

*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***

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 Maitre 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 Mehadj, 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<sup>lle</sup> 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.

# ***Introduction***

L'industrie des télécommunications sans-fil est un secteur émergent et branlant couramment des nouveaux équipements, technologies et services innovants. Avec une importance définie autour de plusieurs facteurs, le sans-fil permet d'éliminer le besoin d'une ligne physique et infrastructure couteuse, il offre en plus une disponibilité permanente. Ce sujet a suscité un vif intérêt ces dernières années et concerne les réseaux locaux ou à grande envergure et avec des sources, des trafics et types de services très variés, incluant à la fois la voix, les données et la vidéo. Sans oublier de mentionner, que ces progrès significatifs sont sur le point de changer radicalement notre façon de vivre et d'interagir. Des progrès dus principalement au très large déploiement des [1-5]: GSM (*Global System for Mobile Communication*), PDA (*Personal Digital Assistant*), 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), iPhone, GPRS (*General Packet Radio Service*), EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), mobile TV, WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) et WLL (*Wireless Local Loop*), iPod.... Il est indispensable que ces équipements et services exploitent et accèdent à des portions des ressources spectrales disponibles. Cependant, le spectre fréquentiel disponible pour une radiocommunication est une commodité intangible dont l'importance ne cesse d'augmenter. Il est même parfois considéré comme une ressource critique pour réussir le déploiement d'une technologie ou service de transmission sans-fil.

Les réseaux sans-fil se sont confrontés dès l'année 2002 [6-9] au problème capital de la saturation de l'espace spectral réservé. Ce problème est particulièrement mis en évidence, avec le désir croissant des opérateurs de télécommunications d'une expansion, augmentation du nombre d'abonnés et services offerts, par conséquent accroissement des profits [6]. Ceci a mené accidentellement [6-9], à une congestion de l'espace des fréquences, y compris avec une réutilisation des canaux. Toutes ces raisons ont conduit les ingénieurs, chercheurs et concepteurs à créer de nouvelles technologies et méthodes d'accès. Des nouveaux procédés qui visent à optimiser et maximiser l'usage des bandes fréquentielles limitées, précieuses et souvent rares à trouver [6]. Un usage prédominant des techniques FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) et TDMA (*Time Division Multiple Access*) a été exploité au sein des premières générations des réseaux sans-fil [10-14]. Par la suite, est venue la technologie CDMA (*Code Division Multiple Access* dont les principes de base ont été proposés

par une actrice d'Hollywood), actuellement normalisée et largement déployée [10-14]. Toutefois, il s'est avéré possible, d'améliorer la gestion du spectre de radiocommunication avec des méthodes d'accès basées sur des considérations spatiales en utilisant des réseaux de capteurs intelligents [15-17]. Une intelligence qui se résume en premier lieu par une détection des paramètres des signaux mesurés dans la même bande fréquentielle et en second lieu un filtrage adaptatif et séparation spatiale de ces signaux. Ceci permet d'avoir un partage bénéfique des ressources entre utilisateurs et services, par conséquent une augmentation appréciable de la capacité du réseau. Actuellement, il est même possible d'affirmer que l'utilisation des réseaux de capteurs intelligents, de conception habituellement onéreuse (l'unique inconvénient de leur utilisation) [18-22], dans les systèmes de télécommunications au niveau des émetteurs et récepteurs, présente plusieurs avantages, à savoir : estimation et détection des sources, filtrage spatial adaptatif, pointage et traçage précis des cibles mobiles souvent éphémères, contrôle précis des niveaux de radiations électromagnétiques et le plus important exploiter utilement la même bande fréquentielle dans des zones géographiques adjacentes, technique dite SDMA (*Space Division Multiple Access*) [7]. Ces avantages permettent une augmentation appréciable du nombre des utilisateurs et des services, sans oublier la simplicité et l'efficacité de la mise en œuvre d'une liaison point à point sans-fil à faible interférences avec les réseaux de capteurs.

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 au premier chapitre 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. Pour ce point, les notions présentées sont les fruits des trois stages que nous avons effectués au sein des laboratoires d'électronique et de télécommunications de Sophia Antipolis et d'électronique de Toulouse. 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 ce même chapitre, 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 le deuxième chapitre, 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 au premier chapitre.

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 (*artificial social system*). Dans le troisième chapitre 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 au niveau du quatrième chapitre. En effet, dans cette partie 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.



# *Chapitre I*

## *Etude et Modélisation des réseaux de capteurs*

## **I. Introduction**

L'information sur le monde est acquise par l'observation et la mesure. Les résultats de ces mesures, sont sujets à des erreurs et perturbations. Il est souvent facile de croire que les erreurs peuvent être éliminées en construisant un dispositif de détection et filtrage élaboré. Hélas, les limites de la nature et les technologies existantes, font que la fabrication d'un tel dispositif est une tâche ardue. Dans cette perspective, il est intéressant de remplacer un capteur par un dispositif composé de plusieurs capteurs, de façon à augmenter le nombre des entrées qui doivent être combinées pour détecter et filtrer les signaux possédant des directions spécifiques et distinctes [1,5]. Avec un tel système, il est possible de se focaliser sur une région géographique, il s'agit alors d'un filtrage basé sur des considérations spatiales. L'étude des réseaux de capteurs fait l'objet de ce chapitre avec une présentation des recueils détaillés de leurs : technologies, architectures, performances et mode de fonctionnement.

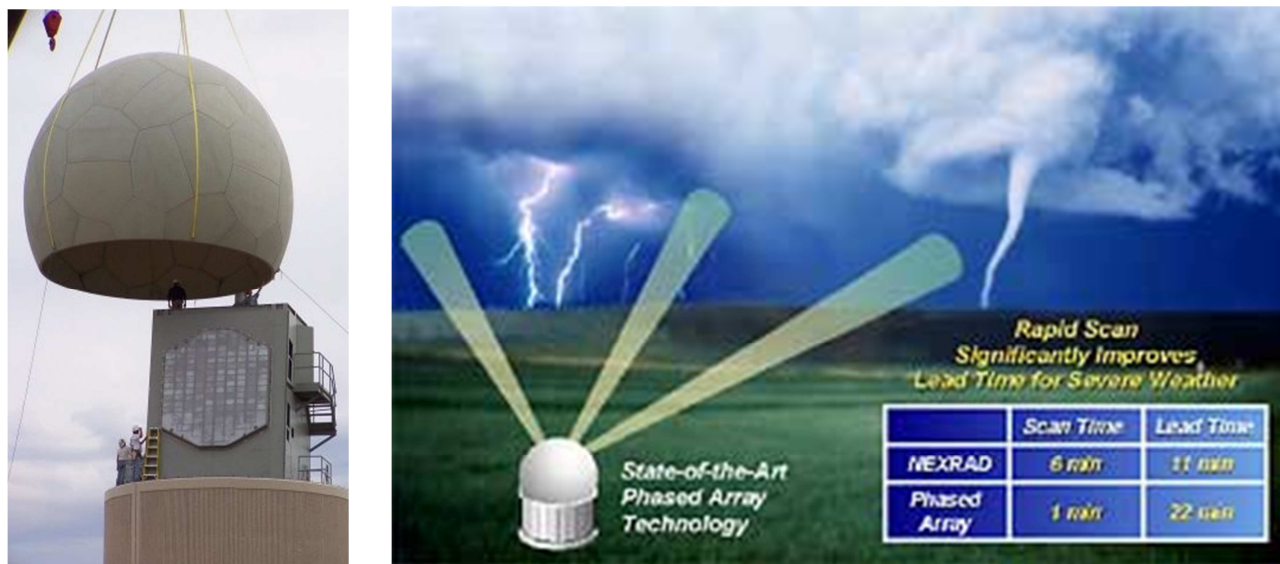
## **II. Domaines d'applications**

Les réseaux de capteurs sont utilisés pour améliorer l'acquisition en effectuant un filtrage spatial. Un procédé rencontré dans plusieurs domaines, nous citerons par exemple : radar, sonar, surveillance sous-marine et Tomographie.... Durant ces dernières années une maturation dans la compréhension, la conception et l'exploitation des réseaux de capteurs a été atteinte. Nous trouvons leurs applications dans la surveillance des aéroports, détection des missiles, détection des explosions nucléaires souterraines, systèmes de localisations, radar et sonar,... [15,16,23,24].

### **II.1. RADAR et SONAR**

Les systèmes radar et sonar exploitent le même principe, à savoir l'émission d'une onde et le traitement de ses échos. La seule différence réside dans le fait que le radar exploite des ondes électromagnétiques et le sonar des ondes acoustiques [26-29]. Les réseaux de capteurs ont fait leur apparition dans les systèmes radar et sonar, actuellement la totalité de ces systèmes se basent sur les réseaux de capteurs comme composante essentielle. En effet, pour ces systèmes ont fait appel à des réseaux de capteurs sous forme de panneaux plats ou sphériques immobiles [26-29]. Les faisceaux d'ondes produits par de tels

dispositifs peuvent explorer de vaste portion de l'espace rapidement et avec une grande précision. La *figure-I-1* présente deux exemples de radars modernes à base de réseau de capteurs, le premier dédié à la détection des tornades, le second pour le contrôle du trafic aérien [26].



a- radar pour la détection des tornades (*National severe storm laboratory USA*)



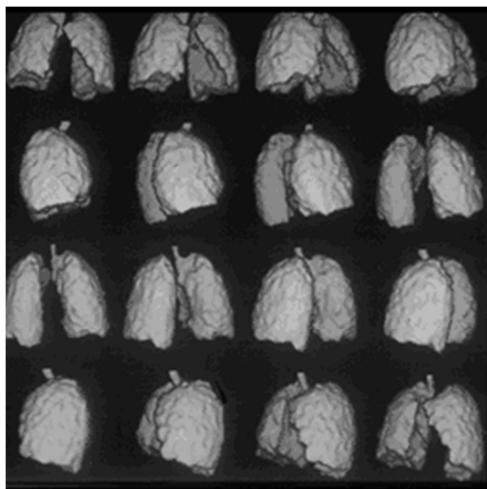
b- radar pour le contrôle des lignes aériennes (*ALASKA USA*)

*Figure-I-1- Radars à base de réseaux de capteurs [26]*

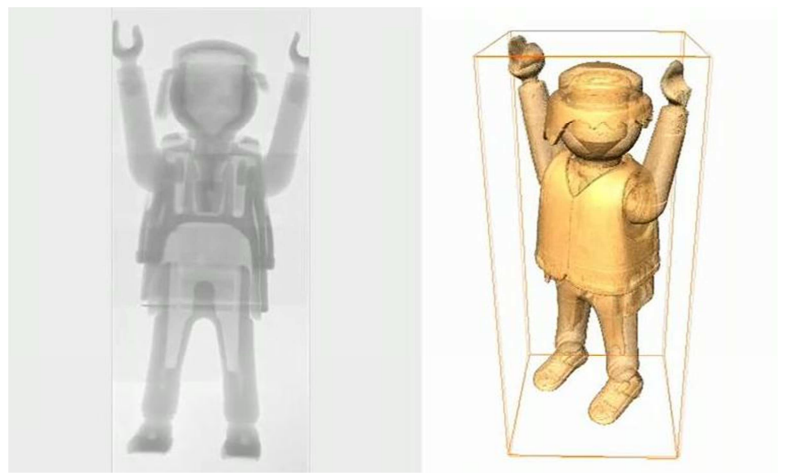
## II.2. Tomographie

Cette technologie, permet grâce au pouvoir des réseaux de capteurs, la reconstruction en trois Dimensions des objets examinés. Il est également possible, par le biais de la tomographie, d'obtenir le modèle tridimensionnel portant les

informations de densité des structures internes. Une exploration par coupe est alors possible et révèle avec précision les structures internes de l'objet, leurs dimensions, leurs positions dans l'espace et la présence d'éventuels défauts. Cette technique est très utilisée en médecine pour déceler d'éventuelles tumeurs (*figure-I-2-a*). Elle a également été utilisée récemment au sein des scanners corporels (*figure-I-2-b*) avec une combinaison de plusieurs types de réseaux de capteurs : thermiques, antennes à ondes millimétriques opérant en parallèle [29-33].



a- Application médicale :  
diagnostic des poumons



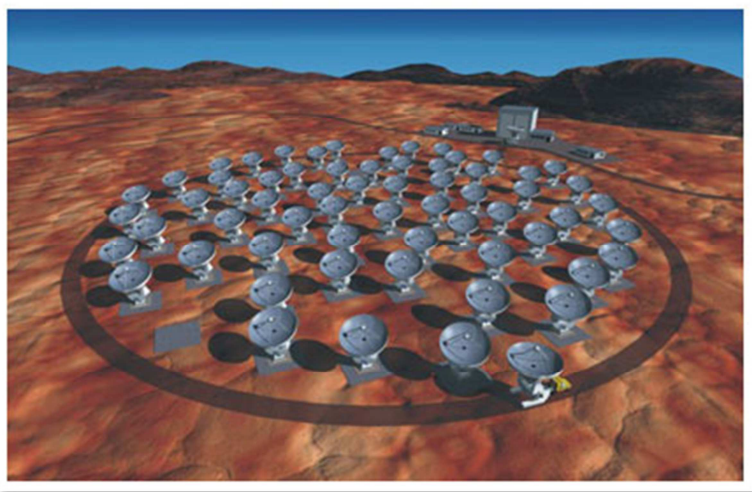
b- Scanner corporel

*Figure-I-2- Applications de la Tomographie par réseaux de capteurs [29]*

### II.3. Radio Astronomie

Cette fois les réseaux de capteurs sont utilisés comme systèmes passifs pour la détection des objets stellaires. Dans ce cas, le réseau d'antennes peut avoir une taille de plusieurs kilomètres (*figure-I-3*) avec une géométrie variable. Ce qui permet, d'atteindre une portée profonde avec une grande sensibilité [23,25,33,34,35]. Les exemples de ce type de réseau ne manquent pas et nous pouvons citer :

