

Système M2M/IoT par satellite

Hybridation d'un réseau NB-IoT via une constellation LEO

Sylvain Cluzel

Jeudi 7 mars 2019

Daniela Dragomirescu

José Radzik

Mathieu Dervin

Cédric Baudoin

Sonia Cazalens

Jean-Baptiste Dupé

Directrice de thèse
Co-directeur de thèse

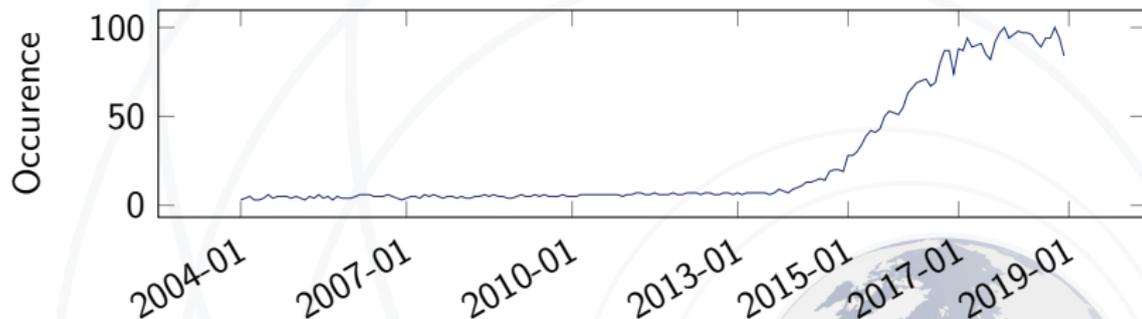
Thales Alenia Space

Thales Alenia Space

CNES

CNES

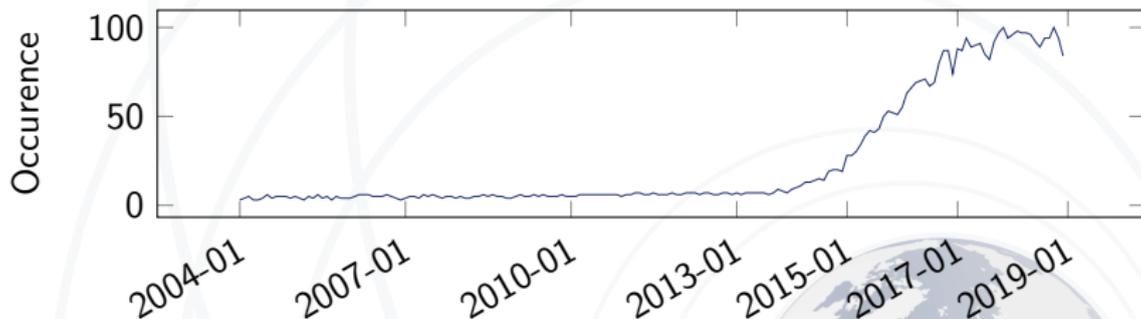
IoT – Internet of Things – Internet des objets



Analyse du mot "IoT" par Google Trends.



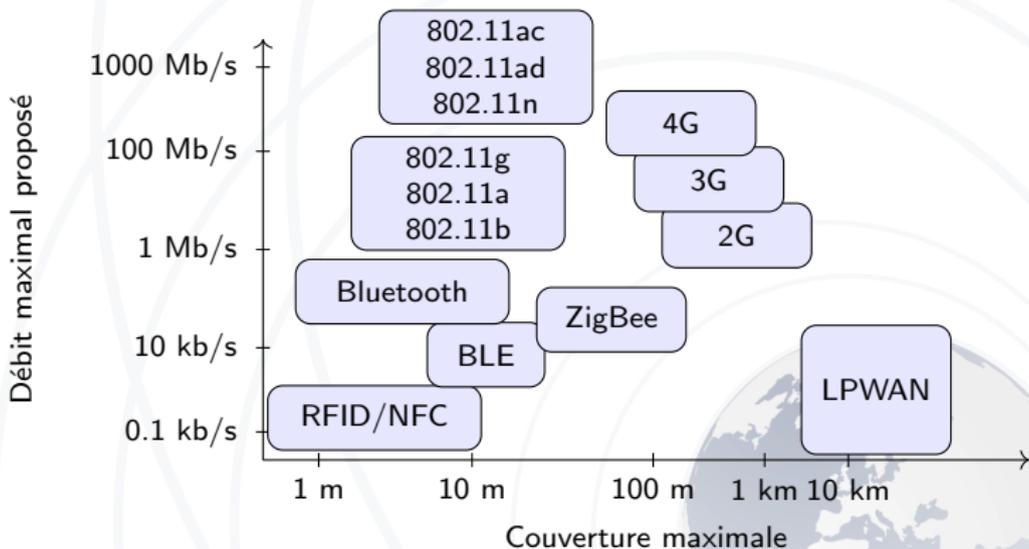
IoT – Internet of Things – Internet des objets



Analyse du mot "IoT" par Google Trends.

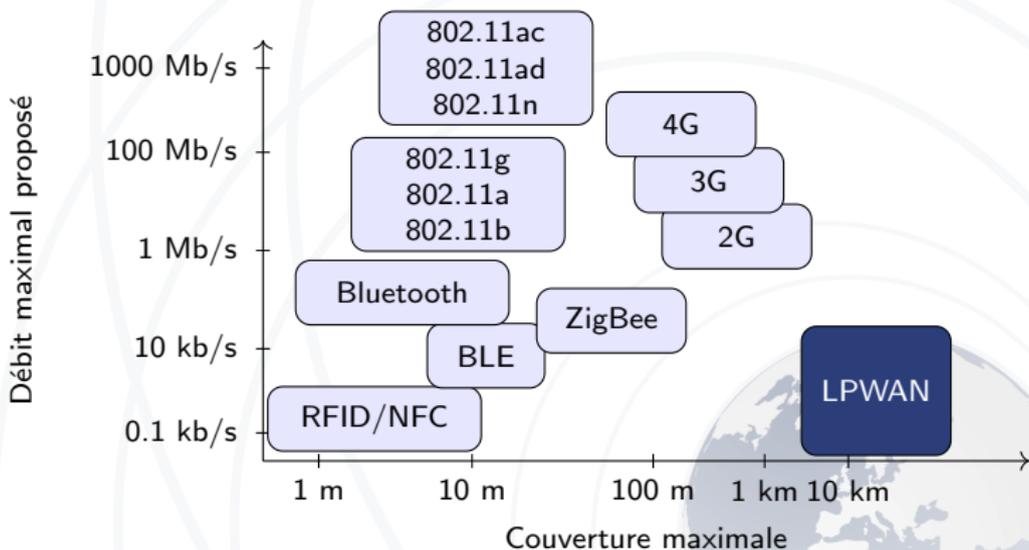
Les objets connectés sont reliés à Internet

Contexte et problématique — IoT



Lien entre technologies terrestres, couverture, et débit maximal.

Contexte et problématique — IoT



Lien entre technologies terrestres, couverture, et débit maximal.

LPWAN

Réseau sans fil à faible consommation énergétique à grande échelle

Caractéristiques de ces réseaux :

- ▶ Autonomie des terminaux d'environ 10 ans avec 2 piles AA
- ▶ Couverture > 10 km
- ▶ Terminaux à bas cout (quelques euros), potentiellement mobiles
- ▶ Faible débit (< 1 kbit/s), communications sporadiques

Plusieurs solutions LPWAN existent :

- ▶ LoRa
- ▶ Sigfox
- ▶ RMPA
- ▶ NB-IoT



Carte de couverture NB-IoT

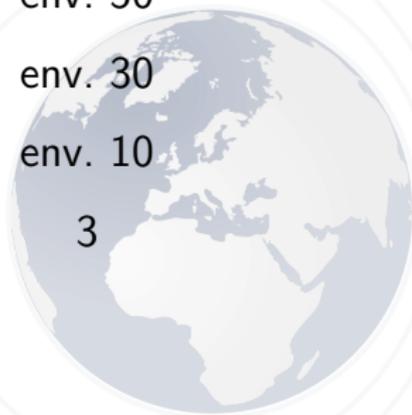


Couverture NB-IoT

Intérêt du satellite : la couverture globale

Nombre de satellites nécessaires pour permettre à une constellation de couvrir la planète :

	Altitude	Nb de satellites
LEO	800 km	env. 50
LEO	1200 km	env. 30
MEO	10000 km	env. 10
GEO	36000 km	3



Peut-on utiliser des satellites
pour réaliser une extension de couverture
d'un réseau **NB-IoT** ?



Peut-on utiliser des satellites
pour réaliser une extension de couverture
d'un réseau **NB-IoT** ?

- ▶ Comment ?
 - ▶ Proposer un système.
 - ▶ Vérifier sa faisabilité.
- ▶ Quelles seraient les performances limites en terme de nombre d'utilisateurs ?



Plan de la présentation

1. Système proposé
2. Caractérisation du lien satellite et du trafic
3. Traitement du signal reçu
4. Performances du système complet

Conclusions et perspectives



Système proposé

Quelques éléments sur NB-IoT

Description du système proposé

Problématiques à aborder



NB-IoT — Généralités

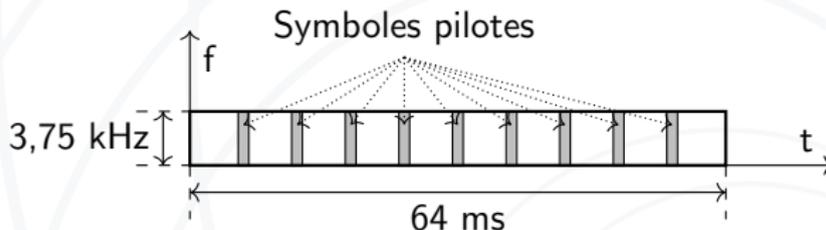
- ▶ Proposé par 3GPP en aout 2016 (*Release 13*) dans le cadre de LTE
- ▶ Synchronisation avec un nœud central (*Gateway*)
- ▶ Fonctionnement bidirectionnel
- ▶ Allocation de ressources et gestion du modcod en fonction de la qualité du lien
- ▶ Accusés de réception



NB-LoT — Différences avec LTE

	LTE	NB-LoT
Fonctionnement multiporteuse	oui	oui
Fonctionnement monoporteuse	non	oui
Largeur de la porteuse la plus fine	1,4 MHz	180 kHz
Bande de fréquence utilisée	1,4 MHz	3,75 kHz
Utilisation de répétitions	non	oui

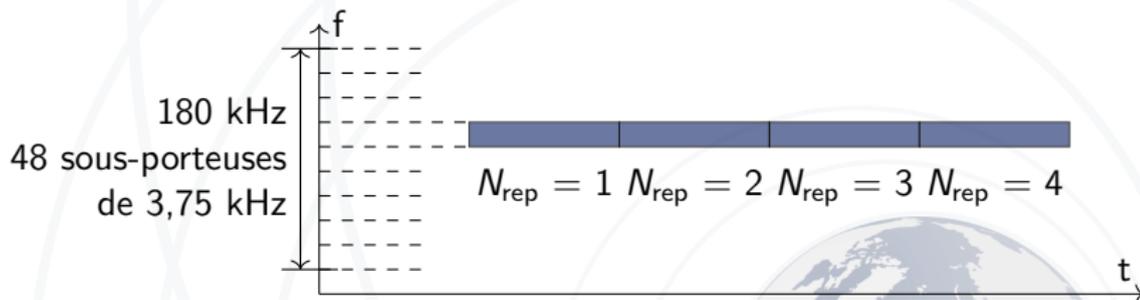
NB-IoT — Caractéristiques importantes



- ▶ 104 bits utiles + CRC en fin de message
- ▶ Modulation $\pi/4$ -QPSK, turbocodage 1/3
- ▶ Une répétition = 64 ms
- ▶ Séquence connue de symboles pilotes (un symbole toutes les 2 ms)



NB-LoT — Caractéristiques importantes



- ▶ 2^n répétitions continues dans le temps (entre 1 et 128).
- ▶ Chaque répétition contient le même message.

