5 : coordonnées des points limites

Les résultats des tests de localisation sont représentés dans les Figures Figure IX-9 et Figure IX-10. Sur ces figures, les points en croix rouges représentent les positions des répélites et ceux en violet ceux des quatre points limitant la zone de tests. Le triangle vert est celui de la position initiale à partir de laquelle le récepteur commence son déplacement. Les points en bleu représentent les positions calculées par le récepteur GNSS le long de la trajectoire suivie dont une estimation est tracée en rouge.

La forme générale des deux trajectoires ressemble à celle suivie par robot (trajectoire estimé en ligne rouge) .Etant donné qu'on n'a aucun suivi en temps réel du déplacement du robot et du calcul de position, on ne peut pas comparer les coordonnées des points calculés aux positions réelles. Mais puisque le point de départ et le point d'arrivé sont presque confondus, la comparaison de leurs coordonnées nous donne une idée sur la précision du système. En effet, la distance séparant le point initial de départ du point d'arrivée calculé par le récepteur est de quelques décimètres. Ces premiers résultats semblent alors assez satisfaisants. Ils sont donc la conséquence d'un fonctionnement correct de notre système des répélites.

Il est clair que cette première série de tests ne suffit pas pour tirer une conclusion sur la précision du système en indoor. Des expériences, permettant de comparer le déplacement du récepteur et les positions calculées en temps réel, sont prévues. Dans ce cas on aura une idée des précisions de tous les points de la trajectoire. En outre, une deuxième phase d'amélioration du système consiste à implémenter la SMICL et la DTT pour réduire l'erreur induite par les multi-trajets et l'éblouissement.



Figure IX-9 : test de trajectoire linéaire



Figure IX-10 : test de trajectoire circulaire

3. Conclusion

Pour conclure, on a décrit la mise en œuvre et le déploiement de notre système à répélites dans un espace intérieur typique. Les tests de localisation dans cet environnement nous ont permis d'évaluer l'erreur de calcul pour une position fixe ainsi que pour la forme générale de trajectoires lors du déplacement du récepteur. Ces premiers résultats obtenus sont à améliorer. Ils permettent cependant dans un premier temps de valider le fonctionnement du système à répélites à base de fibre optique en attendant les futures expériences (en temps réel).

Les erreurs de mesure pour les points fixes sont inférieures au mètre pour les positions se trouvant dans la zone de test. Par conséquent, on peut donc confirmer que les résultats de la phase de calibration sont suffisamment précis pour assurer une marge d'erreur de quelques décimètres. Ainsi l'étape de calibration des délais a atteint ses objectifs.

IV. Conclusion sur la mise en œuvre du système à répélites à base de fibre optique

Dans cette deuxième partie, on a étudié la nouvelle architecture de notre système indoor à base de fibre optique. Les avantages nombreux de ce support de signal ont fait de lui le meilleur moyen pour remplacer les câbles coaxiaux et créer les différents délais systémiques.

On a donc mis en œuvre le système à répélites en utilisant la fibre optique. Le signal GNSS est converti en signal optique au moyen d'un modulateur direct (transmetteur optique) puis reconverti en signal RF au moyen d'un démodulateur (récepteur optique). Pour valider le fonctionnement du montage optique, les signaux récupérés à la sortie des démodulateurs sont envoyés dans un récepteur GPS pour vérifier leurs caractéristiques. La qualité de ces signaux en termes de niveaux de bruit et de puissance RF est assurée, reste alors la question de la calibration des délais réels introduits sur chaque signal.

Une méthode d'estimation des délais réels basée sur la mesure de déphasages est implémentée. Par ailleurs une deuxième technique basée sur la mesure des pseudodistances est aussi utilisée pour calibrer ces délais. La comparaison des résultats et des performances en termes d'incertitudes de ces deux approches prouve leur convergence à une différence de quelques décimètres. Cette différence est principalement due à la précision du récepteur GPS évaluée à moins d'un mètre. On conclue alors sur la validité de la méthode de calibration optique et le bon fonctionnement du système des décalages. Par conséquent les résultats de l'approche optique, basée sur la mesure de déphasage des signaux sinusoïdaux, sont considérés comme notre référence de calibration du système à répélites.

