# Chapitre IV : Génération des signaux IMBOC et tests pratiques des performances

L'objectif de ce chapitre est de générer les nouveaux codes IMBOC sous forme de signaux RF compatibles avec un récepteur GNSS standard. On commence alors par convertir les codes binaires (en 0 et 1) en signaux GNSS sur une porteuse de 1.57542 GHz. Cette étape est réalisée au moyen d'un modulateur numérique BPSK. Ensuite on teste la compatibilité de la sortie du modulateur avec un récepteur GNSS pour valider cette étape de génération. On envoie alors les signaux générés dans un récepteur GNSS. Celui-ci les enregistre sous un format « .dat » qu'on exploitera par la suite au moyen d'algorithmes d'acquisition et de poursuite du code GNSS en question. On obtient alors le tracé de la fonction d'autocorrélation associée aux codes testés. Dans la suite, on détaillera les méthodes de génération et de réception des signaux GNSS. Celles-ci sont appliquées aux codes IMBOC pour évaluer leurs performances dans une situation réelle avec un récepteur GNSS standard.

## I. Génération des signaux GNSS (IMBOC)

Pour cette première étape, on utilise un générateur de signaux Rhode&Schwarz SMBV100A représenté dans Figure IV-1. Cet instrument prend comme entrée le code numérique binaire en 0 et 1 (à un débit fixé) et envoie en sortie le signal RF, modulé selon le type de modulation choisi, autour d'une fréquence porteuse. Dans le cas des signaux BOC ou IMBOC émis sur la bande L1, notre générateur prend en entrée le code binaire BOC ou IMBOC résultant de la modulation du code primaire par la sous-porteuse carrée. Ce code émis à un débit $f_c$  (=  $pf_0$ ) est modulé en BPSK à la fréquence porteuse de 1,57542 GHz. Le signal ainsi généré par le Rhode&Schwarz est équivalent à celui émis par un satellite GPS ou Galileo sans le message de navigation. Il est donc de même nature qu'un signal Galileo modulé en BOC ne portant pas le message de navigation.



Figure IV-1: générateur Rhode&Schwarz

Pour tester et valider l'étape de génération, on a commencé par générer un signal GPS standard avec un code de Gold (PRN2). Ce signal est créé par cette même procédure décrite ci-dessus en remplaçant le code numérique BOC ou IMBOC par le code GPS. Il est envoyé ensuite dans un récepteur GPS pour évaluer l'efficacité de notre technique de génération. En phase d'acquisition, le récepteur réussit à capter le signal et à déterminer le code émis. Etant donné que notre signal ne contient pas de message de navigation, le récepteur GPS standard ne peut pas utiliser son algorithme jusqu'au bout pour calculer une pseudodistance. On se contente alors de cette première détection de code pour valider notre technique de génération des signaux GNSS. Dans le but d'effectuer nos tests d'autocorrélation et d'interférence, on développe notre propre (réalisé par M. Patarot) algorithme d'acquisition qui ne nécessite pas la présence du message de navigation. Cet algorithme est décrit dans le paragraphe suivant.

# II. Algorithme d'acquisition des signaux GNSS générés sans message de navigation

Les signaux GNSS (sans message de navigation) générés sont échantillonnés et enregistrés par le récepteur IFEN NavX dans des fichiers de format « .dat ». L'algorithme développé prend comme entrées le fichier du signal enregistré et le code numérique binaire utilisé pour sa génération. Dans le cas des signaux IMBOC, le code binaire en question est le code IMBOC modulé par la sous porteuse carrée.

Notre algorithme d'acquisition utilise une méthode nommée « parallel code phase search acquisition » (Borre 2006) pour calculer la fonction de corrélation entre le signal reçu et celui

généré localement. Cette méthode est basée sur le calcul de la transformée de Fourrier de la fonction de corrélation C(k) en utilisant l'expression suivante :

$$C(k) = sig_{local}^{*}(k) * sig_{recu}(k)$$

Où  $sig^*_{local}(k)$  est le conjugué de la transformée de Fourrier du signal local et  $sig_{reçu}(k)$  est la transformée de Fourrier du signal reçu.

Le montage de la Figure IV-2 décrit les étapes suivies pour réaliser cette méthode d'acquisition.