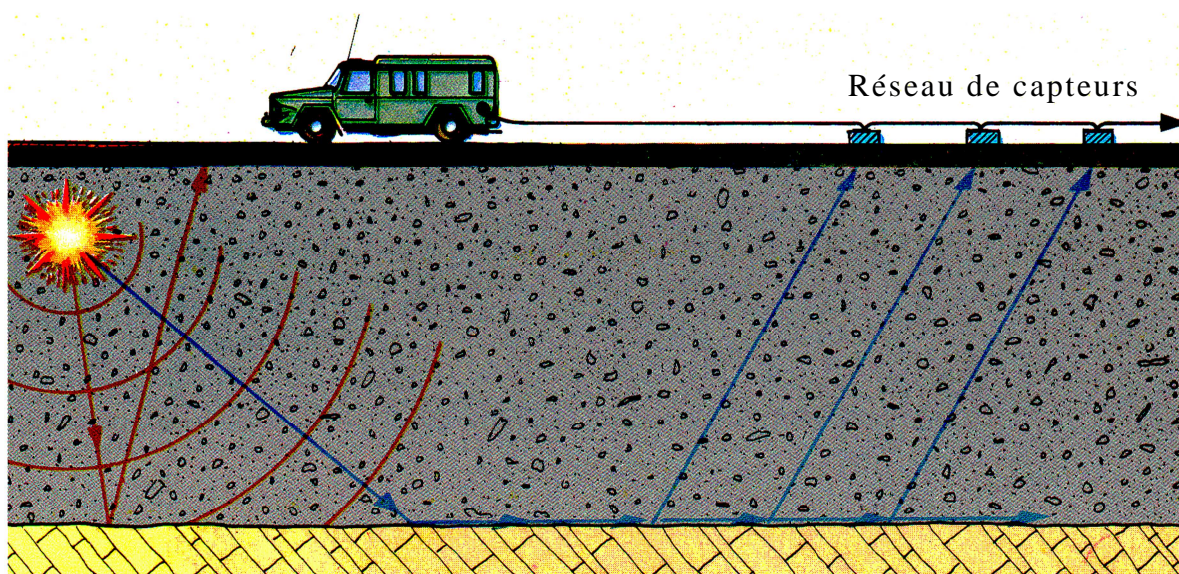
- ✓ Very Large Array Radio Telescope (VLA), New Mexico.
- ✓ Gold Stone Antennas, Californie.
- ✓ Very Large Telescope (VLT), Chili.



*Figure-I-3- Réseaux de capteurs en Radio Astronomie : Very Large Array Radio Telescope (VLA). New Mexico [35].*

#### II.4. Sismologie

Il s'agit d'utiliser les réseaux de capteurs pour reconstituer la nature des différentes couches de l'écorce terrestre, voire détecter les débuts d'éventuels séismes ou d'éventuels essais nucléaires souterrains. Cette technique consiste à envoyer dans le sol des ondes sonores, qui seront réfléchies, réfractées et absorbées par les différentes couches rocheuses. Les retards temporels ainsi que l'intensité des mesures effectuées par un réseau de capteurs, permet de reconstituer la nature et caractéristiques des couches voire la détection d'éventuels gisements (*figure-I-4*) [15,31].



*Figure-I-4- Approche sismique à base de réseau de capteurs. Détection et reconstitution des couches géologiques [15].*

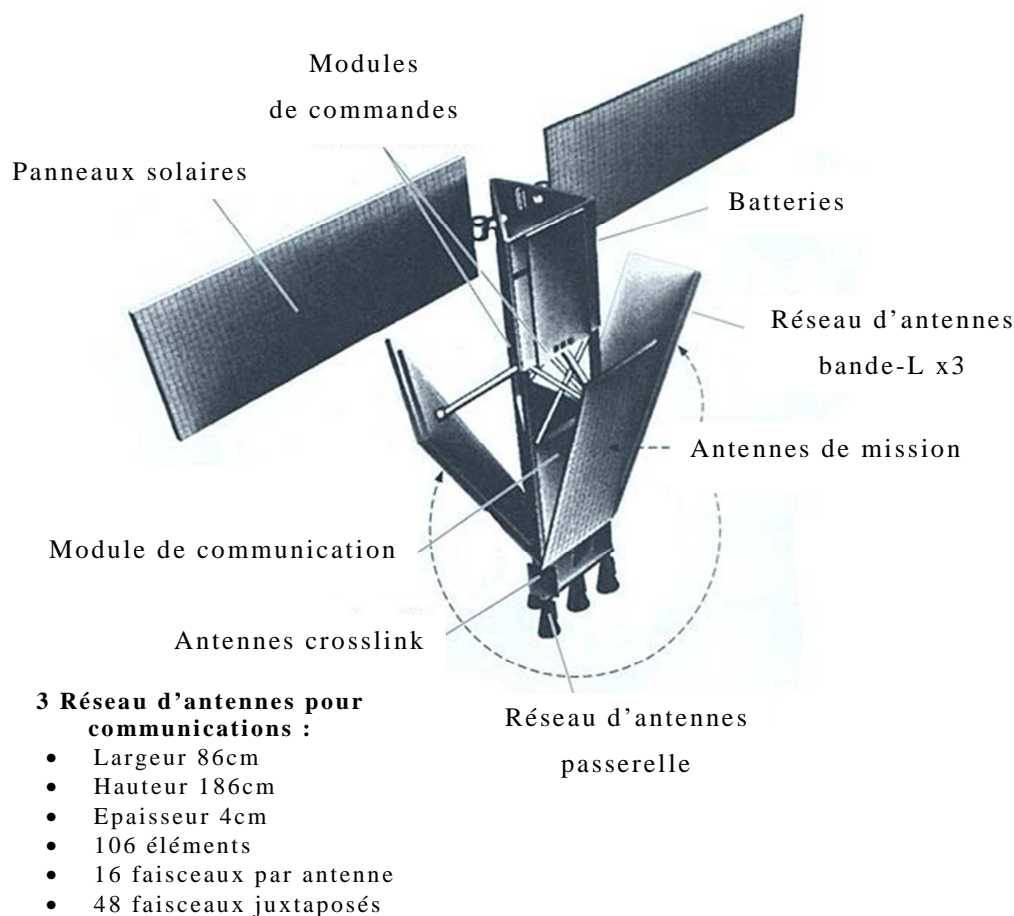
## II.5. Télécommunications

Avec le bouleversement technologique de ces dernières années, les réseaux de capteurs ont eu un apport considérable au niveau des systèmes de télécommunications. En effet, l'utilisation des réseaux d'antennes élémentaires de faibles dimensions et faibles puissances a permis d'obtenir des performances très intéressantes et par conséquent de surmonter les problèmes de l'encombrement spectral et la consommation électrique.

### **II.5.a. Systèmes de télécommunications spatiaux**

Les avantages et possibilités des réseaux de capteurs, ont facilité leur large utilisation dans les systèmes de transmission au sein des systèmes d'exploration, de navigation et de positionnement spatiaux. Des systèmes spatiaux tels que [36] :

- ✓ les sondes : Cassini, Voyager et Wild2,
- ✓ réseau satellitaire : GPS, Galileo, Tracking and data relay satellite, defense satellite communication system (DSCS3) et Iridium (*figure-I-5*).



*Figure-I-5- Le satellite IRIDIUM possédant trois réseaux de capteurs avec 160 éléments chacun [36].*

Il est clair que dans un environnement spatial, la plus petite force peut avoir une grande influence sur une sonde ou un satellite, sans oublier l'effet dispersif et les atténuations dues aux distances très importantes. Toutes ces causes vont avantager un pointage électronique vis-à-vis d'un pointage mécanique et par conséquent favoriser fortement l'utilisation des réseaux de capteurs [35-37].

### II.5.b. Systèmes de télécommunication sans-fil

Pour les systèmes de télécommunications sans-fil les réseaux de capteurs offrent la possibilité de supporter des débits très importants et apportent une augmentation de la capacité. De plus avec les réseaux de capteurs, il est possible de compenser les affaiblissements notamment pour des fréquences élevées [1,38].

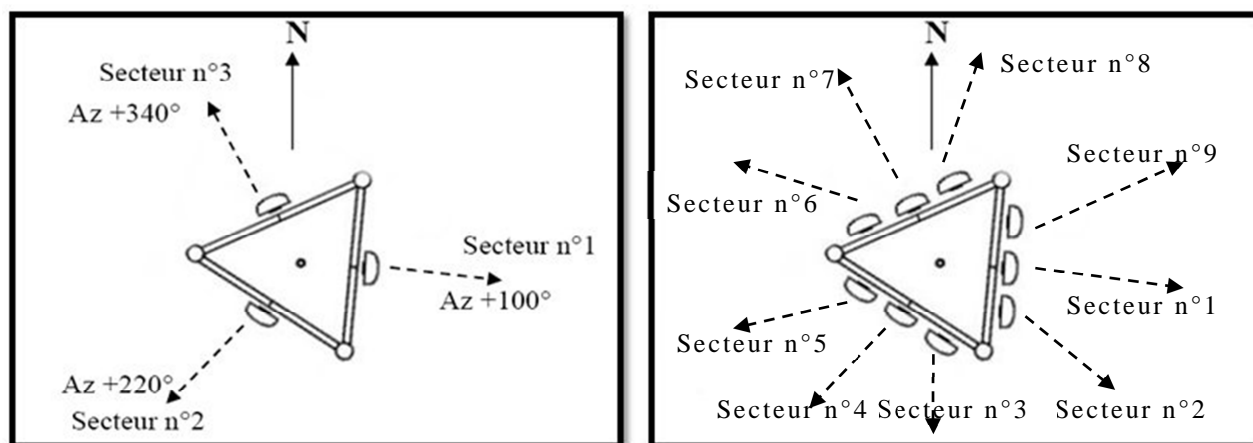
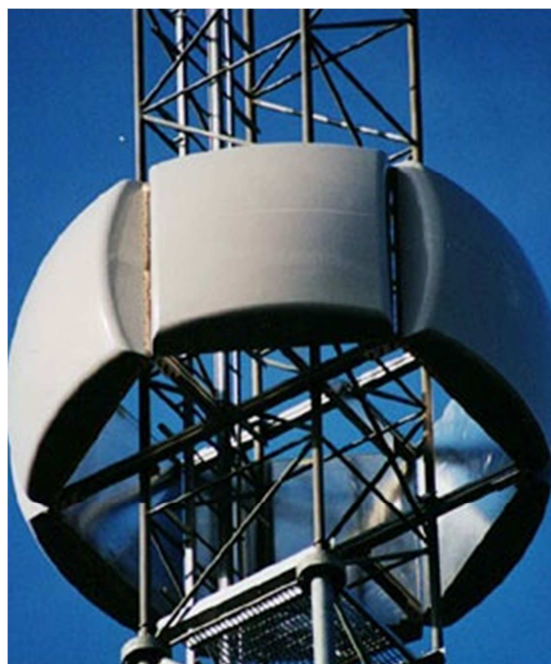


Figure-I-6- Utilisation des réseaux de capteurs au niveau des stations de base GSM pour augmenter la capacité [1,39-41].

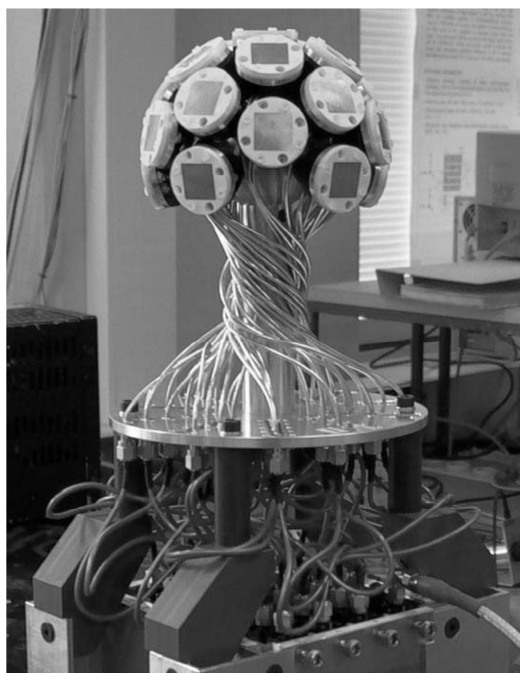
Nous pouvons même affirmer que les réseaux mobiles de la troisième génération (3G) et plus particulièrement les systèmes de transmission sans-fil, seront exclusivement à base de réseaux de capteurs [39]. Pour la téléphonie mobile, il apparaît clairement qu'avec un nombre de secteurs important en faisceaux étroits (*voir la figure-I-6*), il devient alors possible de cibler avec précision les abonnés en utilisant une faible puissance d'émission. Une station de base utilisant un réseau de capteurs (*figure-I-7*) est capable de détecter avec précision les stations mobiles de sa région, une détection qui consiste à calculer le nombre exact des sources et estimer avec précision leurs directions. Le nombre des faisceaux produit par la station de base va dépendre de la répartition des mobiles, ces faisceaux vont cibler et isoler les mobiles en petit groupe avec en plus une compensation de l'effet du canal dû principalement par les propagations multi-trajets [7,40,41].



