

Définition de signaux et de techniques de traitement innovants pour les futurs systèmes GNSS

Marion Roudier *CNES, France*

A. Garcia-Pena, O. Julien *ENAC, France*

C. Poulliat, M.L. Boucheret *INPT-ENSEEIH, France*

T. Grelier, L. Ries *CNES, France*

D. Kubrak *Thales Alenia Space, France*

Introduction

- ❖ Définition de GNSS
- ❖ Principe de fonctionnement du GNSS
- ❖ Contexte de ma thèse
- ❖ Objectifs de ma thèse

Introduction - Définition de GNSS

- ❖ **GNSS (Global Navigation Satellite System) = Système de navigation par satellite**
- ❖ Définition de GNSS : Système basé sur une constellation de satellites, qui permet à un utilisateur de déterminer sa position et sa vitesse, n'importe où et n'importe quand, et de synchroniser son horloge avec le temps GPS ultra précis
- ❖ Exemples de GNSS :
 - GPS : le GNSS Américain
 - Galileo : le GNSS Européen
 - Glonass : le GNSS Russe
- ❖ Exemples d'application :
 - La navigation sur route, maritime, aérienne
 - La topographie
 - Le sauvetage aéronautique ou maritime
 - La géophysique
 - L'agriculture de précision
 - Le suivi des animaux migrateurs

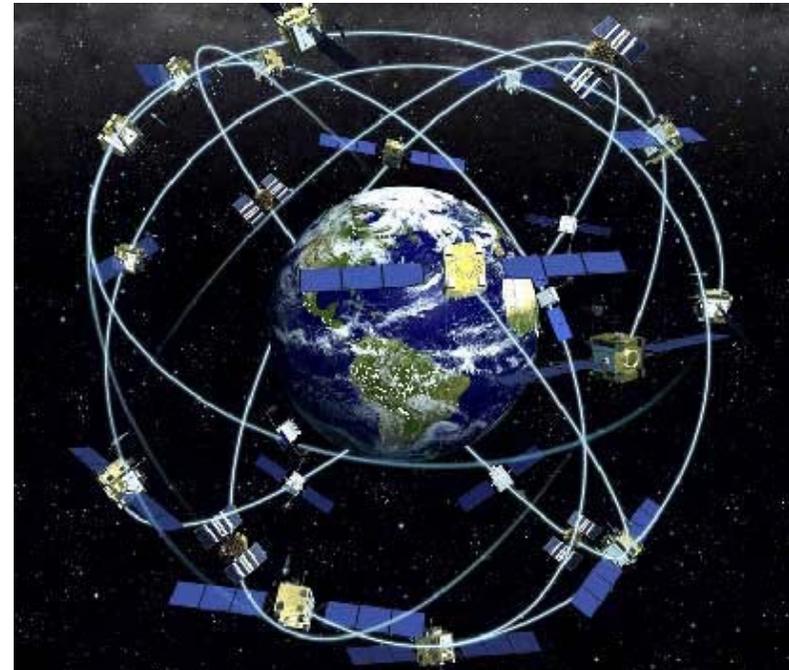


Fig. 1. Exemple d'une constellation de satellites tiré du *Journal of Information Science and Technology*

Introduction - Principe de fonctionnement du GNSS (1/2)

On cherche à déterminer les coordonnées du récepteur :
 $(x_{récept}, y_{récept}, z_{récept})$

- ❖ Chaque satellite de la constellation émet un signal en direction de la Terre
- ❖ Ce signal est constitué d'un message de navigation, qui contient :
 - ❑ Les coordonnées du satellite $(x_{sat}, y_{sat}, z_{sat})$: *Ephemeris data*
 - ❑ Des informations de temps et d'horloge : *Clock data*
- ❖ Lorsque le récepteur reçoit le signal envoyé par le satellite :
 - ❑ Il lit le message de navigation
 - ❑ Il en déduit le temps de propagation $t_{propa\ sat/récept}$ entre le satellite et le récepteur, impacté par le biais d'horloge entre le satellite et le récepteur

Introduction - Principe de fonctionnement du GNSS (2/2)

- ❖ Pour connaître les coordonnées du récepteur, il faut donc résoudre l'équation :

$$d_{sat/récept} = t_{propa\ sat/récept} v$$

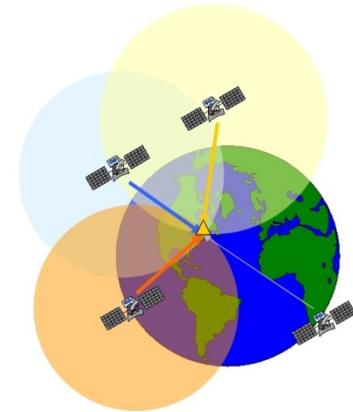
$$= \sqrt{(x_{sat} - x_{récept})^2 + (y_{sat} - y_{récept})^2 + (z_{sat} - z_{récept})^2} + \text{biais horloge}_{sat/récept}$$

Ayant comme connus :

- Les coordonnées du satellite $(x_{sat}, y_{sat}, z_{sat})$
- Le temps de propagation $t_{propa\ sat/récept}$

Ayant 4 inconnues :