D'autre part cette technique permet d'avoir un moyen d'auto-calibration du système de localisation, indépendant de la mesure de position, peu coûteux et avec une précision satisfaisante inférieure au centimètre). Il est aussi remarquable qu'une telle approche n'ait pas besoin de matériel spécifique pour réaliser ses mesures. Cette méthode de calibration répond donc à tous les besoins de notre à système : à savoir sa simplicité, son autonomie et sa précision.

Pour finir, on a effectué une première série de tests de localisation qui s'est avérée prometteuse. Les résultats de positionnement relatif obtenus sont estimés à quelques décimètres de la trajectoire réelle.

Conclusion et perspectives

Avec le système à répélites, on offre une continuité du service GNSS de localisation fonctionnant à l'extérieur avec des précisions suffisantes (inférieures au mètre). Cette solution reste favorisée par rapport aux autres solutions proposées pour la localisation en indoor puisqu'elle garantit l'utilisation des même ressources matérielles et logicielles quand on passe de l'extérieur vers l'intérieur. Dans le cadre de ce système, on a réalisé un ensemble d'études pour améliorer son architecture et réduire les interférences qu'il peut induire sur les signaux extérieurs.

Pour conclure sur les travaux réalisés durant cette thèse, on résume les résultats obtenus dans les deux parties et on décrit le système à répélite optimisé au moyen ces travaux. On détaillera, par la suite, les perspectives envisagées. Dans la première partie, les différents codes proposés pour le système à répélites offrent un gain en puissance d'interférence satisfaisant (autour de 16 à 20 dB). D'autre part les fonctions d'autocorrélation de ces codes ne présentent aucuns pics secondaires, d'où leur parfaite adéquation avec les répélites et l'utilisation de la DTT. En effet dans ce cas on n'est plus contraint par les positions des pics secondaires pour choisir les délais initiaux et le nombre de répélites à utiliser.

Dans la deuxième partie, on a utilisé la fibre optique pour alléger l'infrastructure et créer les différents délais initiaux par propagation du signal (dans un milieu guidé qui est la fibre optique). Dans le but de déterminer avec précision les délais initiaux réels pour garantir une précision de localisation inférieure au mètre, on a développé une méthode de calibration des délais des répélites. Les résultats d'estimation des délais sont obtenus avec une incertitude estimée de quelques millimètres.

Nous concluons avec les premiers résultats des tests de localisation indoor utilisant le système. Ces premières observations semblent satisfaisantes et promettent une précision de l'ordre de quelques décimètres en indoor.

Dans le futur système à répélites, le générateur GNSS envoie une séquence maximale IMBOC, idéale en termes d'autocorrélations. Ceci permettra une utilisation optimale du principe des répélites et de la DTT. Après création des délais par l'architecture optique, la méthode de calibration des délais à des incertitudes millimétriques limite la marge d'erreur du calcul de position en indoor. On bénéficie ainsi des avantages des travaux que j'ai réalisés pour un fonctionnement optimal des répélites. De plus, en intégrant la SMICL et la DTT développées précédemment, on profite de la réduction des effets des trajets indirects et de l'éblouissement. On crée ainsi un système à répélites avec une architecture allégée, à faible niveau d'interférence avec les signaux satellitaires et intégrant différentes techniques de réduction des erreurs de position.

En ce qui concerne les perspectives de mes travaux, je suggère d'étudier les codes résultants des combinaisons de plusieurs codes IMBOC à différentes valeurs de p de façon similaire à celle de la CBOC ou la CBCS. De telles combinaisons peuvent apporter une amélioration supplémentaire en termes d'interférences inter-système.