Figure IV-2 : montage d'acquisition parallèle

Pour valider le fonctionnement de notre algorithme, on l'a testé avec un signal idéal émis par le générateur de signaux GNSS « Spirent » et avec un signal GPS standard enregistré sur une antenne externe. Les résultats (d'autocorrélation) obtenus confirment l'efficacité de cet algorithme en terme de détection du code reçu et d'optimisation du temps de calcul.

#### III. Performances des signaux IMBOC générés par le Rhode&Schwarz (R&S)

Les résultats des simulations réalisées pour les codes IMBOC à différentes valeurs du paramètre p sont représentés dans les figures ci-dessous. Pour commencer, on a tracé les fonctions d'autocrrélation des codes IMBOC. Les Figures IV- 3 et Figure IV-4 montrent les tracés obtenus suite à la phase d'acquisition pour les signaux IMBOC avec p prenant comme valeurs 3, 5, 7 et 11. Ces signaux sont générés par la technique de génération expliquée au paragraphe I. Les tracés des fonctions d'autocorrélation et d'intercorrélation donnés dans ce

chapitre ne sont pas normalisés. Les fonctions tracées sont celles obtenues par corrélation du signal, émis par le R&S, au signal local généré par le récepteur.



Figure IV-3 : Fonction d'autocorrélation du signal IMBC à p=3



Figure IV-4 : Fonctions d'autocorrélation des signaux IMBC à p=3, 5, 7 et 11.

En observant la forme des fonctions d'autocorrélation tracées pour chaque code IMBOC, on note qu'elles sont presque identiques à celles obtenues dans l'étude théorique (chapitre III). L'unique différence réside dans les pics secondaires négatifs qui sont inversés en pics positif dans les Figures IV- 3 et Figure IV-4. Ceci est du au fait que les valeurs d'autocorrélation sont obtenues par l'amplitude au carré de la sortie (en nombre complexe) de notre algorithme d'acquisition ( $|C(t)|^2$ ). On en conclut donc que notre technique de génération de ces codes est valide.

Néanmoins, il est clair que pour les valeurs de p supérieures à 7, une déformation considérable est observée sur les figures de corrélations tracées. Ceci est prévisible étant donné que la largeur de bande du récepteur GPS (IFEN) utilisée pour ces expériences est de 14 MHz. Elle devient donc insuffisante pour les codes IMBOC à p supérieur à 9 puisqu'ils nécessitent une bande spectrale d'au moins 18 MHz (=  $2 * p * f_0$ ).

Dans une deuxième expérience, on s'intéresse au niveau d'interférence entre les signaux IMBOC et les signaux GPS de la bande L1. Ce niveau est évalué par la fonction de corrélation entre le signal GPS et celui du nouveau code IMBOC pour un p donné. On utilise le même algorithme d'acquisition développé précédemment et les mêmes signaux enregistrés. Mais pour obtenir la fonction d'intercorrélation, on fixe le code local au PRN2 de GPS pour tous les signaux enregistrés. Ainsi selon le fichier « .dat » choisi, on évalue l'interférence possible entre le signal enregistré (dans ce fichier) et celui du PRN2. Par cette approche, on simule les interférences susceptibles de perturber l'acquisition du PRN2 en présence des autres signaux (GPS et IMBOC)

La Figure IV-5 montre le tracé de la fonction d'intercorrélation entre deux signaux GPS PRN1 PRN2. Cette première figure est prise comme référence du niveau d'interférence qu'on compare à ceux des codes IMBOC. Dans la Figure IV-6, on présente les résultats d'intercorrélation entre le code GPS PRN2 et les codes IMBOC avec p prenant 3, 5, 7 et 11 comme valeur.



Figure IV-5 : Fonction d'intercorrélation des signaux GPS PRN1 et PRN2.



Figure IV-6 : Fonctions d'intercorrélation du signal GPS PRN2 avec les signaux IMBOC à p=3, 5, 7 et 11.

Ces figures confirment que les niveaux d'interférences résultants dans le cas d'un code IMBOC sont nettement plus faibles que la référence GPS (Figure IV-5). Les gains de ces niveaux d'interférences par rapport à celui de référence sont égaux à ceux calculés théoriquement sauf dans le cas du code IMBOC à p égal à 11. En effet, les valeurs d'intercorrélation obtenues quand p est égal à 11 demeurent nettement plus bas que ceux de référence mais ils dépassent le niveau théorique attendu. Etant donné que ce code nécessite une bande de réception plus large pour l'acquérir correctement, ses performances d'intercorrélation sont aussi détériorées pour la même raison. Par conséquent les codes

IMBOC avec p supérieur ou égal à 9 n'atteignent pas leur niveau d'interférence optimal à moins d'utiliser un récepteur GNSS avec une largeur de bande suffisante (supérieure à 18 MHz).