*a- Station produisant 3 Secteurs fixes.*



*b- Station intelligente produisant un nombre dynamique de Secteurs.*



*c- réseaux de capteurs sphérique expérimental, pour télécommunications GSM Helsinki University.*



*d- Réseau de capteurs plan pour les futures réseaux GSM Royal Institute of Technology, Stockholm.*

*Figure-I-7- Station de base GSM 3G utilisant des réseaux de capteurs [1,39].*



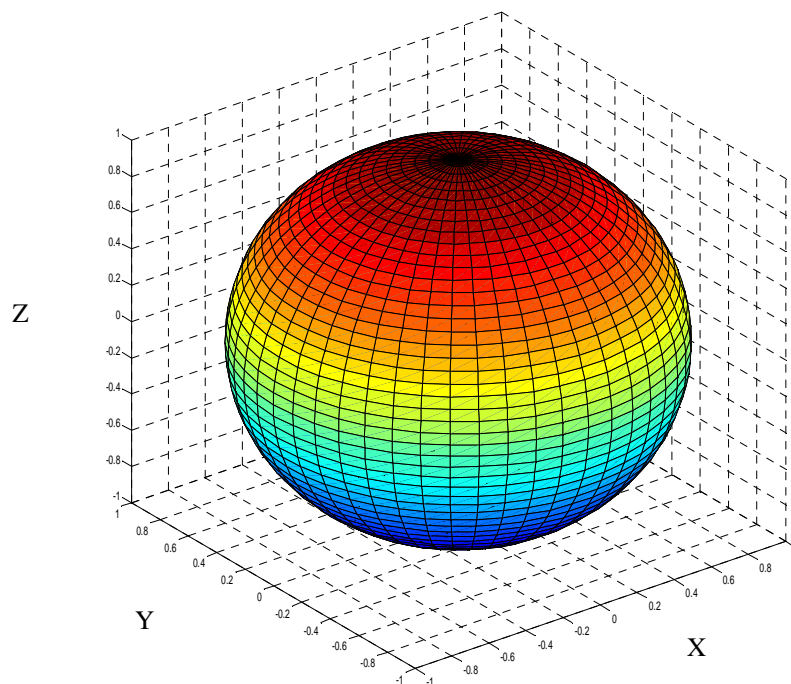
### **III. Technologie et modélisation des capteurs**

Les capteurs peuvent être à base d'une multitude de technologies [31,32,42]. 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) [31,32,42]. Une bonne compréhension des réseaux de capteurs avec comme objectif l'élaboration d'un modèle proche de la réalité, ne peut être faite sans l'étude des capteurs indépendamment.

#### **III.1. Directivité**

La directivité associée à un capteur permet de fournir des informations majeures et précises concernant son comportement vis-à-vis des directions incidentes des signaux à mesurer [31,33]. Nous pouvons alors dire que cette notion n'est rien d'autre qu'une mesure du gain d'un capteur en fonction des directions. Sachant que la puissance d'un signal est une fonction décroissante par rapport au carré de la distance [28,29], la directivité est représentée sous une forme normalisée (avec un maximum égal à un).

Couramment la conception d'un algorithme de détection ou d'adaptation pour réseaux de capteurs est basée sur un modèle avec un gain spatial et un diagramme de directivité supposé isotrope [16,24], la forme de ce diagramme est représentée sur la *figure-I-8*. Avec ce modèle, le capteur est supposé avoir le même gain, quel que soit la direction du signal incident. Il s'agit alors d'une mesure sans déformation vis-à-vis de la direction au niveau du capteur. La réalisation des capteurs qui peuvent satisfaire cette condition est quasiment impossible [31,32,42,43], chaque type de capteur va avoir son propre gain spatial. Toutefois, l'utilisation d'une telle hypothèse (capteurs isotropes) est une approximation admissible dans le cas des réseaux linéaires ou plan. En effet, pour ces deux types de réseaux et pour une direction donnée, la déformation du signal sera identique au niveau des différents capteurs formant le réseau.



*Figure-I-8- Représentation sphérique d'une directivité isotrope, le capteur se trouve au centre de cette sphère schématisant le gain par rapport à la direction.*

### III.2. Etude des cas de directivité pour capteurs réels

Dans cette étude nous prenons en considération une forme et architecture quelconque pour les réseaux de capteurs, ce qui nous oblige à ne pas négliger l'influence des capteurs sur le comportement globale du système, pour cela nous avons étudié plusieurs types de capteurs. Quelques prototypes de capteurs sont présentés :

- ✓ la *figure-I-9* présente le gain spatial mesuré pour une photodiode utilisée pour des liaisons optiques [2,43,44],
- ✓ la *figure-I-10* représente le gain spatial mesuré pour un microphone [27,29],
- ✓ et sur la *figure-I-11* la directivité mesurée est représentée pour des antennes destinées à des applications en télécommunications [1,29,45-50].

L'analyse de ces diagrammes montre que la réponse du capteur dépend de la direction incidente du signal à mesurer. Les digrammes de directivité montrent que pour certaines directions, correspondants à l'ouverture principale du capteur, les signaux peuvent être mesurés avec une faible atténuation, alors que pour d'autres directions, ils peuvent être fortement affaiblis ou bien complètement ignorés.

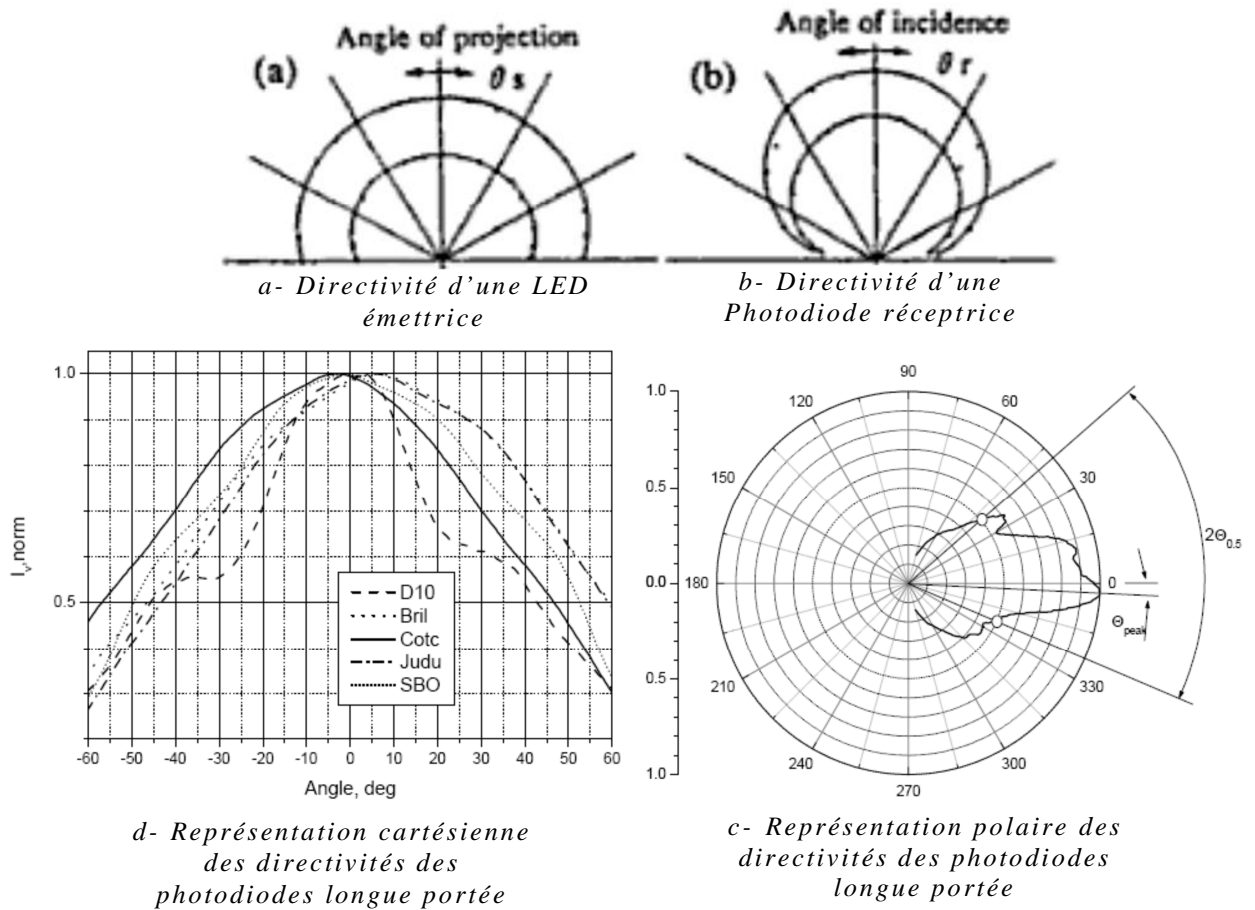


Figure-I-9- Cas de directivités capteurs optiques [2,43,44].

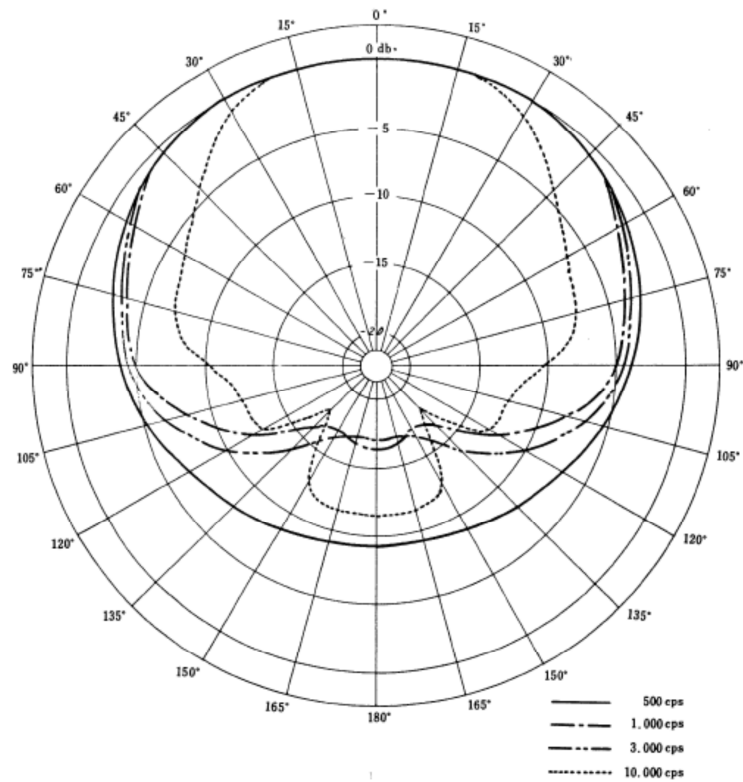
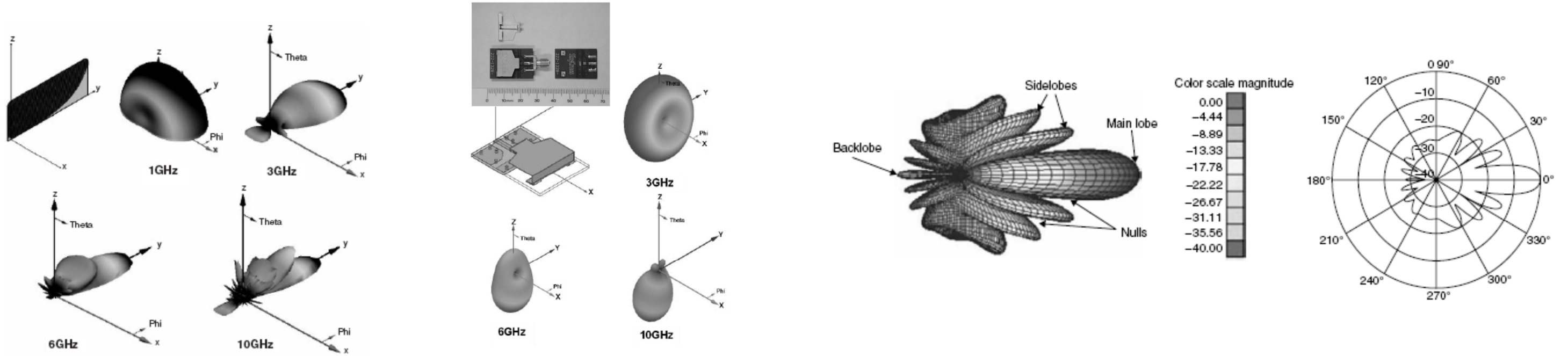


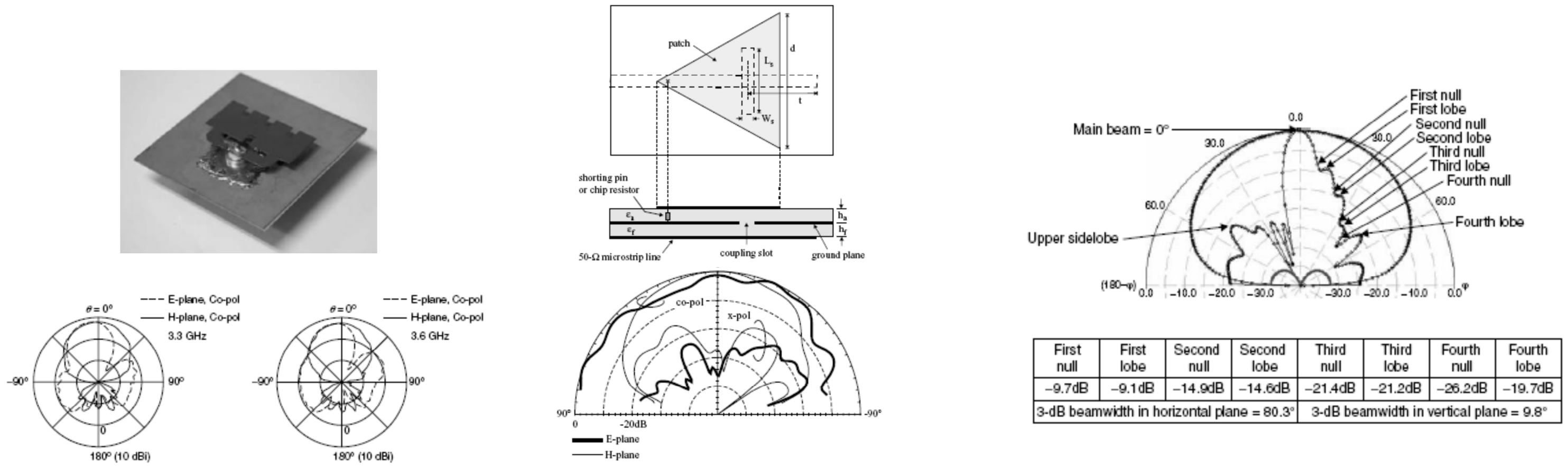
Figure-I-10-Cas de directivités des microphones [27,29].



a- Directivité d'antennes Vivaldi

b- Directivité d'antennes SMT-3TO1M SkyCross

c- Directivité d'antennes liaison point à point stations de bases GSM.