Ces transmissions suivent le standard NB-LoT.

Contraintes à prendre en compte

Système contraint par :

- ▶ Un bilan de liaison assez défavorable
- ▶ Des terminaux à bas cout
- ▶ Objectif de réduction des temps d'émission et de réception



Contraintes à prendre en compte

Système contraint par :

- ▶ Un bilan de liaison assez défavorable
- ▶ Des terminaux à bas cout
- ▶ Objectif de réduction des temps d'émission et de réception

Pas de contrainte sur :

- ▶ Le délai de réception
- ▶ L'altitude du satellite
- ▶ Le lieu de traitement de l'information



Caractéristiques du système

- ▶ Constellation de satellites LEO (*Low Earth Orbit*, 800 km)
- ▶ Couverture de la planète entière à tout instant
- ▶ Les terminaux suivent les spécifications et fréquences NB-IoT
- ▶ Lien unidirectionnel direct vers le satellite
- ▶ Tous les traitements sont effectués au sol

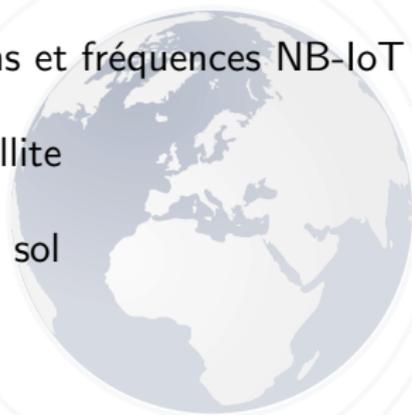
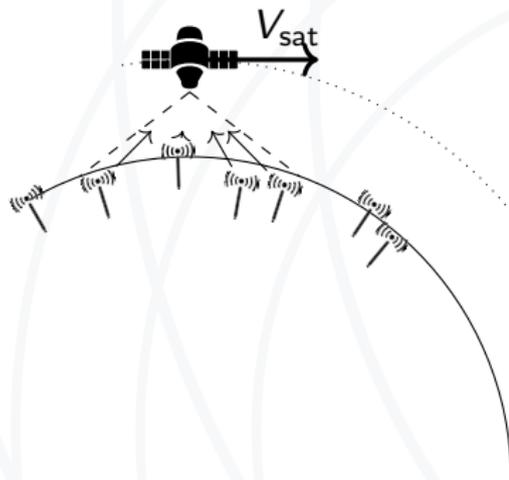


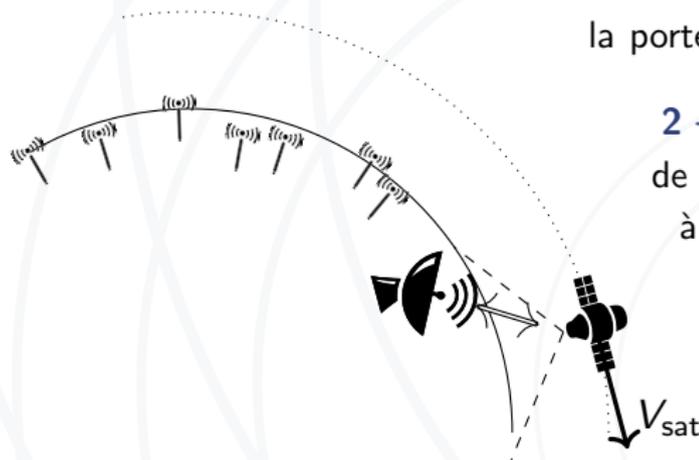
Schéma du système



1 – Numérisation de la porteuse en continu

Principe de fonctionnement du système.

Schéma du système

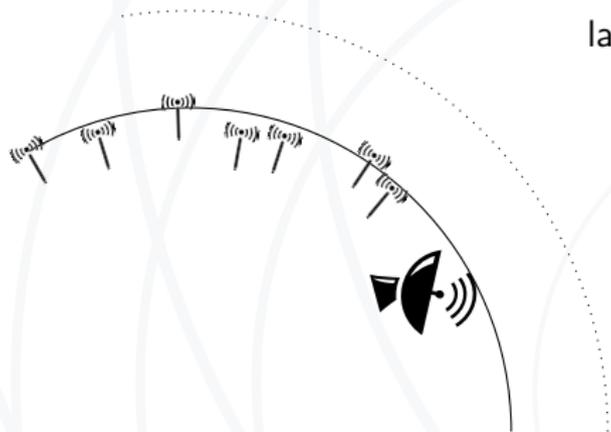


1 – Numérisation de la porteuse en continu

2 – Transmission de la numérisation à la station sol

Principe de fonctionnement du système.

Schéma du système



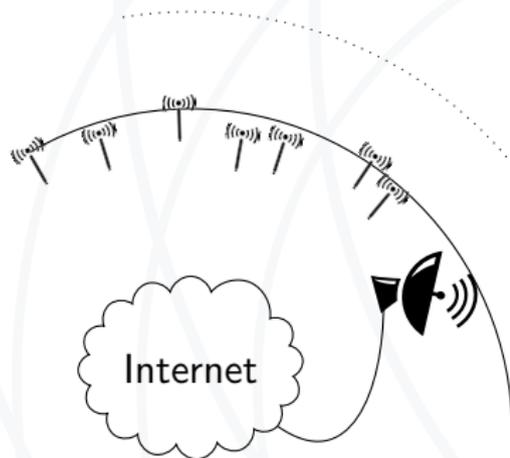
1 – Numérisation de la porteuse en continu

2 – Transmission de la numérisation à la station sol

3 – Analyse et traitement des données numérisées au sol

Principe de fonctionnement du système.

Schéma du système



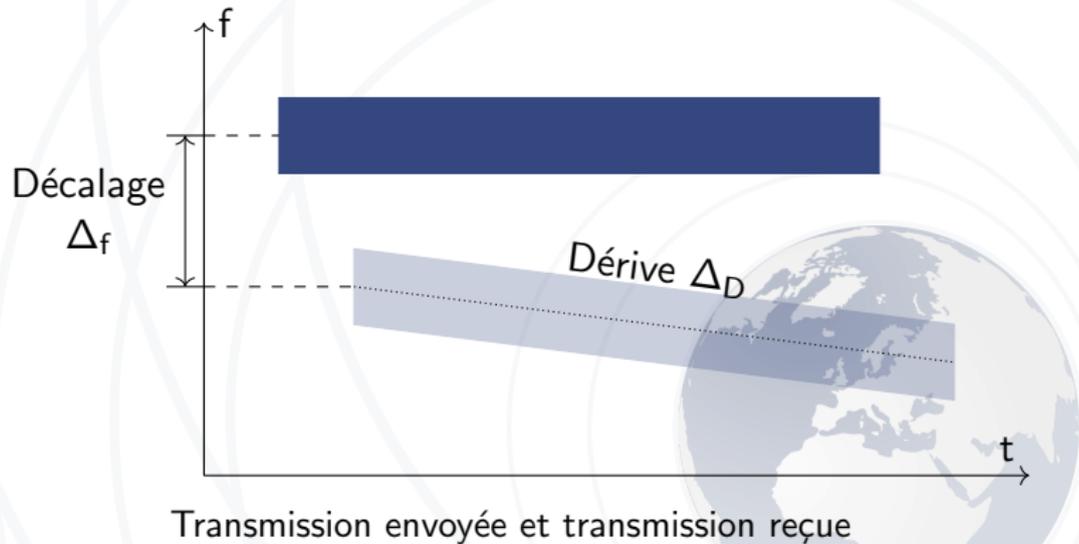
1 – Numérisation de la porteuse en continu

2 – Transmission de la numérisation à la station sol

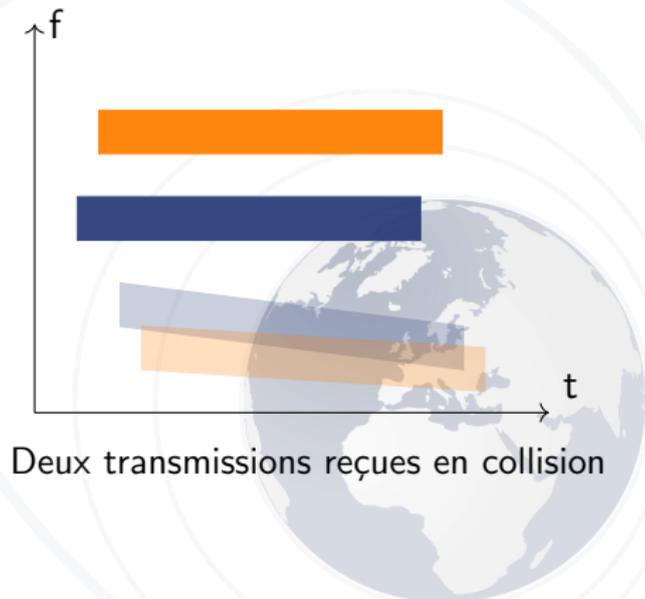
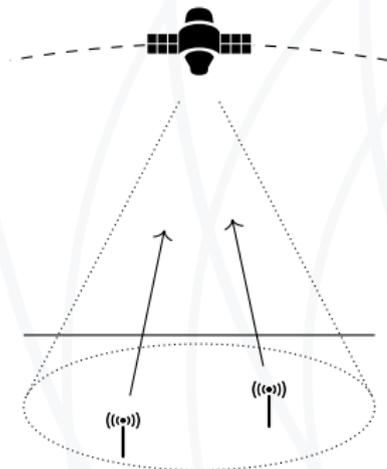
3 – Analyse et traitement des données numérisées au sol

Principe de fonctionnement du système.