Par ailleurs, l'étude des codes menée dans ces travaux concerne uniquement la bande L1. On peut envisager d'étendre cette étude et la technique des codes IMBOC aux autres bandes GNSS L2 et L3.

Une autre perspective intéressante concerne une nouvelle méthode de détection des trajets indirects. Celle-ci se base sur les figures d'intercorrélation, entre la séquence maximale et sa version modulée en IMBOC à p défini (pair ou impair). Ces tracés de corrélation sont composés de p pics secondaires de largeur égale à $\frac{2}{p}$ chip (de la m-séquence) qui apparaissent au début et à la fin de la séquence. En dehors de ces pics la fonction d'intercorrélation est nulle ou quasi-nulle. Sur de telles figures de corrélation, un trajet indirect de longueur supérieure à $\frac{1}{p}$ chip peut être distingué du trajet direct. Dans une deuxième étape, il faudra chercher à améliorer les performances de cette méthode pour détecter des multi-trajets plus courts que $\frac{1}{n}$ car il semble qu'ils soient dominants en indoor.

Références

(Akrout et al. 2008)	Akrout, A. A., A. Shen, G. Duan, and A. Romdane, "Etude du «chirp» et de l'intervalle spectrale libre des modes Fabry-Perot d'une diode laser verrouillée en mode", 2008.
(Avila-Rodriguez 2008)	Avila-Rodriguez, JA., On Generalized Signal Waveforms for Satellite Navigation, 2008 Bundeswehr München, 438 pp. http://137.193.32.1/research/docs/phd_Jose_Angel_Avila_Rodr iguez.pdf.
(Avila-Rodriguez et al. 2006)	Avila-Rodriguez, JA., S. Wallner, and G. W. Hein, 2006: How to optimize GNSS signals and codes for indoor positioning.
(Bally & Berroir 2008)	Bally, FX., and JM. Berroir, Incertitudes expérimentales, 2008. http://poisson.ens.fr/Ressources/incertitudes.pdf
(Barnes et al. 2003)	Barnes, J., C. Rizos, J. Wang, D. Small, G. Voigt, and N. Gambale, Locata: A new positioning technology for high precision indoor and outdoor positioning. Proceedings 2003 International Symposium on GPS\$\backslash\$ GNSS, 9–18.
(Barnes et al. 2006)	Barnes, J., C. Rizos, M. Kanli, and A. Pahwa, A Positioning Technology for Classically Difficult GNSS Environments from Locata. Position, Location, And Navigation Symposium, 2006 IEEE/ION, 715–721.
(Binhao et al. 2010)	Binhao Wang, Guofeng Yan, and Chunsheng Yan, Fiber length and chromatic dispersion measurement technology using a novel optical frequency domain reflectometry. Adv. Optoelectron. MicroNano-Opt. AOM 2010 OSA-IEEE-COS, 1–3, doi:10.1109/AOM.2010.5713515.
(Bird & Arden 2011)	Bird, J., and D. Arden, Indoor navigation with foot-mounted strapdown inertial navigation and magnetic sensors [Emerging Opportunities for Localization and Tracking]. Wirel, 2011. Commun. IEEE, 18, 28–35, doi:10.1109/MWC.2011.5751293.
(Borre 2007)	Borre, K., A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach. 2007th ed. Birkhäuser, 198 pp.
(Bosch & Lescure 1997)	Bosch, T., and M. Lescure, Crosstalk analysis of 1 m to 10 m laser phase-shift range finder. 1997, Instrum. Meas. IEEE