# IV. Influence des signaux IMBOC générés sur l'acquisition des signaux satellitaires

Dans le but d'observer l'influence de ces niveaux d'interférence sur les pics d'autocorrélation, on refait une liste d'expériences où le récepteur GNSS reçoit en parallèle le signal satellitaire et le signal du répélite indoor. Dans ce cas le récepteur placé à l'extérieur poursuit le signal du satellite (PRN2 par exemple). Le signal du répélite (PRN33 ou code IMBOC avec p égal à 7) est le signal perturbateur. En faisant varier le niveau de puissance d'émission de ce signal, on cherche à évaluer la marge d'amplification possible de ses signaux indoor. Ces expériences permettent aussi de comparer les effets d'interférence induits par les codes standards et les codes IMBOC. Les Figures IV-7, IV-8 et IV-9 illustrent les résultats de ces expériences pour des rapports de puissance entre le signal satellite est reçu à -130 dBm et l'atténuation due à l'espace libre est de l'ordre de 60 dB (équivalent à une vingtaine de mètres de distance de propagation depuis l'intérieur vers l'extérieur). Les rapports R entre la puissance du répélite et celle du satellite reçus au niveau du récepteur sont calculés par l'expression suivante :

 $R = -130 dB - (P_{répélite} - 60 dB)$  où  $P_{répélite}$  est la puissance émise par le répélite.

Les niveaux de puissances émis en indoor et les rapports de puissance sont donnés dans le Tableau IV-1.

Expérience n°	1 (Figure IV-7)	2 (Figure IV-8)	3 (Figure IV-9)
Puissance émise du répélite (dBm)	-40	-30	-20
Rapport de puissance Puissance répélite/ satellite reçu au niveau du récepteur (dBm)	30	40	50

Tableau IV-1 : Niveaux des puissances des signaux du satellite reçu et du répélite émis.

Le maximum de puissance autorisée en intérieur est de -50 dBm. Les valeurs de puissance testées pour les codes IMBOC sont supérieures à -40 dBm. Dans la Figure IV-8, le répélite indoor émet le PRN33 à la puissance maximale autorisée de -50 dBm. Ce cas nous permet d'évaluer l'amélioration apportée par le code IMBOC émis à des puissances supérieures.



Figure IV-7 : auto-corrélation du PRN 2 dans le cas où le récepteur reçoit en parallèle le PRN33 émis par le répélite à -50 dBm

Les résultats obtenus dans les Figures ci-dessous confirment qu'il est possible d'amplifier les signaux des répélites quand on émet les codes IMBOC. Dans la Figure IV-8, les puissances émises sont de -40 dBm. Le niveau de bruit est très faible pour les deux cas ; avec le PRN33 ou avec le code IMBOC. Il aussi clair que le niveau d'interférence dû au PRN33 reste plus élevé que celui du code IMBOC à p égal à 7.



Figure IV-8 : auto-corrélation du PRN 2 dans le cas où le récepteur reçoit en parallèle le PRN33 ou le code IMBOC avec p égal à 7 à un rapport de puissance égale à 30dB.

En passant à un niveau de puissance supérieur de -30 dBm, on note que le niveau d'interférence augmente pour le PRN 33 tandis qu'il reste quasi-invariant pour le code IMBOC. A un tel niveau de puissance, le bruit résultant des interférences du code IMBOC est

équivalent à celui induit par le PRN33 à la puissance maximale autorisée de -50 dBm (Figure IV-7).



Figure IV-9 : auto-corrélation du PRN 2 dans le cas où le récepteur reçoit en parallèle le PRN33 ou le code IMBOC avec p égal à 7 à un rapport de puissance égale à 40 dB.

A la puissance de -20 dBm, on note que les niveaux de bruit augmentent notablement dans les deux cas proposés (Figure IV-9). Quand le PRN 33 est émis par le répélite, ce bruit d'interférence dépasse le seuil de 3dB (l'amplitude des pics de bruit est supérieure à la moitié du pic d'autocorrélation). Dans cette situation, l'acquisition du signal est fortement perturbée. Dans ce cas la mesure de pseudodistance serait erronée. En revanche, avec le code IMBOC, la situation est nettement meilleure avec un seuil de bruit acceptable. Ce seuil de bruit demeure faible mais il est plus élevé que le niveau standard du PRN33 observé à -50 dBm de puissance émise. On considère alors le niveau de puissance à -20 dBm supérieur au niveau maximal toléré.