- Les coordonnées du récepteur $(x_{récept}, y_{récept}, z_{récept})$
- Le biais d'horloge entre le satellite et le récepteur $\text{biais horloge}_{sat/récept}$



- ❖ Il faut donc **4 équations** pour résoudre ce système à 4 inconnues
- ❖ Il faut donc **4 satellites** pour déterminer la position 3D du récepteur

Introduction - Contexte

- ❖ Les systèmes GNSS sont de plus en plus présents dans la vie courante
- ❖ Les nouvelles applications se trouvent principalement en milieu urbain
- ❖ En milieu urbain, les nombreux obstacles impactent le signal émis par le satellite

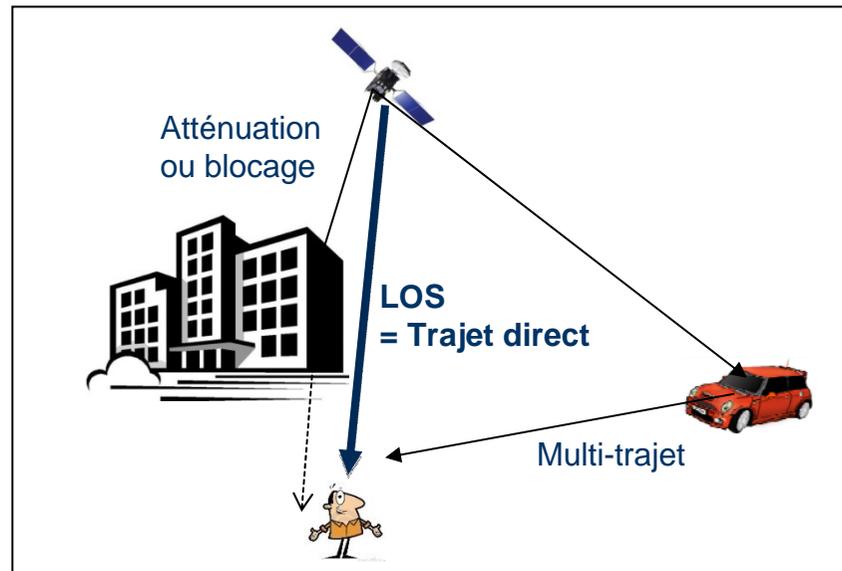


Fig. 2. Conséquences d'un environnement urbain sur le signal reçu

- ❖ Ces impacts peuvent causer de rapides et fortes variations sur la phase et l'amplitude du signal reçu
- ❖ Cela engendre des difficultés pour le récepteur à démoduler le message de navigation

Introduction - Objectif

❖ Objectifs de ma thèse :

- ❑ Concevoir un nouveau signal GNSS plus robuste aux distorsions introduites par un environnement urbain, en optimisant :
 - Le codage canal
 - La structure du message de navigation
 - La structure du signal
- ❑ Tester les performances de démodulation du nouveau signal GNSS
 - En développant un outil de simulation capable de calculer les performance de démodulation d'un signal GNSS en milieu urbain

❖ Planning de ma thèse :

- ❑ Première phase : développer l'outil de simulation
- ❑ Deuxième phase : concevoir et optimiser le nouveau signal

Plan

- I. Simulateur SiGMeP
- II. Modèles de canal de propagation choisis
- III. Méthodologie mise en place pour calculer les performances de démodulation
- IV. Performances de démodulation obtenues avec SiGMeP
- V. Conclusion

Plan

I. Simulateur SiGMeP

II. Modèles de canal de propagation choisis

III. Méthodologie mise en place pour calculer les performances de démodulation

IV. Performances de démodulation obtenues avec SiGMeP

V. Conclusion

I- Simulateur SiGMeP (1/2)

- ❖ But
Tester les performances de démodulation d'un nouveau signal GNSS en milieu urbain
- ❖ Les tests sont simulés par ordinateur
- ❖ Un outil de simulation a donc été implémenté en langage C : SiGMeP (Simulator for GNSS Message Performance)