	Trans., 46, 1224–1228, doi:10.1109/19.668256.
(Bouet 2008)	Bouet, M., and A. L. dos Santos, RFID tags: Positioning principles and localization techniques. Wireless Days, 2008. WD '08. 1st IFIP, 1–5.
(Cailliez & Pagès 1976)	Cailliez, F., and JP. Pagès, Introduction à l'analyse des données. Société de mathématiques appliquées et de sciences humaines, 1976, Paris.
(Caratori et al. 2004)	Caratori, J., M. François, N. Samama, and A. Vervich-Picois, UPGRADE RnS Indoor Positioning System in an Office Building, 2004.
	http://www.ion.org/search/view_abstract.cfm?jp=p&idno=5880 (Accessed March 15, 2012).
(Cemin Zhang et al. 2006)	Cemin Zhang, M. Kuhn, B. Merkl, M. Mahfouz, and A. E. Fathy, Development of an UWB Indoor 3D Positioning Radar with Millimeter Accuracy. Microwave Symposium Digest, 2006. IEEE MTT-S International, 106–109.
(Costa et al. 1982)	Costa, B., D. Mazzoni, M. Puleo, and E. Vezzoni: Phase shift technique for the measurement of chromatic dispersion in optical fibers using LED's. 1982, Quantum Electron. IEEE J., 18, 1509–1515, doi:10.1109/JQE.1982.1071432.
(D.Kaplan & J. Hegarty 2006)	D.Kaplan, E., and C. J. Hegarty, «UNDERSTANDING GPS: Principles and applications». Artech House, 2006.
(Dedes & Dempster 2005)	Dedes, G., and A. G. Dempster, Indoor GPS positioning - challenges and opportunities. Vehicular Technology Conference, 2005. VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd, Vol. 1 of, Vehicular Technology Conference, 2005. VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd, 412–415.
(Dejun et al. 2009)	Dejun Zou, Zhongliang Deng, Jianming Huang, Huadong Liu, and Lei Yang, A Study of Neuman Hoffman Codes for GNSS Application. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom '09. 5th International Conference on, Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom '09. 5th International Conference on, 1–4.

(Dixon 1984)	Dixon, R. C., 1984: Spread Spectrum Systems: With Commercial Applications. second edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 573 pp.
(ECC REPORT 168 2011)	ECC REPORT 168, ECC REPORT 168 REGULATORY FRAMEWORK FOR INDOOR GNSS PSEUDOLITES. Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), 2011, Miesbach, http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/official/pdf/ECCRep168.p df.
(Escofier 2004)	Escofier, J. P., Théorie de Galois. 2nd ed. Dunod, 2004.
(Al Fakir 2004)	Al Fakir, S., « Théorie de Galois & codes, géométrie & arithmétique ». Ellipses, 2004.
(Fisk et al. 1994)	Fisk, M., M. M. Prcic, G. Rzyski, and R. Stevens,: Application of fiber-optic delay lines in radar phase noise measurement. AUTOTESTCON '94. IEEE Systems Readiness Technology Conference. "Cost Effective Support Into the Next Century", Conference Proceedings. 1994, 179–182.
(Fluerasu & Samama 2011)	Fluerasu, A., and N. Samama, A Brief History of the Evolution of Local Infrastructure Based GNSS Indoor Positioning Systems From Pseudolites to Repealites, through Repeaters. 2011, Londres.
(Fujii et al. 2007)	Fujii, A., H. Sekiguchi, M. Asai, S. Kurashima, H. Ochiai, and R. Kohno, Impulse Radio UWB Positioning System. Radio and Wireless Symposium, 2007 IEEE, 55–58.
(G.Proakis 2008)	G.Proakis, John, Digital Communication. 5th ed, 2008.
(Gigl et al. 2007)	Gigl, T., G. J. M. Janssen, V. Dizdarevic, K. Witrisal, and Z. Irahhauten, Analysis of a UWB Indoor Positioning System Based on Received Signal Strength. Positioning, Navigation and Communication, 2007. WPNC '07. 4th Workshop on, 97–101.
(Giuliani 2002)	Giuliani, G., M. Norgia, S. Donati, and T. Bosch, Laser diode self-mixing technique for sensing applications, 2002, doi:10.1088/1464-4258/4/6/371.

