

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université ABOU BEKR BELKAID Tlemcen
Faculté de Technologie

Département du Génie Electrique et Electronique GEE
Laboratoire de Télécommunications

Thèse pour l'obtention du diplôme de
Docteur en Télécommunications

Thème :
Détection coopérative multiagents
pour réseaux de capteurs

Résumé

Présenté par
Monsieur BENADDA Belkacem

Devant le jury

Président : F. BEREKSI REGUIG Professeur à l'Université de Tlemcen
Examineur : M. F. KHELFI Professeur à l'Université d'Oran
Examineur : H. HAFFAF Professeur à l'Université d'Oran
Examineur : A. BESSAID Professeur à l'Université de Tlemcen
Examineur : S. M. MERIAH Professeur à l'Université de Tlemcen
Membre invité : F. DEBBAT Maître de Conférences à l'Université de Mascara
Directeur de thèse : F. T. BENDIMERAD Professeur à l'Université de Tlemcen

Année universitaires 2010-2011

Je remercie DIEU le clément le miséricordieux

Ce travail est dédié, à mes parents, mes Frère et sœurs, ma chère nièce, toute ma famille sans oublier mes amis.

Remerciement

Ce travail a été réalisé sous la direction du Professeur BENDIMERAD Fethi Tarik. Nous tenons à le remercier intensément, pour les possibilités, avantages et outils qu'il nous a accordé au sein du laboratoire de télécommunications de la faculté de technologie, qui sans aucun doute, ont contribué à nous initier, améliorer et approfondir nos connaissances dans le monde des télécommunications. Ce travail est un témoignage en faveur du Professeur BENDIMERAD Fethi Tarik.

Les résultats présentés sont le fruit de plusieurs années passées au côté des membres du laboratoire qui nous ont aidés à avancer par leurs conseils, ambiance amicale et aides. Nous remercions vivement : Professeur Seddiki Omar, Professeur Chikh Bled Mohammed, Mr BOUKLI HACENE Noure Edine, Professeur BENHAMED Nasr-Eddine, Mr Abri Mehadji, Mr BENDAHMANE Fouzi, Mr MERAD Lotfi, Mr DJENNAS Sid-Ahmed SANS OUBLIER LES AUTRES,...

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et sincères gratitudeux aux honorables professeurs et membres du jury : Professeur F. BEREKSI REGUIG Président, Professeur M. F. KHELFI examinateur, Professeur H. HAFFAF examinateur, Professeur A. BESSAID examinateur, Professeur S. M. MERIAH examinateur, M^{lle} F. DEBBAT membre invité, qui ont acceptés de lire, corriger, critiquer, juger et améliorer ce travail.

Sans oublier d'exprimer nos meilleurs remerciements aux enseignants et étudiants du département du génie électrique et électronique en particulier : Professeur MEGHABAR AbdelMajid Chef de département, Mr Benremdane Abou Sayf, Bourouis Abderrahim, ... et les autres.

I. Introduction :

Les capteurs peuvent avoir des modèles et technologies variés : hydrophone, diode laser, photo transistors, électrodes, antennes.... Ils peuvent donc prétendre à un large éventail d'applications, nous citons à titre indicatif : imagerie médicale, radar, sonar, surveillance sous-marine, astronomie, sismologie, détection des gisements miniers et pétroliers sans oublier les systèmes de télécommunications sans-fil. Dans notre cas, un réseau de capteurs n'est rien d'autre qu'un groupement de plusieurs capteurs identiques avec des positions fixes par rapport à une référence choisi. Ce point de référence doit être proche du réseau. Couramment, et pour des considérations pratiques, ce point de référence coïncide avec l'un des capteurs du réseau. Le capteur sera donc l'entité utilisée pour l'observation et la mesure d'une source vectrice d'information. Les signaux mesurés par les capteurs du réseau seront identiques à l'exception d'un certain retard dû à la répartition spatiale des capteurs et la géométrie du réseau. Ce qui permet d'exploiter les caractéristiques spatiales : directions et positions des sources à écouter.

Bien que l'objectif de notre travail ne concerne pas la conception des réseaux de capteurs dédiés aux systèmes de télécommunications, nous présenterons dans une première partie quelques aspects de leurs utilisations et conceptions. Ce qui nous permettra de mettre en évidence, que la fabrication et le mode de fonctionnement de ces systèmes n'est pas simple et passe souvent par des phases de conception et d'optimisation heuristiques. L'étude et la synthèse sur la matérialisation des réseaux de capteurs nous aidera ultérieurement à critiquer, voire proposer des algorithmes et modèles liés à la solution de notre problème à résoudre dans le cadre de cette recherche. Sur cette même partie, nous enchaînerons par une étude du milieu de propagation et une élaboration d'un modèle que nous supposons proche du comportement physique. Ce modèle sera implémenté et utilisé tout au long de cette recherche.

La fonction de base d'un récepteur ne consiste pas à produire le meilleur rapport signal sur bruit, mais de pouvoir décider efficacement de la présence ou l'absence d'une source d'information ou de bruit. Dans le cadre de notre recherche, le traitement des signaux mesurés par les réseaux de capteurs intelligents est séparé en deux étapes : une étape qui se limite uniquement à l'écoute et le filtrage spatial, précédée par une étape de détection des paramètres

des signaux et sources de l'environnement. L'estimation et la détection est utilisée pour acquérir des informations sur plusieurs signaux, afin de prendre une décision et pouvoir effectuer une sélection. La majorité des algorithmes de détections se basent sur des hypothèses facilitant la prise de jugement : estimation des valeurs de certaines entités ou paramètres sur l'observation. Dans une deuxième partie, nous présenterons une étude détaillée d'une multitude d'algorithmes de détection, suivie de la manière avec laquelle nous avons adapté et implémenté ces approches sur le modèle élaboré pour les réseaux de capteurs présenté précédemment.

La finalité et l'intention de ce travail consiste à créer un système complet apte à faire coopérer et combiner : la détection des sources de l'environnement, la mesure simultanée de plusieurs sources et l'élimination des sources indésirables. Pour cela, nous nous sommes orientés vers les systèmes multiagents, une nouvelle discipline informatique qui trouve des applications dans le génie logiciel, les systèmes répartis et l'intelligence artificielle. En effet, les systèmes multiagents sont définis comme étant de multiples entités dites agents, en interaction permanente. De plus, les agents sont supposés être des systèmes indépendants les uns des autres et autonomes pour la prise d'une décision. Dans un tel système la totalité des agents doivent coopérer pour atteindre un objectif commun, une coopération qui ne se limite pas uniquement à un simple échange de données, traditionnellement utilisé avec une conception concurrente multi tâches. En effet, le travail collectif des agents utilisera en plus les notions de : coopération, coordination, négociation... on parle souvent d'un système multiagents comme étant un système social artificiel. Dans la dernière partie de ce travail, nous fournirons une étude détaillée du développement, analyse et utilisation des systèmes multiagents. Cette étude nous permet de définir les techniques utilisées, la manière de les approfondir et la façon de les implémenter. Les principaux résultats de cette recherche seront présentés. En effet, nous allons concevoir et intégrer une solution de détection et filtrage spatial pour les réseaux de capteurs exploitant le comportement coopératif d'un système multiagents. Cette solution multiagents, va tirer ces ressources et connaissances du modèle élaboré pour le réseau de capteurs et les différentes techniques de détection étudiées et implémentées.

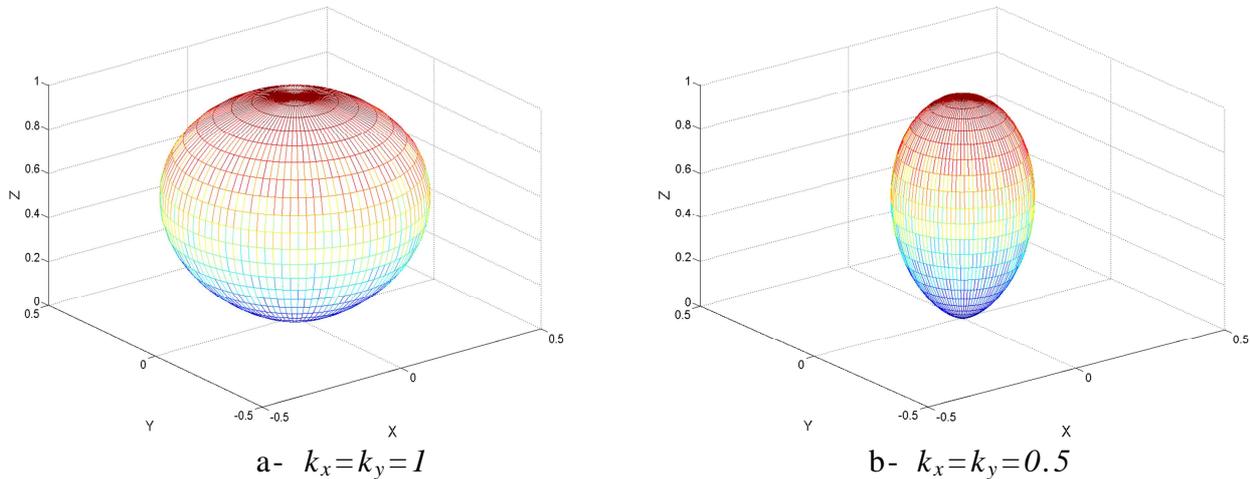
II. Technologie et modélisation des capteurs

Les capteurs peuvent être à base d'une multitude de technologies. Ils ont pour rôle principal la conversion d'une énergie en un signal électrique. Le type et la technologie des capteurs sont choisis suivant la nature des signaux et le milieu de propagation (canal).

En se basant sur les cas concrets des capteurs et l'analyse de leurs diagrammes de gains spatiaux. Nous proposons le prototype de l'équation (1) pour modéliser le comportement d'un capteur. La directivité de ce modèle est représentée par la *figure-1*.

$$D(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_x \times \cos(\theta)^2 \times \sin(\theta) \times \cos(\varphi) \\ k_y \times \cos(\theta)^2 \times \sin(\theta) \times \sin(\varphi) \\ |\cos(\theta)^2 \times \cos(\theta)| \end{pmatrix} \quad (1)$$

avec $k_x, k_y \in \mathbb{R}^*$ et $\theta \in [0, 2\pi]$; $\varphi \in [0, 2\pi]$ angles incidents des signaux mesurés selon une représentation sphérique relative à la terre ; φ : azimut, θ : élévation. Le modèle (1) proposé n'est utilisé que si l'angle θ représentant l'élévation appartient à l'intervalle $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ dans le cas contraire le gain D est supposé nul.



*Figure-1- Modèle de la directivité D proposé pour un capteur.
pour les deux cas le capteur possède les coordonnées (0,0).*

Nous avons utilisé le modèle de l'équation (1) pour représenter les capteurs et nous l'avons considéré comme étant proche du comportement réel de ces derniers. Les deux constantes « k_x » et « k_y » vont nous permettre de régler les ouvertures respectivement suivant les plans « Z-X » et « Z-Y ».

III. Technologie et modélisation des déphaseurs

En pratique, un filtrage spatial ne peut être matérialisé sans faire appel aux déphaseurs. Les déphaseurs à base de la ferrite s'adaptent à la problématique des transmissions hertziennes sans-fil en technologie imprimée. Ayant travaillé sur les déphaseurs a ferrite en technologie imprimée durant le stage effectué en février 2008 au laboratoire d'électronique INP TOULOUSE, nous pouvons dire que ces déphaseurs se présentent comme une solution intéressante vis-à-vis des autres technologies. Les déphaseurs discrets peuvent ne pas satisfaire certaines conditions alors que ceux à base d'une technologie numérique introduisent des erreurs sur les parties utiles de l'information. Néanmoins, en télécommunications il est également souhaitable d'avoir des déphaseurs réciproques pour avoir un seul dispositif opérant en émission et réception.

Pour notre cas le déphaseur associé avec un système d'amplification sera représenté par un simple nombre complexe (2).

$$W_i = A_i e^{j\varphi_i} = W r e_i + j W i m_i \quad (2)$$

avec i désignant le rang du capteur au sein du réseau.

Le déphaseur W_i peut prendre n'importe quelle valeur complexe sauf pour modéliser des déphaseurs à valeurs discrètes. Pour représenter ce dernier type, il suffit d'ajouter des contraintes supplémentaires obligeant la sélection d'une valeur à partir d'un ensemble limité de valeurs.

IV. Modélisation des milieux de propagation

Le milieu de propagation par définition désigne le milieu utilisé par un signal de communication entre émetteur et récepteur, couramment appelé canal de transmission. L'idéal pour une liaison sans-fil est atteint si le signal reçu est exclusivement le résultat d'une propagation directe sans déformations.