Pour conclure, on se limite alors à une puissance émise maximale pour l'indoor à -30 dBm en utilisant les codes IMBOC. Grâce aux gains d'interférence réalisés avec les codes IMBOC, à cette puissance maximale, on garantit un niveau de bruit équivalent à celui des codes GPS au maximum de -50 dBm. Ainsi l'objectif d'amplification du signal GNSS indoor tout en veillant à ce que les interférences avec les signaux satellitaires soient au plus bas est atteint.



Figure IV-10 : auto-corrélation du PRN 2 dans le cas où le récepteur reçoit en parallèle le PRN33 ou le code IMBOC avec p égal à 7 à un rapport de puissance égale à 50dB.

Les expériences exposées précédemment sont réalisées pour un paramètre p égal à 7. Ce choix se justifie par les contraintes de bande de filtre limitée à 14 MHz. Pour des valeurs de paramètre p plus élevée (9 ou 11), il serait possible d'augmenter encore le seuil de la puissance maximale tolérée pour les répélites.

## V. Conclusion

Pour conclure, cette technique de génération des codes IMBOC nous offre la possibilité de créer notre propre signal pour le système à répélites selon nos besoins. Les expériences effectuées avec les signaux IMBOC confirment leur capacité à réduire les interférences avec les codes des satellites. On peut donc mettre en pratique l'utilisation de ces nouveaux codes pour nos tests de localisation en indoor. Ceci nécessite évidement de modifier l'algorithme d'acquisition et de poursuite implémenté sur le récepteur GNSS pour l'adapter à la structure et au débit de ces codes.

Par ailleurs, les dernières expériences confirment la possibilité d'élever le maximum de puissance tolérée pour les transmetteurs en indoor. On remplace alors le seuil fixé à -50 dBm à -30 dBm lorsqu'on utilise un code IMBOC à p égal 7.

## VI. Conclusion sur les nouveaux codes IMBOC

En conclusion, les codes modulés en IMBOC (avec p impair) proposés dans ce chapitre (les codes de Gold ou les séquences maximales modulées en IMBOC) ont la particularité de réduire les niveaux d'interférence avec les signaux des satellites. La procédure de génération de ces codes est similaire à celles des signaux BOC de Galileo et GPS. La forme des figures d'autocorrélation est aussi proche de celles des codes BOC. On en déduit que de tels codes peuvent être détectés et décodés par un récepteur Galileo ou GPS nouvelle génération (sans modifier le fonctionnement des récepteurs).

En termes de niveaux d'interférence avec les signaux GNSS à l'extérieur, de nombreuses simulations et études théoriques ont été menées. L'ensemble des simulations concerne l'évaluation des valeurs d'intercorrélation pour différents codes IMBOC à différentes valeurs du paramètre p ainsi que les niveaux d'interférence avec les signaux des satellites à l'extérieur. De plus l'étude de la répartition du spectre dans la bande L1 a été prise en compte dans le choix du code optimal pour éviter tout problème d'interférence avec la deuxième génération de signaux (GPS et Galileo) modulés en BOC.

Au moyen d'une étude théorique des équations de corrélation, on a établi les niveaux théoriques de gains réalisables avec les codes IMBOC. Celui-ci est équivalent à la valeur du paramètre p. Pour les valeurs de p maximales tolérées (pour les bandes spectrales allouées) le gain d'interférence est de l'ordre de 20 dB (p=11) dans la bande GPS et 16 dB (p=7) pour Glonass.

Nous avons également évalué les interférences intra-système dans le cas de la simulation du déploiement du système à base de répélites dans le bâtiment de la Cité des Sciences. On en déduit qu'avec la répartition proposée, il est possible de faire du positionnement en 3D (dans la pire des positions). Dans le but d'améliorer les performances du système, il serait préférable d'augmenter les délais initiaux pour éviter les interférences intra-système. Les résultats des simulations prouvent que les risques d'interférence pour l'extérieur sont très faibles compte tenu des valeurs de rapport signal sur bruit (des codes satellitaires évalués) à l'extérieur (de l'ordre de 30 dB au minimum).