



Transmission des mesures d'un réseau de capteurs environnementaux en bande ISM. Une approche semi-logicielle

Gregory Hellbourg, Rodolphe Weber, Anthony Millot, Cécile Capdessus

► To cite this version:

Gregory Hellbourg, Rodolphe Weber, Anthony Millot, Cécile Capdessus. Transmission des mesures d'un réseau de capteurs environnementaux en bande ISM. Une approche semi-logicielle. Ragot José Batton-Hubert Mireille Breuil Florent, Breuil Florent. Colloque Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication Pour l'Environnement, Presses des Mines, pp.112-115, 2011, Sciences de la Terre et de l'Environnement. hal-00647529

HAL Id: hal-00647529

<https://hal.science/hal-00647529>

Submitted on 2 Dec 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Transmission des mesures d'un réseau de capteurs environnementaux en bande ISM. Une approche semi- logicielle

Grégory Hellbourg^{*}, Rodolphe Weber^{*,**}, Anthony Millot^{***}, Cécile
Capdessus^{**}

^{*} Observatoire de Paris - Station de radioastronomie, F-18330
Nançay, France, gregory.hellbourg@obs-nancay.fr

^{**} Laboratoire PRISME, Université d'Orléans
Site Galilée, 12 rue de Blois, 45067 Orléans cedex 2, France
{[rodolphe.weber](mailto:rodolphe.weber@univ-orleans.fr),[cecile.capdessus](mailto:cecile.capdessus@univ-orleans.fr)}@univ-orleans.fr

^{***} ATCOM Télémétrie - 15 rue Jean Bertin, BP 79, 45430 Checy,
France, millot@atcom.fr

Cet article présente une méthode de gestion de la qualité de l'eau à distance. Les mesures provenant de sondes placées dans des forages sont transmises dans une bande libre de droits (bande ISM à 433 MHz). Cependant, la présence de nombreux autres émetteurs dans cette bande diminue la qualité des transmissions. Pour résoudre cette problématique, nous proposons d'utiliser, en réception, un réseau d'antennes. Ceci permettra de réaliser un filtrage spatial afin de diminuer l'impact des transmissions parasites sur les signaux issus des sondes. De plus, pour limiter le coût du système, nous proposons de réaliser ce filtrage de manière logicielle. Mais au préalable, il faut détecter les trames émises ponctuellement par les sondes afin d'en déclencher le stockage sur disque dur. Cette détection doit être robuste aux interférences. Dans cet article, nous évaluons les performances de plusieurs détecteurs fondés sur la signature cyclostationnaire de la modulation utilisée.

MOTS-CLÉS : gestion de la qualité de l'eau, bande ISM, réseau d'antennes, cyclostationnarité

This article presents the concept of a long-range transmission sensor network for low data rate environmental measurements. It uses the ISM free-access frequency band at 433 MHz. In addition to distance attenuation, a major issue is the presence of numerous radio frequency interferences in this band. With a view to optimizing the sensor life and cost, the system complexity has been shifted to the central station which will be based on array processing techniques. In this paper, we describe four spatial cyclostationary detectors for triggering the acquisition of sensor data frames in this highly corruptive radio environment.

KEYWORDS: water quality monitoring, ISM band, antenna array, cyclostationarity

INTRODUCTION

Depuis quelques années, la surveillance de la qualité des masses d'eau est devenue une préoccupation environnementale majeure. Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse, autrefois réalisées manuellement, sont devenues trop coûteuses face aux nouvelles réglementations nécessitant des contrôles plus importants et plus fréquents. L'utilisation de réseaux de capteurs sans fils (Wireless Sensor Networks, WSN) semble être une alternative prometteuse pour répondre à cette problématique. Par exemple, un système d'analyse à distance de la constitution chimique de l'eau est présenté dans [Capella et al., 2010]. Dans cette application, le réseau de capteurs communique sur une bande de fréquence propriétaire. Cependant, il est tout à fait possible d'utiliser une bande de fréquences libre. Ceci est le cas dans [Lopez Riquelme et al., 2009], où un réseau de capteurs sans fils est utilisé dans la bande libre à 2,4GHz dans le cadre de l'agriculture de précision, ou encore dans [Willis et al., 2007], présentant une expérimentation de transmission en bande libre à 40MHz. Dans ces deux cas, les transmissions sont réalisées en environnement calme avec peu d'activités humaines ce qui limite les risques de brouillage dus à d'autres émetteurs. Nous présentons dans cet article un concept de surveillance de la qualité de l'eau à distance dans un environnement électromagnétique fortement pollué.