Le modèle associé avec un milieu de propagation permet de comprendre les altérations subites par le signal émis à travers un canal. Les modèles spécifiant une propagation réelle sont compliqués. En outre, pour une bonne conception des réseaux de capteurs avec une sélection correcte des techniques de détection et d'adaptation, il est indispensable de connaître la manière avec laquelle l'énergie est répartie sur l'espace (milieu de propagation). Par conséquent, si une source est

vue comme un point avec une forte concentration d'énergie, il devient utile de détecter avec précision les paramètres de ce point en prenant en considérations les effets du canal. Ces raisons nous poussent à étudier et modéliser les effets des canaux de transmission sur un signal :

- Pertes de propagation
- Bruits additifs
- Effets multi-trajets : Le principe d'une propagation multi-trajets est schématisé sur la *figure-2*.

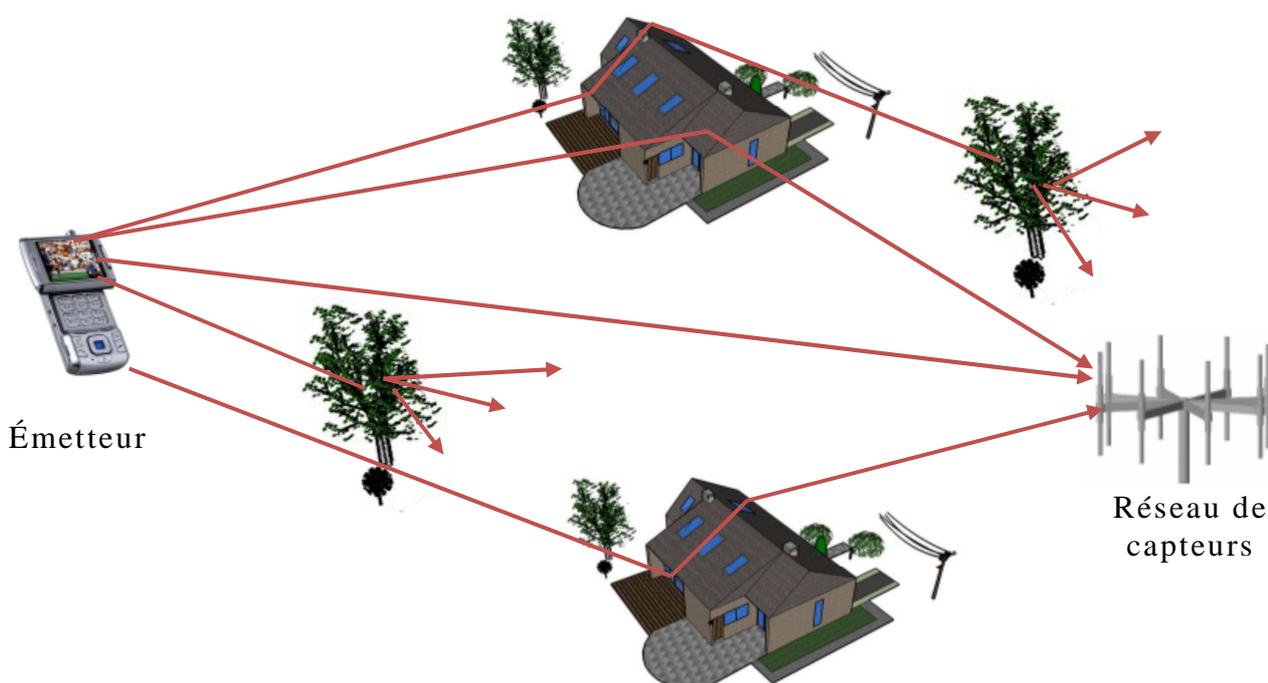


Figure-2- Principe des canaux multi-trajets causés par des dispersions, réfractions, réflexions et diffractions d'une onde.

Il est à présent clair que les canaux de transmission vont introduire des bruits et des altérations sur les signaux émis. La simulation d'un système de télécommunications impose la modélisation des canaux en se basant sur les descriptions mathématiques des phénomènes. La *figure-3* représente un schéma synoptique du modèle que nous avons adopté pour simuler les canaux de transmission.

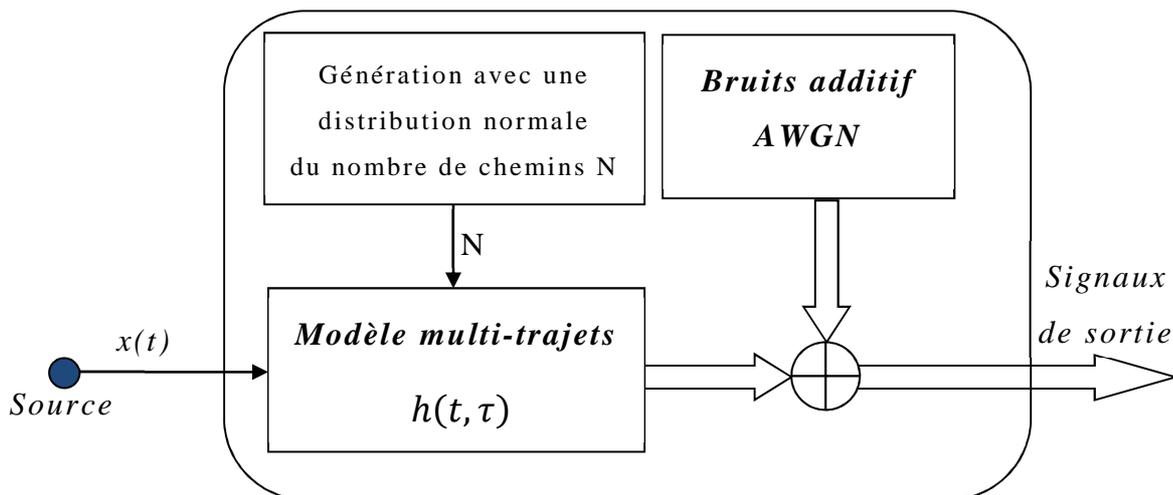


Figure-3- Synoptique de l'implémentation réalisée pour le canal de transmission et exploitée lors des simulations.

$$\text{Avec } h(t, \tau) = \sum_{i=1}^N x(t) e^{j\phi_i(t)} \delta(\tau - \tau_i(t))$$

V. Modélisation des réseaux de capteurs

Dans notre cas, les sources de l'environnement schématisées dans la figure-4 sont supposées être situées à une grande distance par rapport au réseau de capteurs. Cette hypothèse est validée dans la pratique, et va nous permettre d'utiliser la notion des ondes planes pour élaborer le modèle des signaux au niveau des réseaux de capteurs.

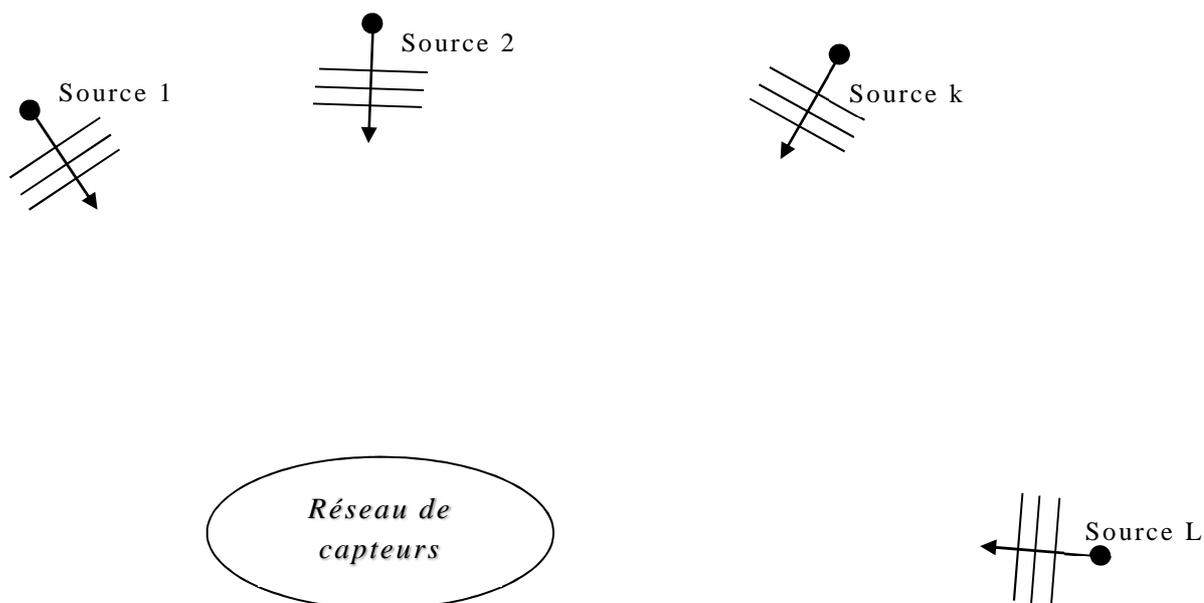


Figure-4- Répartition spatiale de L sources de l'environnement en champ lointain.

V.1. Structure des réseaux capteurs

Il s'agit d'une combinaison de plusieurs capteurs opérants en parallèle, combinés avec des puissants algorithmes (*figure-5*) pour :

- ✓ remédier aux effets du milieu de propagation : atténuation, absorption, réflexion, Multi-trajets,...
- ✓ cibler des destinataires,
- ✓ concentrer l'énergie émise dans une région spatiale limitée ayant comme conséquence une augmentation de la portée du signal,
- ✓ séparer les signaux correspondants à différentes sources associées avec des directions dissemblables,
- ✓ assurer des gains élevés, respectivement nuls, sur des directions spécifiques.

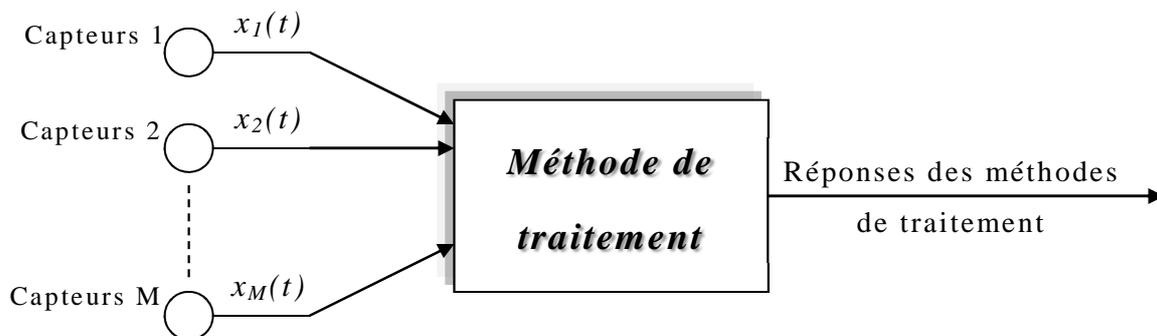


Figure-5- Diagramme fonctionnel du principe de traitement par réseau de capteurs.

V.2. Modélisation des signaux

V.2.a. Configuration spatiale

Un réseau de capteurs se présente comme un agencement d'un certain nombre de capteurs élémentaires, chacun considéré comme un point d'acquisition occupant une certaine position dans l'espace. Les capteurs sont considérés comme des observateurs indépendants par rapport à une référence fixe (*voir figure-6*). Cette condition nous permet de prendre en considération les caractéristiques spatiales des différents signaux et de localiser de manière précise l'information.

V.2.b. Modélisation des signaux

Supposons que le réseau comporte « M » capteurs, nous disposons de M réponses notées sous une forme vectorielle par (3).

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Soit « L » signaux incidents sur le réseau, il est évident que « L » est plus grand que le nombre des sources de l'environnement, en conséquence d'une propagation multi-trajets. Un signal $s_i(t)$ unique, après avoir subi les effets du canal, est représenté sous une forme vectorielle (4).