(Gold 1967)	Gold, R., Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing (Corresp.). Inf. Theory IEEE Trans., 13, 619–621, 1967.
(Gold 1968)	Gold, R., Maximal recursive sequences with 3-valued recursive cross-correlation functions (Corresp.). Inf. Theory IEEE Trans., 14, 154–156, 1968.
(Gross 2003)	Gross, J., Linear Regression. 2003. http://books.google.fr/books?id=ZCSwnQEACAAJ.
(Guenda et al. 2011)	Guenda, L., L. Bras, M. Oliveira, and N. B. Carvalho, Indoor/outdoor management system compliant with Google Maps and Android® OS. EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE, EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE, 1–4.
(Gueuning et al. 1997)	Gueuning, F. E., M. Varlan, C. E. Eugne, and P. Dupuis, Accurate distance measurement by an autonomous ultrasonic system combining time-of-flight and phase-shift methods. 1997, Instrum. Meas. IEEE Trans., 46, 1236–1240, doi:10.1109/19.668260.
(Haverinen & Kemppainen 2009)	Haverinen, J., and A. Kemppainen, Global indoor self- localization based on the ambient magnetic field. 5th Int. Conf. Comput. Intell. Robot. Auton. Syst. 5th CIRAS, 2009. doi:10.1016/j.robot.2009.07.018.
(Hein et al. 2006)	Hein, G., JA. Avila-Rodliguz, and S. Wallner, The DaVinci Galileo Code and Others In. InsideGNS, 2006.
(Hui et al. 2007)	Hui Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and Jing Liu, Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. Syst. 2007, Man Cybern. Part C Appl. Rev. IEEE Trans., 37, 1067– 1080.
(Hyman & Lait 1960)	Hymans, A. J., and J. Lait, Analysis of a frequency-modulated continuous-wave ranging system. 1960, Proc. IEE - Part B Electron. Commun. Eng., 107, 365–372, doi:10.1049/pi-b-2.1960.0130.
(Jain 2003)	Jain, S., A survey of Laser Range Finding, 2003. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.130.6 167.

(Jardak & Samama 2010)	Jardak, N., and N. Samama, Short Multipath Insensitive Code Loop Discriminator. 2010, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, January, VOL.46, No1.
(Jee et al. 2005)	Jee, GI., J. Lee, and SH. Im, Indoor Positioning Using Time Synchronized Switching GPS Repeater, 2005. http://www.ion.org/search/view_abstract.cfm?jp=p&idno=6484 (Accessed March 15, 2012).
(Jie et al. 2007)	Jie Qin, C. Stroud, and F. Dai, Phase Delay Measurement and Calibration in Built-In Analog Functional Testing. System Theory, 2007. SSST '07. Thirty-Ninth Southeastern Symposium on, System Theory, 2007. SSST '07. Thirty-Ninth Southeastern Symposium on, 145–149.
(Jong-Seon 1997)	Jong-Seon No, Kyeongcheol Yang, Haboug Chung, and Hong-Yeop Song, New construction for families of binary sequences with optimal correlation properties, 1997. Inf. Theory IEEE Trans., 43, 1596–1602.
(Jong-Seon 2003)	Jong-Seon No, Gang-Mi Gil, and Dong-Joon Shin, Generalized construction of binary bent sequences with optimal correlation property, 2003. Inf. Theory IEEE Trans., 49, 1769–1780.
(Journet et al. 1996)	Journet, B., G. Bazin, and F. Bras, Conception of an adaptative laser range finder based on phase shift measurement. Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on, Vol. 2 of, Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996, Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on, 784–789 vol.2.
(Kee et al. 2001)	Kee, C., D. Yun, H. Jun, B. Parkinson, S. Pullen, and T. Lagenstein, Centimeter-Accuracy Indoor Navigation Using GPS-Like Pseudolite GPS World, 2001.
	http://www.gpsworld.com/wireless/indoor- positioning/centimeter-accuracy-indoor-navigation-using-gps- like-pseudolites-716 (Accessed March 15, 2012).
(Kuudniemi et al. 2012)	Kuusniemi, H., M. Z. H. Bhuiyan, M. Strom, S. Soderholm, T. Jokitalo, Liang Chen, and Ruizhi Chen, 13: Utilizing pulsed pseudolites and high-sensitivity GNSS for ubiquitous outdoor/indoor satellite navigation. Indoor Position. Indoor Navig. IPIN 2012 Int. Conf., 1–7,