First null	First lobe	Second null	Second lobe	Third null	Third lobe	Fourth null	Fourth lobe
-9.7dB	-9.1dB	-14.9dB	-14.6dB	-21.4dB	-21.2dB	-26.2dB	-19.7dB
3-dB beamwidth in horizontal plane = 80.3°				3-dB beamwidth in vertical plane = 9.8°			

d- Directivité d'antennes WiFi

e- Directivité d'antennes stations de bases GSM.

f- Directivité d'antennes stations de bases GSM.

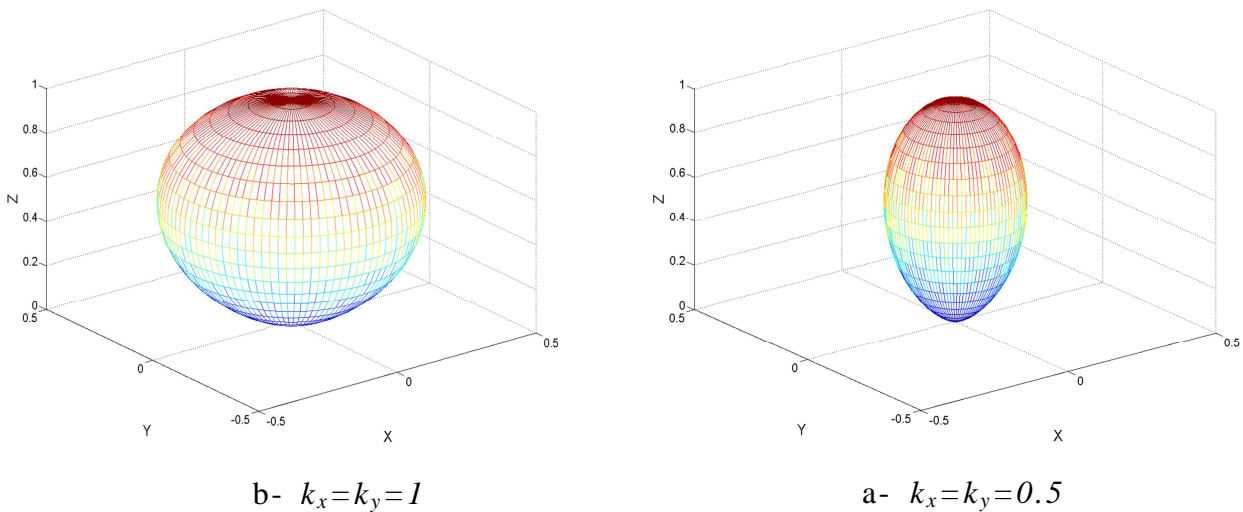
Figure-I-11- exemple de directivités d'antennes pour systèmes de télécommunications [1,29,50].

### III.3. Modèle proposé pour un capteur

En se basant sur les cas concrets des capteurs et l'analyse de leurs diagrammes. Nous proposons le prototype de l'équation (I-1) pour modéliser le comportement d'un capteur. La directivité de ce modèle est représentée par la *figure-I-12*.

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

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;  $\varphi$ : azimut,  $\theta$ : élévation. Le modèle (I-1) proposé n'est utilisé que si l'angle  $\theta$  représentant l'élévation appartient à l'intervalle  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$  dans le cas contraire le gain  $D$  est supposé nul.



*Figure-I-12- Modèle de la directivité D proposé pour un capteur.  
pour les deux cas le capteur possède les coordonnées (0,0).*

Une comparaison entre l'allure de ce modèle, représentée sur la *figure-I-12* avec les formes des *figures-I-9, 10 et 11*, montrent une grande ressemblance sur l'aspect. Nous avons donc utilisé le modèle de l'équation (I-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 ».

## **IV. Technologie et modélisation des déphaseurs**

### **IV.1. Généralités**

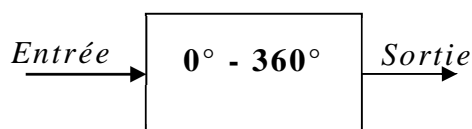
Il est pratiquement impossible de mettre en œuvre un réseau de capteurs sans avoir recourt aux déphaseurs [23,25,33,35,40,46,47]. Dans cette section nous allons aborder la technologie des déphaseurs, qui va nous permettre de mettre en évidence les limites et problèmes rencontrés en pratique. Cette étude va en plus aborder leurs utilisations en combinaison avec les méthodes de détection et d'adaptation.

Les performances des déphaseurs s'expriment en termes de : minimisation des pertes, bande passante, erreur de phase, puissance supportée temps de réponse et puissance de contrôle. Les déphaseurs peuvent être classés sous différentes familles [1,23,33]:

- ✓ Déphaseurs à valeurs continues à base d'une technologie à ferrite,
- ✓ Déphaseurs à valeurs discrètes à base de diodes PIN, MMIC, MEMs,
- ✓ Déphaseurs numériques à base de DSP (Digital Signal Processors).

### **IV.2. Déphaseurs à valeurs continues**

Les déphaseurs à ferrite permettent de créer une telle solution (*figure-I-13*). Le déphaseur sera analogique et avec un comportement réciproque, il peut alors opérer en mode réception et émission en même temps [51-59]. Ces déphaseurs s'utilisent exclusivement pour des applications en télécommunications, ils ont été utilisés en premier dans une géométrie de guide d'onde, ensuite coaxiale et finalement en technologie imprimée [51,52].



*Figure-I-13- Déphaseur continu :  
avec une variation entre 0° et 360°.*

### IV.2.a. Notions sur les ferrites

Les ferrites sont une sorte de céramique à base d'oxyde de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ferrimagnétique. En industrie elle à la forme  $\text{MOFe}_2\text{O}_3$  où MO désigne un composé métal oxyde. Le métal peut être du Manganèse Mn, Magnésium Mg, Nickel Ni, Fer Fe, Cuivre Cu, Zinc Zn ou un mélange de ces métaux. Il existe également d'autres formes pour les ferrites :  $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  où R désigne un élément rare tel qu'Yttrium Y ou Gadolinium Gd [51,52].

Dans les ferrites magnétisées, le moment de spin des électrons dépend de la puissance du champ magnétique continu appliqué et la perméabilité de la ferrite prend la forme d'un tenseur dont les éléments sont fonction du champ appliqué. Il faut également noter que le comportement magnétique de la ferrite suit une courbe d'hystérésis, ce qui fait apparaître des phénomènes non linéaires et rend très difficile la modélisation par une expression mathématique [51,52].

### IV.2.b. Déphaseurs ferrite

Les déphaseurs ferrites guide d'onde sont les premiers à être utilisés, ils sont également bien adaptés pour les grandes puissances. Couramment, de tels déphaseurs sont fabriqués en insérant de la ferrite de forme toroïdale (ou autres) à l'intérieur d'un guide d'onde (*figure-I-14*). Toutefois, Différent modèles existent [51,53-55].

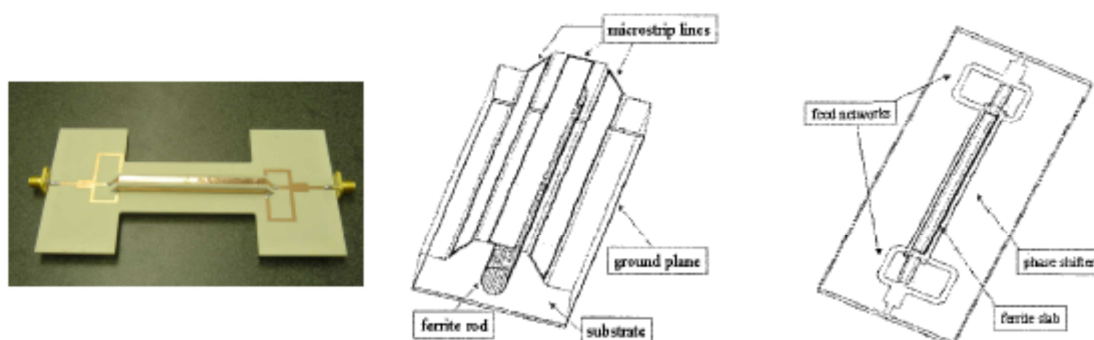


Figure-I-14- Déphaseur à ferrite avec guide d'onde [54].

La conception d'un déphaseur à ferrite, consiste en premier lieu à choisir le matériau ferrite (principalement pour définir le champ de saturation), un tel choix doit satisfaire l'équation (I-2) [51,56]. Une valeur proche de 0,4 est bien adaptée pour les grandes puissances alors qu'une valeur proche de 0,7 permet d'atteindre des déphasages importants [51,56].

$$0.4 \leq \frac{\omega_m}{\omega} \leq 0.7 \quad (I-2)$$

avec :  $\omega_m = \gamma 4\pi M_s$  ;  $\gamma$ : Rapport gyromagnétique  $\gamma = 2,21 \times 10^5 \text{ rad/s} = 2,28 \text{ MHz} / O_e$

$\omega = 2\pi f$  fréquence désirée

Nous avons également noté, qu'il existe des conceptions des déphaseurs à ferrites adaptées pour des antennes imprimées. Cette fois la ferrite est utilisée comme substrat (*figure-I-15*) [56]. Sous cette forme, ces déphaseurs sont très bien adaptés pour les faibles puissances avec un encombrement réduit (en taille et en poids). Il faut également noter que la conception de ces déphaseurs s'effectue de manière empirique avec des logiciels de simulation suivi d'une validation expérimentale [55,59-61].

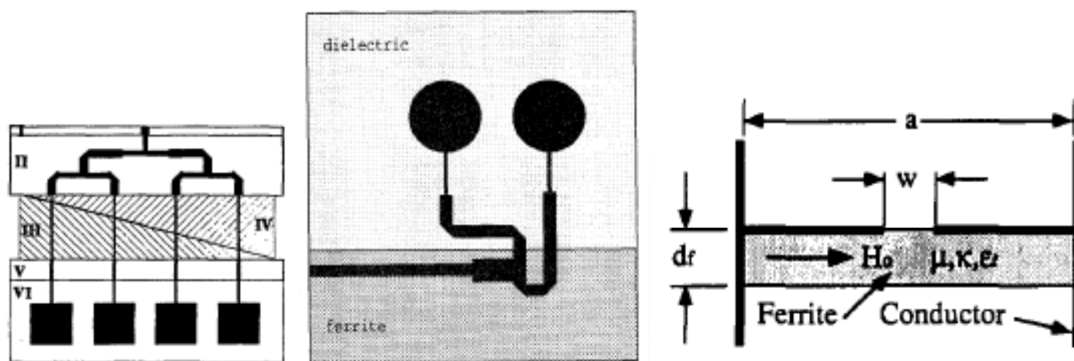


Figure-I-15- Réseaux d'antennes imprimées à base d'un substrat à ferrite

#### IV.3. Déphaseurs à valeurs discrètes

Ce type de déphaseurs est conçu à base de diodes PIN (*Positive Intrinsic Negative*), de circuits MICs (*Microwave Integrated Circuits*) ou de MEMS (*Micro Electromechanical Systems*) pour des dispositifs dont le principe est représenté par la *figure-I-16* [19,25,29,32,42,46,62-68]. Avec ces technologies, les déphaseurs sont réciproques, ils peuvent donc opérer en émission et réception en même temps [29,32,42,46,68]. Le principe de fonctionnement de ces déphaseurs consiste à faire permuter une ligne de transmission entre plusieurs. Le déphasage imposé peut être estimé avec l'équation (I-3) [29,32,42,46,68].

$$\Delta\varphi = \beta(l_{ref} - l_i) \quad (I-3)$$

avec  $\beta = \frac{\omega}{V}$ ,  $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$   $l_{ref}$  longueur de la ligne de référence et  $l_i$  longueur de ligne.



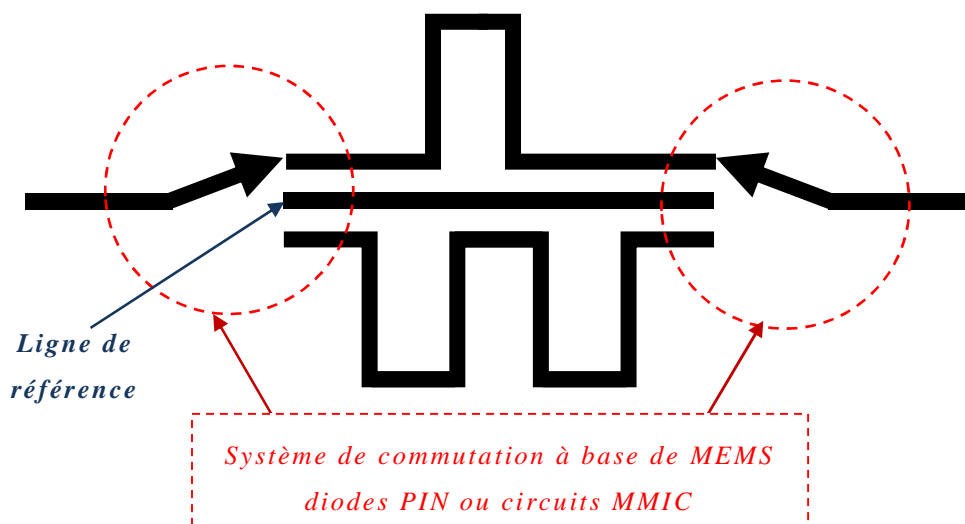


Figure-I-16- Principe des déphaseurs à valeurs discrètes.

Les lignes sont de différentes longueurs et par conséquent chacune d'elles est associée avec un angle de déphasage fixe par rapport à une ligne considérée comme référence, cette valeur est imposée par le temps de propagation du signal sur la différence de longueur entre lignes, la *figure-I-17* montre quelques déphaseurs du type discret. Leur seul inconvénient réside dans le fait que ces derniers ne peuvent fournir qu'un nombre fini de valeurs pour le déphasage [19,25,29,32,42,46,62-67].