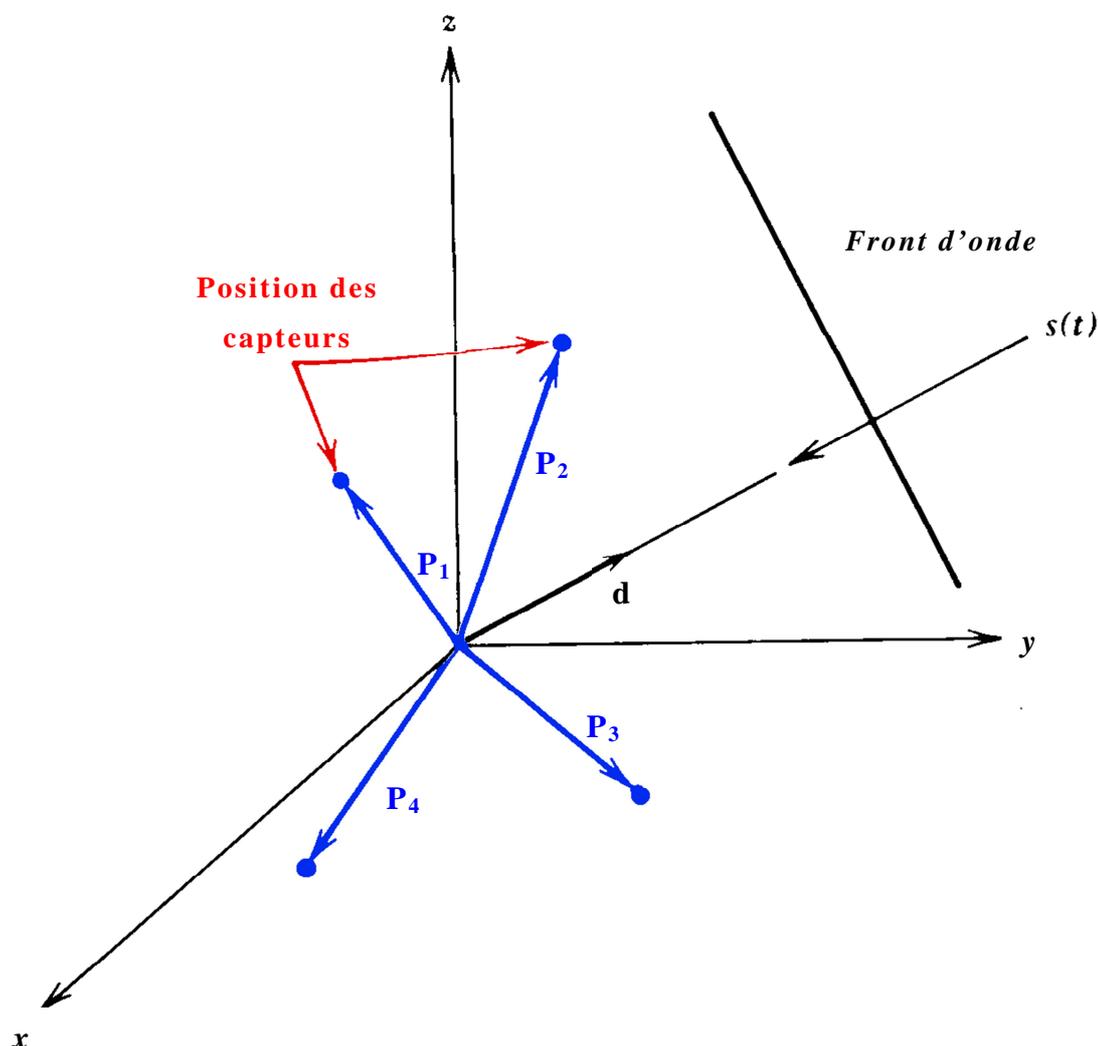


Figure-6- Principe de l'échantillonnage spatial effectué par un réseau avec des capteurs répartis dans l'espace.

$$S_i(t) = \begin{bmatrix} s_{i\ 1}(t) \\ s_{i\ 2}(t) \\ \vdots \\ s_{i\ M}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Les sorties des différents capteurs, pour le signal $s_i(t)$ seront donc identiques à l'exception d'un certain retard correspondant au temps de propagation du front d'onde. Par conséquent, la réponse individuelle des capteurs va contenir des informations sur le retard temporel et le déphasage par rapport au signal mesuré par le capteur de référence. Les techniques basées sur les réseaux de capteurs prennent avantages sur ces informations.

Supposons à présent que le signal incident est une onde plane, la direction de cette onde est précisée par le vecteur unitaire « d » (*figure-6*). Les différents retards de propagations τ_j sont déterminés par (5).

$$\tau_j = \frac{d \cdot P_j}{c} \quad (5)$$

où « c » : est la vitesse de propagation (vitesse de la lumière dans le cas des ondes électromagnétiques) et $d \cdot P_j$: un produit scalaire qui s'interprète comme étant la projection du vecteur P_j sur le vecteur « d » (*figure-7*).

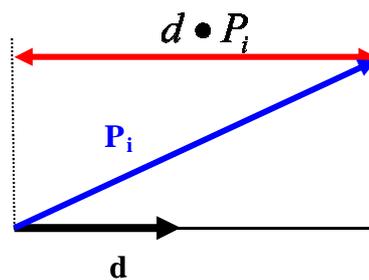


Figure-7- Présentation de la projection du vecteur P_i .

La réponse globale du réseau pour les L signaux de l'environnement, est modélisée par une combinaison linéaire des différentes mesures associées avec les signaux $s_i(t)$ selon l'équation (6).

$$X(t) = \sum_{i=1}^L s_i(t) \times S_i \quad (6)$$

C'est ce modèle qui a été utilisé tout au long de ce travail, pour modéliser l'effet des réseaux de capteurs sur les mesures. Nous rappelons que l'effet des bruits est inclut au niveau de chaque signal $s_i(t)$ à travers le modèle adopté pour le canal.

VI. Formulation du problème de détection

Les performances des réseaux de capteurs vont être sérieusement dégradées si les caractéristiques de l'environnement où sont effectuées les mesures changent continuellement. Ceci a pour origine, l'effet :

- ✓ des sources et bruits externes inconnues en nombre et en directions,
- ✓ des sources en mouvement permanent,
- ✓ des propagations multi-trajets.

Dans notre cas, le problème de détection, qui doit être traité par un réseau de capteurs quelconque, avec un modèle de propagation à base d'ondes planes, est formulé par :

- ✓ le calcul et la détermination du nombre des sources d'énergie,
- ✓ une estimation des directions d'arrivées en présence des bruits et des signaux interférents.

Le principe de détection, proposé dans le cadre de ce travail, va respecter les étapes schématisées par le diagramme de la *figure-8*.

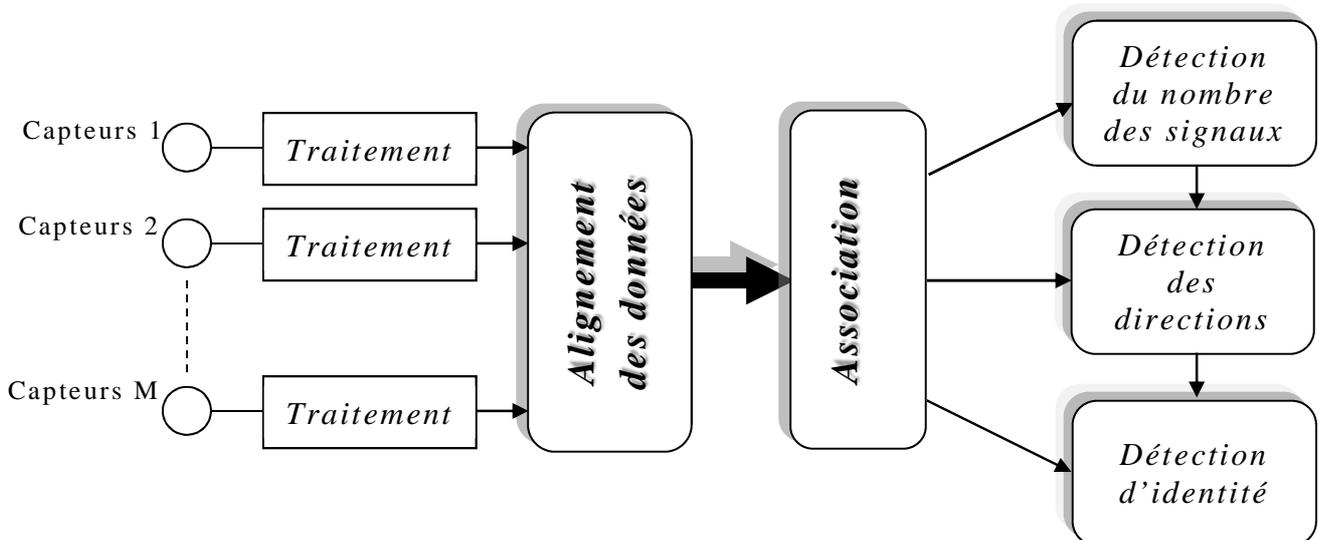


Figure-8- Diagramme fonctionnel des étapes de la phase de détection proposée.

VI.1. La phase de traitement

Cette étape doit être réalisée de façon à ne pas modifier ou manipuler la partie utile du signal mesuré par un capteur. Le plus couramment il s'agit d'un filtrage, une démodulation, décalage en fréquence, conversion analogique numérique. A titre de rappel, dans ce travail, les signaux sont supposés à bande étroite, ce qui nous oblige à utiliser des filtres passe bandes réglés sur la fréquence utile de l'application envisagée, comme première étape de traitement.

VI.2. La phase d'alignement des données

Dans cette phase nous transformons les lignes mesurées par les différents capteurs en une représentation standard : étape dite de normalisation. Il s'agit d'un simple alignement en amplitude des signaux mesurés. Pratiquement cette étape peut s'identifier à un contrôle de puissance.

VI.3. Association des données

Dans cette étape il s'agit d'effectuer un regroupement des différentes mesures en une représentation qui est traitée comme une seule entité physique. Soit un réseau à « M » capteurs avec des positions arbitraires dans l'espace. Un tel réseau reçoit « L » signaux avec une fréquence bien connue « $\omega = 2\pi f$ » et des directions « d_1, d_2, \dots, d_L ». Nous avons établi préalablement que la réponse des capteurs peut être exprimée par le modèle (7).

$$X(t) = \sum_{i=1}^L s_i(t) \times S(d_i) \quad (7)$$

avec :

- ✓ $X(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_M(t)]^T$ vecteur des différentes mesures,
- ✓ $s_i(t)$ le signal de direction d_i
- ✓ $S(d_i) = [D_1(d_i) \ D_2(d_i).e^{-j\omega\tau_2(d_i)} \ D_3(d_i).e^{-j\omega\tau_3(d_i)} \ \dots \ D_M(d_i).e^{-j\omega\tau_M(d_i)}]^T$ désigne le vecteur d'espace du réseau associé avec la direction d_i ,
- ✓ $D_k(d_i)$ gain spatial du capteur de rang k formulé par (1).
- ✓ $\tau_k(d_i)$ retard de propagation entre le capteur de référence et le capteur de rang k suivant la direction d_i .

L'étape d'association des données, consiste à estimer une matrice de corrélation « R » à partir de « K » échantillons mesurés durant un intervalle d'observation et de mesure limité. Cette estimation est effectuée en calculant le

moment du premier ordre des variables aléatoires $X(t)$ selon le modèle (8). Il est évident que cette matrice de corrélation est une matrice de dimension « $M \times M$ ».

$$\hat{R} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K X(k) \cdot X(k)^H \quad (8)$$

Il est également certain que la matrice de corrélation « \hat{R} » est une approximation obtenue à partir du nombre limité d'échantillons effectués sur les signaux mesurés par les capteurs du réseau.

VI.4. La phase de détection

Cette phase de détection, qui est basée sur les étapes précédentes, est divisée en trois étapes. Une première étape, consiste à estimer le nombre des signaux incidents sur le réseau de capteurs. Par la suite et comme seconde étape la détections des directions de ces signaux. Compte tenu des effets multi-trajets, il est évident que le nombre des signaux incidents sur le réseau de capteurs peut être plus grand que le nombre des sources réels de l'environnement. Une dernière étape dite détection d'identités va être utilisée pour supprimer les doublons.

VII. Détection du nombre de sources

VII.1. Formulation générale

Le problème de base dans ce cas, consiste à déterminer le nombre des signaux incidents sur le réseau. La détection du nombre de sources est une tâche critique et difficile particulièrement pour l'élaboration des critères de détection. Couramment il est plus simple de détecter le nombre des signaux mesurés que d'estimer leurs paramètres. De plus, la capacité d'un réseau à séparer deux sources proches peut être interprétée par le fait que le réseau ne peut pas voir la présence de ces deux signaux et par conséquent il ne pourra pas les séparer.

Nous avons proposé des algorithmes d'estimation du nombre de sources de l'environnement avec un réseau de capteurs possédant une géométrie à trois dimensions quelconque. Les algorithmes proposés sont basés sur l'exploitation du modèle élaboré précédemment avec les méthodes de détection AIC (Akaike Information Criterion) et MDL (Minimum Description Length) largement utilisées en détections dans le domaine spectral.

VII.2. Approches de détection AIC et MDL

VII.2.a. *Présentation des méthodes*

Ces deux approches utilisées pour la détection du nombre des signaux incidents sur le réseau, sont basés sur la détermination et le test des valeurs propres de la matrice de corrélation estimée par (8), pour obtenir des indications sur les petites valeurs propres associées avec le sous espace des bruits. Ces méthodes consistent alors à minimiser un critère à travers l'espace des signaux à détecter.

Pour construire ce critère, il faut dans une première étape estimer les valeurs propres de la matrice de corrélation obtenue suivant le modèle (8). Soit les valeurs propres organisées sous la forme (9).

$$g_1 \geq g_2 \geq g_3 \geq \dots \geq g_M \quad (9)$$

Plusieurs fonctions sont proposées pour les méthodes AIC et MDL, si l'on dispose de « K » mesures indépendantes pour une matrice de corrélation et une famille de valeurs propres de la forme (9). Une forme simplifiée des critères à minimiser sont donnés par (10) pour AIC et par (11) pour MDL.

$$L_{AIC} = \min_L AIC(L) = \min_L (-K \log(\mathcal{L}_L) + L(2M - L)) \quad (10)$$

$$L_{MDL} = \min_L MDL(L) = \min_L \left(-K \log(\mathcal{L}_L) + \frac{(L(2M - L) + 1) \log(K)}{2} \right) \quad (11)$$

sachant que l'entité \mathcal{L}_L est donné par (12).

$$\mathcal{L}_L = \frac{\prod_{i=L+1}^M g_i}{\left(\frac{\sum_{i=L+1}^M g_i}{M - L} \right)^{M-L}} \quad (12)$$

Il apparait clairement que ces deux méthodes sont identiques à l'exception du terme de pénalité qui fait introduire le terme $\log(K)$ pour la méthode MDL.