Le concept proposé est basé sur une transmission unidirectionnelle et à bas débit en bande libre ISM (Industrielle, Scientifique et Médicale) à 433MHz. La figure 1 décrit le principe de notre système et de plus amples détails sont présentés dans [Millot et al., 2009]. En environnement sans interférences, notre prototype présente une sensibilité permettant une transmission longue distance ($>10\text{km}$) bien que la puissance autorisée de transmission soit limitée à 10mW. Cependant, cette bande ISM étant utilisée dans de nombreuses applications domotiques sans fils (clefs de transmission voiture, télécommandes de portails...), le risque d'interférences est très élevé et cela réduit les capacités de transmission longue distance.

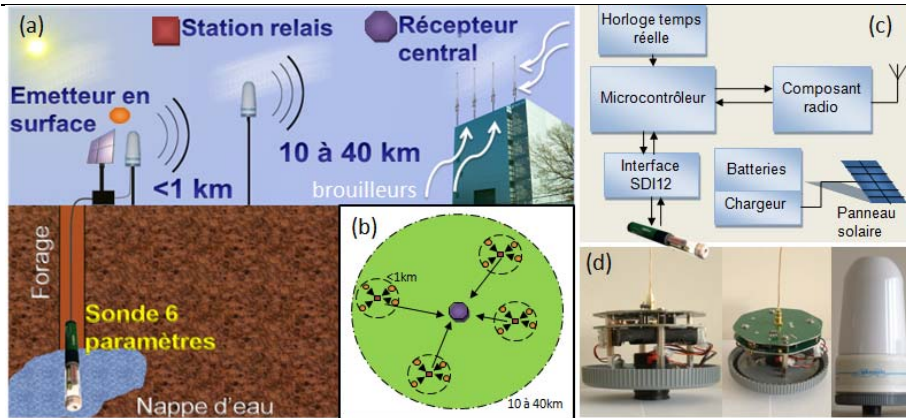


Figure 1 : Description du démonstrateur de surveillance de l'eau à distance. (a) et (b) Principe global : La sonde 6 paramètres (Aqua50 de NeoTex-Ponsel) est placée dans une cavité d'eau souterraine. Elle communique avec un émetteur en surface via un protocole SDI12. Dans un rayon de 1 km, plusieurs systèmes sonde/émetteur transmettent leurs données à une station relais. Enfin, la station relais transmet les données au récepteur central situé dans un rayon de 10 km à 40 km. La transmission se fait par paquets de quelques secondes une fois par jour (sauf transmission d'urgence) via une modulation de phase à 2 états à la vitesse de 1200 bauds (c) et (d) Description de l'émetteur en surface et de la station relais. Ils sont constitués de deux cartes électroniques interconnectées entre elles et fixées l'une sur l'autre. La première, sur laquelle est installée l'antenne fouet (1/4 onde), regroupe les fonctions de communication (SDI12) et de transmission radio ainsi que le microcontrôleur pour gérer l'ensemble. La seconde carte contient une partie de l'alimentation (régulateur) et le chargeur de batteries relié au panneau solaire. C'est également sous cette seconde carte qu'est fixé le pack contenant les batteries. L'ensemble est intégré dans un boîtier plastique étanche (IP65) muni d'un connecteur pour accueillir le câble le reliant à la sonde. Ce boîtier peut aisément être fixé en haut d'un mât. L'autonomie électrique de ces émetteurs/récepteurs peut être garantie pour la durée de vie des batteries.

Nous proposons donc d'équiper la station de réception d'un réseau phasé d'antennes qui devrait permettre le filtrage spatial des signaux. Afin de minimiser les surcoûts d'implantation, les traitements seront réalisés de manière logicielle. Pour cela, nous proposons d'acquérir et de stocker automatiquement les trames émises par les capteurs environnementaux (en général quelques secondes par jour). Le déclenchement de ces acquisitions doit être robuste par rapport à la présence de brouilleurs.