#### IV.4. Déphaseurs à base de DSP

Cette fois, le déphasage sera attribué à un processeur et prend une forme numérique. La réalisation de tels déphaseurs n'a été possible qu'avec le développement des convertisseurs analogique numérique, qui actuellement offrent de très grands débits, combinés avec les vitesses de calcul faramineuses des nouveaux processeurs et DSP [1,46,69-72]. Cependant il faut noter que la technologie pour réaliser et implémenter des calculs intensifs n'a vu le jour que récemment. Au début, l'utilisation des traitements complètement numériques pour le filtrage spatial était limitée par les performances et rapidité des convertisseurs et processeurs. Avec les nouveaux ADC (*Analog to Digital Converter*) opérants à des vitesses très rapides, les déphaseurs réalisés précédemment avec des solutions analogiques, peuvent prendre un aspect numérique. En effet, actuellement la résolution des ADC varie entre 8 à 24 bits et leurs vitesses de conversion arrivent à des valeurs de l'ordre du 20GHz voire même 100GHz [1,46,69-73]. La *figure-I-18* représente deux schémas synoptiques expliquant le fonctionnement de ces déphaseurs.

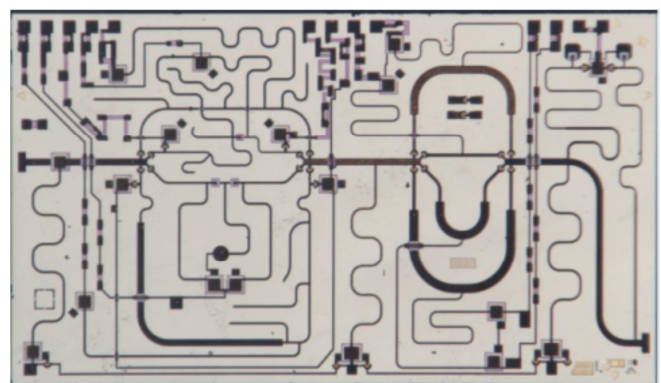
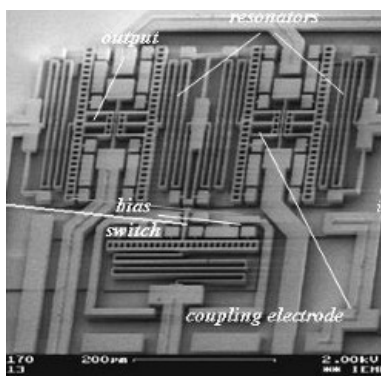
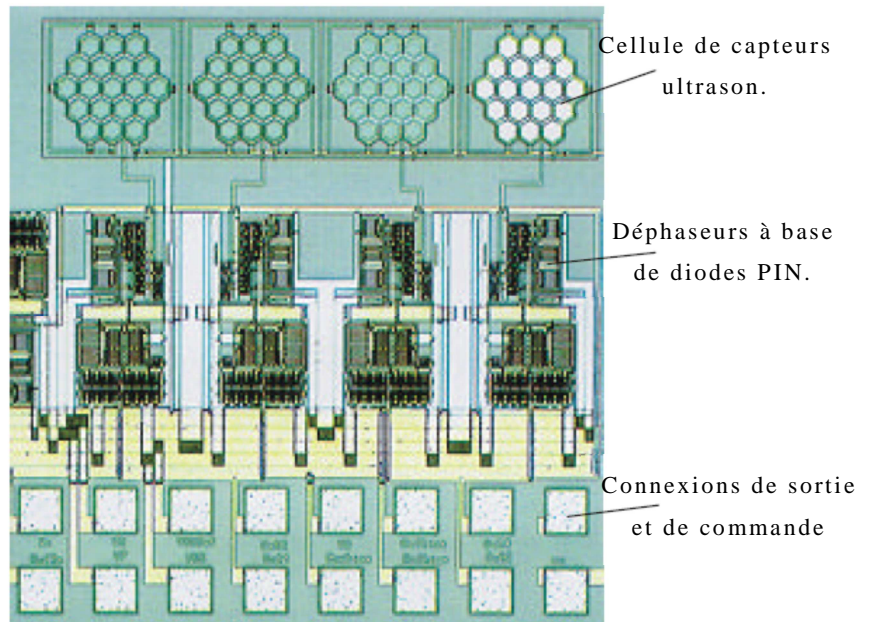
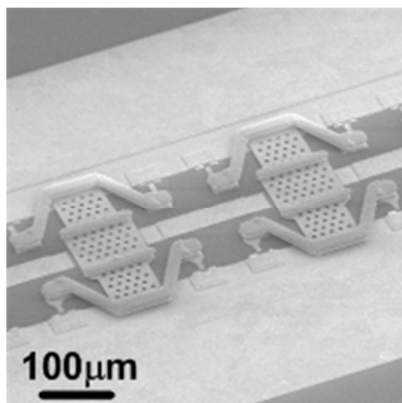
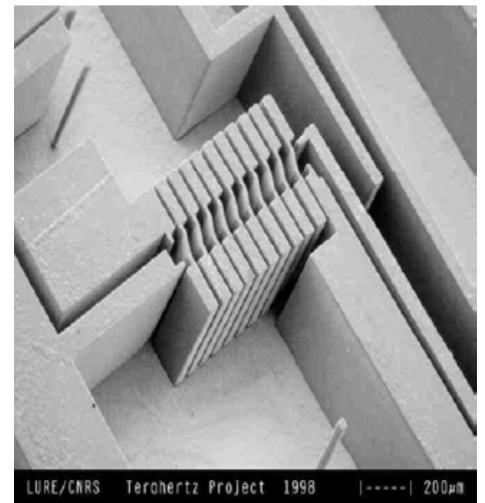
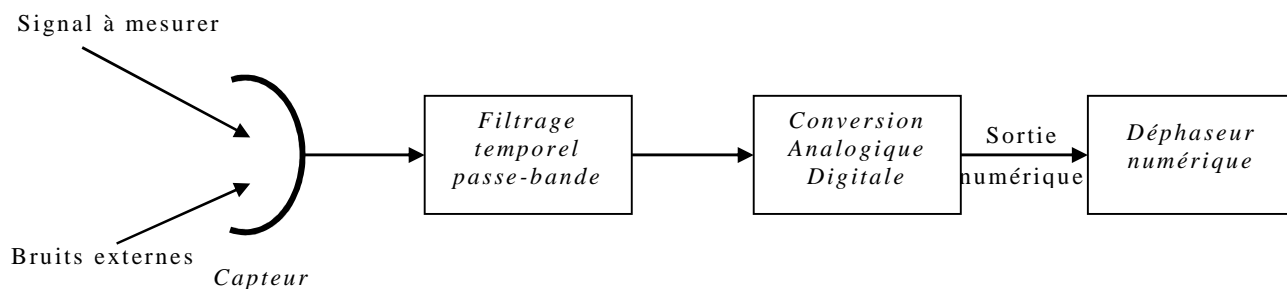
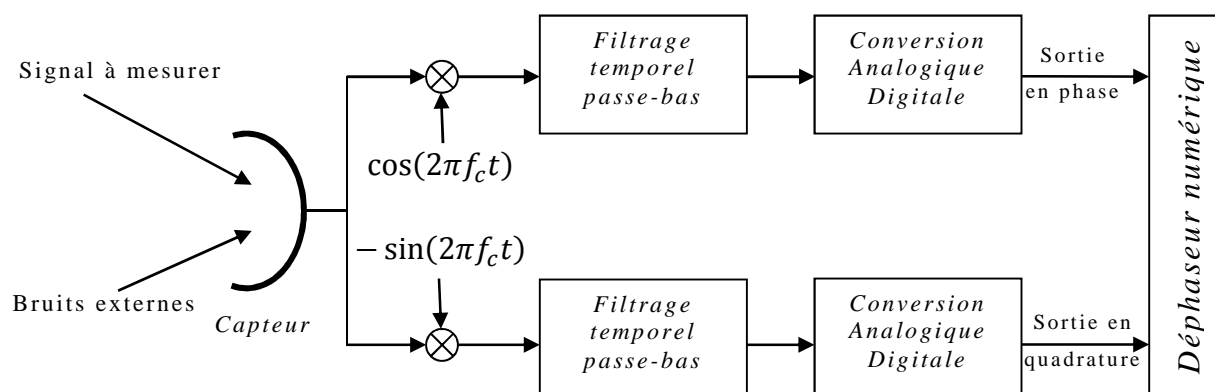


Figure-I-17- Exemple de déphaseurs à valeurs discrètes à base de circuits MICs, composants MEMS ou Diodes PIN.



a- Signaux sans modulations/démodulations



b- Signaux avec modulations/démodulations

Figure-I-18- Schéma synoptique du principe de fonctionnement des déphaseurs numériques.

Actuellement ce type de solution est florissant, particulièrement pour des applications de réseaux de capteurs. Toutefois, en transmission hertzienne sans-fil avec l'exploitation de fréquences de plus en plus élevées, une solution complètement numérique pour le filtrage spatial est difficile à mettre en œuvre [1,46,73]. L'autre inconvénient de ces déphaseurs est qu'ils ne peuvent opérer, uniquement en mode réception ou émission [1,46,73].

#### IV.5. Modélisation des déphaseurs

Dans cette section nous avons effectué un tour d'horizon relatif aux différentes technologies de réalisation des déphaseurs, pour préparer l'étude des algorithmes destinés au filtrage spatial pour les réseaux de capteurs. En effet, en pratique, un filtrage spatial ne peut être matérialisé sans faire appel aux déphaseurs [16-18,23-29]. 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 à 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 (I-4).

$$W_i = A_i e^{j\varphi_i} = W r e_i + j W i m_i \quad (I-4)$$

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.

## **V. Milieu 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. Hélas dans la réalité le canal va altérer le signal avec l'ajout de bruits et d'autres déformations : affaiblissement, effacement, absorption, dispersion, réfraction, réflexion, rotation de faraday, scintillement, dépendance de la polarisation, effet doppler, évanouissement et multi-trajets... [74-82].

Le modèle associé avec un milieu de propagation permet de comprendre les altérations subites par le signal émis à travers un canal. Les modèles de propagation réel sont compliqués, il n'est pas obligatoire de charger le modèle avec la totalité des phénomènes cités précédemment, seulement les plus prédominants pour un cas précis sont pris en compte. 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 pour préparer l'étape de modélisation des signaux au niveau des réseaux de capteurs.

### V.1. Pertes de propagation

Les pertes par diffusion sont dues principalement à la nature de l'environnement de propagation ouvert dans le cas des communications sans-fil [74-76]. En effet, l'énergie émise par une source ponctuelle, va se propager dans une large zone spatiale et par conséquent un récepteur ne peut détecter qu'une partie de cette énergie. En général, les pertes de propagation imposent un contrôle de puissance [3,11,12,77], ce type de perte n'a pas été pris en compte dans ce travail, ce qui suppose, pour notre cas, que les sources se trouvent à égales distances du réseau de capteurs.

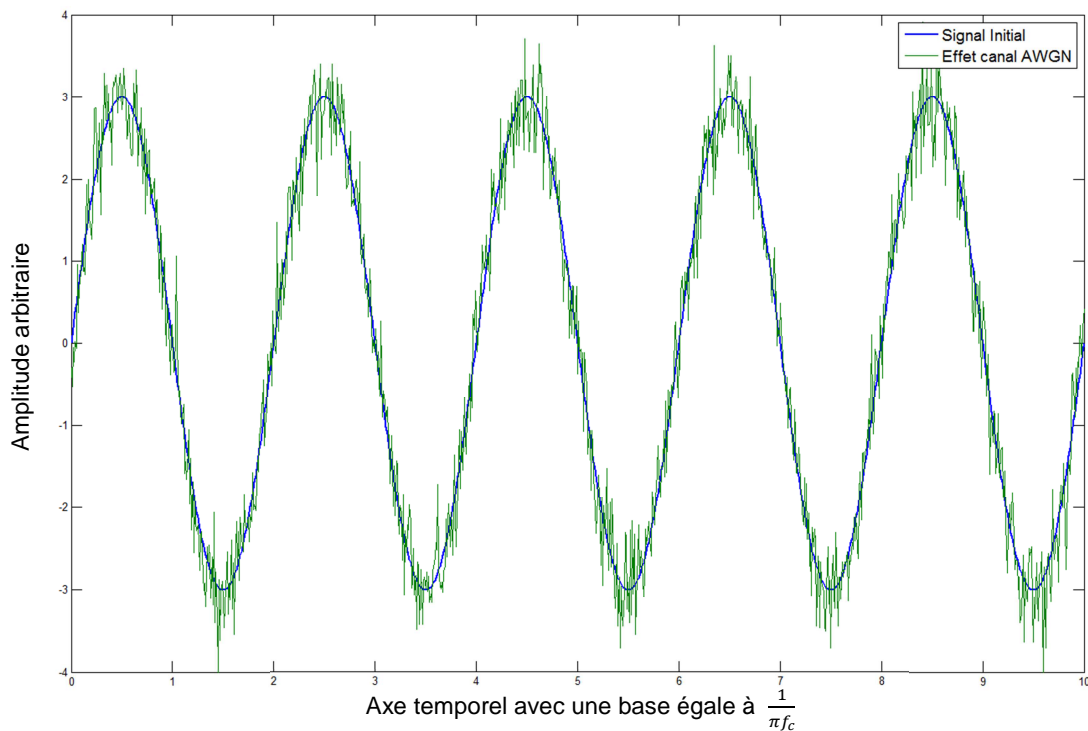
### V.2. Bruits additifs

Il est clair que la totalité des canaux de communications sont corrompus par du bruit dit ambiant. Ce type de bruit est généré par des phénomènes thermiques au niveau de l'émetteur et du récepteur combiné avec des sources de fond, ayant un comportement stochastique. Le modèle de ce bruit est supposé avoir une très large bande passante et aucune forme déterministe particulière. Le modèle dit AWGN (*Additive white Gaussian noise*) est le plus utilisé en télécommunications pour caractériser un bruit de fond. Dans ce cas la fonction de distribution est donnée par (I-5) [74].