	doi:10.1109/IPIN.2012.6418911.
(Langley 2011)	Langley, R., Innovation: GLONASS: Developing Strategies for the Future: GPS World, 2011. http://gpsworld.com/innovation- glonass-11405/ (Accessed September 2, 2013).
(Liu & Komo 1992)	Liu, SC., and J. J. Komo, Nonbinary Kasami sequences over GF(p), 1992. Inf. Theory IEEE Trans., 38, 1409–1412, doi:10.1109/18.144728.
(Magid 1958)	Magid, M., Precision Microwave Phase Shift Measurements, 1958. Instrum. IRE Trans., I-7, 321–331, doi:10.1109/IRE- I.1958.5006809.
(Mautz 2009)	Mautz, R., The Challenges of Indoor Environments and Specification on some Alternative Positioning Systems, 2009. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=490 7800 (Accessed February 15, 2012).
(Mautz 2011)	Mautz, R., and S. Tilch, Survey of optical indoor positioning systems. Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011 International Conference on, 1–7.
(McEliece 1987)	McEliece, R. J., Finite Fields for Computer Scientists and Engineers. Kluwer Academic Publishers, 1987.
(Mourikis & Roumeliotis 2004)	Mourikis, A. I., and S. I. Roumeliotis, Analysis of positioning uncertainty in simultaneous localization and mapping (SLAM). Vol. 1 of, Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on, 13– 20 vol.1.
(Ng'oma 2005)	Ng'oma, A., Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems. Technische Universiteit Eindhoven, 2005 http://alexandria.tue.nl/extra2/200512106.
(Niemi & Ludvigsen 2001)	Niemi, T., G. Genty, and H. Ludvigsen, Group-delay measurements using the phase-shift method: improvement on the accuracy. Optical Communication, 2001. ECOC '01. 27th European Conference on, Vol. 4 of, Optical Communication, 2001. ECOC '01. 27th European Conference on, 496–497 vol.4.
(No & Kumar 1989)	No, JS., and P. V. Kumar, A new family of binary pseudorandom sequences having optimal periodic correlation properties and larger linear span, 1989. Inf. Theory IEEE

Trans	35.	371-	-379.
11uno.,	JJ,	571	517.