Émission d'une transmission



Émission de deux transmissions



Publications « système » : LPWAN et satellite

- ▶ En réponse à des problématiques de réseau
 - ▶ Probabilité de collision et taux d'erreur paquet sous différentes hypothèses de schéma d'accès

M. ANTEUR *et al*, "Modeling and performance analysis of ultra narrow band system for M2M", *ASMS/SPSC* 2016
 - ▶ Impact d'une constellation discontinue sur le trafic

H. CHELLE *et al*, "Modelling discontinuous LEO satellite constellations : impact on the machine-to-machine traffic and performance evaluation", *ASMS/SPSC* 2016
- ▶ Sigfox par satellite

V. DESLANDES, "MUSTANG : The Ultimate Integrated System for IoT & M2M Communications", *ASMS/SPSC* 2016
- ▶ Communiqués de presse : Sigfox et LoRa par satellite

Traduction de la problématique

- ▶ Modéliser les transmissions reçues par le satellite
- ▶ Proposer un récepteur fonctionnant à fort niveau de bruit
- ▶ Modéliser l'impact des collisions



Lien montant et trafic

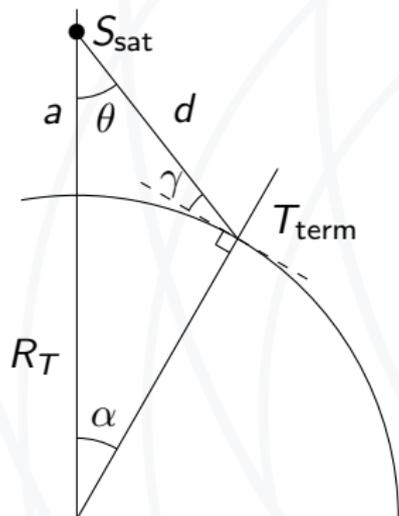
Bilan de liaison

Interférences intrasystèmes

Charge du système



Bilan de liaison pour un terminal



$$\frac{E_s}{N_0}(\alpha) = \frac{\text{PIRE} \cdot (G/T)}{k_B \cdot R_s \cdot \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot L_{\text{autres}} \cdot d(\alpha)^2}$$

PIRE
(G/T)

k_B

R_s

λ

Puissance Isotrope Rayonnée Équiv.

Facteur de gain du satellite

Constante de Boltzmann

Rythme symbole

Longueur d'onde

Bilan de liaison pour un terminal

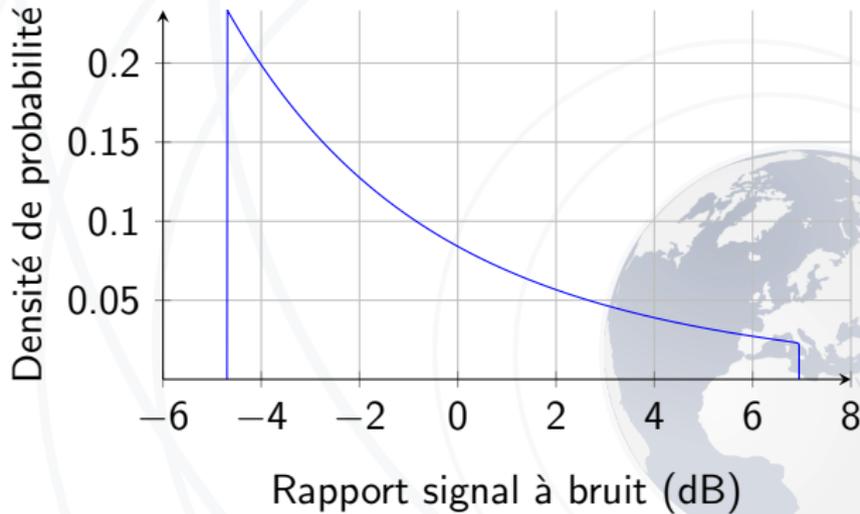
Paramètres du bilan de liaison :

Fréquence centrale	0,950	GHz
Puissance d'émission	23	dBm
PIRE	-10,2	dBW
Débit symbole R_s	3,5	kBaud
Altitude	800	km
Élévation min du satellite	12,9	°
θ_{3dB} du satellite	120	°
(G/T) du satellite	-23,9	dB

$$-5 \text{ dB} < \frac{E_s}{N_0}(\alpha) < 7 \text{ dB}$$

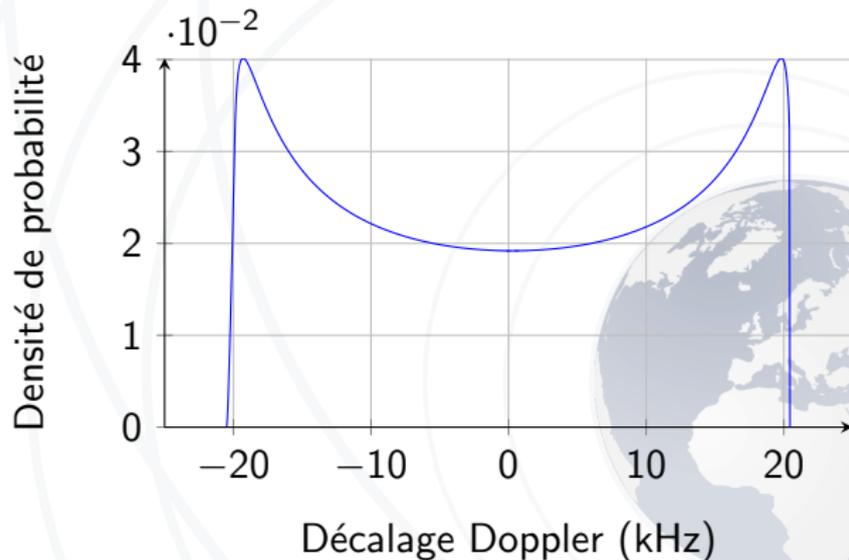
Bilan de liaison

En supposant une répartition uniforme des utilisateurs, on calcule :



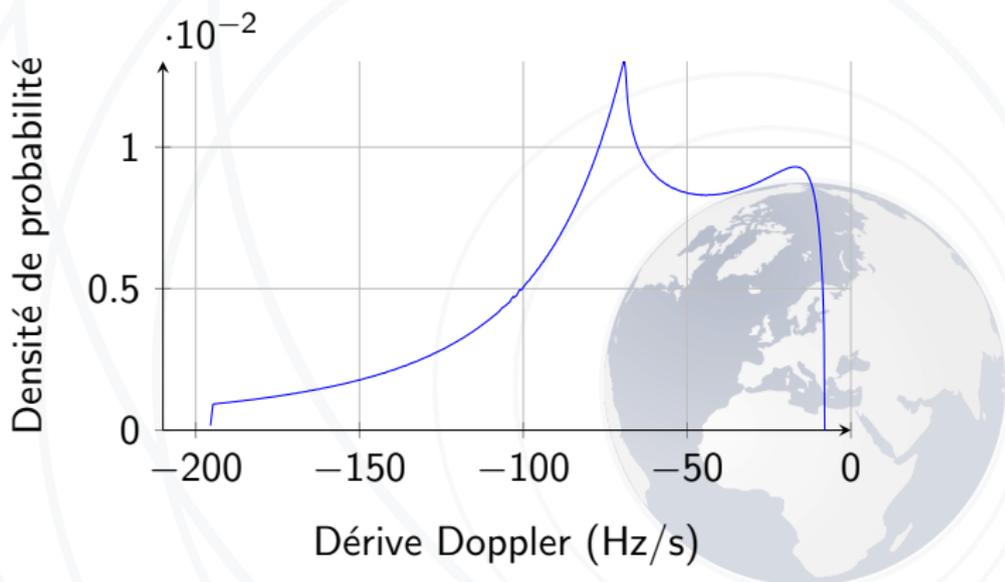
Bilan de liaison

De même, par simulation :



Bilan de liaison

De même, par simulation :



NB-IoT — un standard terrestre

- ▶ Synchronisation avec un nœud central
- ▶ Allocation de ressources
- ▶ Gestion du modcod en fonction de la qualité du lien
- ▶ Accusés de réception



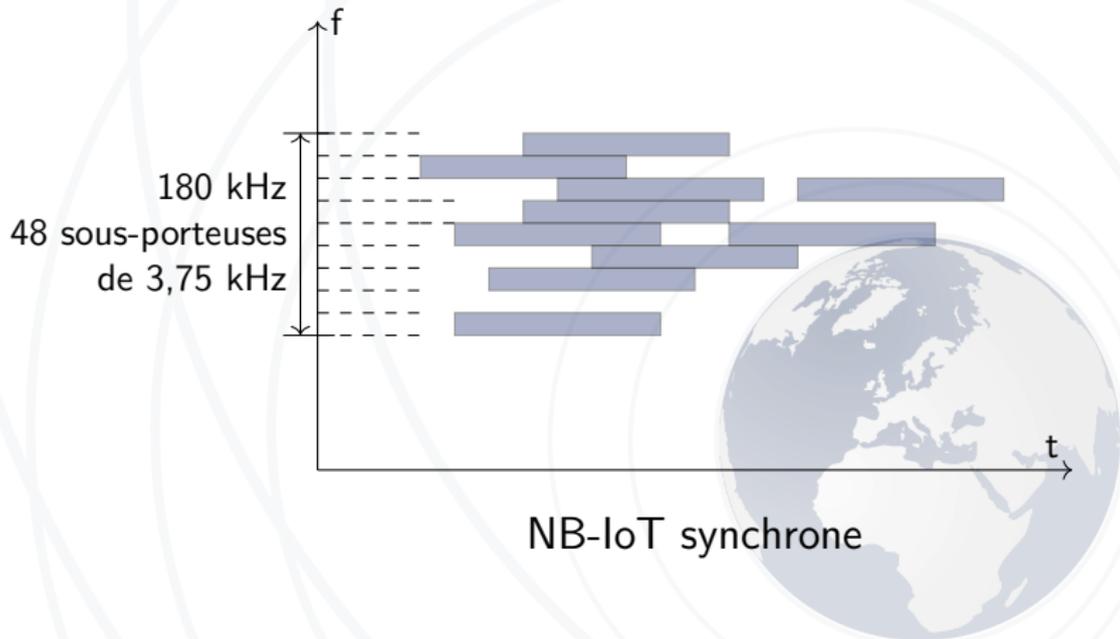
NB-IoT — un standard terrestre

- ▶ Synchronisation avec un nœud central
- ▶ Allocation de ressources
- ▶ Gestion du modcod en fonction de la qualité du lien
- ▶ Accusés de réception