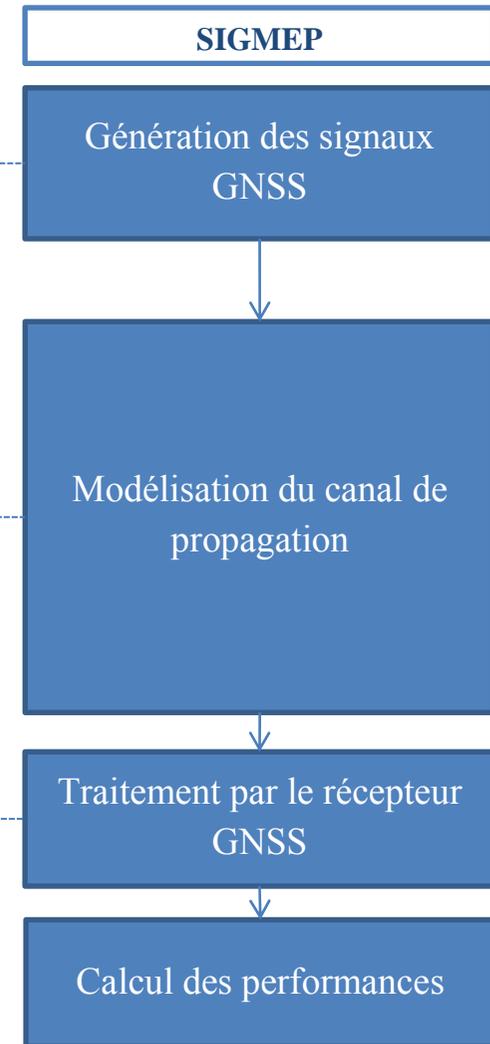
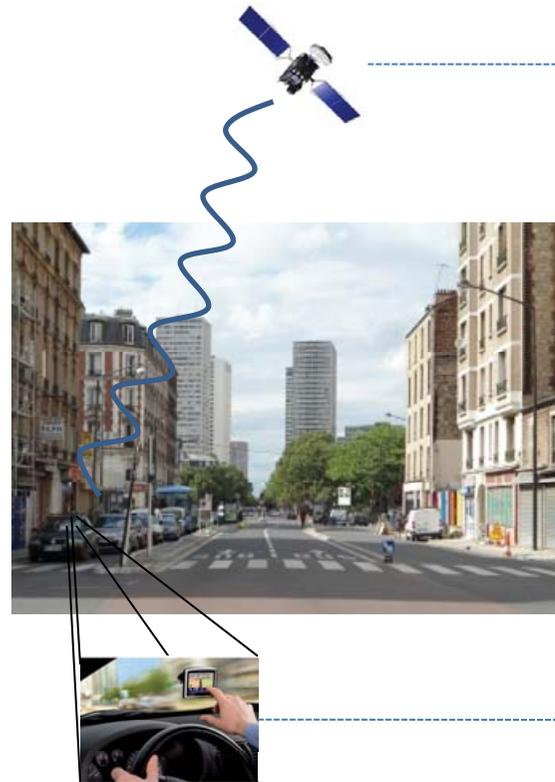


Fig. 3. Structure du simulateur SiGMeP

I- Simulateur SiGMeP (2/2)

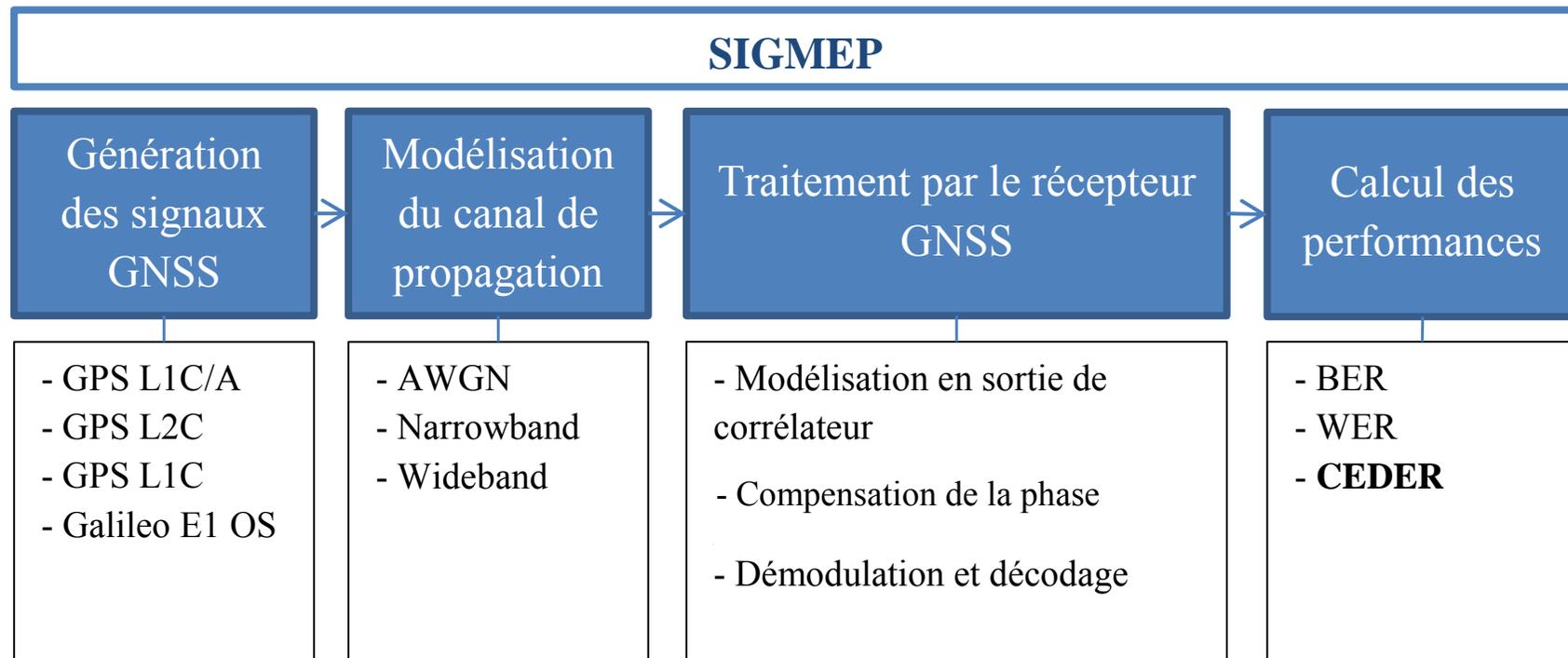


Fig. 4. Description de la structure du simulateur SiGMeP

CEDER = Clock and Ephemeris Data Error Rate

❖ Seules données nécessaires au récepteur pour calculer une première position

Plan

I. Simulateur SiGMeP

II. Modèles de canal de propagation choisis

III. Méthodologie mise en place pour calculer les performances de démodulation

IV. Performances de démodulation obtenues avec SiGMeP

V. Conclusion

II- Modèles de canal de propagation choisis

- ❖ Un modèle LMS (Land Mobile Satellite) en environnement urbain et pour la démodulation est visé
- ❖ La revue de l'état de l'art a identifié 2 candidats :