(Norgia et al. 2007)	Norgia, M., G. Giuliani, and S. Donati, Absolute Distance Measurement With Improved Accuracy Using Laser Diode Self-Mixing Interferometry in a Closed Loop, 2007. Instrum. Meas. IEEE Trans., 56, 1894–1900, doi:10.1109/TIM.2007.904551.
(Olsen et al. 1982)	Olsen, J., R. Scholtz, and L. Welch, Bent-function sequences, 1982. Inf. Theory IEEE Trans., 28, 858–864.
(Passy & Von der Weid 1995)	Passy, R., N. Gisin, and JP. Von der Weid, High-sensitivity- coherent optical frequency-domain reflectometry for characterization of fiber-optic network components, 1995. Photonics Technol. Lett. IEEE, 7, 667–669, doi:10.1109/68.388759.
(Petrovski et al. 2003)	Petrovski, I., K. Okano, S. Kawaguchi, H. Torimoto, K. Suzuki, M. Toda, and J. Akita, Indoor Code and Carrier Phase Positioning with Pseudolites and Multiple GPS Repeaters, 2003. http://www.ion.org/search/view_abstract.cfm?jp=p&idno=5293
(Poujouly et al. 1999a)	Poujouly, S., B. Journet, and D. Miller, Laser range finder based on fully digital phase-shift measurement. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE, Vol. 3 of, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE, 1773–1776 vol.3.
(Poujouly et al. 1999b)	Poujouly, S., B. Journet, and D. Placko, Digital laser range finder: phase-shift estimation by undersampling technique. Industrial Electronics Society, 1999. IECON '99 Proceedings. The 25th Annual Conference of the IEEE, Vol. 3 of, Industrial Electronics Society, 1999. IECON '99 Proceedings. The 25th Annual Conference of the IEEE, 1312–1317 vol.3.
(Protassov 2002)	Protassov, K., Analyse statistique des données expérimentales. EDP Sciences, 2002. http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk &AN=120120&site=ehost-live.
(Puntanen 2010)	Puntanen, S., Linear Regression Analysis: Theory and Computing, 2010.

(<i>Qiyue et al. 2007</i>)	Qiyue Zou, A. Tarighat, and A. H. Sayed, Compensation of Phase Noise in OFDM Wireless Systems. Signal Process, 2007. IEEE Trans., 55, 5407–5424, doi:10.1109/TSP.2007.899583.
(R.petit 1931)	R.petit, « Ondes électromagnétiques en radioélectricité et en optique », 1931.
(Al-Raweshidy & Komaki 2002)	Al-Raweshidy, H., and S. Komaki, Basic Microwave Properties of Optical Links: intertion loss, Noise Figure, and Modulation Transfer. Radio over Fibre Technologies for Mobile communications Networks, 2002. ' http://books.google.fr/
(Rizos et al. 2010)	Rizos, C., G. Roberts, J. Barnes, and N. Gambale, Experimental results of Locata: A high accuracy indoor positioning system. Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on, Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on, 1–7.
(Rue & Held 2005)	Rue, H., and L. Held, Gaussian Markov random fields. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2005.
(Samama 2008)	Samama, N., Global Positioning: Technologies and Performance. Wiley, 420 pp, 2008.
(Sancho et al. 2013)	Sancho, S., A. Suarez, and F. Ramirez, General Phase-Noise Analysis From the Variance of the Phase Deviation, 2013. Microw. Theory Tech. IEEE Trans., 61, 472–481,
(Schon & Bienlenberg 2008)	Schon, S., and O. Bielenberg, On the capability of high sensitivity GPS for precise indoor positioning. Positioning, Navigation and Communication, 2008. WPNC 2008. 5th Workshop on, 121–127.
(Selmi & Samama 2011)	Selmi, I., and N. Samama, Optimal Codes for GNSS-like Signals for Indoor Positioning. European Navigation Conference 2011, London.
(Selmi & Samama 2013a)	Selmi, I., and N. Samama, Design of New Codes for Reducing Interference Between GNSS-Like Signals Transmitted Indoors. Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2013), Montbéliard.
(Selmi & Samama 2013b)	Selmi, I., and N. Samama, New optimized codes for indoor positioning. Submitt. Febr. 2013, Annales of Telecom.