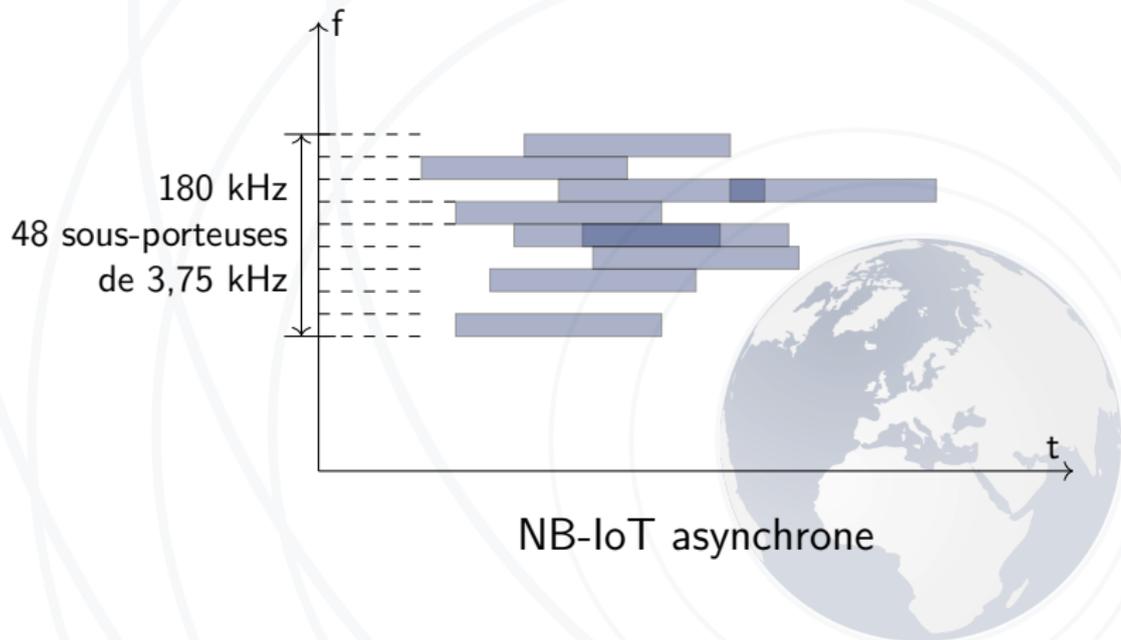
Indisponible dans notre système



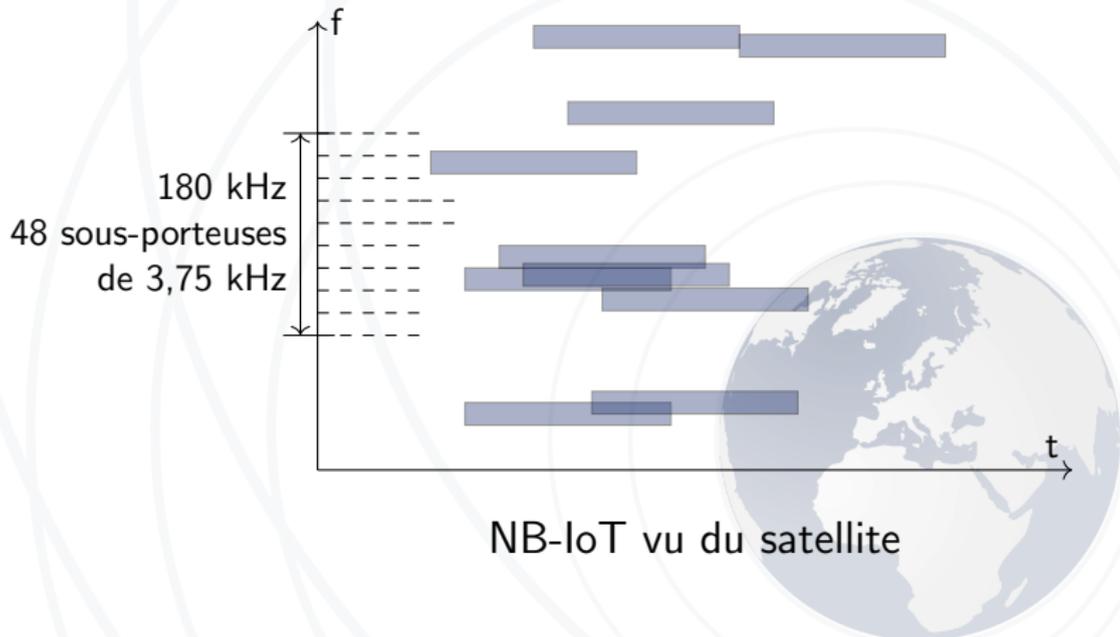
NB-LoT et bilan de liaison satellite



NB-LoT et bilan de liaison satellite

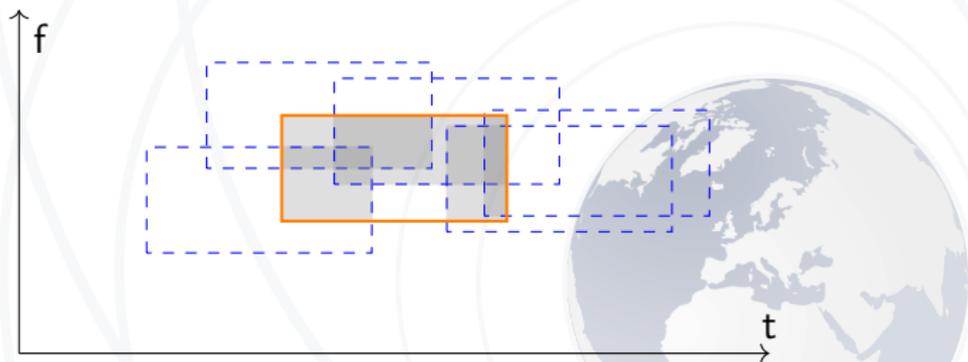


NB-IoT et bilan de liaison satellite



Un schéma d'accès Aloha Temps-Fréquence

- ▶ Décalage Doppler important
- ▶ Absence de synchronisation temporelle



Comment caractériser l'occupation du canal ?

Charge du système — Utilité

On définit une charge (taux de contention) pour lier :

- ▶ le nombre de terminaux au sol
- ▶ leur profil de trafic
- ▶ la proportion de collision de message

$$\rho = \frac{\text{Nombre de terminaux en transmission}}{\text{Nombre de canaux disponibles}}$$



Charge du système — Formulation

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{\text{BP}}{\text{BP} + 2\Delta_{f,\text{max}}} \cdot \frac{1}{48} \cdot \frac{N_m T_{\text{message}}}{24 \cdot 3600} \cdot d_t \cdot \pi (\alpha_{\text{max}} R_{\text{Terre}})^2$$

Élargissement du canal dû au décalage Doppler

Nombre de sous-porteuses

Proportion d'occupation d'une sous-porteuse

Nombre de terminaux en vue du satellite



Charge du système — Ordre de grandeur

- ▶ Pour un satellite à une altitude de 800 km :
 - ▶ disque de 1900 km de rayon en visibilité du satellite
 - ▶ 11 millions de km²
 - ▶ France, Allemagne, Benelux, Suisse, Autriche
- ▶ une transmission d'une seconde toutes les 12 heures
- ▶ $d_t = 0,22$ terminaux par km²

La charge est de 1.



Récepteur

Problématique, état de l'art et solution proposée

Étape d'estimation fine de la fréquence de la transmission

Impact des interférences



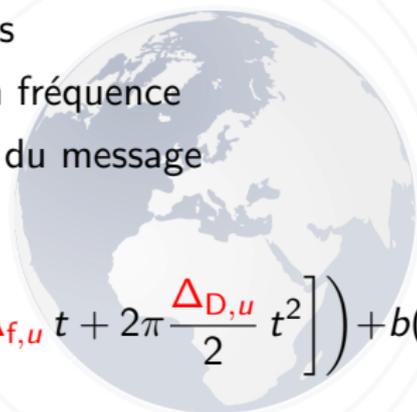
Objectif et contraintes

Objectif :

- ▶ Détecter, se synchroniser et démoduler une transmission

Contexte :

- ▶ Rapport signal à bruit peu favorable
- ▶ Décalage et dérive Doppler importants
- ▶ Démodulation aveugle en temps et en fréquence
- ▶ Symboles pilotes répartis tout le long du message



$$y_{\text{sat}}(t) = A_u \cdot y_u(t - \tau_u) \cdot \exp \left(i \left[\phi_{0,u} + 2\pi \Delta_{f,u} t + 2\pi \frac{\Delta_{D,u}}{2} t^2 \right] \right) + b(n)$$

État de l'art : estimation de fréquence et de dérive

Méthodes d'estimation existantes :

- ▶ Optimal, mais couteux : critère MMSE et descente de gradient.
T. ABATZOGLOU, "Fast maximum likelihood joint estimation of frequency and frequency rate", *ICASSP* 1986
- ▶ Moins couteux mais nécessite un bon rapport signal à bruit (> 0 dB)
M. MORELLI, "Doppler-rate estimation for burst digital transmission", *IEEE Trans. of Comm.* 2002
L. TIAN *et al*, "An algorithm for Doppler shift and Doppler rate estimation based on pilot symbols", *CECNet* 2002

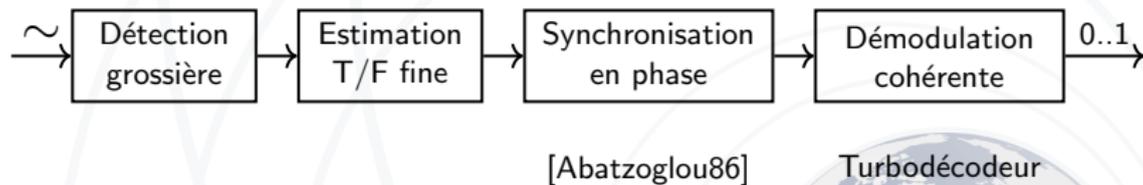
Idée : approximer la fréquence et la dérive de manière robuste, puis utiliser l'algorithme optimal.