	Prieto (Perez Fontan)	DLR
Multipath modeling	Narrowband	Wideband
Model type	Statistical	Hybrid: statistical/deterministic
Measurement campaigns date	1990	2002
Calculation burden	Simple to implement	Heavy and time-consuming

Fig. 5. Caractéristiques des 2 modèles de canal de propagation choisis

- ❖ Le modèle de Perez Fontan est référencé dans le COST (European Cooperation in the field Of Scientific and Technical Research) depuis 2002
- ❖ Le modèle du DLR est le modèle de référence wideband pour l'ITU (International Telecommunication Union) depuis 2009

II- Modèles de canal de propagation choisis

- ❖ L'impact du canal de propagation LMS sur le signal reçu peut être modélisé en utilisant la réponse impulsionnelle du canal $h(t; \tau)$:

$$r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t; \tau) s(t - \tau) d\tau$$

Avec :

- $r(t)$ est le signal reçu à l'instant t
 - $s(t)$ est le signal transmis à l'instant t
 - $h(t; \tau)$ est la réponse impulsionnelle du canal
 - t est la variable déterminant l'instant auquel h est définie
 - τ est la variable qui détermine le délai auquel h est définie
-
- ❖ Ainsi, l'expression mathématique de h dépend du modèle de canal sélectionné : Prieto ou DLR

II- Modèles de canal de propagation choisis - Prieto

- ❖ Le modèle de Prieto est **Narrowband** : le délai temporel entre le signal direct et les échos dus au multi-trajet n'est pas modélisé
- ❖ La réponse impulsionnelle du canal s'écrit donc : $h(t; \tau) = c(t)\delta(t - \tau_{direct}(t))$
- ❖ L'amplitude de l'enveloppe complexe du signal reçu est une variable aléatoire : elle suit une loi de **Lo** de paramètres (M_A, Σ_A, MP)

$$c(t) = \underbrace{a_{received}(t)}_{\sim \text{Lo}} e^{j\varphi_{received}(t)} = \underbrace{a_{direct}(t)}_{\sim \text{Log-Normal}(M_A, \Sigma_A)} e^{j\varphi_{direct}(t)} + \underbrace{a_{multipath}(t)}_{\sim \text{Rayleigh}(MP)} e^{j\varphi_{multipath}(t)}$$

- ❖ (M_A, Σ_A, MP) suivent des lois Gaussiennes, dont les paramètres dépendent des conditions environnementales :
 - Le type d'environnement (urbain, semi-urbain, très urbain...)
 - L'élévation du satellite
 - La bande de la porteuse
 - L'état du canal (= atténuation ou blocage de la composante 'signal direct')

II- Modèles de canal de propagation choisis - Prieto

- ❖ Le modèle de Prieto définit 2 états, correspondant à la force de l'atténuation ou du blocage de la composante 'signal direct'

- ❑ Etat GOOD :

De pas d'atténuation à atténuation moyenne

- ❑ Etat BAD :

De atténuation moyenne à forte

- ❖ Les transitions entre états sont modélisées par une chaîne semi-Markovienne

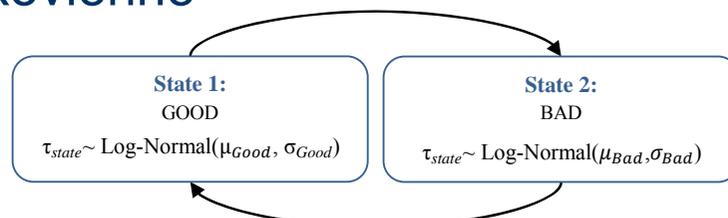
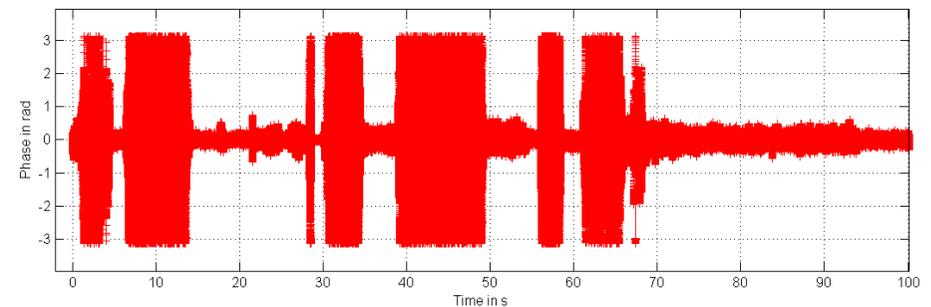
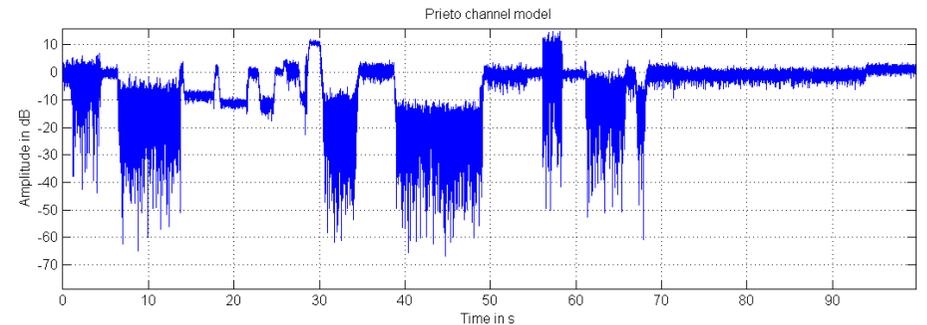