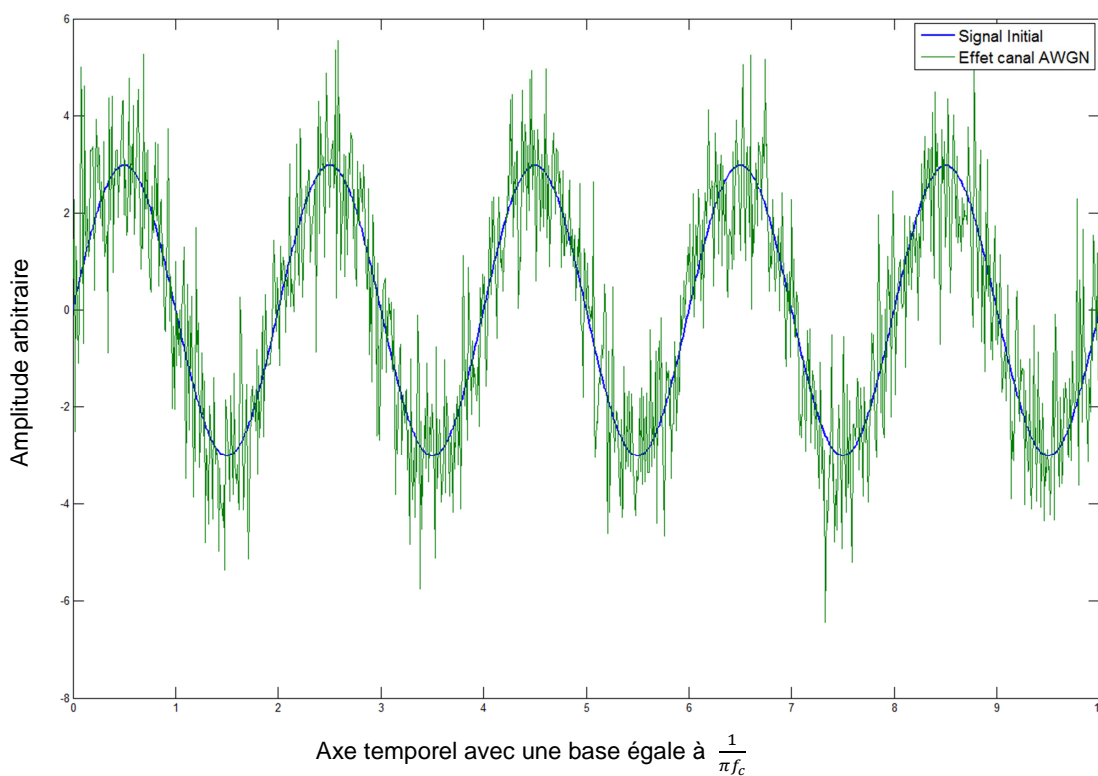
$$G(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{\left[\frac{-(f-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (I-5)$$

avec  $\mu$  la valeur moyenne (que nous avons supposée nulle) et  $\sigma^2$  la variance supposée égale à la puissance du bruit [78].

Nous avons utilisé une variante implémentée sous MATLAB<sup>®</sup> pour ce type de modèle au niveau de nos simulations, nous représentons sur la *figure-I-19* l'effet de ce bruit sur un signal bande étroite (sinusoïdal). Il apparait clairement que plus le rapport signal sur bruits augmente, l'effet du bruit sur le signal diminue.



a. Effet du canal AWGN avec un rapport signal sur bruit  $RSB=15$ .



b. Effet du canal AWGN avec un rapport signal sur bruit  $RSB=5$ .

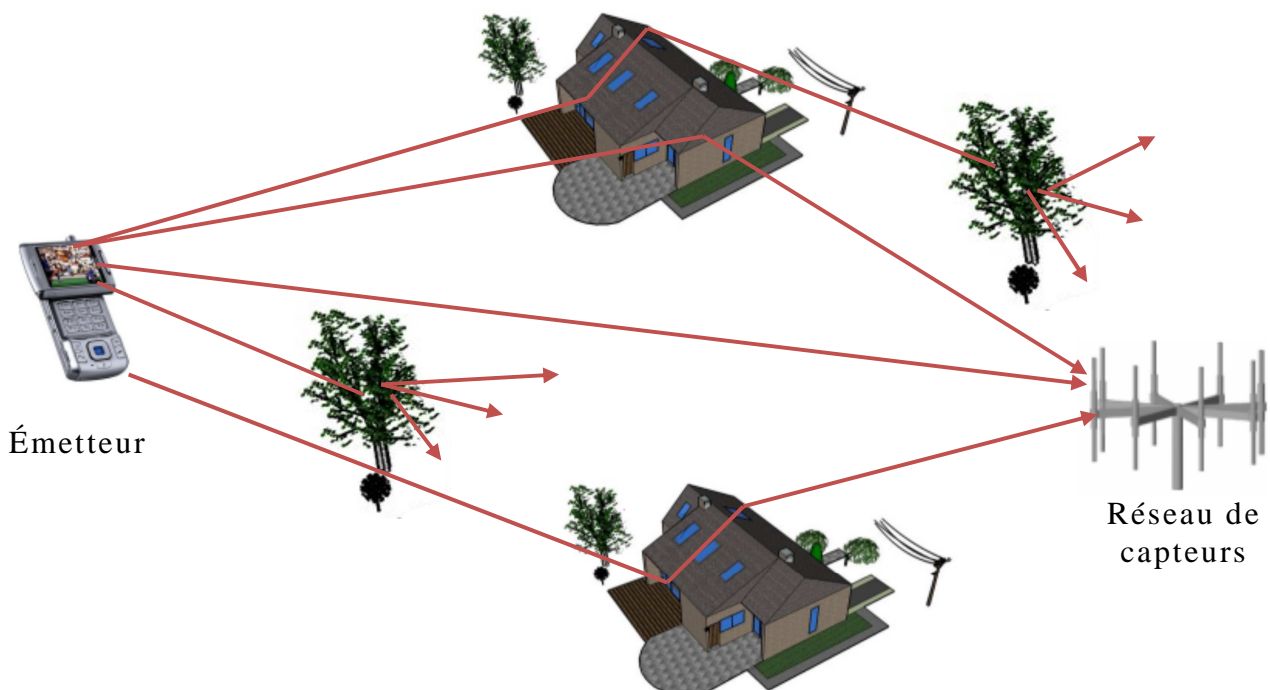
Figure-I-19- Effets du modèle AWGN sur une transmission d'un signal bande étroite sinusoïdal.

### V.3. Effets multi-trajets

L'effet multi-trajets fait référence aux phénomènes où plusieurs copies du même signal sont perçues au niveau du récepteur [79-82]. Cet effet est causé par l'existence de plusieurs chemins de propagation entre émetteur et récepteurs, des multi-trajets causés par des phénomènes tels que [79]:

- ✓ Dispersion : a lieu quand un signal rencontre un objet avec des dimensions plus petites que la longueur d'onde du signal considéré ; gouttelettes d'eau, nuages, insectes. Ce phénomène est souvent appelé dispersion de Rayleigh.
- ✓ Réfraction : a lieu lorsqu'un signal se propage à travers une structure.
- ✓ Réflexion : lorsqu'un signal rencontre une surface lisse avec un angle qui va le réorienté vers le récepteur.
- ✓ Diffraction : a lieu lors d'une rencontre d'un signal avec un coin ou une extrémité.

Avec ces phénomènes plusieurs répliques déphasées du même signal vont arriver au niveau du récepteur. Le principe d'une propagation multi-trajets est schématisé sur la *figure-I-20*.

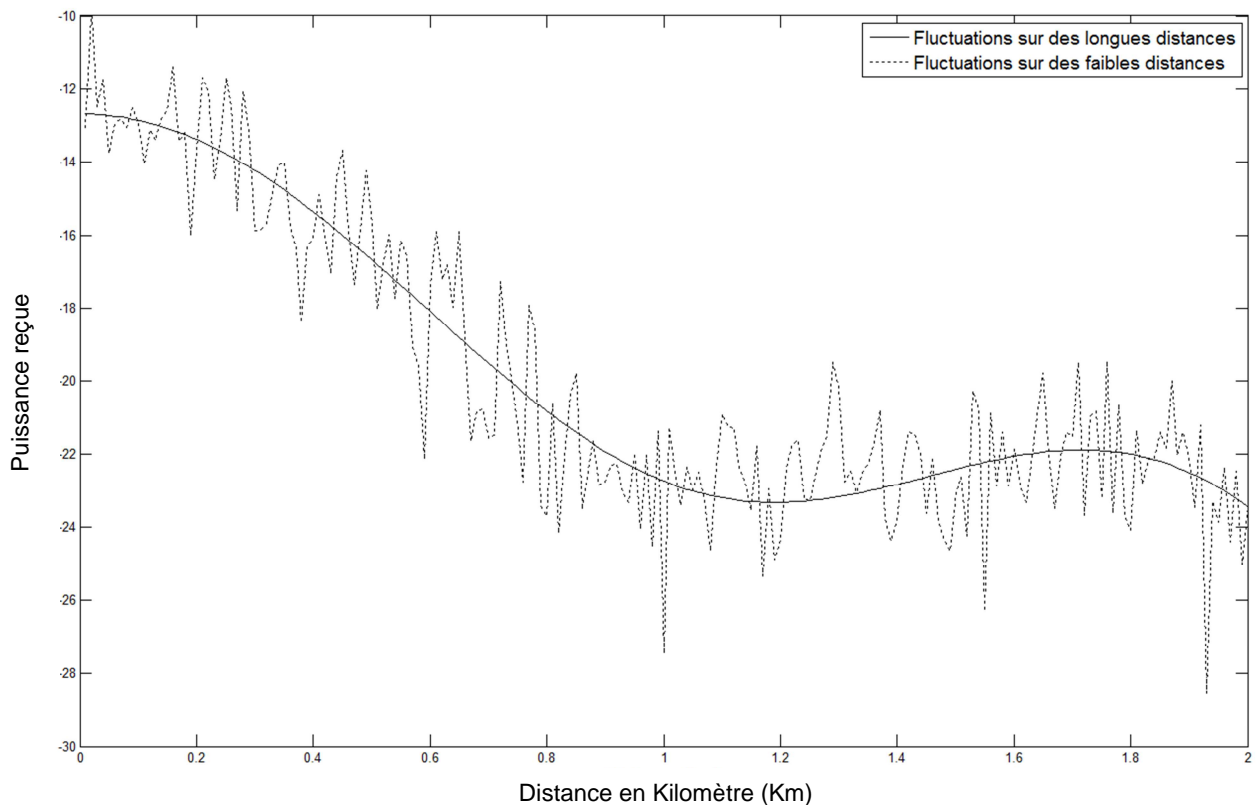


*Figure-I-20- Principe des canaux multi-trajets causés par des dispersions, réfractions, réflexions et diffractions d'une onde.*

Les canaux de transmission peuvent être considérés comme des filtres linéaires caractérisés par une fonction de transfert. Il est relativement difficile de proposer un modèle pour ce type de canaux, particulièrement avec des sources mobiles qui introduisent l'effet d'évanouissement. Toutefois, nous avons exploité un modèle statistique donné par l'équation (I-6) [80,81]. L'effet de ce type de canaux, sur un signal en fonction de la distance est représenté sur la *figure-I-21*, avec deux configurations : fluctuation sur des courtes et longues distances.

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^N x(t) e^{j\varphi_i(t)} \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (I-6)$$

avec  $x(t)$  signal en provenance de l'émetteur,  $\varphi_i(t)$  déphasage associé avec le chemin de rang  $i$ ,  $\tau_i(t)$  retard de propagation associé avec le chemin de rang  $i$ .

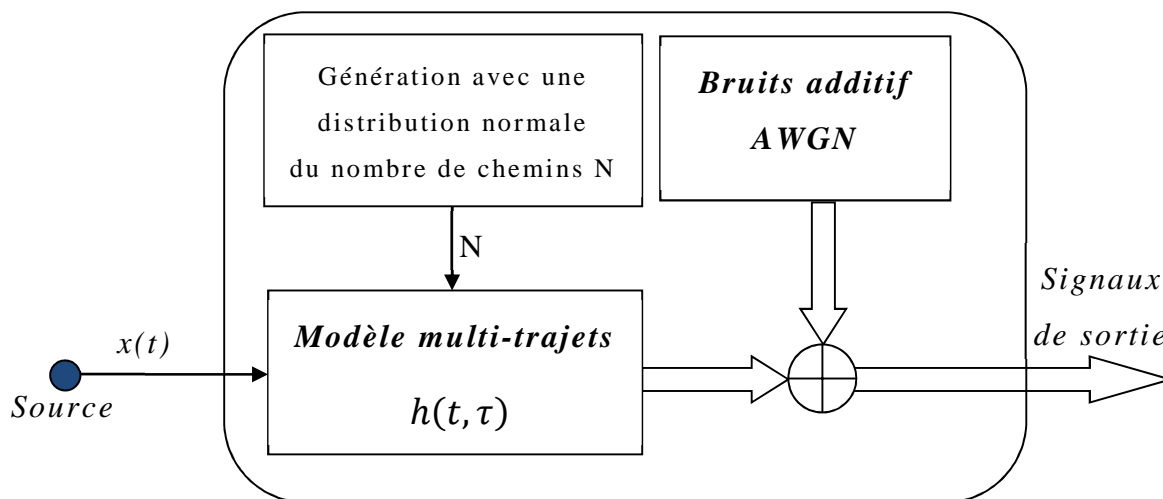


*Figure-I-21- Comparaison entre des fluctuations longue et faible distance d'un canal multi-trajets [82].*



#### V.4. Modélisation des canaux

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 décrits dans les sections précédentes. La *figure-I-22* représente un schéma synoptique du modèle que nous avons adopté pour simuler les canaux de transmission.



*Figure-I-22- Synoptique de l'implémentation réalisée pour le canal de transmission et exploitée lors des simulations.*

### VI. Modélisation des réseaux de capteurs

Dans notre cas, les sources de l'environnement schématisées dans la *figure-I-23* sont supposées situées à une grande distance par rapport au réseau de capteurs. Cette hypothèse est validée dans la pratique [4,15], et va nous permettre d'utiliser la notion des ondes planes pour élaborer le modèle des signaux au niveau des réseaux de capteurs.