Nous présenterons tout d'abord une analyse des brouilleurs dans la bande ISM 433 MHz. Ceci nous permettra de définir une stratégie optimale de transmission. Ensuite, nous nous intéresserons aux possibilités de détecter de manière robuste une transmission via les propriétés cyclostationnaires du signal transmis. En particulier, nous comparerons les performances de quatre détecteurs cyclostationnaires au moyen de simulations. Enfin, nous conclurons et présenterons quelques perspectives à ce projet.

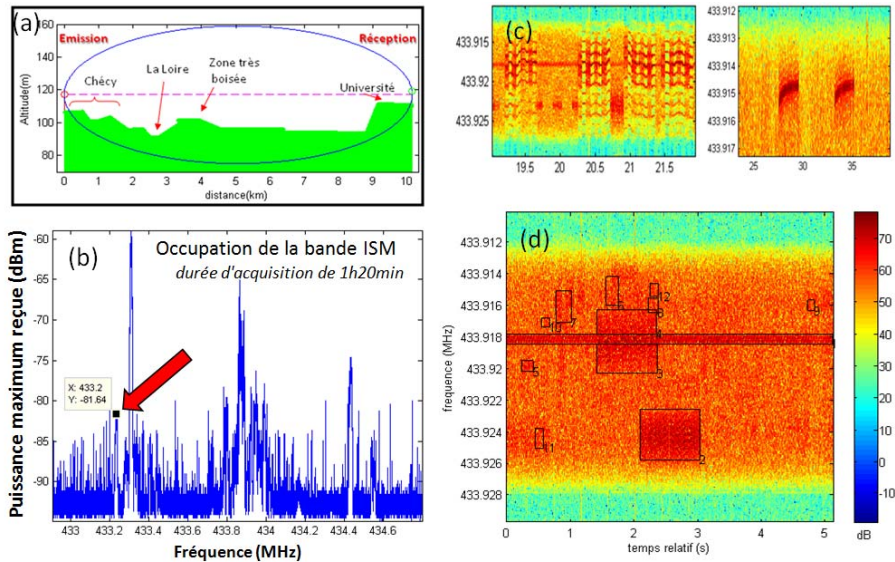


Figure 2 : Analyse des brouilleurs potentiels dans la bande ISM 433MHz: (a) disposition géographique du système de mesure. (b) Puissances maximum reçues dans toute la bande pendant une heure et vingt minutes. La mesure a été effectuée sur le premier site d'observation à l'université d'Orléans. A titre de référence, le niveau du signal, issu de notre émetteur situé à 10 km (Chécy) et émettant une puissance de 10 mW, est représenté par un rectangle noir (au bout de la flèche rouge). Ces mesures nous ont permis de confirmer la forte occupation de la bande mais permettent également de mettre en évidence l'inégale répartition des brouilleurs. (c) Exemples montrant la diversité des profils temps-fréquence des émetteurs rencontrés. (d) Exemple de résultats de recherche automatique de brouilleurs sur un plan temps-fréquence. Chaque brouilleur est identifié par un rectangle numéroté dont les dimensions temporelles et fréquentielles ainsi que les puissances maximum et moyennes sont ensuite enregistrées dans une base de données. Cette base de données nous permet ensuite de réaliser une étude statistique sur ces brouilleurs.

ANALYSE DES RFI DANS LA BANDE ISM A 433 MHZ

La bande ISM à 433 MHz a une largeur de 1,74 MHz. Etant donné le faible débit de notre système (1200 bauds), l'occupation fréquentielle de celui-ci sera très faible, de l'ordre de 10kHz. Il est intéressant de voir la répartition fréquentielle des brouilleurs dans la bande afin d'identifier d'éventuelles zones moins perturbées.

Un système expérimental a été développé afin de réaliser une étude statistique de la présence de brouilleurs. Ce système est basé sur une carte électronique Xilinx (Xtreme DSP IV) permettant, après une mise en forme analogique, l'acquisition de signaux dans la bande ISM 433MHz. L'implantation d'un récepteur numérique permet l'acquisition et le stockage de bandes de 10kHz

afin de réaliser des analyses statistiques en temps différé. Plusieurs observations ont été réalisées en environnement semi-urbain, pour différentes fréquences et à différents instants de la journée. La figure 2.a montre les implantations géographiques du récepteur central et de la station relais expérimentale dans la périphérie d'Orléans (France). La figure 2.b compare la puissance reçue du signal provenant de la station relais avec le niveau de puissance des brouilleurs présents dans la même bande. La figure 2.c illustre la diversité des émetteurs rencontrés. En conclusion, ces mesures montrent que la bande ISM 433 MHz est d'une façon générale très utilisée mais qu'il est toujours possible d'identifier, dans un lieu donné, à un moment donné, des plages de fréquences beaucoup moins utilisées. En pratique, il est tout à fait envisageable d'étudier la bande ISM au lieu d'installation du récepteur, d'identifier les fréquences les moins perturbées et de configurer les émetteurs pour transmettre à ces fréquences.