Fig. 6. Chaîne semi-Markovienne qui régit les transitions d'états

- ❑ On passe d'un état à l'autre
- ❑ La durée de chaque état suit une loi Log-Normale



Satellite Elevation	40°
User Speed	50 km/h

Fig. 7. Illustration de l'amplitude et de la phase du signal reçu générés avec le modèle de Prieto

II- Modèles de canal de propagation choisis - DLR

- ❖ Le modèle du DLR est **Wideband** : le délai temporel entre le signal direct et chaque écho du au multi-trajet est modélisé
- ❖ La réponse impulsionnelle du canal s'écrit donc :

$$h(t, \tau) = c_{direct}(t)\delta(\tau - \tau_{direct}(t)) + \sum_{l=1}^L c_l(t)\delta(\tau - \tau_l(t))$$

- h est la réponse impulsionnelle du canal
- c_{direct} est l'enveloppe complexe du canal de la composante 'signal direct'
- τ_{direct} est le temps de propagation
- L est le nombre d'échos
- c_l est l'enveloppe complexe du canal associée à l'écho l
- τ_l est le délai entre la composante 'signal direct' et le l -ième écho

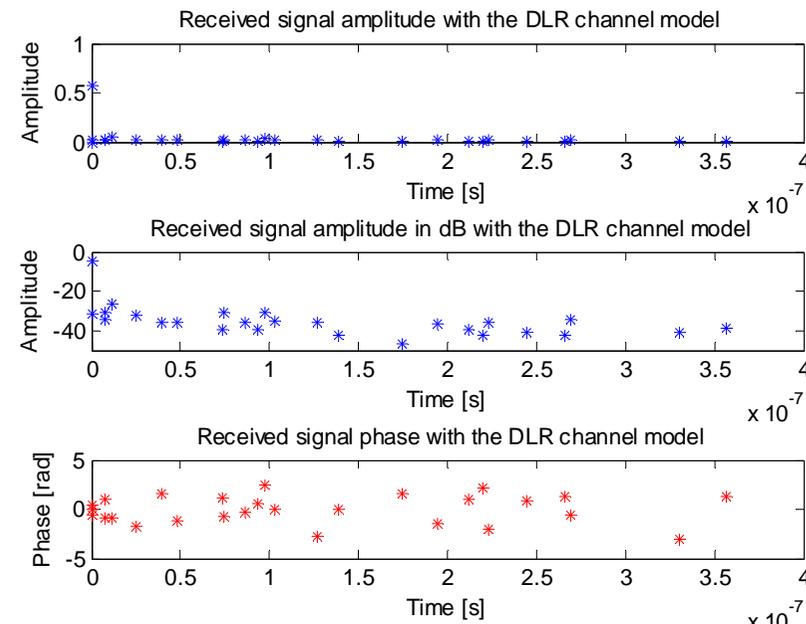


Fig. 7. Exemple du réponse impulsionnelle du modèle du DLR, avec 45° d'azimuth

II- Modèles de canal de propagation choisis - DLR

❖ Le modèle est basé sur une scène générée artificiellement, avec des obstacles potentiels :

- Des immeubles
- Des arbres
- Des lampadaires

❖ Les obstacles sont générés aléatoirement

❖ L'impact de chaque obstacle est (en grande partie) calculé de manière déterministe, par méthode de lancer de rayon et techniques géométriques