#### VI.1. Structure des réseaux capteurs

Il s'agit d'une combinaison de plusieurs capteurs opérants en parallèle, combinés avec des puissants algorithmes (*figure-I-24*) pour [16,83]:

- ✓ 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.

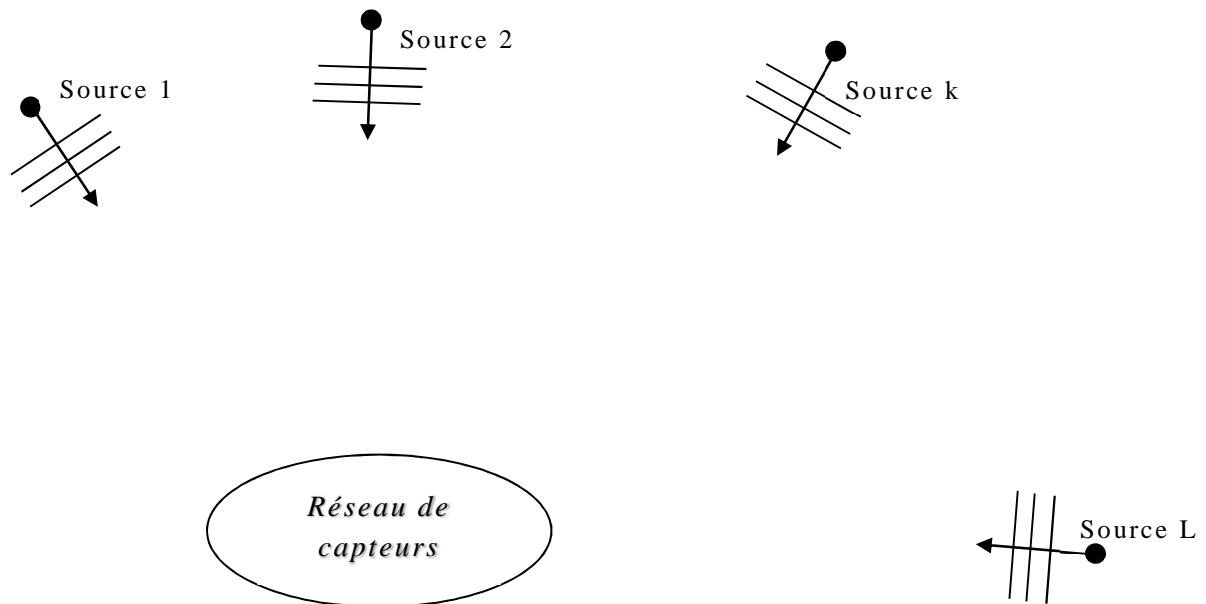


Figure-I-23- Répartition spatiale de L sources de l'environnement en champ lointain.

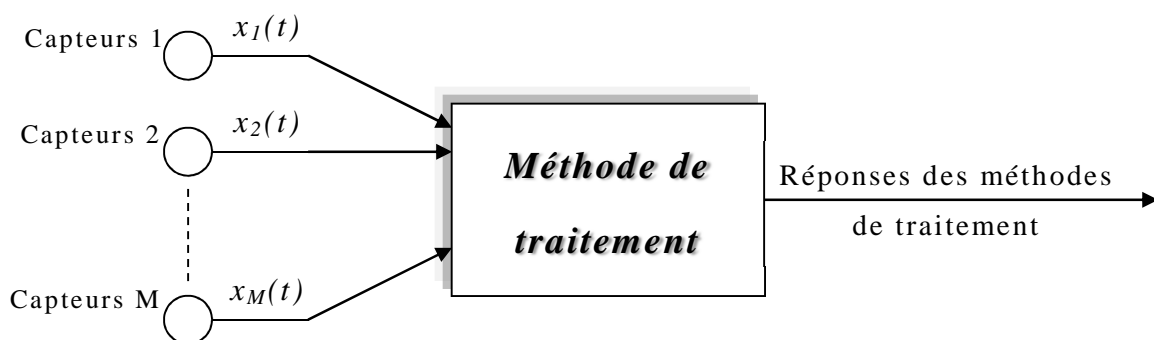
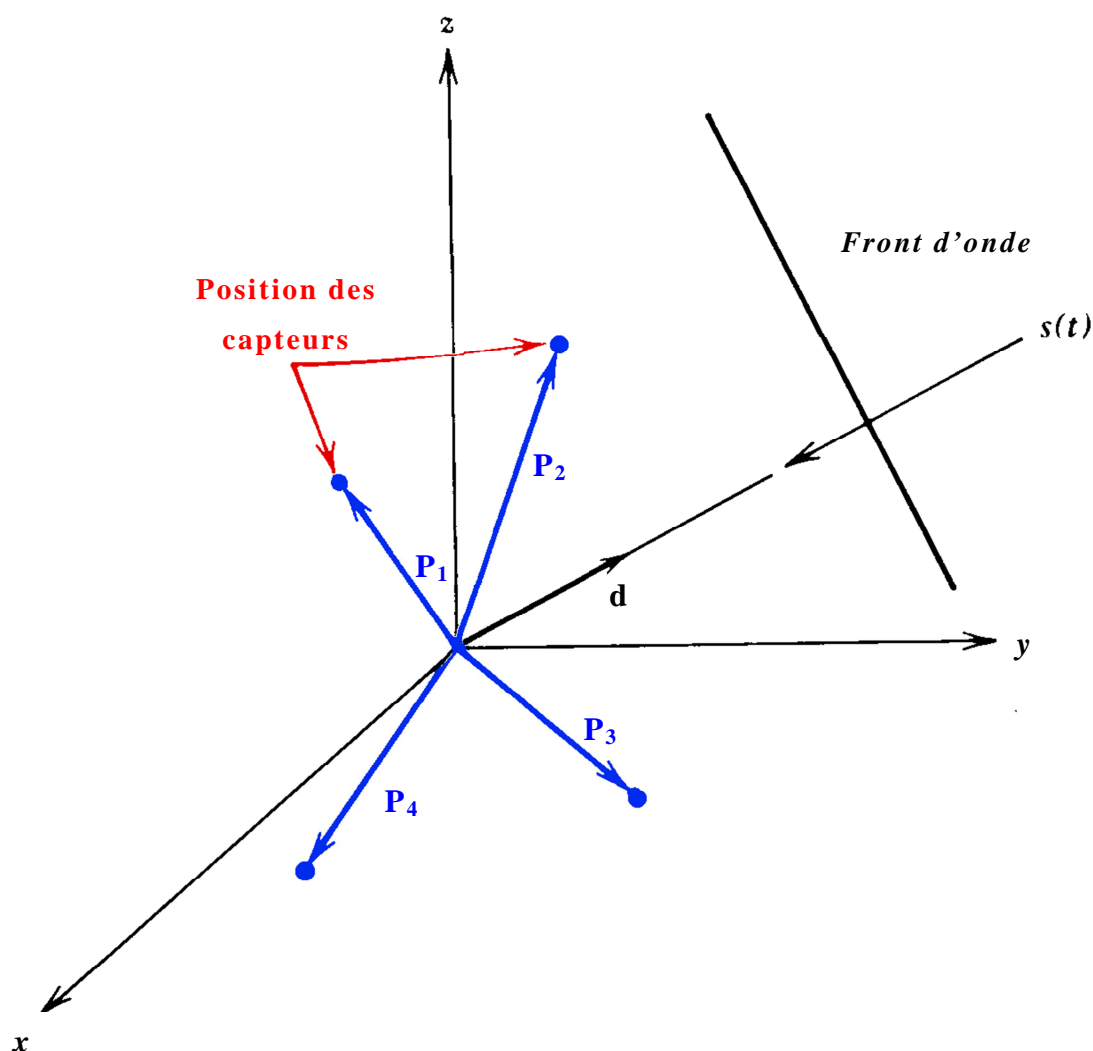


Figure-I-24- Diagramme fonctionnel du principe de traitement par réseau de capteurs.

## VI.2. Modélisation des signaux

### **VI.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 [84]. Les capteurs sont considérés comme des observateurs indépendants par rapport à une référence fixe (*figure-I-25*). Cette condition nous permet de prendre en considération les caractéristiques spatiales des différents signaux et de localiser de manière précise l'information.



*Figure-I-25- Principe de l'échantillonnage spatial effectué par un réseau avec des capteurs répartis dans l'espace.*

### VI.2.b. Modélisation des signaux

Supposons que le réseau comporte «  $M$  » capteurs, nous disposons de  $M$  réponses notées sous une forme vectorielle par (I-7).

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} \quad (I-7)$$

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 (I-8).

$$S_i(t) = \begin{bmatrix} s_{i1}(t) \\ s_{i2}(t) \\ \vdots \\ s_{iM}(t) \end{bmatrix} \quad (I-8)$$

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 (I-9). 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.

$$S_i(t) = \begin{bmatrix} s_i(t - \tau_1) \\ s_i(t - \tau_2) \\ \vdots \\ s_i(t - \tau_M) \end{bmatrix} \quad (I-9)$$

Supposons à présent que le signal incident est une onde plane, la direction de cette onde est précisée par le vecteur unitaire «  $d$  » (figure-I-25). Les différents retards de propagations  $\tau_j$  sont déterminés par (I-10).

$$\tau_j = \frac{d \cdot P_j}{c} \quad (I-10)$$

où «  $c$  » : est la vitesse de propagation (vitesse de la lumière dans le cas des ondes électromagnétiques) et  $d \cdot P_i$  : un produit scalaire qui s'interprète comme étant la projection du vecteur  $P_i$  sur le vecteur «  $d$  » (figure-I-26).

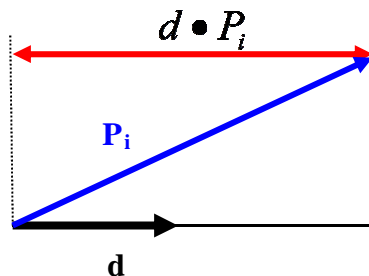


Figure-I-26- Présentation de la projection du vecteur  $P_i$ .

Dans ce travail, nous considérons uniquement des signaux à bande étroite le signal  $s_i(t)$  peut être exprimé par (I-11) [69,70]. Cette hypothèse est parfaitement vérifiée en télécommunication où les signaux sont modulés par des porteuses de fréquence fixe [74].

$$s_i(t) = a_i(t) \times e^{j\omega t} \quad (I-11)$$

la réponse du capteur de rang «  $m$  » au signal  $s_i(t)$  est donnée par (I-12) et (I-13).

$$x_i(t) = D_m(d) \times a_i(t - \tau_m) \times e^{j\omega(t - \tau_m)} \quad (I-12)$$

$$x_i(t) = D_m(d) \times a_i(t - \tau_m) \times e^{j\omega t} \times e^{-j\phi_m} \quad (I-13)$$

Avec le postula bande étroite, la fonction modulante  $a_i(t)$  demeure constante, à un instant donné, tout le long du réseau de capteurs [69,70]. La réponse du réseau prend la forme (I-14) et (I-15), où  $S_i$  désigne le vecteur d'espace du signal associé au réseau de capteurs considéré.

$$x_i(t) = D_m(d) \times s_i(t) \times e^{-j\phi_m} \quad (I-14)$$

$$X(t) = s_i(t) \times \begin{bmatrix} D_1(d) \times e^{-j\varphi_1} \\ D_2(d) \times e^{-j\varphi_2} \\ \vdots \\ D_M(d) \times e^{-j\varphi_M} \end{bmatrix} = s_i(t) \times S_i \quad (I-15)$$

avec  $|\varphi_m| \leq \pi$ ,  $D_m(d)$  le gain du capteur de rang  $m$  donné par (I-1),  $S_i$  vecteur d'espace associé avec le signal  $s_i(t)$ .

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 (I-16).

$$X(t) = \sum_{i=1}^L s_i(t) \times S_i \quad (I-16)$$

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.

## **VII. Conclusion**

Ce chapitre présente une liste non exhaustive de différentes classes et services offerts par les réseaux de capteurs avec un compromis entre efficacité et technologie. En effet, si les réseaux de capteurs sont exploités par ingéniosité dans un environnement en continuelle évolution, il est possible non seulement d'effectuer un filtrage sur des considérations spatiales mais d'avoir en plus l'opportunité de mesurer sur plusieurs directions simultanément. Dans le chapitre suivant nous allons introduire le problème de la détection de manière formelle, de façon à fournir et formuler les méthodes algorithmes et technologies susceptibles d'améliorer le fonctionnement et le mode opératoire des infrastructures de télécommunications à base de réseaux de capteurs.

***Chapitre II***

***Détection par***

***réseaux de capteurs***

## **I. Introduction**

Dans le cas des sources mobiles et transitoires ; qui risquent de disparaître ou apparaître de manière éphémère dans le temps, l'utilisation des capteurs directifs dotés d'une certaine intelligence est indispensable. Ceci est valable pour la détection, le filtrage adaptatif, voire la poursuite [77]. Pour effectuer ces tâches, il est possible d'utiliser des systèmes électromécaniques à base de moteurs électriques sauf qu'actuellement des dispositifs complètement électroniques dominant et ceci grâce aux réseaux de capteurs adaptatifs [1,17,28]. Ces derniers sont composés de capteurs actifs intégrés, avec des excitations contrôlées en phase et en amplitude [23]. Dans ce cas, l'objectif est double : en émission produire un rayonnement dirigé avec précision vers des sources préalablement détectées, en réception détecter et isoler le signal émis par une source en présence d'autres signaux partageant le même spectre fréquentiel. Sans oublier de mentionner, que les sources doivent être préalablement identifiées : il s'agit alors d'un problème de détection. Dans ce chapitre nous allons présenter les algorithmes et procédés que nous avons étudié et développé pour les réseaux de capteurs, en exploitant le modèle élaboré et présenté précédemment (dans le premier chapitre).