VII.2.b. *Evaluation des performances*

L'analyse des performances consiste à calculer la probabilité avec laquelle les valeurs « L_{AIC} » ou « L_{MDL} » sont différentes du nombre L des signaux incidents sur le réseau de capteurs. Ces probabilités de mauvaise détection sont exprimées par l'équation (13) pour AIC et l'équation (14) pour MDL.

$$Pr[L_{AIC} \neq L] \quad (13)$$

$$Pr[L_{MDL} \neq L] \quad (14)$$

Commençons par une analyse de la sous-estimation des sources exprimée par les probabilités suivantes :

La Probabilité d'une sous-estimation de la méthode AIC est nulle ce qui montre que cette approche de détection n'introduit aucune sous-estimation.

Ce pendant pour la méthode MDL, la probabilité d'une sous-estimation est exprimée par (15).

$$Pr_{MDL} = 1 - G\left(\frac{\mu_{MDL}}{\sigma_{MDL}}\right) \quad (15)$$

avec :

- ✓ $G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2} dz$ distribution Gaussienne,
- ✓ $\mu_{MDL} = -\log(1 + g_L) + (M - L + \alpha) \log\left(1 + \frac{g_L}{M - L + \alpha}\right) - \frac{2M - 2L + \alpha}{2K} \log(K)$.
- ✓ $\sigma_{MDL}^2 = \frac{1}{K} \left(1 + \frac{1}{M - L}\right) \left(\frac{(M - L)^2 g_L^2}{(g_L + M - L + \alpha)^2}\right)$

La probabilité (15) montre clairement que l'approche MDL souffre du problème de sous-estimation des sources de l'environnement.

Nous allons à présent vérifier le problème d'une surestimation des signaux incidents. La surestimation est étudiée à travers les probabilités suivantes :

La probabilité d'une surestimation associée à la méthode AIC est exprimée par l'équation (16).

$$Pr_{AIC} = 1 - G\left(\frac{\mu_{AIC}}{\sigma_{AIC}}\right) \quad (16)$$

avec :

- ✓ $G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2} dz$ distribution Gaussienne,
- ✓ $\mu_{AIC} = -\log(1 + g_L) + (M - L - \alpha) \log\left(1 + \frac{g_L}{M - L - \alpha}\right) - \frac{2M - 2L - \alpha}{K}$.
- ✓ $\sigma_{AIC}^2 = \frac{1}{K} \left(1 + \frac{1}{M - L}\right) \left(\frac{(M - L)^2 g_L^2}{(g_L + M - L - \alpha)^2}\right)$

Cette probabilité (16) montre clairement que l'approche AIC souffre du problème de surestimation des signaux de l'environnement. Ce problème a été présenté et traité dans plusieurs travaux.

Toutefois, la probabilité d'une surestimation de la méthode MDL est nulle ce qui montre que cette approche de détection n'introduit aucune surestimation.

VII.2.c. Analyse des performances de détection AIC et MDL

L'analyse des performances des deux algorithmes AIC et MDL sera effectuée à travers un réseau linéaire et uniforme (*figure-9*), l'espacement entre les capteurs adjacents est la moitié de la longueur d'onde porteuse. Les capteurs possèdent une réponse de la forme $(I-1)$ avec $k_x=k_y=1$.

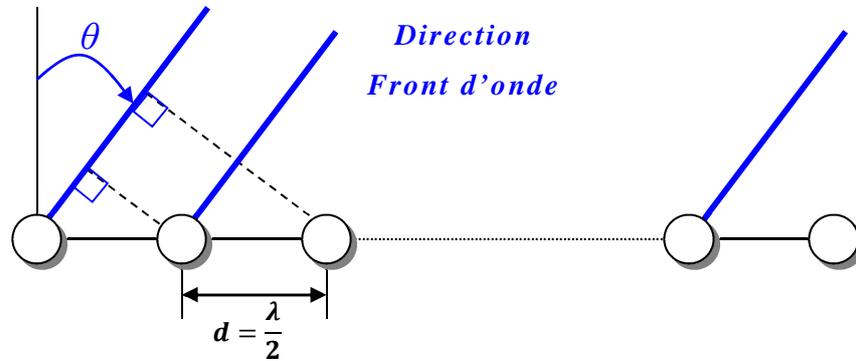
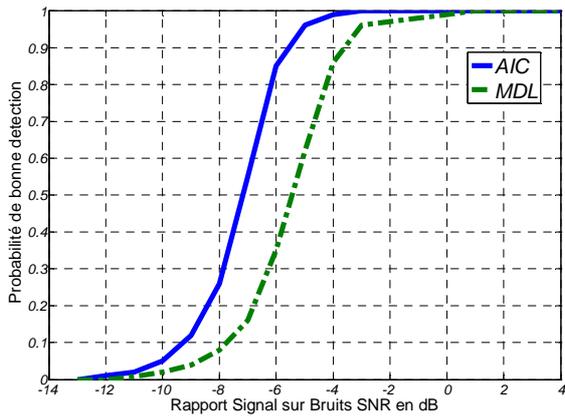


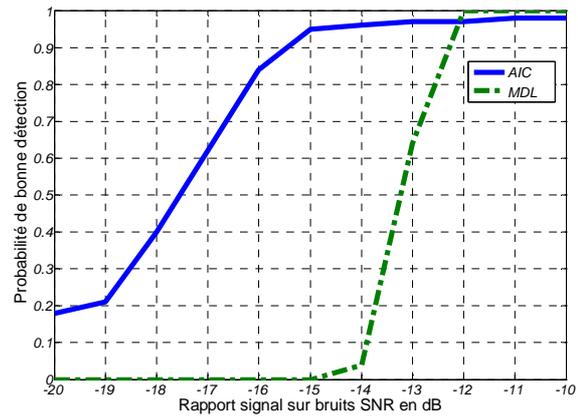
Figure-9 Réseau linéaire uniforme et régulier.

Les paramètres que nous allons analyser, tout en effectuant des comparaisons avec des travaux de détection similaires, se résument à l'effet des bruits, résolution de détection angulaire, effet du nombre de capteurs et effet du nombre d'échantillons utilisés pour calculer la matrice de corrélation.

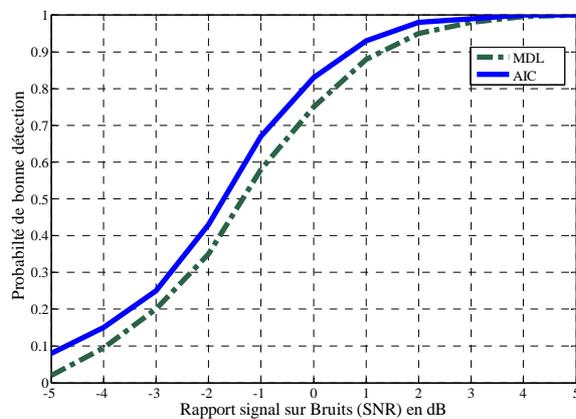
- ✓ Influence des bruits : l'influence des bruits sur la détection du nombre de sources, sera analysée en exploitant le rapport signal sur bruits. Analysons la détection d'une seule source de direction 0° avec un réseau linéaire respectivement de 3 et 14 capteurs. Les probabilités obtenues sont représentées sur la *figure-10*. Il apparaît clairement que la méthode AIC offre de très bons résultats pour des valeurs faibles du rapport signal sur bruit avec une surestimation si le rapport devient important. A l'opposé, l'approche MDL opère de manière satisfaisante pour des valeurs importantes du rapport signal sur bruits.
- ✓ Effet de la séparation angulaire : l'effet de la séparation angulaire entre sources combiné avec l'effet du rapport signal sur bruits est analysé par un réseau à 8 et 14 capteurs sur la *figures-10*. Il apparaît que pour une faible séparation de l'ordre de 1° , une estimation sans erreurs ne peut être obtenue que pour des valeurs élevées du rapport signal sur bruits. Nous avons également noté, d'après ces résultats, que pour des faibles séparations angulaires la méthode AIC présente fréquemment des surestimations.



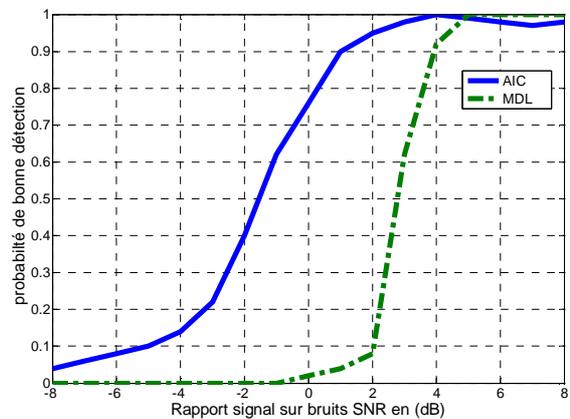
a- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 3 capteurs, un seul signal avec une direction de 0° . SNR=-6dB $N_{AIC}=1$ $N_{MDL}=0$, SNR=-4dB $N_{AIC}=1$ $N_{MDL}=1$, SNR=2dB $N_{AIC}=2$ $N_{MDL}=1$.



b- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 14 capteurs, un seul signal avec une direction de 0° . SNR=-17,5dB $N_{AIC}=1$ $N_{MDL}=0$, SNR=-12,5dB $N_{AIC}=1$ $N_{MDL}=1$, SNR=-11dB $N_{AIC}=2$ $N_{MDL}=1$.



c- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 8 capteurs, deux sources incidentes de directions 10° et 15° . SNR=-3dB $N_{AIC}=1$ $N_{MDL}=0$, SNR=0dB $N_{AIC}=2$ $N_{MDL}=2$, SNR=5dB $N_{AIC}=3$ $N_{MDL}=2$.

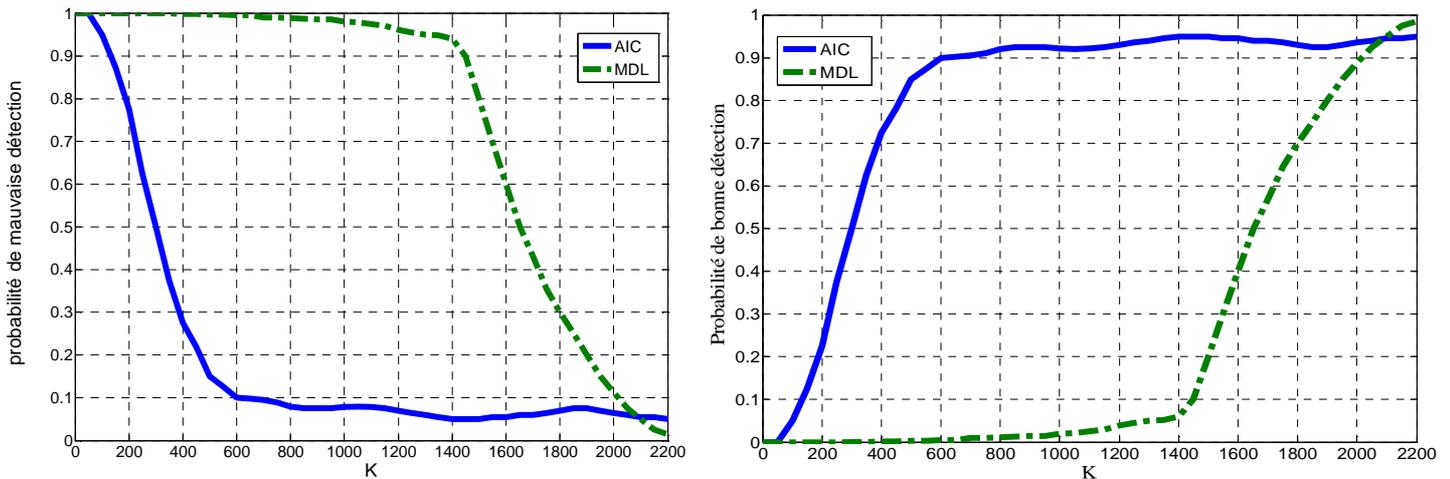


d- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 14 capteurs, deux sources incidentes de directions 0° et 1° . SNR=-2dB $N_{AIC}=0$ $N_{MDL}=0$, SNR=2dB $N_{AIC}=2$ $N_{MDL}=1$, SNR=5dB $N_{AIC}=2$ $N_{MDL}=2$, SNR=7dB $N_{AIC}=3$ $N_{MDL}=2$.