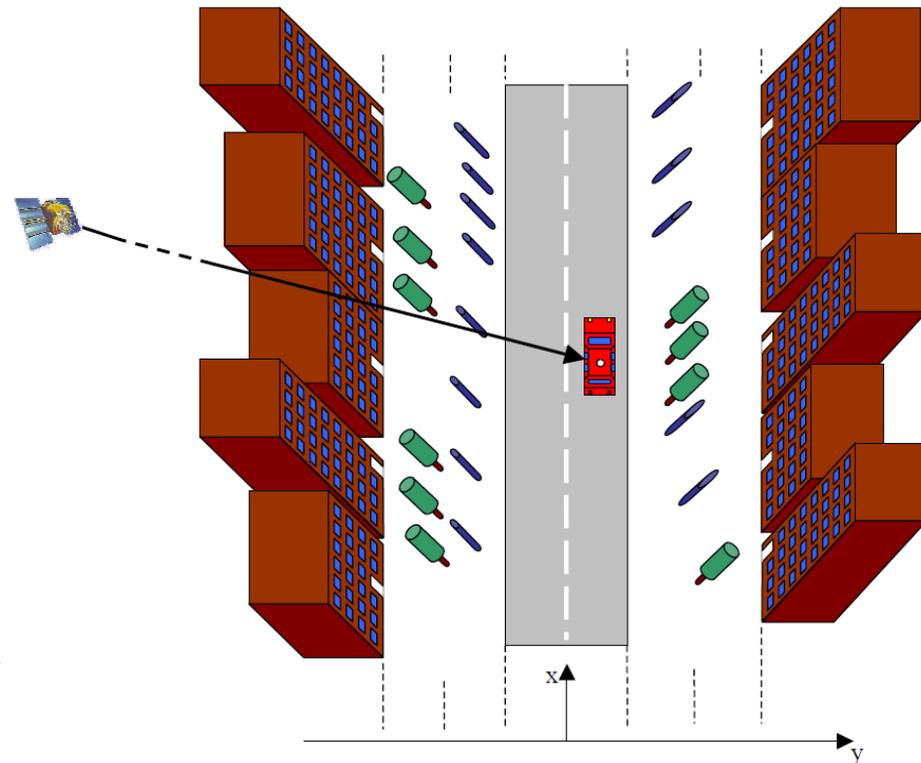


Fig. 8. Exemple de scène générée artificiellement avec le modèle du DLR

Plan

- I. Simulateur SiGMeP
- II. Modèles de canal de propagation choisis
- III. Méthodologie mise en place pour calculer les performances de démodulation**
- IV. Performances de démodulation obtenues avec SiGMeP
- V. Conclusion

III- Méthodologie pour le calcul des performances (1/2)

- ❖ La **méthode classique** utilisée en GNSS consiste à calculer :
 - ❑ La probabilité d'erreur du message de navigation (BER, WER ou CEDER) en **fonction du C/N_0 reçu**
- ❖ Dans un canal de propagation dynamique, la puissance du signal reçu est fluctuante à cause de :
 - ❑ L'utilisateur qui est en mouvement
 - ❑ L'environnement qui évolue au cours du temps
- ❖ En conséquence, le **C/N_0 reçu fluctue considérablement** pendant le temps considéré : cela n'a pas de sens de représenter les performances de démodulation comme une fonction du C/N_0 reçu
- ❖ Cependant, la puissance du signal direct C_{direct} reste constante sur une durée conséquente
- ❖ C'est pourquoi nous représentons les performances de démodulation en environnement urbain, comme une **fonction du C_{direct}/N_0**

III- Méthodologie pour le calcul des performances (2/2)

- ❖ De plus, d'un point de vue opérationnel, l'utilisateur ne voit qu'un petit éventail de valeurs de C_{LOS} / N_0

- ❖ En fait en GNSS, le C_{LOS} / N_0 dépend de :
 - ❑ La puissance du signal reçu, qui dépend elle-même du diagramme de gain de l'antenne et de l'élévation du satellite
 - ❑ La plateforme de l'utilisateur (tête HF)

- ❖ Donc pour une plateforme utilisatrice donnée, cela a du sens de représenter les performances de démodulation en environnement urbain, comme une fonction de l'élévation du satellite

- ❖ Cette dernière étape sera présentée lors de prochains travaux

Plan

- I. Simulateur SiGMeP
- II. Modèles de canal de propagation choisis
- III. Méthodologie mise en place pour calculer les performances de démodulation
- IV. Performances de démodulation obtenues avec SiGMeP**
- V. Conclusion

IV- Performances obtenues avec SiGMeP

❖ Conditions de simulation :

Paramètres	Modèle de canal		
	AWGN	Prieto	DLR
Fréquence d'échantillonnage	20 kHz	20 kHz	20 kHz
Type d'environnement	Urbain	Urbain	Urbain
Vitesse utilisateur	50 km/h	50 km/h	50 km/h
Élévation du satellite	-	40°	40°
Azimuth du satellite	-	Moyenne stat	0°- 45°- 90°
Estimation de la phase	❖ Compensation parfaite par la phase induite par le canal	❖ Compensation parfaite par la phase induite par le canal <u>ou</u> ❖ Estimation de la phase totale par PLL	❖ Compensation par la phase induite par le canal résultante de la somme de chaque écho de multi-trajet pour un échantillon

Fig. 10. Conditions de simulation pour les performances de démodulation présentées, obtenues avec SiGMeP