Prétraitement

	Plage de Δ_f	Plage de Δ_D
Plage initiale	220 000 Hz	200 Hz/s
Objectif du prétraitement	10 Hz	10 Hz/s

Synchronisation en phase [Abatzoglou86]

Vue d'ensemble de la solution proposée



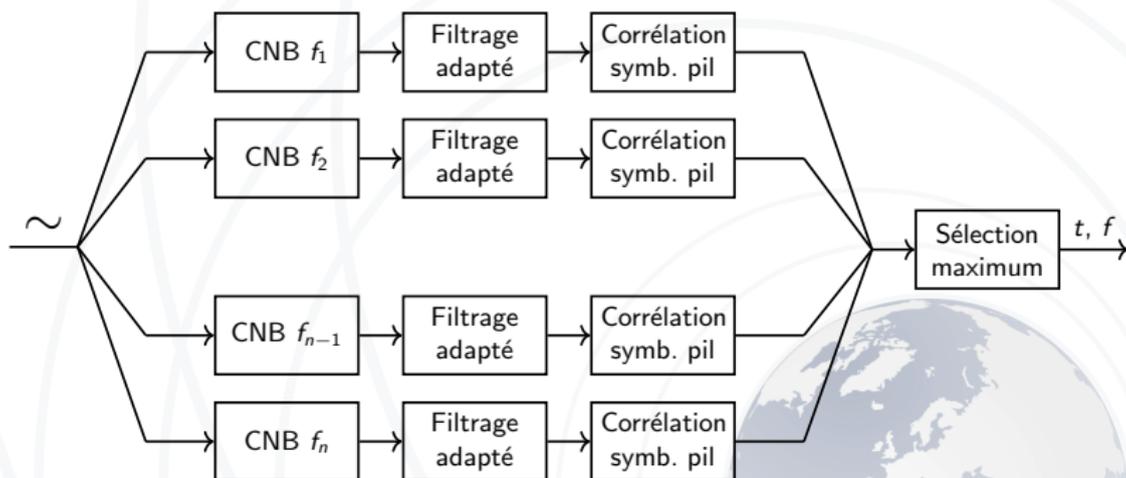
Stratégie de traitement en réception

Après la détection grossière

	Plage de Δ_f	Plage de Δ_D
Plage initiale	220 000 Hz	200 Hz/s
Après la détection de puissance	200 Hz	200 Hz/s
Objectif du prétraitement	10 Hz	10 Hz/s

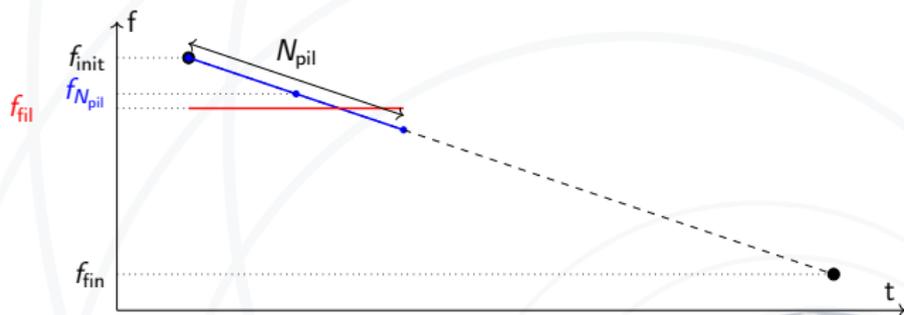
Synchronisation en phase [Abatzoglou86]

Banc de filtres corrélateurs



Banc de filtres de l'étape d'estimation temps-fréquence fine. CNB f_i représente le convertisseur numérique en bande de base centré autour de la fréquence f_i .

Un filtre du banc



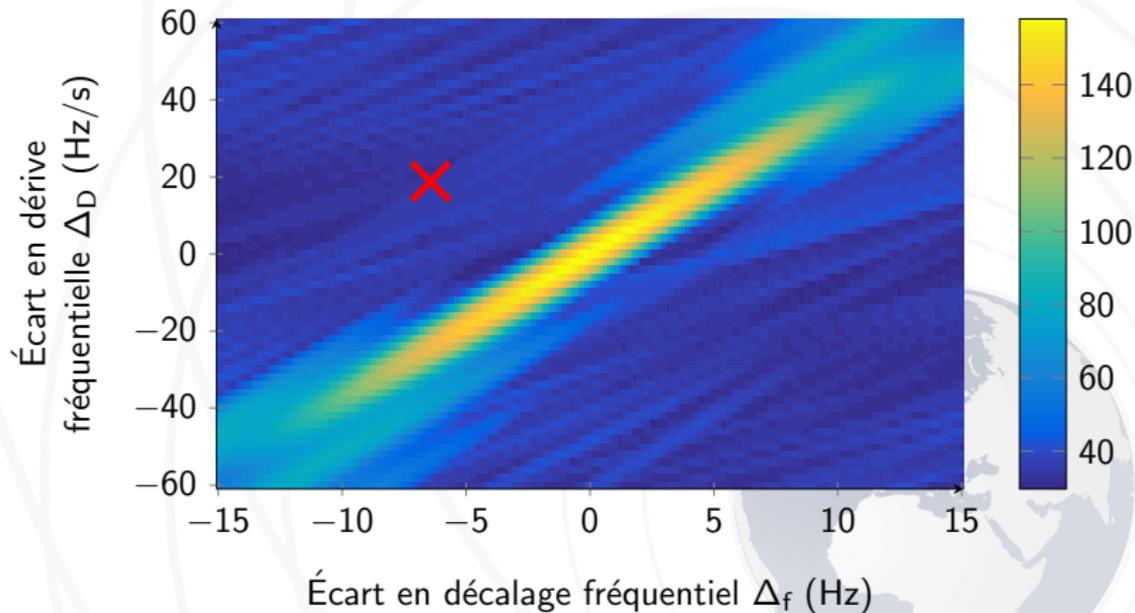
Estimation de la fréquence initiale d'un message.

Pour chaque filtre, écart Δ_f et Δ_D entre le corrélateur et le message reçu.

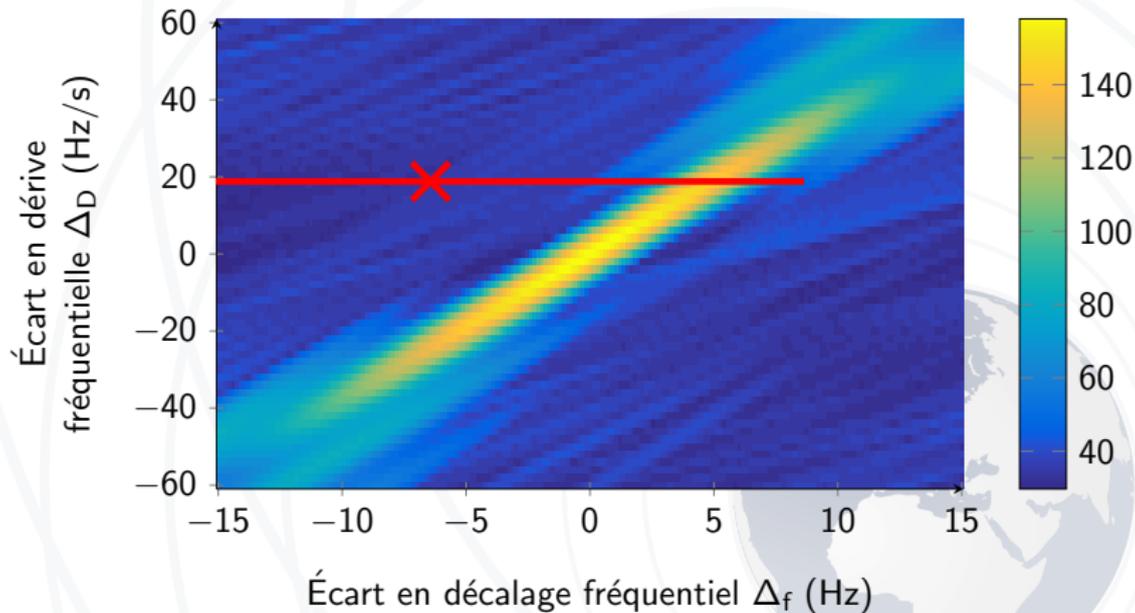
Le maximum que l'on peut espérer mesurer :

$$f(\Delta_f, \Delta_D) = \left| \sum_{n=0}^{N_{pil}-1} e^{2i\pi(\Delta_f n T_{pil} + \frac{\Delta_D}{2} (n T_{pil})^2)} \right|$$

Fonction d'ambigüité

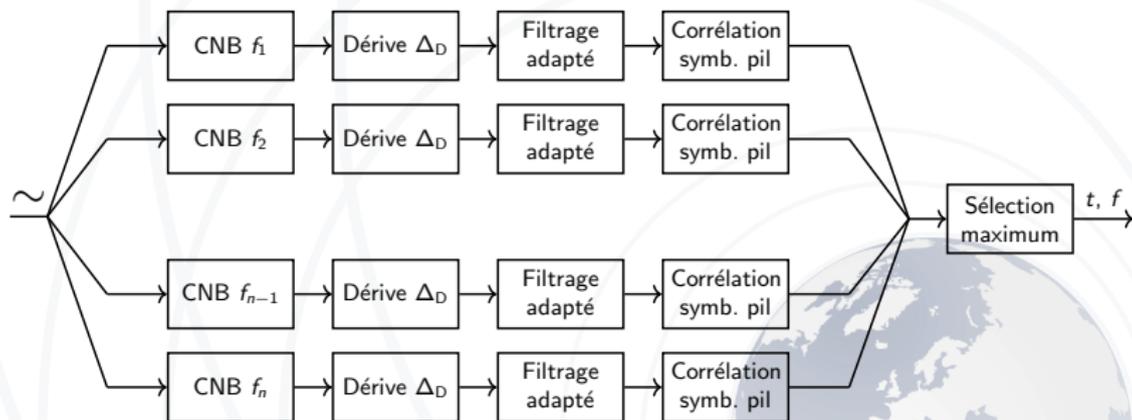


Fonction d'ambigüité



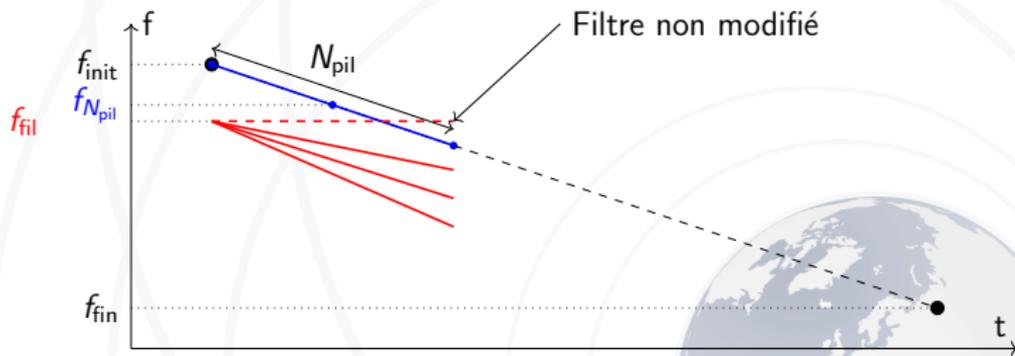
Valeurs de la fonction f avec $N_{pil} = 150$