Figure-10- Effet des bruits et de la séparation angulaire sur la détection du nombre des signaux incidents.

✓ Effet des échantillons d'estimation de la matrice de corrélation : nous allons présenter dans ce paragraphe, les performances des deux techniques de détection AIC et MDL par rapport au nombre d'échantillons « K » utilisé pour estimer la matrice de corrélation « \hat{R} ». Au niveau de la figure-11 nous présentons les résultats de simulation, des probabilités de mauvaise détection sur un réseau de 10 capteurs avec un rapport signal sur bruits SNR=-3dB et trois signaux incidents sur le réseau [0° 10° 15°]. La figure-11 montre clairement la supériorité de l'approche AIC par rapport à l'approche MDL pour

des faibles valeurs de « K », alors que pour des valeurs importantes les deux méthodes tendent vers la même probabilité de détection.



a- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 10 capteurs, trois signaux incidents $[0^\circ \ 10^\circ \ 15^\circ]$ et rapport signal sur bruits $SNR=-3dB$.

Figure-11- Effet du nombre d'échantillons utilisé pour l'estimation de la matrice de corrélation sur la détection du nombre des signaux incidents.

VIII. Détection des directions

Le deuxième problème à résoudre, consiste à détecter les directions incidentes des différents signaux présents sur le réseau de capteurs, connaissant leurs nombre comme indiqué par la *figure-12*. Ce qui explique la coopération réalisée entre les deux approches pour la détection du nombre des signaux incidents.

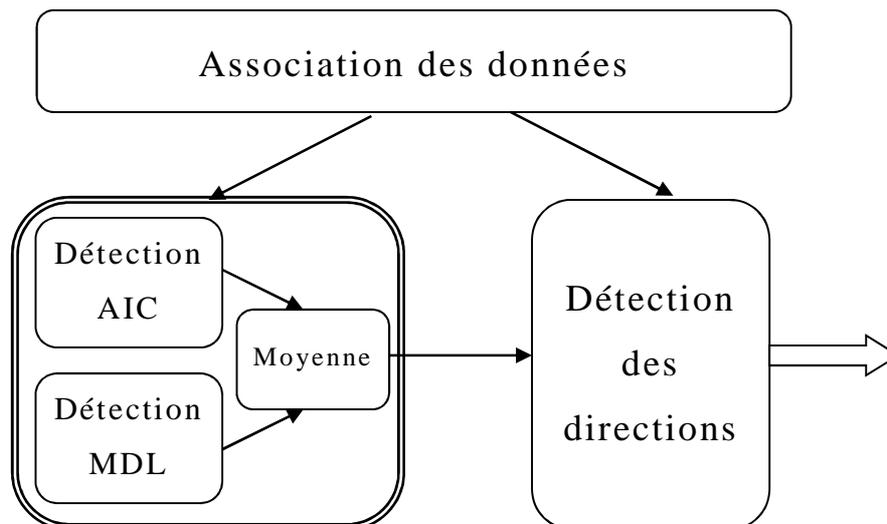


Figure-12- Detections des directions incidentes sur le réseau de capteurs en aval d'une estimation du nombre des signaux.

VIII.1. Détection basée sur l'erreur quadratique moyenne

VIII.1.a. Présentation de la méthode

Classée parmi les techniques non paramétriques, cette méthode dite MVDR (*Minimum Variance Distortion Less Response*) ou bien CAPON, consiste à minimiser un critère de vraisemblance de la puissance mesurée (critère de l'erreur quadratique moyenne). Nous avons reformulé et développé cette approche en combinaison avec un filtrage spatial comme indiqué sur le diagramme schématisé sur la *figure-13*.

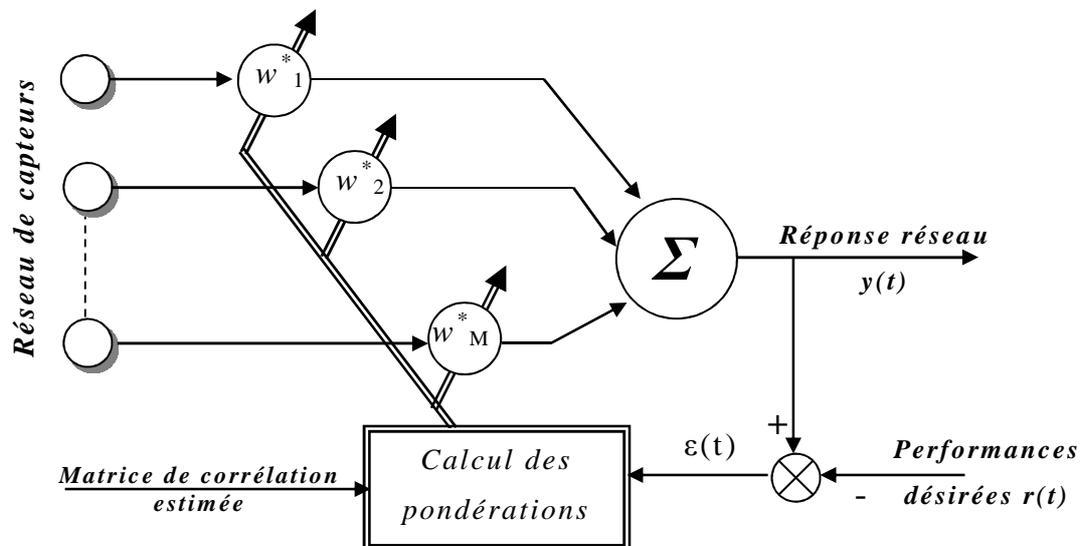


Figure-13 Schéma synoptique de l'algorithme de filtrage et de détection spatial implémenté.

Pour implémenter cette méthode, premièrement une erreur est estimée entre un signal de référence $r(t)$ et la réponse du réseau $y(t)$. la puissance P_s des signaux mesurés s'écrit alors sous la forme (17).

$$P_s(\mathbf{d}) = \frac{1}{S(\mathbf{d})^H \hat{R}^{-1} S(\mathbf{d})} \quad (17)$$

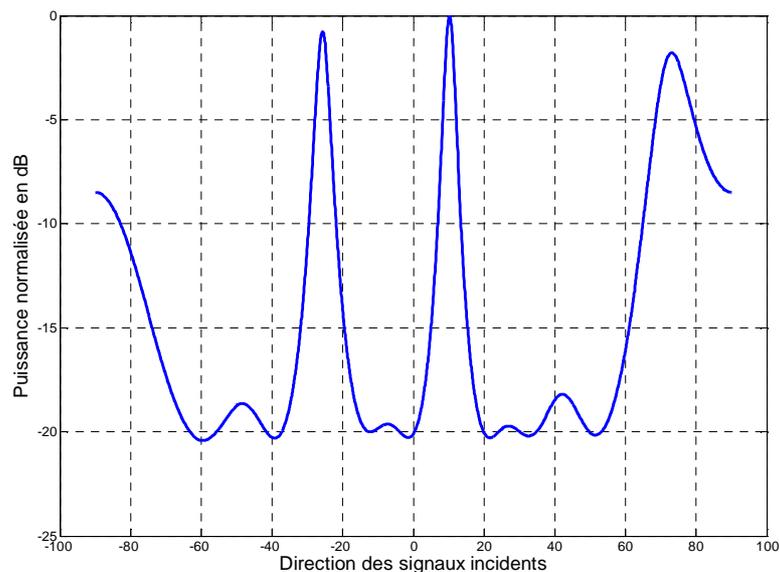
Les maxima de la puissance P_s permettront de détecter les directions des signaux incidents.

VIII.1.b. Simulations et résultats

Nous allons l'appliquer sur quelques architectures de réseaux de capteurs pour analyser les performances.

✓ Réseau rectiligne uniforme : Commençons par appliquer ce procédé de détection sur un réseau rectiligne et régulier comportant 10 capteurs élémentaires. Les sources ont été placées sur les directions -25° , 10° et 70° . la directivité obtenue est schématisée sur la *figure-14*, nous avons supposé la source avec la direction 10° comme étant la source d'intérêt.

Le nombre des sources détectées est égal à trois. La représentation de la *figure-14* témoigne d'une bonne détection des directions associées avec les trois signaux.



(b) Directions détectées

Figure-14- Détection MSE effectuée sur un réseau linéaire et régulier de 10 capteurs. Les sources sont supposées aux directions : -25° , 10° et 70°

✓ Réseau plan : nous allons à présent appliquer cette méthode sur un réseau plan régulier schématisé par la *figure-15*. Le premier cas est basé sur un réseau plan de 16 éléments. trois sources ont été simulées selon les directions $(-30^\circ, -60^\circ)$, $(50^\circ, 30^\circ)$ et $(10^\circ, 10^\circ)$ cette dernière est supposée utile. La directivité obtenue ainsi que les directions détectées sont représentées par la *figure-16*.

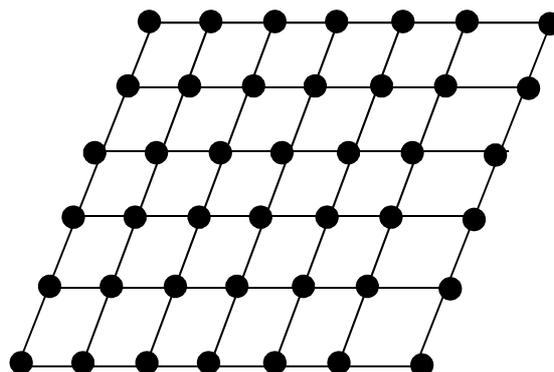
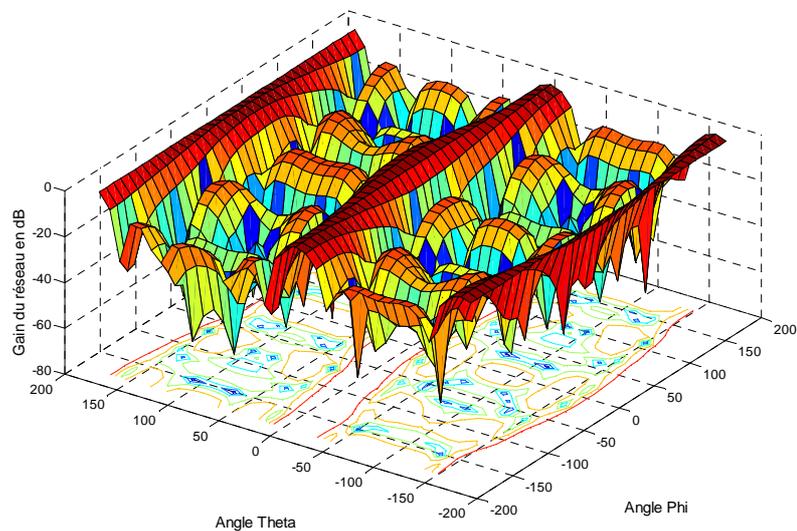


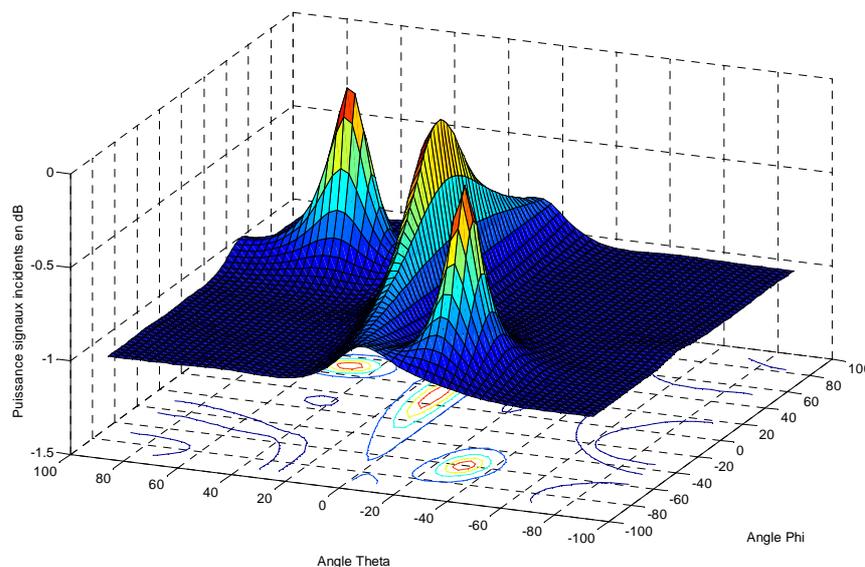
Figure-15 Réseau plan de capteurs.

Les résultats obtenus sur la *figure-16* montrent des niveaux entre -40dB et -60dB pour les directions des sources détectées. D'après les diagrammes du gain spatial du réseau, il apparaît clairement que la représentation spatiale et la représentation en courbe de niveaux de la puissance de sortie du réseau permet d'identifier trois sources autour des directions données.

En analysant ces résultats, il apparaît clairement que cette méthode de détection des directions incidentes est efficace. Seulement, elle ne permet d'avoir que des résolutions de mauvaise précision. De plus, si les sources sont corrélées entre elles alors elle devient quasiment inexploitable.



a-Gain spatial du réseau



b-Représentation spatiale des directions détectées.