(Selmi et al. 2013a)	Selmi, I., and A. Vervich-Picois, Positoning Results of the Repealite Based Indoor Positioning System in a Small Room New Calibration and 2D positioning. JETSAN, 2013, Fontainebleau.
(Selmi et al. 2011)	Selmi, I., Y. Gottesman, F. Delavault, A. Vervich-Picois, and N. Samama, Time delayed transmitter based indoor positioning system A simple electronic and optical architecture for signal generation. European Navigation Conference 2011, London.
(Selmi et al. 2012a)	Selmi, I., A. Vervisch-Picois, Y. Gottesman, and N. Samama, Experimental Positioning Results of the Repealite Based Indoor Positioning System Preliminary 2D results. 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sydney, Australie.
(Selmi et al. 2013b)	Selmi, I., N. Samama, Y. Gottesman, and A. Vervisch-Picois, GNSS-Based Calibration of the Infrastructure of the Repealite Indoor Positioning System. IPIN 2013, Montbéliard.
(Selmi et al. 2012b)	Selmi, I., A. Vervisch-Picois, Y. Gottesman, and N. Samama, Optical and radio calibration of the repealite based indoor positioning system. Indoor Position. Indoor Navig. IPIN 2012 Int. Conf., 1–8, doi:10.1109/IPIN.2012.6418906.
(Soller et al. 2005)	Soller, B. J., D. K. Gifford, M. S. Wolfe, and M. E. Froggatt, High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies, 2005. Opt Express, 13, 666–674.
(Verneuil 2003)	Verneuil, JL., Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s, 2003. Université de Limoges. http://epublications.unilim.fr/theses/2003/verneuil-jean- louis/verneuil-jean-louis.pdf.
(Vervisch-Picois et al. 2012)	Vervich-Picois, A., A. Bideau, M. Jeannot, and N. Samama, 2D Indoor Dynamic Positioning Using GNSS Based Repeaters, 2006. http://www.ion.org/search/view_abstract.cfm?jp=p&idno=6925 (Accessed March 15, 2012).
(Vervisch-Picois 2010)	Vervisch-Picois, A., Etude de Systèmes de Positionnement en Intérieur Utilisant de Mesures de Phase du Code ou de Phase de Porteuse de Signaux de Navigation par Satellites, 2010, Université Pierre et Marie Curie-Paris6.

(Vervisch-Picois & Samama 2011)	Vervisch-Picois, A., and N. Samama, Near-Far interference mitigation for pseudolite using double transmission. September 2011, en révision à IEEE.
(Vervisch-Picois et al. 2010)	Vervisch-Picois, A., I. Selmi, Y. Gottesman, and N. Samama, Current status of the repealite based approach: A sub-meter indoor positioning system. Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), 2010 5th ESA Workshop on, 1–6.
(Wallner et al. 2007)	Wallner, S., JA. Avila-Rodriguez, G. W. Hein, and J. J. Rushanan, Galileo E1 OS and GPS L1c Pseudo Random Noise Codes: Requirements, Generation, Optimization and Comparison, 2007. Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), 1549 – 1563.
(Wei et al. 2000)	Wei Zhou, Jianguo Yu, Jie Li, Zongqiang Xuan, and Hui Zhou, A precision frequency standard comparison method and instrument. Frequency Control Symposium and Exhibition, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International, Frequency Control Symposium and Exhibition, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International, 557–560.
(Von der Weid 1997)	Von der Weid, JP., R. Passy, G. Mussi, and N. Gisin, On the characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometry, 1997. Light. Technol. J., 15, 1131–1141, doi:10.1109/50.596958.
(Yuksel et al. 2009a)	Yuksel, K., M. Wuilpart, V. Moeyaert, and P. Megret, Optical frequency domain reflectometry: A review. Transparent Optical Networks, 2009. ICTON '09. 11th International Conference on, Transparent Optical Networks, 2009. ICTON '09. 11th International Conference on, 1–5.
(Yuksel 2009b)	Yuksel, K., M. Wuilpart, V. Moeyaert, and P. Megret, Optical frequency domain reflectometry: A review. Transparent Opt. Networks 2009 ICTON 09 11th Int. Conf., 1–5, doi:10.1109/ICTON.2009.5185111.
(Zhiqi et al. 2007)	Zhiqi Li, Wei Zhou, Baoying Feng, and Lihu Teng, An Ultra- high Resolution Phase Difference Measurement meter. Frequency Control Symposium, 2007, Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE International, Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st

European Frequency and Time Forum. IEEE International, 862–864.