Il est cependant impossible de trouver une bande dans laquelle les brouilleurs seraient totalement absents. Nous avons donc réalisé une étude statistique de ces derniers afin de connaître leur durée, leur largeur spectrale et l'évolution de ces paramètres au cours de la journée. Pour cela, nous avons développé un logiciel permettant l'extraction automatique des caractéristiques temporelles et fréquentielles des émetteurs (largeur de bande, durée, puissance moyenne, puissance crête). L'algorithme est basé sur la segmentation itérative du plan temps-fréquence des données enregistrées. La figure 2.d donne un exemple de cette segmentation automatique sur un plan temps fréquence. Le seuil de détection des brouilleurs est fixé à trois fois la variance du bruit du système.

TABLEAU 1 : STATISTIQUES SUR 4 CAMPAGNES D'OBSERVATIONS (NOV 2009)

Nº, quand	f_0 (MHz)	Brouilleurs (par heure)	ΔT (s)	ΔF (kHz)
1, jour	433.92	5277	0.3	1.6
2, nuit	433.92	4549	0.36	1.58
3, jour	434.2	2864	0.28	1.31
4, nuit	434.2	567	0.32	1.33

f_0 est la fréquence centrale de la bande de 10kHz observée. 'Brouilleurs' donne le nombre moyen d'émetteurs détectés par heure. ΔT et ΔF correspondent respectivement à la durée temporelle moyenne et la largeur fréquentielle moyenne des brouilleurs rencontrés.

Le tableau 1 présente quelques paramètres extraits de ces études statistiques. La première conclusion que l'on peut en tirer est que l'environnement électromagnétique est plus propice à une transmission nocturne, décentrée de la

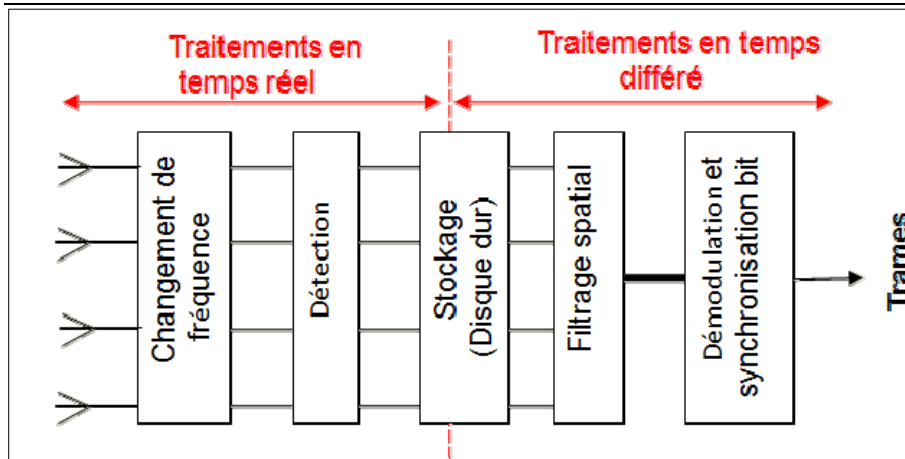


Figure 3 : Description du concept proposé

bande ISM (fréquence centrale à 433,92MHz). La principale raison est que la plupart des systèmes sans fils transmettent à 433,92MHz, et que l'activité humaine est plus élevée le jour que la nuit. En nous plaçant à 434.2MHz, nous pouvons considérer qu'au plus un brouilleur sera présent dans la bande de 10kHz au moment de la transmission des données. De plus, ces brouilleurs ont des durées moyennes inférieures à 1s avec une largeur de bande inférieure à quelques kHz.