Figure-16- Détection MSE effectuée sur un réseau plan et régulier de 16 capteurs. Sources aux directions : $(-30^\circ, -60^\circ)$, $(50^\circ, 30^\circ)$ et $(10^\circ, 10^\circ)$.

VIII.2. Méthode ESPRIT

VIII.2.a. Présentation de la méthode

La méthode ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) permet d'éviter la calibration et la recherche. L'algorithme ESPRIT que nous avons élaboré suit les étapes suivantes :

1. Obtenir une estimation de la matrice de corrélation \hat{R} du réseau de capteurs considéré.
2. Effectuer une détection du nombre des signaux mesurés. Une détection destinée à simplifier la décomposition.
3. Calculer les valeurs et vecteurs propre de la matrice de corrélation \hat{R} estimée.
4. Avec les vecteurs propres, effectuer une décomposition pour avoir deux sous espace E_a et E_b (en respectant le principe expliqué plus haut).
5. Calculer la matrice C selon l'équation (18). Effectuer par la suite une décomposition en valeurs et vecteurs propres de cette matrice pour former l'espace E_c .

$$C = \begin{bmatrix} E_a^H \\ E_b^H \end{bmatrix} [E_a \quad E_b] \quad (18)$$

6. Décomposer l'espace E_c suivant le modèle (19).

$$E_c = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

7. La matrice ψ est alors estimée par (20).

$$\psi = -E_{12}E_{21} \quad (20)$$

8. Les directions incidentes sont alors estimées à partir des valeurs propres $\{\lambda_{\psi_1} \dots \lambda_{\psi_L}\}$ de la matrice ψ .

VIII.2.b. Simulations et résultats

Il est clair que l'algorithme ESPRIT permet d'obtenir directement les directions des sources de l'environnement. A présent, nous allons étudier ses performances en exploitant cet algorithme de détection des directions incidentes sur des réseaux linéaire et sphérique.

✓ Réseau sphérique : Cette méthode est appliquée sur un réseau sphérique régulier schématisé par la *figure-17* avec 36 éléments uniformément répartis. Six sources ont été simulées selon les directions $(-25^\circ, 10^\circ)$, $(15^\circ, 30^\circ)$, $(-30^\circ, 50^\circ)$, $(45^\circ, 70^\circ)$, $(-60^\circ, 90^\circ)$ et $(80^\circ, 110^\circ)$. Un échantillon de la détection obtenue est représenté par le *tableau-1*, alors que la *figure-18* représente l'évolution sur plusieurs itérations.

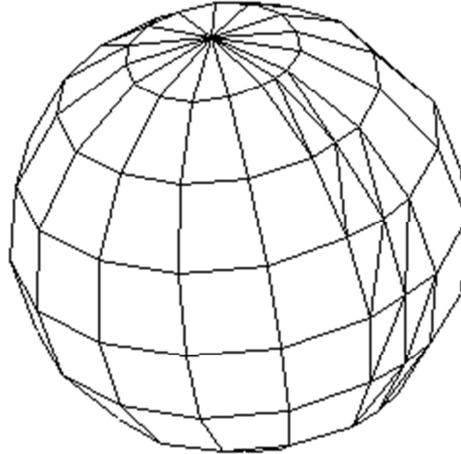


Figure-17- Configuration sphérique pour un réseau de capteurs.

<i>directions simulées</i>	<i>Directions détectées</i>
-25 ; 10	-24.2654 ; 10.9695
15 ; 30	13.8680 ; 31.0196
-30 ; 50	-30.2439 ; 49.4894
45 ; 70	44.6643 ; 69.6174
-60 ; 90	-61.0486 ; 88.5611
80 ; 110	79.7921 ; 110.3863

Tableau-1 : résultat d'une détection ESPRIT sur un réseau sphérique de 36 capteurs.

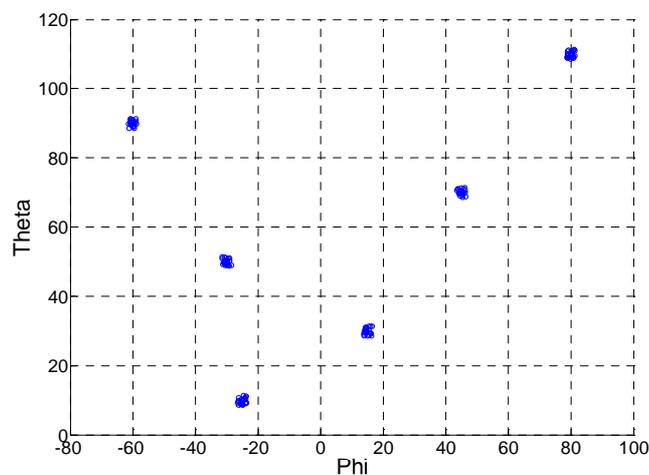


Figure-18- Détection ESPRIT effectuée sur un réseau sphérique de 36 capteurs.

Sources avec les directions : $(-25^\circ, 10^\circ)$, $(15^\circ, 30^\circ)$, $(-30^\circ, 50^\circ)$, $(45^\circ, 70^\circ)$, $(-60^\circ, 90^\circ)$, $(80^\circ, 110^\circ)$.

- ✓ Architecture spéciale : Cette fois la structure du réseau de capteurs utilisée, est représentée par *figure-19*. le *tableau-2* expose un échantillon des résultats obtenus. Les *figures -20 et 21*, représentent les détections effectuées par des exécutions continues de notre implémentation d'ESPRIT.

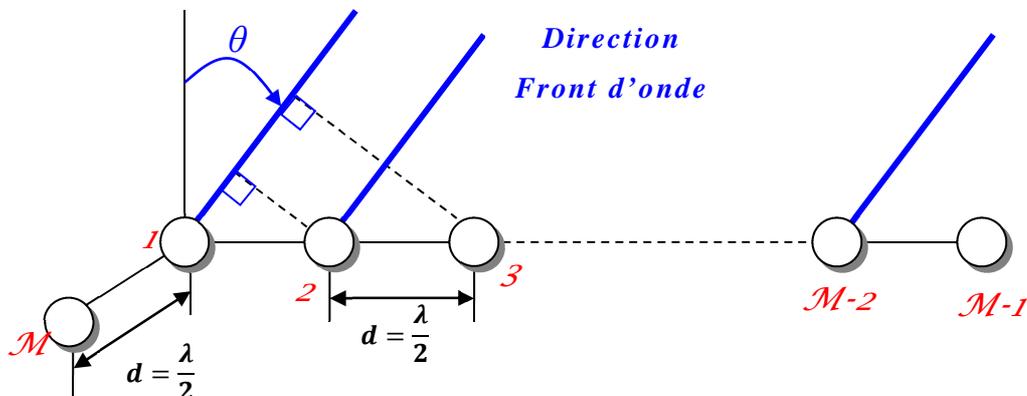


Figure-19- Réseau linéaire deux dimensions.

<i>directions simulées</i>	<i>Directions détectées</i>
<i>Cas d'un réseau M=6</i>	
40 ; 50	39.6186 ; 49.6347
55 ; 80	54.4750 ; 80.3766
70 ; 65	69.2901 ; 66.2462
<i>Cas d'un réseau M=4</i>	
59 ; 59	58.1754 ; 58.5712
70 ; 80	68.8694 ; 80.8517
80 ; 80	80.0809 ; 78.8312

Tableau-2 : Echantillons d'une détection ESPRIT.

En analysant les différents résultats de détection obtenus, nous avons remarqué que ceux de la méthode ESPRIT sont directes et plus précis.

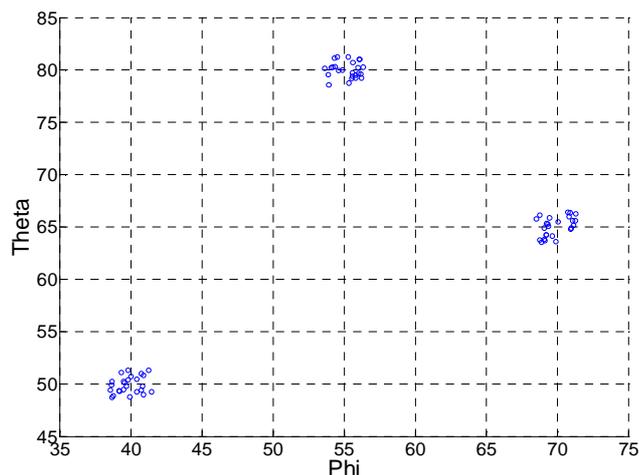


Figure-20- Résultats obtenus pour les directions : $(40,50)$; $(55,80)$ et $(70,65)$

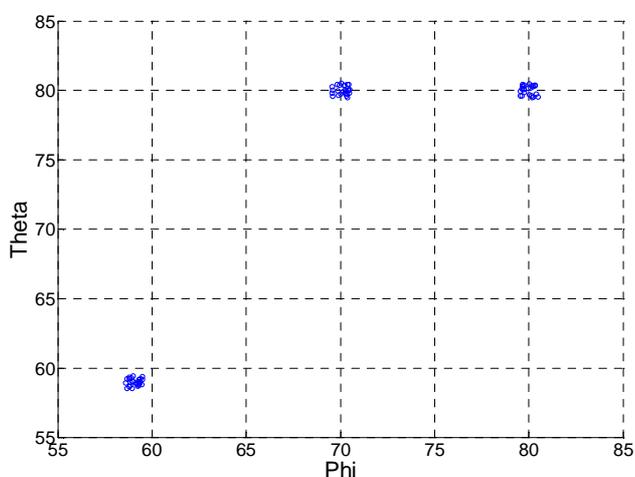


Figure-21- Résultats obtenus pour les directions : $(59,59)$; $(70,80)$ et $(80,80)$

IX. Problématique d'élaboration système multiagents :

Le développement d'un système multiagents combiné avec un réseau de capteur doit résoudre le problème de détection et séparation des signaux. Nous proposons la construction d'un système permettant d'exploiter et combiner les tâches élémentaires de détection (étudiées précédemment) et qui doivent être exécutées de manière indépendante. Le dispositif global est représenté par la *figure-22*. Les systèmes multiagents avec leur architecture non centralisée et coopérative permettent, la réalisation d'un tel système par une implémentation réfléchie, au niveau des agents, des méthodes de détections et filtrage spatial. La solution finale est en mesure d'être facilement incorporée sur une architecture matérielle distribuée. L'intérêt de la solution envisagée réside dans le fait de pouvoir :

- ✓ augmenter la capacité dans le réseau à travers un accès par filtrage spatial,

- ✓ assurer des transmissions sécurisées directement au niveau de la couche physique,
- ✓ diminution de l'effet des interférences et bruits,
- ✓ possibilité de basculer en mode MIMO ,
- ✓ gestion optimisée de la bande passante allouée et contourner ainsi le problème de l'encombrement spectral,
- ✓ avec en plus une détection des directions incidentes des différentes sources de l'environnement.

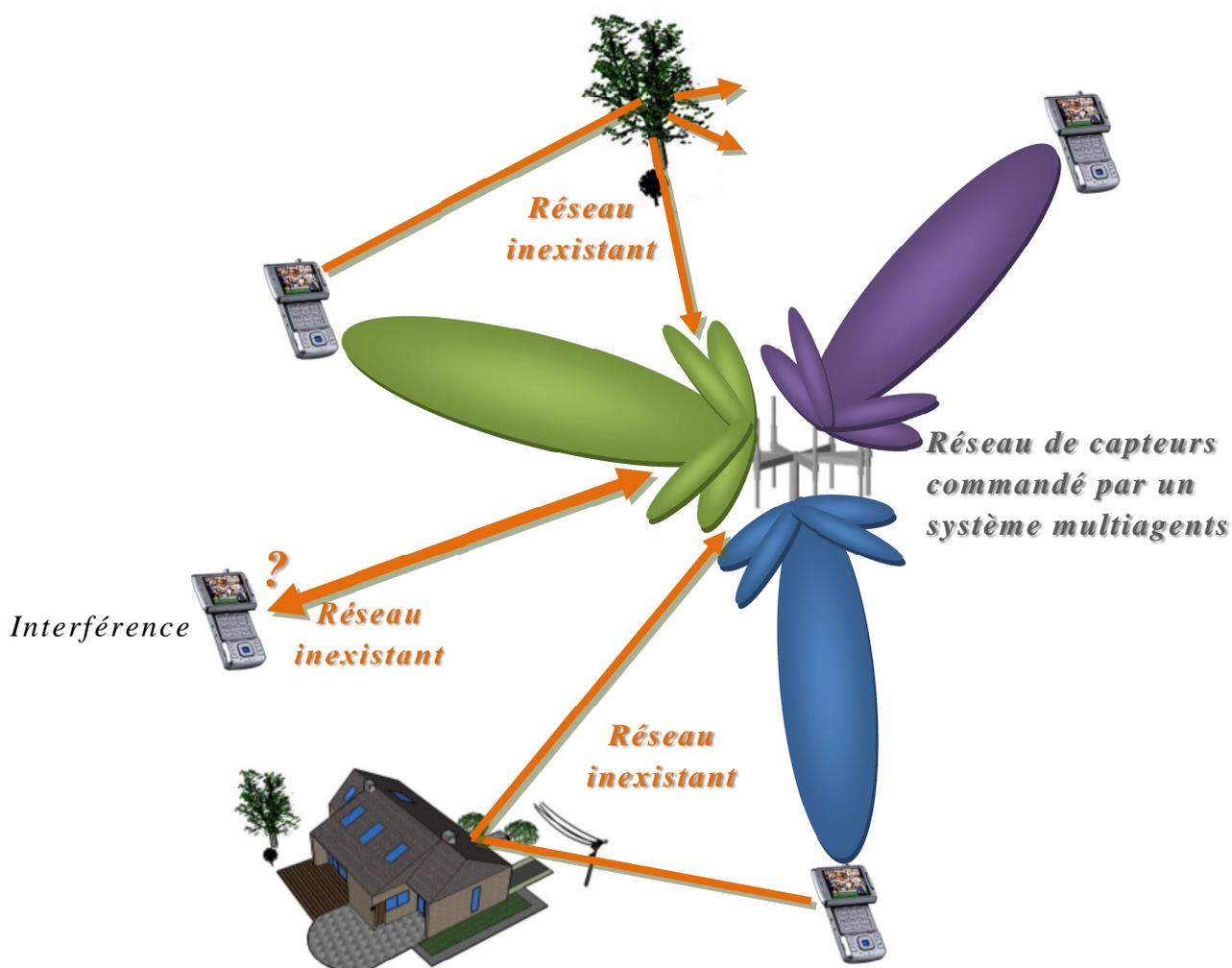


Figure-22- Principe général de la détection coopérative multiagents.