Solution proposée : modification des bancs de filtres



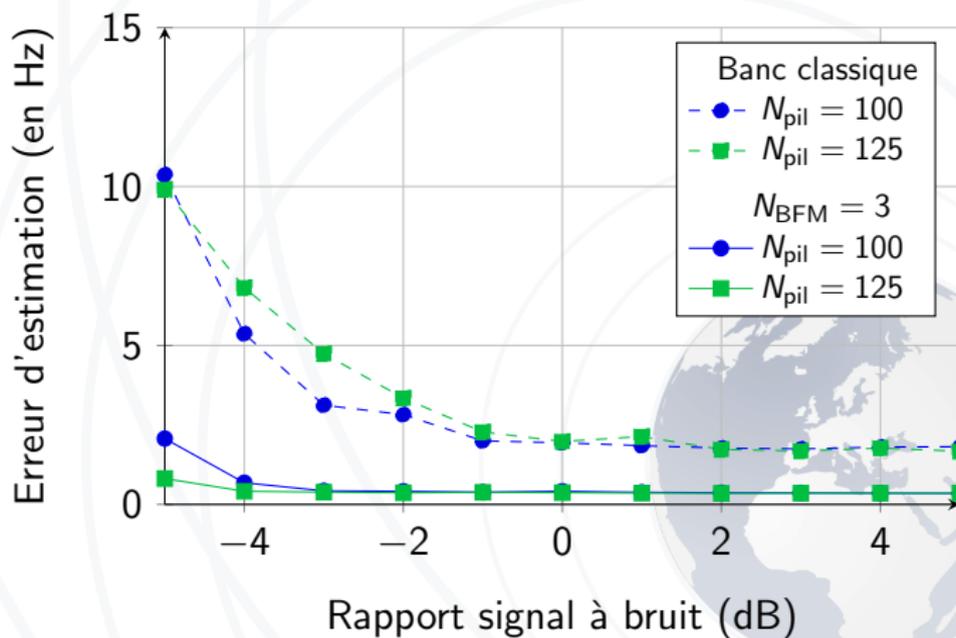
On ajoute une multiplication par une dérive Δ_D prédéfinie.

Solution proposée : N_{BFM} bancs de filtres modifiés

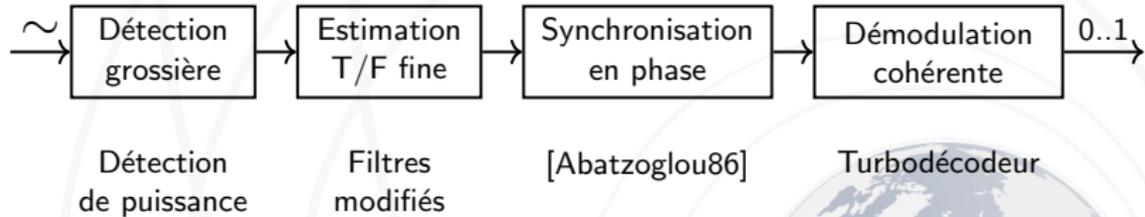


Filtre modifié : $N_{\text{BFM}} = 3$

Solution proposée

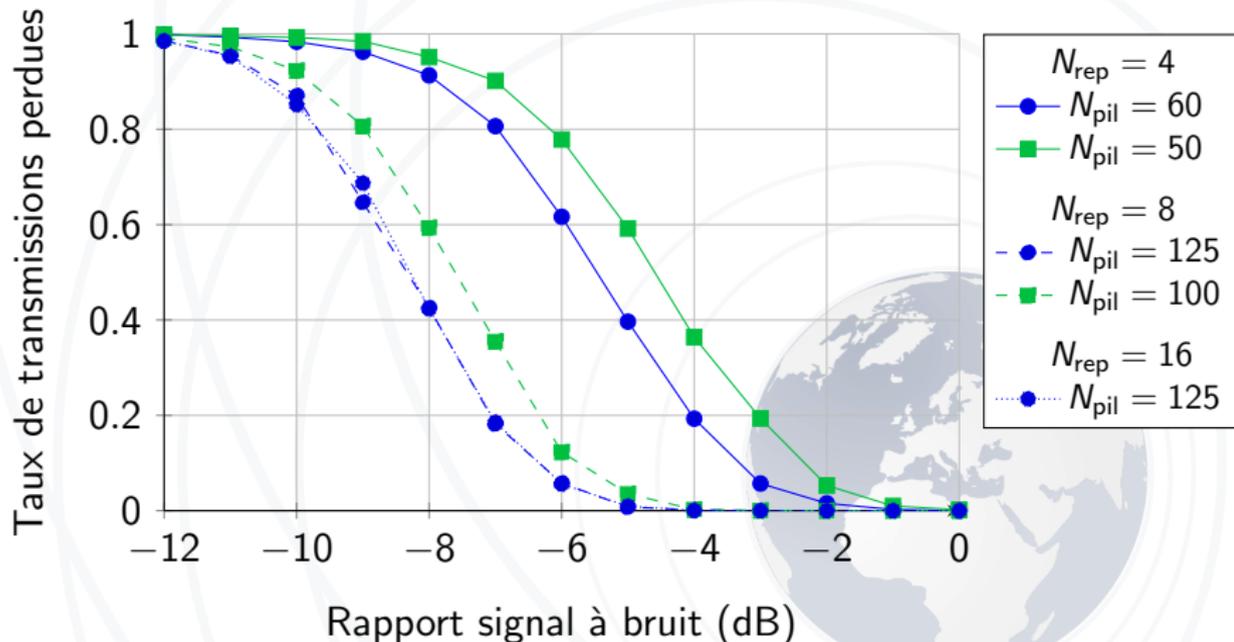


Vue d'ensemble de la solution proposée

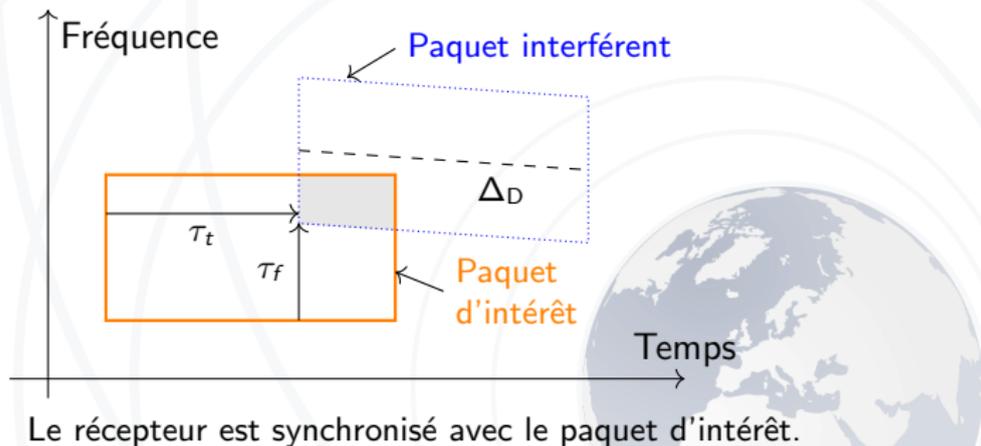


Stratégie de traitement en réception

Performances sans interférent



Apparition d'interférences — Paramètres



État de l'art : Aloha Temps/fréquence

Schéma d'accès Aloha Temps/Fréquence

- ▶ Transmissions non codées :
 - ▶ Estimations du taux d'erreur paquet (TEP) connues
- ▶ Transmissions codées : estimations du TEP
 - ▶ Basées sur des simulations de la couche physique
 - ▶ Une méthode d'estimation du TEP [Li2017]
Z. Li et al, "2D time-frequency interference modelling using stochastic geometry for performance evaluation in Low-Power Wide-Area Networks, ICC 2017
- ▶ Pas d'étude sur le taux d'erreur binaire (TEB)

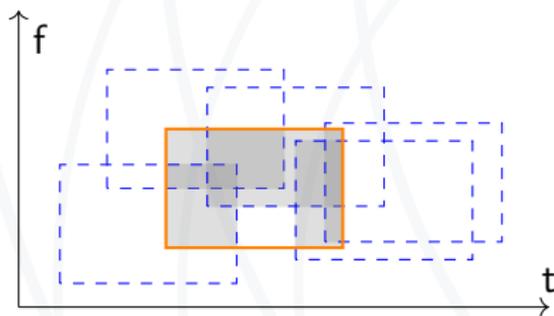
Points étudiés au cours de la thèse

- ▶ Interférence et sommation
- ▶ Estimation du canal
- ▶ Estimation du TEB
- ▶ **Estimation du TEP**



TEP — Problématique

Objectif : calculer le TEP d'une configuration de collision



Données :

- ▶ Pour le paquet d'intérêt :
 - ▶ Puissance
- ▶ Pour chaque interférent :
 - ▶ Puissance
 - ▶ Décalage temporel
 - ▶ Décalage fréquentiel

TEP — Modèle existant

- ▶ Proposé par [Li2017]
- ▶ Indépendant du codage utilisé
- ▶ Nécessite une fonction Γ_{TEP} liant RSB et TEP sans interférent