Bien que le relevé des mesures des capteurs soit programmé pour être réalisé à heure fixe tous les jours, nous laissons la possibilité au système de transmettre des données d'urgence. De plus, nous voulons limiter le coût du récepteur central en préférant des implantations logicielles aux implantations matérielles. Nous proposons donc une architecture basée sur la détection en temps réel des trames de données transmises par les stations relais, puis leur traitement en temps différé après stockage (cf. figure 3).

DETECTION CYCLOSTATIONNAIRE EN PRESENCE DE BROUILLEURS

Nous abordons donc dans cette partie les solutions proposées pour la détection des transmissions permettant de s'affranchir des risques d'interférences avec d'autres émetteurs.

Modèle des données

Notre récepteur central est constitué d'un réseau phasé de M antennes. Ces antennes sont toutes soumises au même environnement électromagnétique, mais elles observent cet environnement de manière différente. En effet, les sources observées par ce réseau (station relais ou brouilleurs) étant en bande

étroite, la distance entre antennes induit des retards géométriques entre chaque antenne et pour chaque source. Nous admettons que ces retards pourront être représentés par des décalages de phases.

Notons $\mathbf{z}(t)$ le vecteur de sortie du réseau d'antennes à l'instant t . Nous avons:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{a}_s s(t) + \mathbf{A}_r \mathbf{r}(t) + \mathbf{n}(t) \quad [1]$$

avec:

- $\mathbf{z}(t) = [\tilde{z}_1(t) \dots \tilde{z}_M(t)]^T$ le vecteur $(M \times 1)$ de sortie du réseau de M antennes à l'instant t
- $\mathbf{a}_s = [a_{1,s} \dots a_{M,s}]^T$ est le vecteur $(M \times 1)$ de signature spatiale du signal $s(t)$ émis par la station relais
- $\mathbf{r}(t) = [r_1(t) \dots r_K(t)]^T$ est le vecteur $(K \times 1)$ des K brouilleurs, et $\mathbf{A}_r = [\mathbf{a}_{r1}, \mathbf{a}_{r2}, \dots, \mathbf{a}_{rK}]$ est la matrice $M \times K$ des signatures spatiales de chaque brouilleur
- $\mathbf{n}(t)$ est le vecteur $(M \times 1)$ de bruit du système, indépendant entre chaque antenne

Nous allons exploiter la propriété de cyclostationnarité afin de détecter une transmission provenant de la station relais. En effet, les signaux modulés contiennent généralement une périodicité cachée, signature de leur mise en œuvre (fréquence porteuse, baud rate, codage,...). En fait, cette périodicité est masquée par le caractère aléatoire du message transmis. Cependant, une approche cyclostationnaire ([Serpedin et al., 2005], [Gardner et al., 2006]) permet de retrouver cette signature, et rend possible l'identification de ces signaux de télécommunication.

Dans le cas de l'analyse multivariée, cette signature peut être retrouvée au moyen de la matrice de corrélation cyclique du réseau:

$$\mathbf{R}_z^\alpha = \left\langle \mathbf{z}(t) \mathbf{z}^H(t) \ell^{i2\pi\alpha t} \right\rangle_\infty \quad [2]$$

ou de sa matrice de corrélation cyclique conjuguée:

$$\overline{\mathbf{R}}_z^\alpha = \left\langle \mathbf{z}(t) \mathbf{z}^T(t) \ell^{i2\pi\alpha t} \right\rangle_\infty \quad [3]$$

où α est la fréquence cyclique (i.e. l'inverse de la périodicité cachée) et $\langle . \rangle_\infty$ est l'opérateur de moyennage.

Un signal cyclostationnaire de fréquence cyclique non nulle, α , générera à cette même fréquence une matrice de corrélation cyclique ou cyclique conjuguée non nulle, alors qu'un signal stationnaire ou cyclostationnaire de fréquence cyclique différente de α générera des matrices de corrélation cyclique et cyclique conjuguée nulles. La propriété essentielle de ces deux matrices est qu'elles sont asymptotiquement dépendantes exclusivement des signaux cyclostationnaires de fréquence cyclique α . Par exemple :

$$\mathbf{R}_z^\alpha = \mathbf{R}_s^\alpha + \underbrace{\mathbf{R}_r^\alpha}_{\rightarrow 0} + \underbrace{\mathbf{R}_n^\alpha}_{\rightarrow 0} \approx \mathbf{R}_s^\alpha = \mathbf{A}_s \mathbf{R}_s^\alpha \mathbf{A}_s^H$$

Nous supposons dans la suite que nous ne recevons aucun signal provenant de brouilleurs cyclostationnaires de même fréquence cyclique que le signal provenant de la station relais.