X. Système multiagents proposé

La majorité des dispositifs de détection nécessitent la coopération et l'intervention simultanée de plusieurs techniques et approches. La détection des directions des signaux mesurés après avoir estimé leur nombre, vont nous permettre de récolter des informations importantes et utiles sur :

- ✓ les sources de l'environnement,
- ✓ l'effet subi par les bruits et la propagation à travers le canal,

sur lesquelles nous allons nous baser pour implémenter les actions et décisions effectuées par les différents agents.

Bien évidemment le système proposé n'effectue pas uniquement une détection de sources. Il est doté d'une stratégie qui lui permet de traiter les mesures et spécifier la nature de l'information à observer. proposée et schématisé sur la *figure-23*.

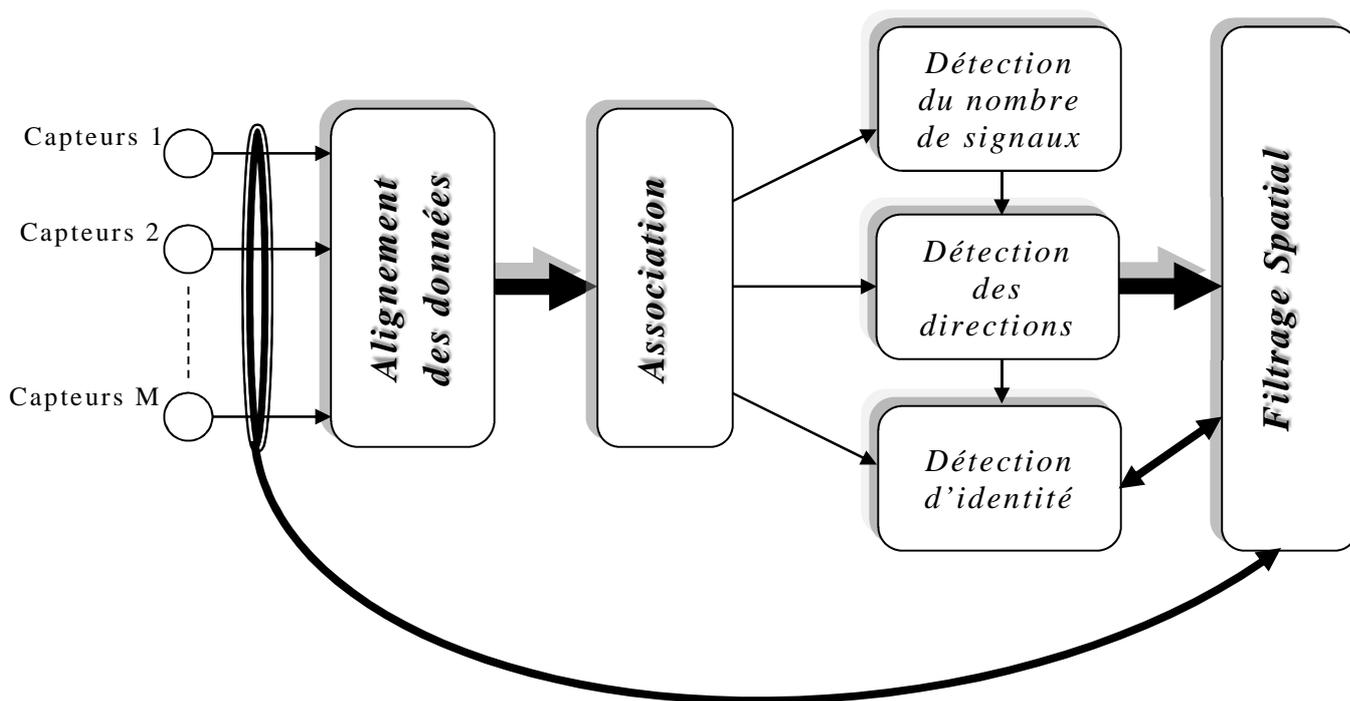


Figure-23- Stratégie adoptée pour le système multiagents dédié à la détection et au filtrage spatial par réseaux de capteurs.

Dans cette stratégie, il s'agit en premier lieu d'estimer le nombre des signaux incidents sur le réseau de capteurs pour une détection correcte de leurs directions. Bien évidemment, pour le filtrage spatial, le nombre des directions détectées correspond aux nombre des signaux détectés. La détection des directions, le filtrage spatial et une détection d'identité vont coopérer pour éliminer d'éventuels doublons reçus comme conséquence d'une propagation multi-trajets (effet de propagation à travers le canal). Cette coopération, selon l'architecture du réseau de capteurs, peut également influencer l'étape d'alignement des données pour la forcer à restructurer le réseau sous une nouvelle architecture en activant/désactivant des capteurs.

X.2. Agents d'association des données

L'agent association des données, supposé opérer sur un environnement continu, va coopérer avec les agents de traitement et alignement des données, de détection du nombre de sources mesurées, détection des directions et filtrage spatial pour estimer la matrice de corrélation « \hat{R} » selon le modèle exprimé précédemment.

X.3. Agents pour la détection du nombre de sources

Cet agent va effectuer une implémentation intelligente des deux approches de détection détaillées. En fonction de la qualité de la matrice de corrélation (nombre d'échantillons K utilisé pour sa détermination) cet agent va soit exploiter la méthode AIC plus performante pour une faible estimation de la matrice de corrélation, soit calculer une moyenne arithmétique des valeurs détectées par les approches AIC et MDL ce principe est représenté sur la *figure-25*.

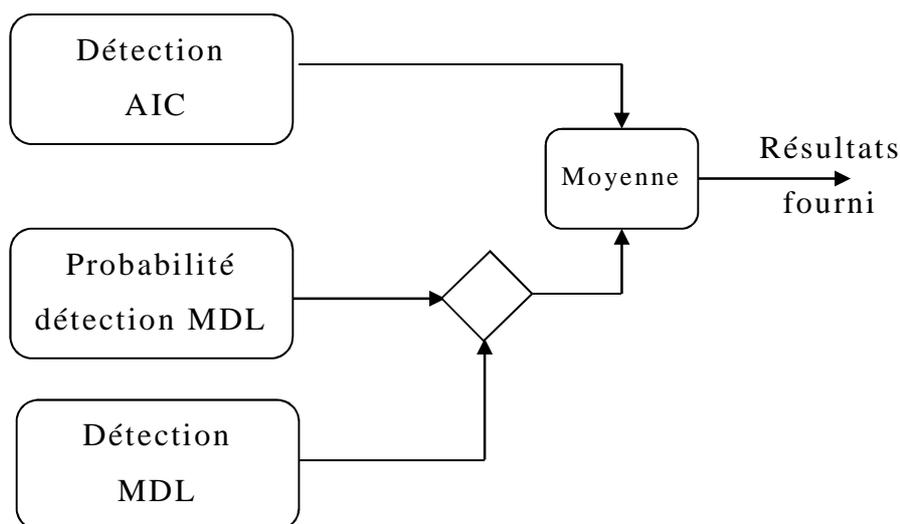


Figure-25- principe utilisé pour combiner AIC et MDL au niveau de l'agent détection du nombre des sources.

X.4. Agents pour la détection des directions

Cet agent implémente la méthode ESPRIT. Bien que cet agent implémente un seul algorithme, il doit coopérer avec l'agent d'association de données pour initialiser le calcul de la matrice de corrélation s'il rencontre des singularités lors de la réalisation de son objectif (détection des directions incidentes). De plus cet agent va coopérer avec l'agent de traitement et d'alignement pour simplifier et optimiser l'architecture du réseau de capteurs.

X.5. Agent pour le filtrage spatial

Cet agent est dédié à la séparation des différentes réponses spatialement filtrées. Le filtrage spatial est effectué par une simple combinaison linéaire des réponses pondérées de chaque capteur du réseau (*figure-13*). Les algorithmes utilisés pour le filtrage spatial ont largement évolué, nous nous limitons dans ce travail à un algorithme basé sur une approche géométrique pour estimer les poids de pondération complexes « W » utilisés pour le calcul de la réponse du réseau selon le modèle (21).

$$W_{opt} = W - \sum_l \frac{X_l \cdot X_l^H}{X_l^H \cdot X_l} W \quad (21)$$

Sachant que Où $l=1,2,\dots,i-1,i+1,\dots,L$. et fait référence aux directions à filtrer.

Traditionnellement le lobe principal généré par le réseau de capteurs est dirigé selon une direction choisie. Toutefois, la réponse du réseau dépend du déphasage imposé sur les différentes lignes de mesure. Nous avons évoqué que pratiquement les déphaseurs ne peuvent pas prendre des valeurs continues dans l'intervalle $[0\ 360^\circ]$. Nous avons montré que pour certains d'entre eux le déphasage est obtenu à partir d'un ensemble de valeurs prédéterminées. Pour remédier à ce problème, cet agent va sélectionner la pondération la plus proche de la pondération optimale calculée par (21) et faire appel, par la suite, au principe de résolution, pour élargir le lobe principal au niveau de l'agent traitement de données.

De plus l'implémentation de cet agent, va déterminer plusieurs réponses de manière concurrente en considérant chacune à son tour, l'une des directions détectées comme étant utile les autres considérées comme du bruit et par conséquent filtrées spatialement. De plus l'agent filtrage spatial va coopérer avec l'agent détection d'identité pour supprimer les doublons créés par l'influence du canal et éviter par conséquent des sorties redondantes.

X.6. Agents pour la détection d'identités

Typiquement une détection d'identité d'une source nécessite la transmission d'une séquence binaire qui doit la définir de manière unique. Pour effectuer cette détection, nous nous sommes basés sur l'hypothèse que, quel que soit le réseau utilisé, l'information transmise est formatée par des trames. Pour ce travail la

détection des identités des sources, nous avons utilisé des trames avec le format représenté par la *figure-26*.

CodeS 16 bits	InfU 32 bits
------------------	-----------------

*Figure-26- Mise en forme des données utilisée dans notre cas.
CodeS : code associé avec la source
InfU : partie Information utile générée de manière aléatoire.*

Pour rester dans le cadre d'une transmission bande étroite nous exploitons une modulation QPSK pour la transmission des trames. Bien évidemment, pour chaque source nous faisons correspondre un code binaire de 16 bits (ce qui permet un nombre maximal de 65635 signaux incidents sur le réseau).

L'agent utilisé pour la détection d'identité est implémenté au niveau du récepteur et doit effectuer :

- 1) Une démodulation des différentes réponses mesurées par l'agent filtrage spatiale.
- 2) Recenser les codes reçus pour les différentes mesures.
- 3) Effectuer une comparaison sur les codes recensés pour identifier les réponses dédoublées par le canal (effet multi-trajets).
- 4) Informer, à la fin, les différents agents, particulièrement celui effectuant le filtrage spatial, des directions à prendre en compte.

XI. Résultats et applications

L'implémentation du système multiagents, réalisé avec JADE et MATLAB sera analysée et exploitée sur différentes architectures de réseaux de capteurs.