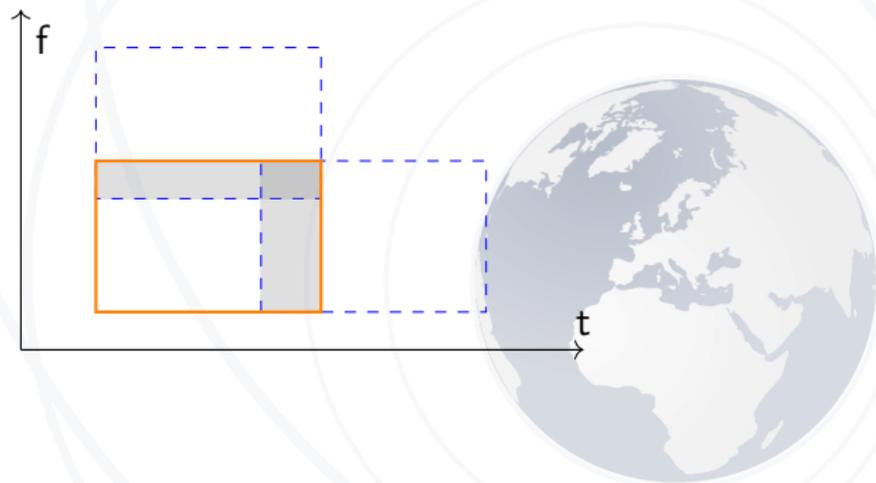
$$\text{RSB}_{\text{eq}}^{[\text{Li2017}]} = \frac{P_{\text{PI}}}{N_0 + \sum_{i=1}^{N_{\text{interf}}} \left| (1 - \tau_f^{(i)})(1 - \tau_t^{(i)}) \right| P_{\text{interf}}^{(i)}}$$

Le TEP équivalent :

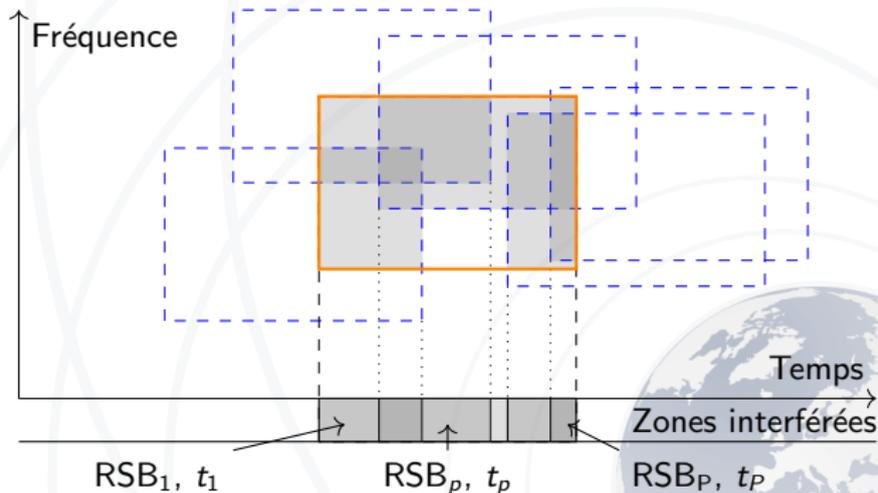
$$\text{TEP}_{\text{estim}}^{[\text{Li2017}]} = \Gamma_{\text{TEP}} \left(\text{RSB}_{\text{eq}}^{[\text{Li2017}]} \right)$$

TEP — Modèle existant

Problème : symétrie entre interférence temporelle et fréquentielle



TEP — Notre modèle



On utilise l'information mutuelle :
$$RSB_{eq}^{MI} = \beta_1 I^{-1} \left(\sum_{p=1}^P t_p I \left(\frac{RSB_p}{\beta_2} \right) \right)$$

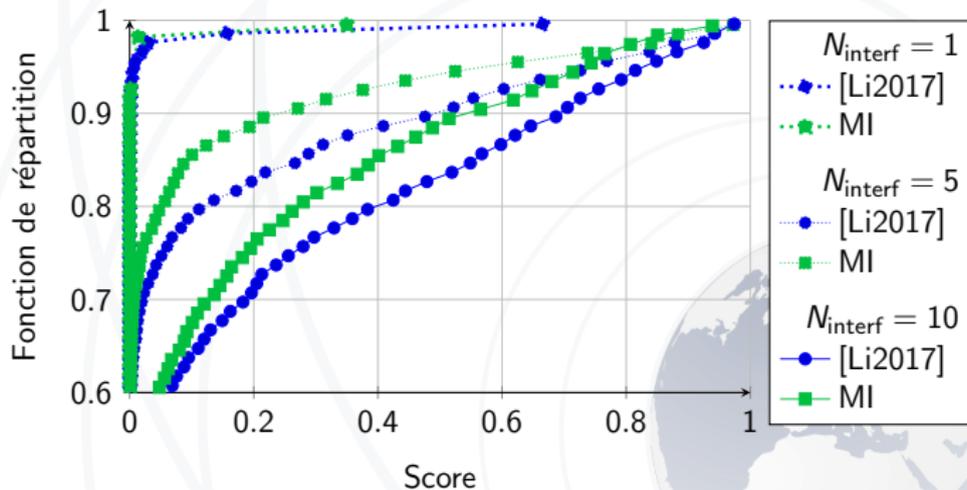
TEP — Résultats

- ▶ On cherche à comparer les deux estimateurs du TEP :
 - ▶ Génération aléatoire de configurations de collisions.
 - ▶ On calcule un TEP par simulation pour chaque configuration (CRC).
 - ▶ On compare cette valeur aux valeurs estimées.
- ▶ Score pour une configuration :

$$s = |\text{TEP}_{\text{simu}} - \text{TEP}_{\text{estim}}|$$



TEP — Résultats



Performance de la méthode d'abstraction pour $N_{\text{rep}} = 4$.

Performances du système

Fonctionnement du simulateur SIC

Résultats



Schéma de fonctionnement du simulateur SIC

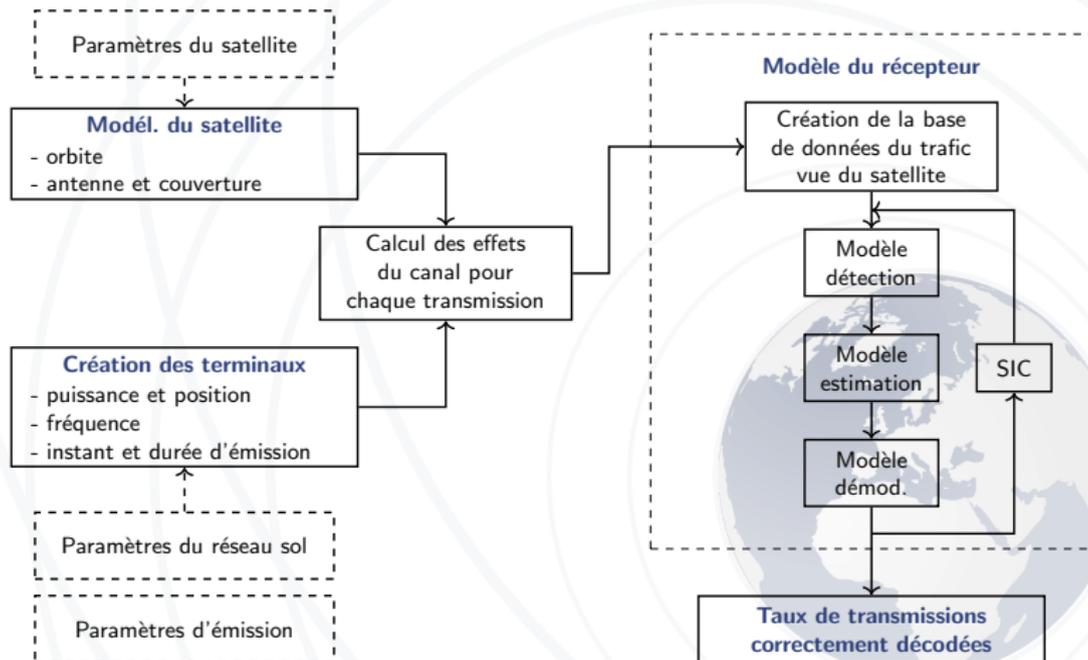


Illustration du principe de récepteur SIC

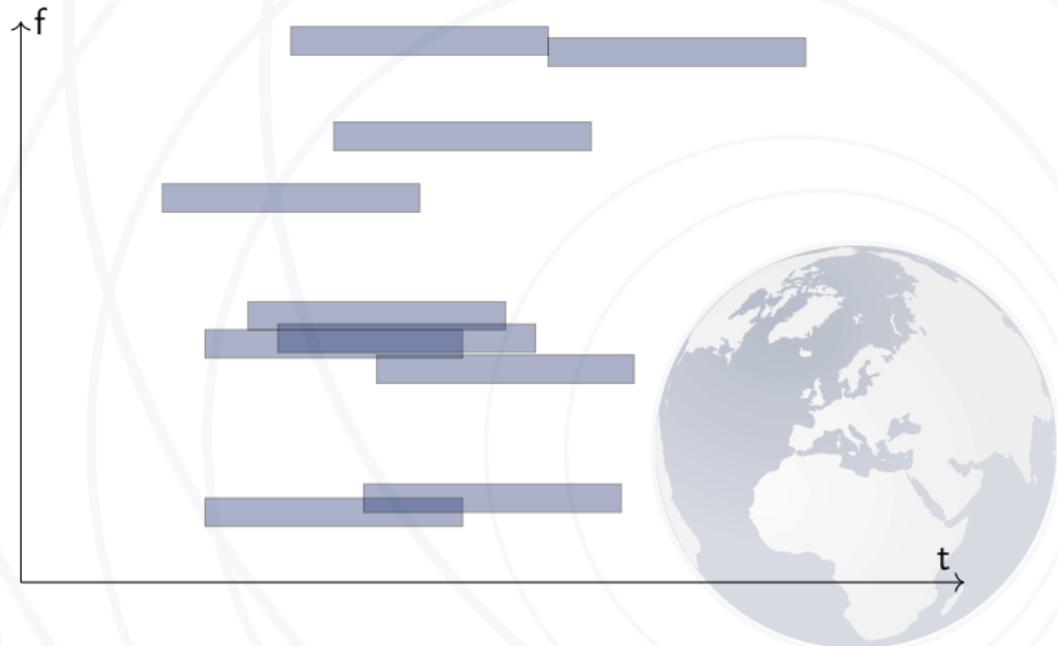


Illustration du principe de récepteur SIC



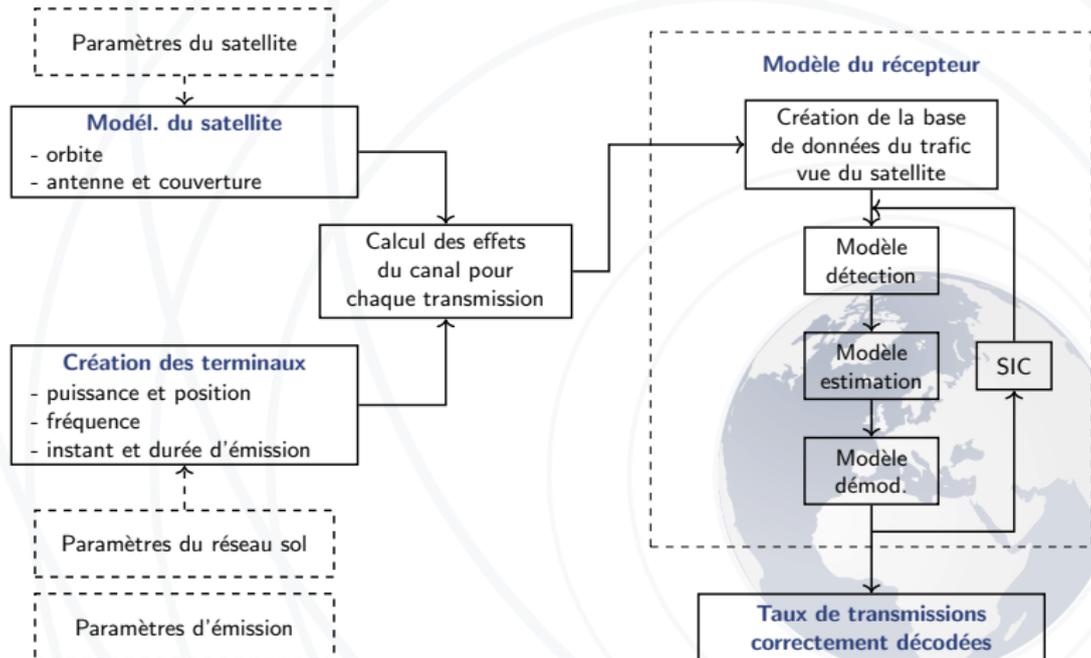
Illustration du principe de récepteur SIC