IV- Performances obtenues avec SiGMeP

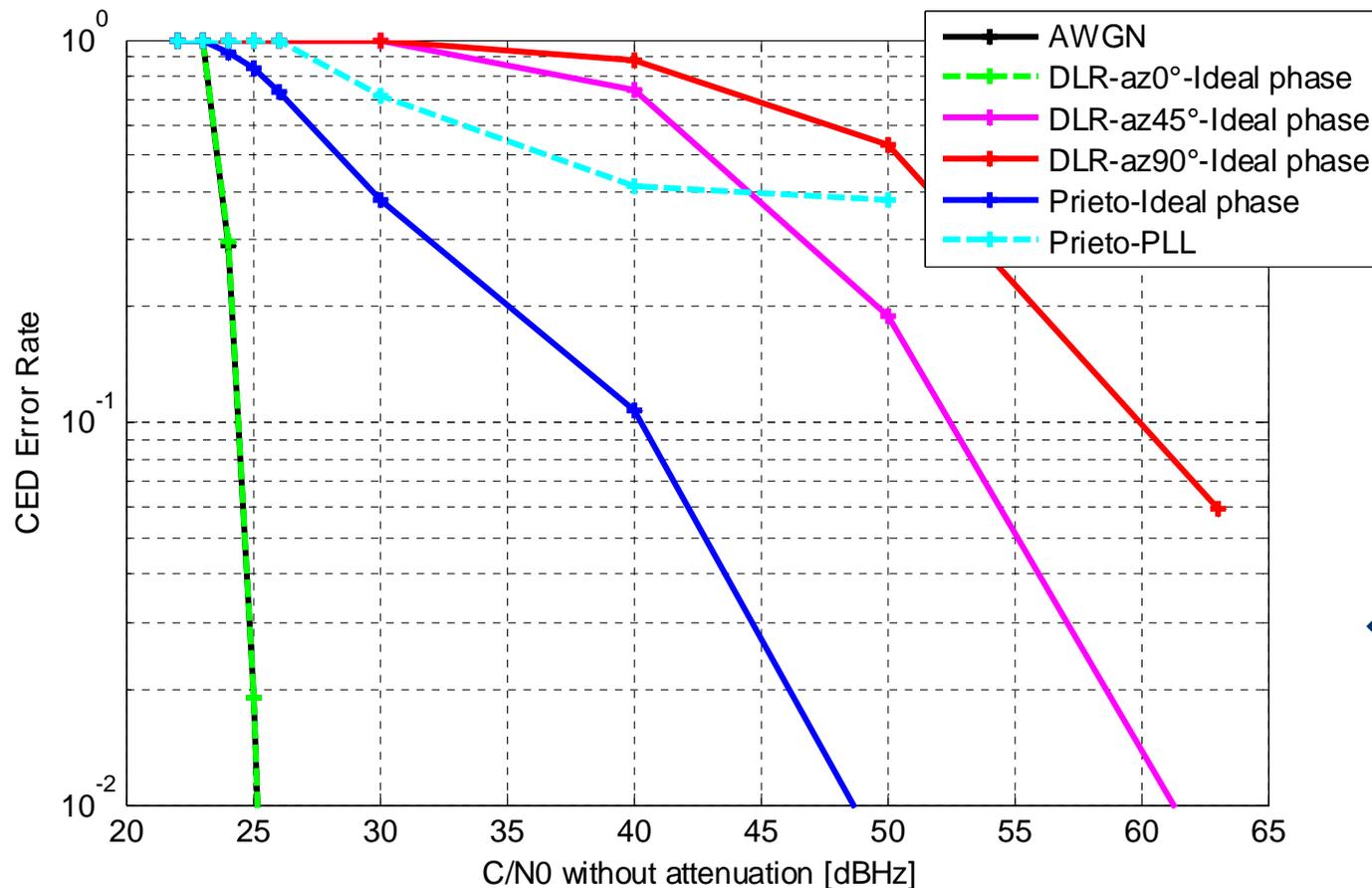


Fig. 11. Performances de démodulation de GPS L1C obtenues avec SiGMeP, avec les modèles de canal AWGN, Prieto et DLR

❖ Les résultats obtenus avec les modèles du DLR et de Prieto ne peuvent pas être comparés dans l'état : plus d'azimuth doivent être générés pour pouvoir faire une moyenne

❖ La courbe obtenue avec le modèle de Prieto avec une estimation de la phase par PLL présente un palier : il semble difficile de démoduler

IV- Performances obtenues avec SiGMeP

Particularité du contexte GNSS :

- ❖ Une fois que le récepteur a réussi à démoduler au moins une fois les CED, il est capable de calculer la position de l'utilisateur pendant un certain temps
 - ❑ Les CED restent les mêmes pendant plusieurs heures
- ❖ Ainsi, il n'est pas nécessaire de démoduler avec succès tous les messages consécutifs
- ❖ C'est pourquoi l'approche classique utilisée en Télécommunications ne semble pas adaptée au signal GNSS en environnement urbain, puisqu'il consiste à calculer la probabilité d'erreur de chaque message reçu
- ❖ Nous proposons donc une nouvelle méthode plus adaptée au contexte GNSS en environnement urbain

IV- Performances obtenues avec SiGMeP - Avancées

Nouvelle méthode :

❖ Puisqu'il n'est pas nécessaire de démoduler chaque message reçu, nous décidons de diviser les messages reçus en 2 catégories :

- ❑ Les messages qui ont une forte probabilité d'être démodulés avec succès
- ❑ Les messages qui ont une faible probabilité d'être démodulés avec succès

❖ Ces 2 catégories sont associées à des conditions particulières de réception du signal