Dans notre application, la transmission entre les stations relais et le récepteur central est réalisée au moyen d'une modulation de type BPSK (Modulation de phase à 2 états). Ce type de modulation est cyclostationnaire de fréquence cyclique [Gardner, 1991] :

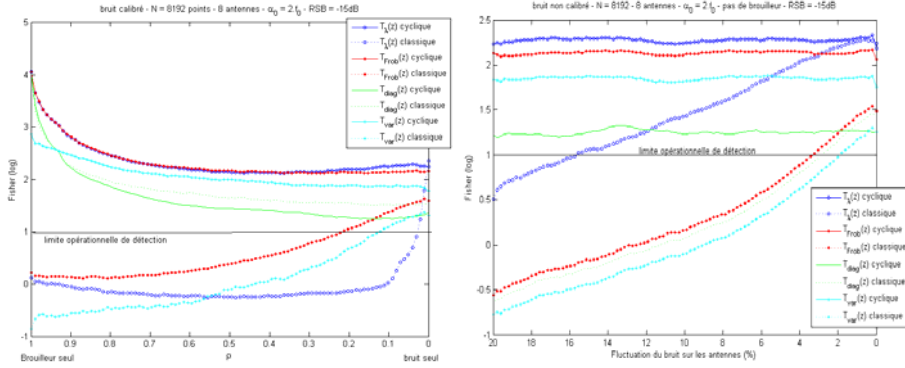


Figure 4 : Mesure des performances de détection des 4 détecteurs cycliques proposés pour différents scénarios. Les performances des mêmes détecteurs mais calculées sur la matrice de corrélation classique sont donnés à titre de comparaison (a) scénario 1 (présence d'un brouilleur et d'un bruit calibré. Le RSB est de -15dB) ρ permet de faire varier la proportion de RFI dans le signal. (b) scénario 2 (pas de brouilleur, bruit non calibré avec une fluctuation de 0% à 20% sur chaque antenne. Le RSB est de -15dB). La limite opérationnelle de détection indique le niveau de performance minimale à atteindre pour garantir une détection correcte du signal transmis par le réseau de capteur (station relais).

- $\alpha_0 = k/T_0$, $k \in \mathbb{Z}$, avec $1/T_0$ le baud rate de la modulation, pour une corrélation cyclique
- $\alpha_0 = 2f_0 + k/T_0$, $k \in \mathbb{Z}$, avec f_0 la fréquence porteuse du signal, pour une corrélation cyclique conjuguée.

Détection d'un signal cyclostationnaire de fréquence cyclique α

Comme expliqué précédemment, nous voulons pouvoir détecter une transmission d'urgence de la station relais. Nous proposons les quatre critères de détection suivants, avec $\alpha = \alpha_0$:

- $T_\lambda(\mathbf{z})$, la plus grande valeur singulière de $\mathbf{R}_z^\alpha$ ou $\overline{\mathbf{R}}_z^\alpha$
- $T_F(\mathbf{z})$, la norme de Frobenius de $\mathbf{R}_z^\alpha$ ou $\overline{\mathbf{R}}_z^\alpha$, directement liée à la somme des valeurs singulières au carré de ces matrices
- $T_{diag}(\mathbf{z})$, la norme de Frobenius de la diagonale de $\mathbf{R}_z^\alpha$ ou $\overline{\mathbf{R}}_z^\alpha$
- $T_{var}(\mathbf{z}) = \frac{1}{M} \cdot (\|\cdot\|_F^2 - \frac{1}{M} trace(\cdot)^2)$, une estimation de la variance des valeurs propres de $\mathbf{R}_z^\alpha$ ou $\overline{\mathbf{R}}_z^\alpha$

Dans la suite, nous allons comparer ces détecteurs entre eux.