XI.1. Réseau rectiligne et uniforme

Le *tableau-3* présente les résultats obtenus par l'agent de détection des directions, pour un réseau rectiligne et uniforme de 20 capteurs associé avec des déphaseurs échantillonnés avec un pas de 30°. Une seule source a été introduite suivant la direction 10°. La *figure-27* montre le filtrage spatial réellement effectué par le système. Il apparaît clairement que le système a choisi 0° comme direction utile, évitant toute redondance inutile. Nous avons également remarqué que le lobe principal est relativement large et couvre la direction 10°. Un tel résultat est obtenu uniquement avec une réduction du nombre de capteurs dans le réseau.

<i>directions simulées</i>	<i>Directions détectées</i>
10	48.5079
	8.4658
	-49.7211
	-80.0497

Tableau-3 : Sorties de l'agent détection des directions incidentes sans corrections.

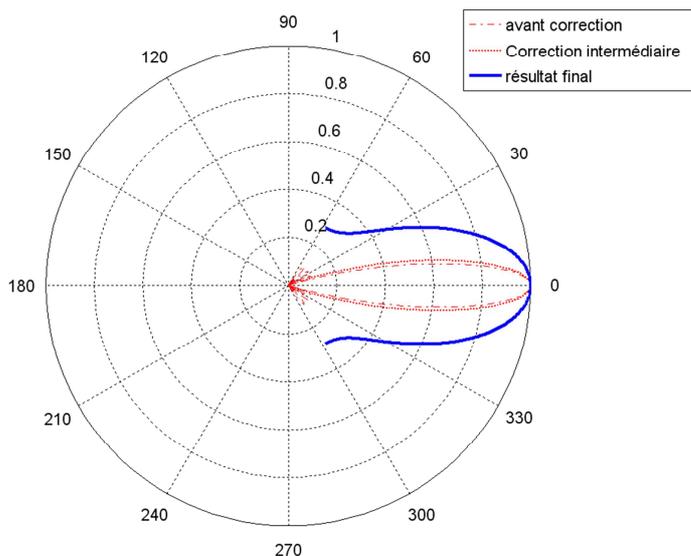


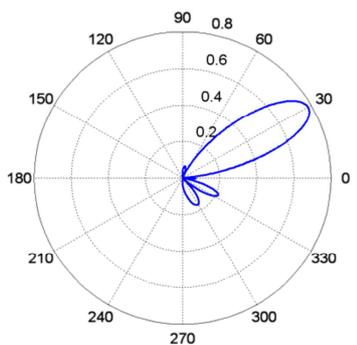
Figure-27-Filtrage spatial réellement réalisé par le réseau après les corrections introduites par le système multiagents.

XI.2. Architecture spécifique en deux dimensions

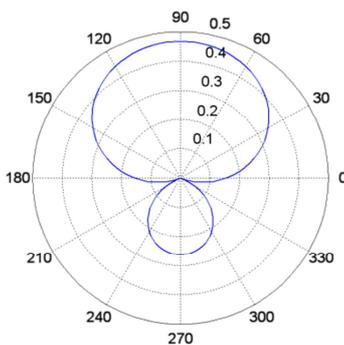
Nous allons à présent, utiliser notre système multiagents sur un réseau plan de sept éléments. Dans cette architecture arbitraire les capteurs vont avoir les positions spécifiées dans le *Tableau-4*. Les résultats que nous avons obtenus sont représentés par la *figure-28*.

Capteur	x (m/λ)	y (m/λ)
1	0.68269	0.29063
2	0.87479	0.63954
3	0.95015	0.74330
4	0.43318	0.29939
5	0.10149	0.31746
6	0.39505	0.64619
7	0.32344	0.60335

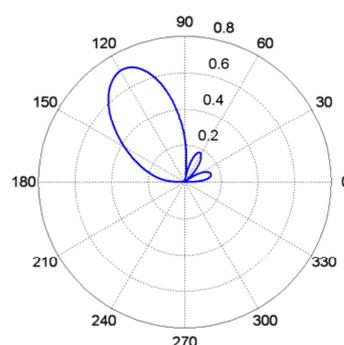
Tableau-4 : Positions des capteurs suivant le plan X-Y.



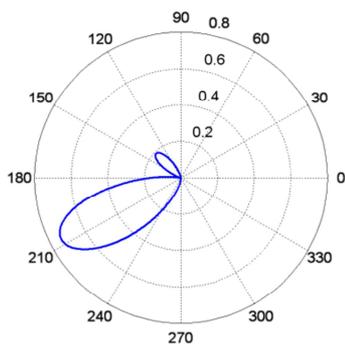
a- Suivant la direction : 30°



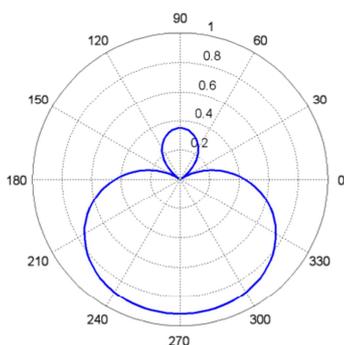
b- Suivant la direction : 90°



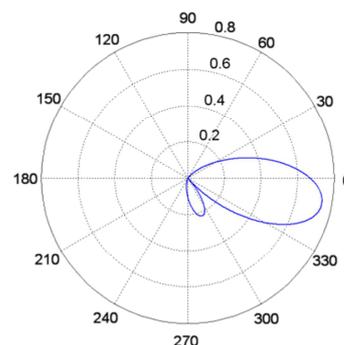
c- Suivant la direction : 150°



d- Suivant la direction : -150°



e- Suivant la direction : -90°



f- Suivant la direction : -30°

Figure-28-Acquisition concurrente par système multiagents.

Directions : $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, -150^\circ, -90^\circ$ et -30°

Nous allons tester notre système multiagents sur un réseau sphérique régulier et uniforme composé de 144 capteurs. Nous avons et des sources générées aux directions : $(-148 -78)$, $(-25 10)$, $(-15 30)$, $(45 70)$ et $(80 110)$. La figure-29, représente le gain global du système avec les différentes coupes suivant toutes les directions détectées.

Ces résultats montrent que le système multiagents associé avec ce réseau de capteurs sphérique est capable de filtrer spatialement et simultanément effectuer une acquisition concurrente des sources supposées utiles.

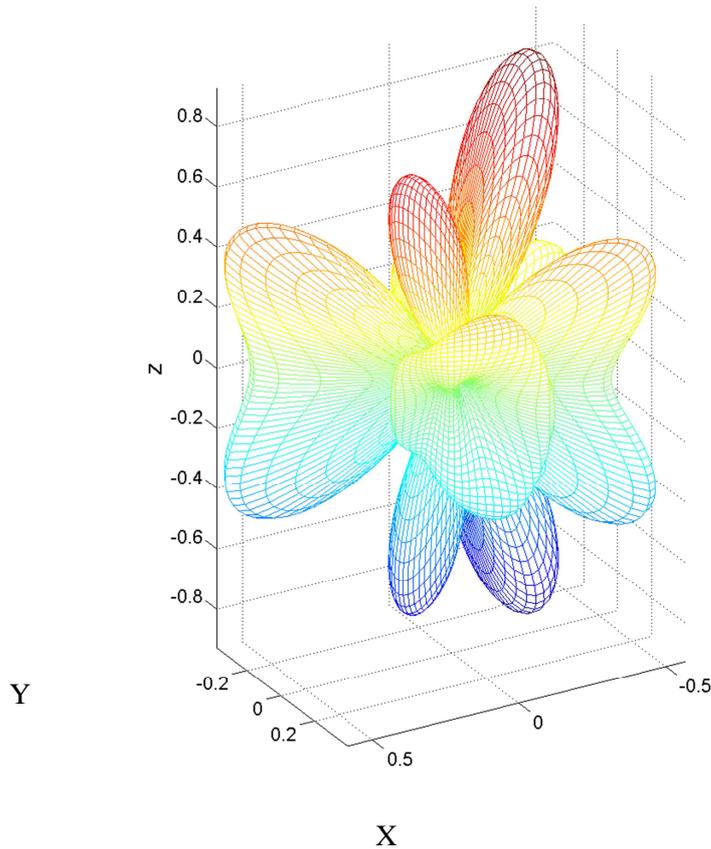


Figure-29-Filtrage spatial multiagents pour un réseau sphérique de 144 éléments avec des sources de directions $[-148 -78 ; -25 10; -15 30; 45 70; 80 110]$.

XII. Conclusion

Sachant que le thème des réseaux de capteurs intelligents a bénéficié d'une importance capitale, particulièrement en raison de la croissance des dispositifs de télécommunications sans-fil. L'intérêt est dû principalement aux techniques modernes de traitement du signal, de détection et d'intelligence artificielle. Dans cette thématique, nous avons traité le problème de détection et localisation des sources d'information utilisant un nombre quelconque de capteurs avec des positions arbitraires et coopérants dans un système actif. L'énergie émise par les sources peut être acoustique, optique, électrique ou électromagnétique. Toutefois, nous nous sommes limités au cas des signaux à bande étroite. Le problème abordé traite principalement trois sujets : l'étude et la modélisation des réseaux de capteurs avec une répartition à trois dimensions quelconque, leurs exploitations pour une détection des sources de l'environnement et par la suite réaliser une acquisition simultanée, efficace et intelligente de plusieurs sources mobiles et transitoires.

Cette dernière étape qui représente l'originalité de notre travail est assurée par un système coopératif multiagents. Avec un tel dispositif, nous montrons qu'il est possible d'améliorer, voire optimiser la liaison sans-fil avec une station mobile. En effet, les systèmes multiagents sont présentés comme un nouveau paradigme de développement et de conception. Les résultats de simulations présentés prouvent qu'avec ces systèmes, il est possible d'obtenir les avantages suivants :

- ✓ facilité d'intégration d'une solution combinée de plusieurs algorithmes et techniques de détection et filtrage spatial,
- ✓ comportement temps réel des solutions envisagées,
- ✓ gestion efficace d'une acquisition concurrente,
- ✓ monitoring d'une région spécifique voire d'une source d'information précise,
- ✓ information détaillée sur le trafic et le comportement des sources de l'environnement.

Nous pouvons également dire qu'une solution à base des systèmes multiagents telle qu'elle est proposée dans cette étude, permet d'intégrer les réseaux de capteurs dans un large éventail d'applications de télécommunications mobiles, voir même l'intégration simplifiée de nouveaux services.

Ce même travail illustre en même temps, l'importance pratique des réseaux de capteurs combinée avec une recherche détaillée sur les techniques de détection, considérées dans notre cas comme une détermination de la répartition de l'énergie émise par plusieurs sources à travers l'espace ou milieu de propagation. L'efficacité d'un filtrage spatial à travers cette détection est ainsi prouvée par la suite.

Il faut également noter, que l'émergence des nouveaux services de la téléphonie sans-fil et des télécommunications spatiales large bande, favorisent une orientation des résultats de cette étude vers une vision large bande. En effet, pour résoudre le phénomène de l'encombrement spectrale il est très utile de pouvoir assurer un suivi spatial de plusieurs utilisateurs et services, tout en évitant les bruits, seulement cette fois-ci avec des considérations large bande sur les signaux de l'environnement.

I. INTRODUCTION :	1
II. TECHNOLOGIE ET MODELISATION DES CAPTEURS	3
III. TECHNOLOGIE ET MODELISATION DES DEPHASEURS	4
IV. MODELISATION DES MILIEUX DE PROPAGATION	4
V. MODELISATION DES RESEAUX DE CAPTEURS	6
V.1. Structure des réseaux capteurs	7
V.2. Modélisation des signaux	7
V.2.a. Configuration spatiale	7
V.2.b. Modélisation des signaux	7
VI. FORMULATION DU PROBLEME DE DETECTION	10
VI.1. La phase de traitement	11
VI.2. La phase d'alignement des données	11
VI.3. Association des données	11
VI.4. La phase de détection	12
VII. DETECTION DU NOMBRE DE SOURCES	12
VII.1. Formulation générale	12
VII.2. Approches de détection AIC et MDL	13
VII.2.a. Présentation des méthodes	13
VII.2.b. Evaluation des performances	13
VII.2.c. Analyse des performances de détection AIC et MDL	15
VIII. DETECTION DES DIRECTIONS	17
VIII.1. Détection basée sur l'erreur quadratique moyenne	18
VIII.1.a. Présentation de la méthode	18
VIII.1.b. Simulations et résultats	18
VIII.2. Méthode ESPRIT	21
VIII.2.a. Présentation de la méthode	21
VIII.2.b. Simulations et résultats	21
IX. PROBLEMATIQUE D'ELABORATION SYSTEME MULTIAGENTS :	24
X. SYSTEME MULTIAGENTS PROPOSE	25
X.1. Agent de traitement et d'alignement	27
X.2. Agents d'association des données	28
X.3. Agents pour la détection du nombre de sources	28
X.4. Agents pour la détection des directions	28
X.5. Agent pour le filtrage spatial	29
X.6. Agents pour la détection d'identités	29
XI. RESULTATS ET APPLICATIONS	30
XI.1. Réseau rectiligne et uniforme	30
XI.2. Architecture spécifique en deux dimensions	31
XII. CONCLUSION	33