❖ Un premier pas de cette nouvelle méthode appliquée avec le modèle de Prieto est de choisir comme conditions particulières de réception :

- ❑ Le canal est toujours dans l'état GOOD
- ❑ Le canal n'est pas toujours dans l'état GOOD

❖ Les performances de démodulation sont ensuite calculées dans la condition particulière de réception qui induit une faible probabilité d'erreur, avec des résultats statistiques sur les fréquences d'occurrence de cette condition particulière de réception

IV- Performances obtenues avec SiGMeP - Avancées

Elévation	40°	80°
Statistiques		
Pourcentage de messages qui sont entièrement en état GOOD	3,79 %	19,7 %
	❖ 15 messages over 400 messages	❖ 79 messages over 400 messages
	❖ 4,5 min over 2h	❖ 23,7 min over 2h
Durée moyenne entre 2 messages entièrement en état GOOD	❖ 25 messages	❖ 4 messages
	❖ 7,5 min	❖ 1,2 min

- ❖ En 2 heures, ce qui correspond au temps de rafraichissement des CED, 15 messages sont entièrement en état GOOD pour une élévation de 40°
- ❖ Pendant chacun de ces 15 messages :

- ❑ CEDER = 10^{-2} pour $\frac{C_{LOS}}{N_0} = 25,2 \text{ dBHz}$ (contre $45,8 \text{ dBHz}$ avec l'approche classique) pour une estimation de phase idéale
- ❑ CEDER = 10^{-2} pour $\frac{C_{LOS}}{N_0} = 25,5 \text{ dBHz}$ (contre impossible avec une approche classique) pour une poursuite de phase par PLL

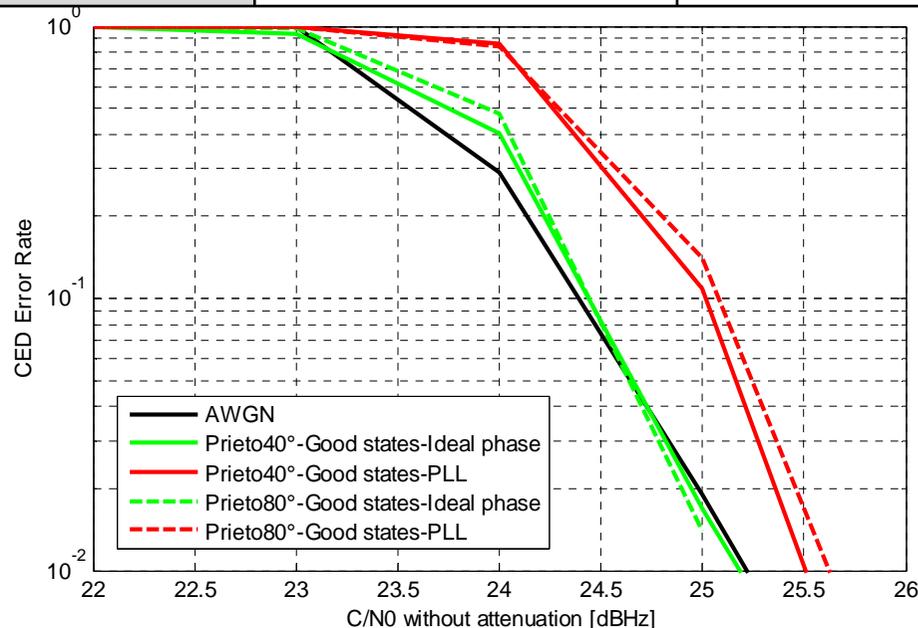


Fig. 12. Performances de démodulation de GPS L1C obtenues avec SiGMeP avec le modèle de Prieto avec la nouvelle méthode

Plan

- I. Simulateur SiGMeP
- II. Modèles de canal de propagation choisis
- III. Méthodologie mise en place pour calculer les performances de démodulation
- IV. Performances de démodulation obtenues avec SiGMeP
- V. Conclusion

V- Conclusion

- ❖ L'outil de simulation SiGMeP a été développé :
 - ❑ Capable de calculer les performances de démodulation des signaux GNSS en milieu urbain
- ❖ Une nouvelle façon de représenter les performances de démodulation en milieu urbain a été proposée :
 - ❑ La probabilité d'erreur du message de navigation est calculée comme une fonction du C_{LOS} / N_0
 - ❑ Les performances de démodulation seront ensuite présentées comme une fonction de l'élévation du satellite
- ❖ Une nouvelle méthode pour calculer les performances de démodulation a été proposée :
 - ❑ Calculer les performances de démodulation dans une condition particulière de réception du signal qui induit une forte probabilité de succès dans la démodulation
 - ❑ Calculer en plus les probabilités d'occurrence de cette condition particulière de réception

Merci

roudier@recherche.enac.fr

Publications :

➤ *'GNSS Signal Demodulation Performance in Urban Environments'*

6th European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Décembre 2013, Neubiberg, Allemagne

➤ *'New GNSS Signals Demodulation Performance in Urban Environments'*

Institute Of Navigation ITM, Janvier 2014, San Diego, Californie

➤ *'Optimizing GNSS Navigation Data Message Decoding in Urban Environment'*

Institute Of Navigation PLANS, Mai 2014, Monterey, Californie