Le test que nous cherchons à mettre en œuvre doit être capable de séparer les deux hypothèses suivantes :

- $H_0 : \mathbf{z}(t) = \sqrt{\rho} \mathbf{a}_r r(t) + \sqrt{1-\rho} \mathbf{n}(t)$
- $H_1 : \mathbf{z}(t) = \sigma_s \mathbf{a}_s s(t) + \sqrt{\rho} \mathbf{a}_r r(t) + \sqrt{1-\rho} \mathbf{n}(t)$

Pour les tests, les signatures spatiales $\mathbf{a}_s$ et $\mathbf{a}_r$ sont choisies de manière aléatoire. $M=8$ antennes sont prises en compte. $s(t)$ est un signal modulé de type BPSK avec $f_0 = 0.1$ et $T_0 = 8$. La RFI $r(t)$ est également un signal BPSK avec $f_1 = 0.318$ et $T_1 = 13$. Le bruit du système $\mathbf{n}(t)$ est considéré indépendant et gaussien. Nous définissons le rapport interference (i.e. brouilleur) sur bruit $RIB = \frac{\rho}{1-\rho}$, avec $0 \leq \rho \leq 1$. Le rapport signal sur bruit est défini par $RSB = \sigma_s^2$.

Les performances des détecteurs sont évaluées à l'aide du critère de Fisher, calculé à l'issu de chaque simulation de Monte Carlo:

$$Fisher = \frac{(E_{H_1}[T_k(\mathbf{z})] - E_{H_0}[T_k(\mathbf{z})])^2}{\text{var}_{H_1}(T_k(\mathbf{z})) + \text{var}_{H_0}(T_k(\mathbf{z}))} \quad [4]$$

avec $k = \{\lambda, F, \text{diag}, \text{var}\}$ qui balaie les 4 détecteurs proposés et où $E_{H_{0,1}}[\cdot]$ et $\text{var}_{H_{0,1}}(\cdot)$ sont respectivement la moyenne et la variance des valeurs des tests sous les hypothèses H_0 et H_1 .

Les scénarios de simulations sont les suivants:

- *scénario 1* : présence d'une RFI et d'un bruit calibré ($\langle n(t)n^H(t) \rangle_\infty = I$). Le RSB est de -15dB (cf. figure 4.a).
- *scénario 2* : pas de RFI, bruit non calibré avec une fluctuation de 0% à 20% sur chaque antenne. Le RSB est de -15dB (cf. figure 4.b).

A titre de comparaison, ces mêmes scénarios sont également appliqués sur des détecteurs calculés à partir de la matrice de corrélation classique, $\mathbf{R}_z$. La limite opérationnelle de fonctionnement a été fixée arbitrairement à une valeur du critère de Fisher de 10. Cela est équivalent à dire que la distance entre les deux hypothèses est 3,16 fois plus grande que l'écart type du détecteur considéré.

Comme le montrent les figures, les détecteurs basés sur la matrice de corrélation classique, $\mathbf{R}_z$, sont très sensibles à la présence de brouilleurs ou aux fluctuations du bruit alors que les détecteurs cycliques y sont très robustes. Les détecteurs basés sur la valeur singulière maximale et sur la norme de Frobénius offrent clairement de meilleurs résultats. D'un point de vue pratique, le compromis entre la performance et la simplicité d'implantation rend la technique fondée sur la norme de Frobénius particulièrement intéressante.