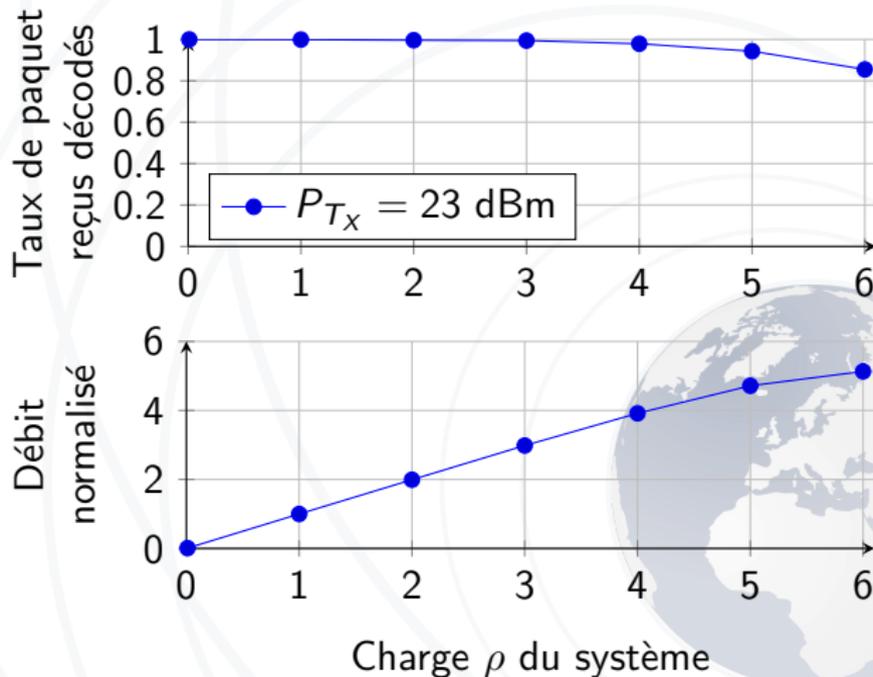
Illustration du principe de récepteur SIC



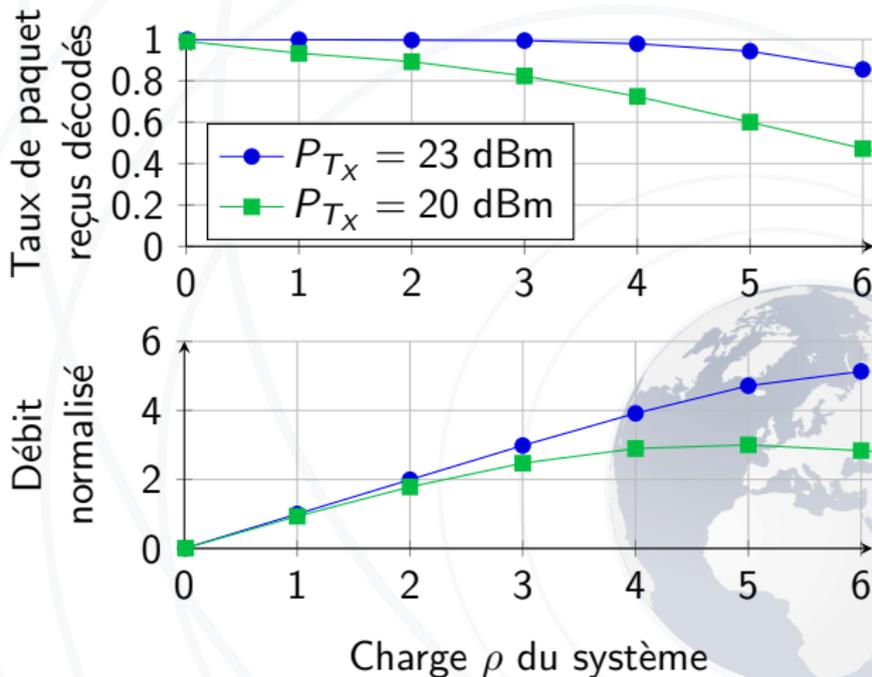
Schéma de fonctionnement du simulateur SIC



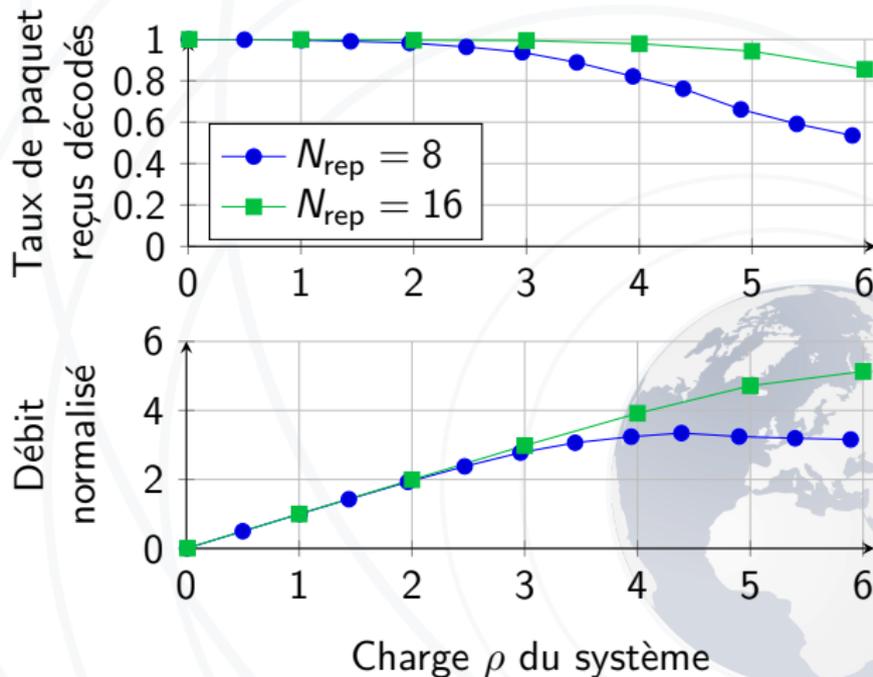
Impact de la puissance d'émission



Impact de la puissance d'émission



Impact du nombre de répétitions



Au final, avec les paramètres suivants :

Fréquence centrale	0,950	GHz
Puissance d'émission	23	dBm
Altitude	800	km
Nombre de répétitions	16	
Nombre d'itérations SIC	5	
Durée des transmissions	1	s
Nombre de transmissions par jour	2	
Densité de terminaux au sol	0,685	term/km ²

$\rho = 3$ soit 7,8 millions de terminaux sous le satellite
> 99 % des messages sont décodés

Conclusions



Conclusions

Au cours de cette thèse, nous avons :

- ▶ Défini un système hybride NB-IoT par satellite, unidirectionnel et asynchrone.
- ▶ Étudié l'impact du lien satellite sur les transmissions.
- ▶ Proposé un récepteur (aveugle et aidé des données) compatible avec les problématiques de RSB défavorable et de forte dérive Doppler :
 - ▶ 3 étapes se succèdent pour réduire la plage de fréquence accessible.
 - ▶ Deux étapes sont issues de la littérature (détection et synchronisation).
 - ▶ L'étape d'estimation de la fréquence a été profondément modifiée.

Conclusions

- ▶ Étudié le schéma d'accès TFA :
 - ▶ investigué l'intrication entre répétitions et interférence ;
 - ▶ développé une nouvelle méthode d'estimation du TEB (non présentée lors de la soutenance) ;
 - ▶ proposé une nouvelle méthode d'abstraction de la couche physique pour calculer des TEP.
- ▶ Implémenté les modèles dans un simulateur afin d'estimer les performances du système en fonction de différents paramètres grande échelle.
- ▶ Le système proposé remplit les objectifs fixés par la problématique.

Publications

Conférences internationales à comité de lecture

- [1] S. CLUZEL, L. FRANCK, J. RADZIK, S. CAZALENS, M. DERVIN, C. BAUDOIN ET D. DRAGOMIRESCU.
« 3GPP NB-IoT coverage extension using LEO satellites ».
In : *Proceedings of IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Juin 2018.

- [2] S. CLUZEL, M. DERVIN, J. RADZIK, S. CAZALENS, C. BAUDOIN ET D. DRAGOMIRESCU.
« Physical Layer Abstraction for Performance Evaluation of LEO Satellite System for IoT using Time-Frequency Aloha Scheme ».
In : *Proceedings of 6th IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*. Nov. 2018.

Perspectives — Amélioration des solutions proposées

Améliorations à court terme :

- ▶ Prise en compte par le simulateur de différents taux de codage.
- ▶ Impact des erreurs d'estimations sur le traitement SIC.

Perspectives basées sur le système proposé :

- ▶ Performances limites, performances dégradées et cout calculatoire.
- ▶ Utilisation de l'information non utilisée :
 - ▶ lien entre décalage, dérive et puissance ;
 - ▶ détection de puissance et estimation du canal.
- ▶ Proposition d'une abstraction prenant en compte l'écart de dérive fréquentielle.

Merci de votre attention !