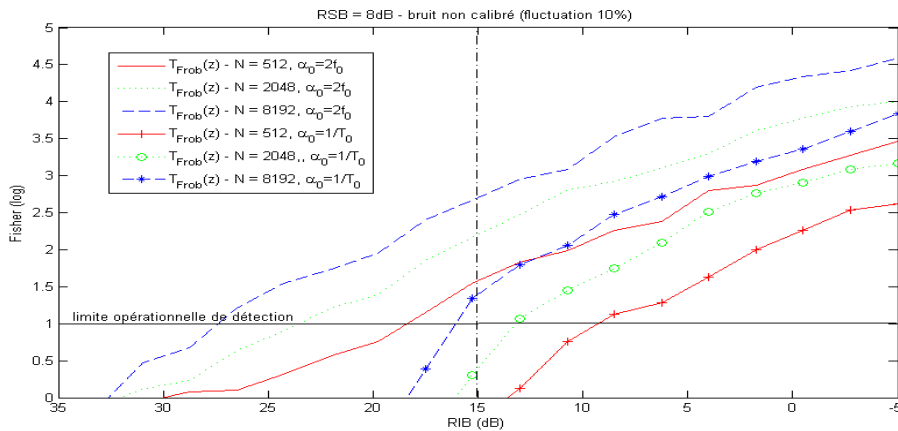


Figure 5 : Simulation en fonction du niveau d'interférence, RIB. Cette simulation réaliste repose sur la présence d'un bruit non calibré avec une fluctuation de 10% entre antennes, et d'un signal utile reçu avec RSB de 8dB. Cette dernière valeur repose sur des mesures réelles du système mis en place sur une distance de 10km et extrapolé pour 40 km. 2 fréquences cycliques sont évaluées. Un RIB = 15dB correspond à un niveau standard d'interférences tel qu'il a été mesuré lors des campagnes d'acquisition de la bande ISM. Cela permet de définir le nombre d'échantillons nécessaire pour garantir, dans cet environnement électromagnétique, une détection du signal transmis par la station relais.

La dernière simulation (cf. figure 5) montre la faisabilité théorique de détection sur grande distance (plusieurs dizaine de kilomètres) en présence d'interférences sur un réseau non calibré. Elle indique également le nombre d'échantillons nécessaires pour garantir un déclenchement correct de l'acquisition. Enfin, il apparait que l'utilisation de la fréquence cyclique $1/T_0$ permet une détection ad-hoc avec 8192 échantillons alors que l'utilisation de la fréquence cyclique $2f_0$ nécessite seulement 512 échantillons. Cependant, en pratique, il est difficile de garantir la stabilité de cette fréquence du fait des dérives potentielles dues aux composants électronique utilisés. La détection sur le baud rate T_0 sera donc préférée.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article avait pour contexte l'étude d'un réseau de capteurs environnementaux pour la surveillance en temps réel des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines. L'originalité de ce projet réside dans l'utilisation d'une bande de fréquences libre (bande ISM), mais également dans la réalisation logicielle des différents traitements sur les signaux. Ces points font de ce projet une solution particulièrement économique, en comparaison à d'autres méthodes de relevés de mesures à distance actuellement utilisées.

L'objectif de l'article était de montrer qu'il est possible d'acquérir automatiquement les trames transmises par le réseau de capteurs malgré le

problème des transmissions parasites polluant ce type de bande libre. Nous avons ainsi proposé et montré la faisabilité du concept de détection cyclostationnaire des signaux transmis.

En termes de perspectives 2 points essentiels restent à valider :

- D'une part la validation de ces performances de détection par une mise en œuvre pratique sur un prototype complet de récepteur central.
- D'autre part, la mise en œuvre de partie filtrage spatial. Des simulations [Millot et al., 2009] ont montrées la pertinence d'une technique de formation de voies de type Capon. Egalement connue sous le nom de MVDR (Minimum Variance Distortionless Response), cette technique permet la génération de coefficients (retards complexes) à appliquer à chaque antenne afin d'annuler automatiquement les signaux provenant de directions autres que la direction d'arrivée des stations relais (direction connue)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Capella et al., 2010] Capella, J.V., Bonastre, A., Ors, R., Peris, M., 2010. "A wireless sensor network approach for distributed in-line chemical analysis of water". *Talanta*, 80, 5
- [Gardner, 1991] Gardner, William A.. "Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals". *Signal Processing Magazine, IEEE*, 8, 2, 14-36
- [Gardner et al., 2006] Gardner, William A., Napolitano, Antonio, Paura, Luigi, April 2006. "Cyclostationarity : Half a century of research". *Signal Processing*, 86, 4, 639-697
- [Lopez Riquelme et al., 2009] Lopez Riquelme, J.A., Soto, F., Suardiaz, J., Sanchez, P., Iborra, A., Vera, J.A., 2009. "Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain". *Computers and Electronics in Agriculture*, 27, 3, 903-938
- [Millot et al., 2009] Millot, Anthony, Weber, Rodolphe, Berho, Catherine, 2009. "Transmission de données environnementales en bande ISM. Application à la surveillance à distance des masses d'eau". *REE*, 11
- [Serpedin et al., 2005] Serpedin, Erchin, Panduru, Sari, Ilkay, Giannakis, Georgios B., December 2005. "Bibliography on cyclostationarity". *Signal Processing*, 85, 12, 2233-2303
- [Willis et al., 2007] Willis, Simon, Cornelis, Jan Kikkert, 2007. "Radio propagation model for long-range wireless networks". *6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*, 1-5