## **II. Formulation du problème de détection**

En se basant sur les études précédentes concernant les capteurs, il apparaît clairement qu'un capteur unique possède un gain spatial fixe sensible à un large éventail de directions. Avec les réseaux de capteurs il est possible de détecter avec précision une source d'information voire un signal et par conséquent limiter l'écoute et la mesure uniquement à cette direction [23,84,85]. En effet, les signaux issus des différentes sources se propagent spatialement à travers un milieu : air, eau, terre. L'onde résultante par interférence, est mesurée par le réseau de capteurs. Une mesure qui sera traitée pour isoler un signal spécifique.

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 :

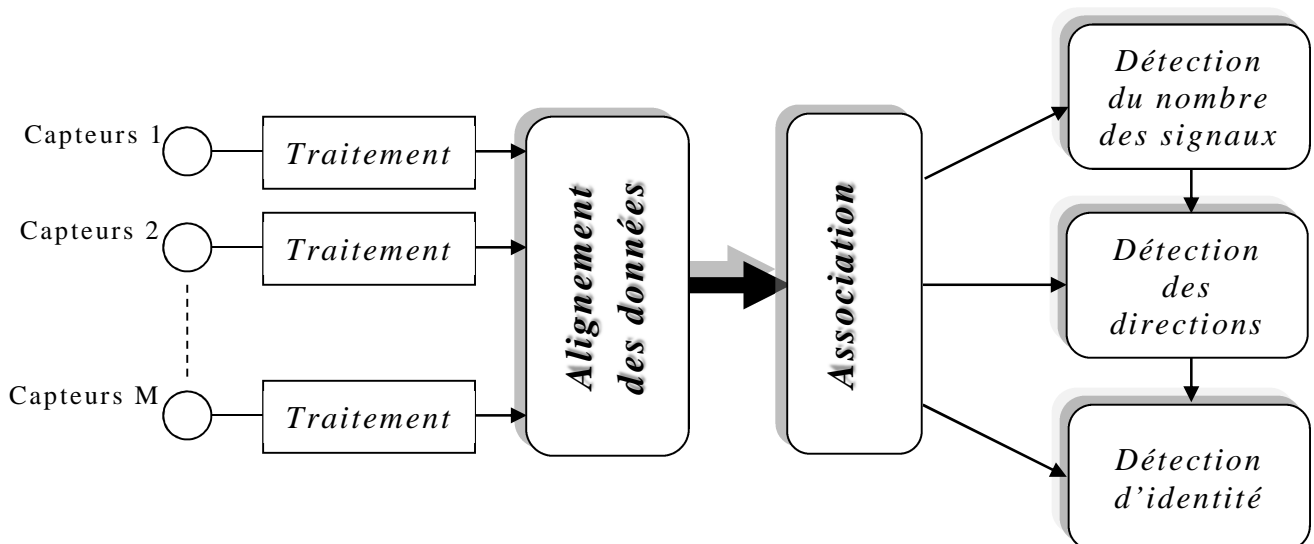
- ✓ des sources et bruits externes inconnues en nombre et en directions,
- ✓ des sources en mouvement permanent,
- ✓ des propagations multi-trajets.



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,

pour pouvoir par la suite effectuer une séparation spatiale. En effet, il est pratiquement impossible que deux sources d'énergies dissemblables possèdent les mêmes coordonnées géométriques [15,23-26,84]. Ce principe de détection, utilisant les réseaux de capteurs en présence du bruit et effets du canal de transmission, proposé dans le cadre de ce travail, va respecter les étapes schématisées par le diagramme de la *figure-II-1*.



*Figure-II-1- Diagramme fonctionnel des étapes de la phase de détection proposée.*

### II.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.

## II.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 [15,40,41].

## II.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 [86]. 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 (I-16) réécrit sous la forme suivante par l'équation (II-1).

$$X(t) = \sum_{l=1}^L s_l(t) \times S(d_l) \quad (II-1)$$

avec :

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

Le modèle (II-1) peut être exprimé sous une forme matricielle par l'équation (II-2) où  $A = [S(d_1) \ S(d_2) \ \dots \ S(d_L)]$  désigne une matrice de taille  $M \times L$  dite matrice manifold du réseau de capteurs. Les colonnes de cette matrice sont associées avec les directions incidentes des signaux mesurés

$$X(t) = A.[s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_L(t)]^T \quad (II-2)$$

Il est à présent possible de calculer la matrice de corrélation «  $R$  » associée avec le réseau de capteurs par (II-3), qui a son tour, peut être exprimée avec la matrice manifold par l'équation (II-4) [70,72].

$$R = E\{X(t).X(t)^H\} \quad (II-3)$$

$$R = A.S.A^H + R_{GWN} \quad (II-4)$$

Où  $R_{GWN}$  désigne la matrice de corrélation des bruits additifs, cette dernière matrice est une matrice diagonale qui prend la forme (II-5).

$$R_{GWN} = A.(\sigma^2.I).A^H \quad (II-5)$$

Avec  $\sigma^2$  variance supposée égale à la puissance moyenne des bruits et «  $I$  » une matrice identité.

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 (II-3) des variables aléatoires  $X(t)$  selon le modèle (II-6) [87-89]. Il est évident que cette matrice de corrélation est une matrice de dimension «  $M \times M$  ».

$$\hat{R} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K X(k).X(k)^H \quad (II-6)$$

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.

#### II.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. Ces deux étapes sont présentées et détaillées dans ce chapitre, avec des résultats de simulation sur des architectures diversifiées de réseaux de capteurs. Les modèles et formulations mathématiques sont présentés d'une manière simplifiée et sont adaptés aux contextes des réseaux de capteurs et au modèle élaboré pour ces derniers.

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. Cette dernière étape sera dévoilée au quatrième chapitre, lors de l'intégration du système multiagents.

### **III. Détection du nombre de sources**

#### **III.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 [90-92]. 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 [91].

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 dans le chapitre précédent avec les méthodes de détection AIC (Akaike Information Criterion) et MDL (Minimum Description Length) largement utilisées en détections dans le domaine spectral [90-104].

Soit un réseau de «  $M$  » capteurs mesurant «  $L$  » signaux incidents et en accord avec la condition (II-7),

$$L \leq M \quad (II-7)$$

ce qui devrait être satisfait à travers une conception adéquate du réseau de capteurs. Les algorithmes de détection exploitent les informations fournies par la matrice de corrélation estimée par l'équation (II-6), associée avec un réseau bien défini : disposition et nombre des capteurs connus. Nous supposons que les signaux sont linéairement indépendants. Alors la matrice relative aux signaux, exprimée par (II-8) est de rang complet «  $L$  ».

$$R_s = A.S.A^H \quad (II-8)$$

Soit les valeurs propres de «  $R_s$  » classées dans un ordre décroissant (II-9) :

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L \quad (II-9)$$

Il est évident que la matrice «  $R_{GWN}$  » est de rang «  $M$  » avec des valeurs propres identiques égales à  $\sigma^2$  la puissance moyenne des bruits [105].

Les valeurs propres de la matrice de corrélation estimée «  $R$  », en se basant sur l'équation (II-4), sont les «  $M$  » valeurs propres de la matrice «  $R_{GWN}$  » additionnées aux «  $L$  » valeurs propres de la matrice «  $R_s$  » [105] (II-10).

$$\lambda_1 + \sigma^2 \geq \lambda_2 + \sigma^2 \geq \dots \lambda_L + \sigma^2 \geq \sigma^2 = \dots = \sigma^2 \quad (II-10)$$

La matrice de corrélation estimée peut alors être divisée en deux parties. Un sous espace des signaux plus bruits et un sous espace des bruits uniquement (II-11). Il faut noter que les valeurs propres du sous espace des bruits sont des valeurs faibles identiques. En effet, en pratique la puissance du bruit est plus faible que celle du signal utile.

$$\hat{R} = \{\widehat{R}_s | \widehat{R}_{GWN}\} \quad (II-11)$$

Une détection des «  $J$  » petites valeurs propres identiques, permet de calculer le nombre des signaux «  $L=M - J$  » incidents sur le réseau de capteurs. Cependant, les valeurs propres des bruits sont sujettes à des modifications statistiques ce qui va introduire des erreurs dans cette estimation. Nous allons montrer que les deux procédés AIC (Akaike Information Criterion) et MDL (Minimum Description Length), les plus utilisés pour la détection du nombre de sources, exploitent les mêmes principes et peuvent être considérés comme similaires [90-104].

### III.2. Approches de détection AIC et MDL

#### **III.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 (II-6), 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 calculer le nombre des sources qui peut prendre l'une des valeurs indiquées par (II-12) [90-104].

$$L = 0, 1, 2, \dots, (M - 1) \quad (II-12)$$

Avec « M » nombre des capteurs du réseau.

Pour construire ce critère, il faut dans une première étape estimer les valeurs propres de la matrice de corrélation obtenue suivant le modèle (II-6). Soit les valeurs propres organisées sous la forme (II-13) calculées pour « K » échantillons.

$$g_1 \geq g_2 \geq g_3 \geq \dots \geq g_M \quad (II-13)$$

Plusieurs fonctions sont proposées pour les méthodes AIC et MDL, si l'on dispose de « K » mesures indépendantes d'une variable aléatoire avec une matrice de corrélation et une famille de valeurs propres de la forme (II-13). Une forme simplifiée des critères à minimiser sont donnés par (II-14) pour AIC et par (II-15) pour MDL [90-104,106].

$$L_{AIC} = \min_L AIC(L) = \min_L (-K \log(\mathcal{L}_L) + L(2M - L)) \quad (II-14)$$

$$L_{MDL} = \min_L MDL(L) = \min_L \left( -K \log(\mathcal{L}_L) + \frac{(L(2M - L) + 1) \log(K)}{2} \right) \quad (II-15)$$

sachant que l'entité  $\mathcal{L}_L$  est donné par (II-16).

$$\mathcal{L}_L = \frac{\prod_{i=L+1}^M g_i}{\left( \frac{\sum_{i=L+1}^M g_i}{M - L} \right)^{M-L}} \quad (II-16)$$

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. Rappelons que « K » désigne le nombre d'échantillons utilisés pour estimer la matrice de corrélation (II-6).

### III.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 (II-17) pour AIC et l'équation (II-18) pour MDL. Cette analyse va nous permettre de tester l'efficacité des critères exprimés par (II-14) et (II-15).

$$Pr[L_{AIC} \neq L] \quad (II-17)$$

$$Pr[L_{MDL} \neq L] \quad (II-18)$$

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 exprimée par l'équation (II-19) qui montre que cette approche de détection n'introduit aucune sous-estimation [103,104].

$$Pr[(AIC(L-\alpha) - AIC(L)) \leq 0] = 0 \quad (II-19)$$

Ce pendant pour la méthode MDL, la probabilité d'une sous-estimation est exprimée par (II-21) obtenue à partir de (II-20).

$$Pr_{MDL} = Pr[(MDL(L-\alpha) - MDL(L)) \leq 0] \quad (II-20)$$

$$Pr_{MDL} = Pr \left[ \left( -K \log(g_L) - K(M-L) \log \left( \frac{\sum_{i=L+1}^M g_i}{M-L} \right) + K(M+\alpha-L) \log \left( \frac{\sum_{i=L-\alpha+1}^M g_i}{M+\alpha-L} \right) - \frac{1}{2} (2M-2L+\alpha) \log(K) \right) \leq 0 \right] \quad (II-21)$$

Pour un nombre infini des échantillons K, la probabilité (II-21) est approximée par (II-22) [93,100,101,104].

$$Pr_{MDL} = 1 - G \left( \frac{\mu_{MDL}}{\sigma_{MDL}} \right) \quad (II-22)$$

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 (II-22) montre clairement que l'approche MDL souffre du problème de sous-estimation des sources de l'environnement. Ce problème a été présenté et traité dans plusieurs travaux [93,100,101,104].

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 (II-24) obtenue à partir de (II-23) [103,104].

$$Pr_{AIC} = Pr[(AIC(L+\alpha) - AIC(L)) \geq 0] \quad (II-23)$$

$$Pr_{AIC} = Pr \left[ \left( -K \log(g_{L+\alpha}) + K(M-L) \log \left( \frac{\sum_{i=L+1}^M g_i}{M-L} \right) - K(M-L-\alpha) \log \left( \frac{\sum_{i=L+\alpha+1}^M g_i}{M-L-\alpha} \right) - (2M-2L-\alpha) \right) \leq 0 \right] \quad (II-24)$$

Pour un nombre infini des échantillons K, la probabilité (II-24) est approximée par (II-25) [103,104].

$$Pr_{AIC} = 1 - G \left( \frac{\mu_{AIC}}{\sigma_{AIC}} \right) \quad (II-25)$$

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 (II-25) 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 [103,104].

Toutefois, la probabilité d'une surestimation de la méthode MDL est nulle (II-26), ce qui montre que cette approche de détection n'introduit aucune surestimation [93,100,101,104].

$$Pr[(MDL(L+\alpha) - MDL(L)) \geq 0] = 0 \quad (II-26)$$

### III.2.c. Résultats et comparaisons

L'analyse des performances des deux algorithmes AIC et MDL sera effectuée à travers un réseau linéaire et uniforme (*figure-II-2*), 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  $k_x=k_y=1$ .

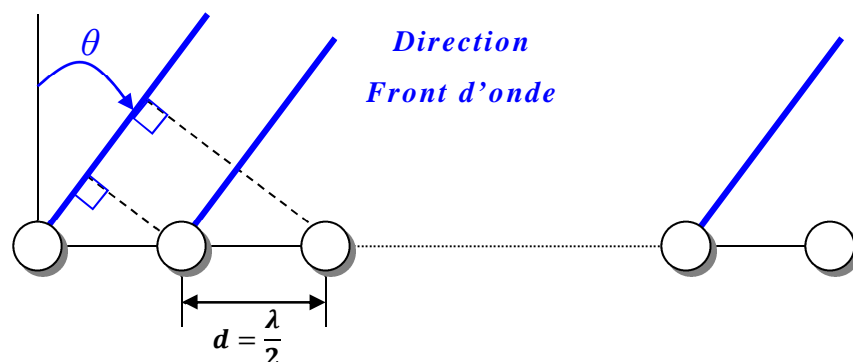
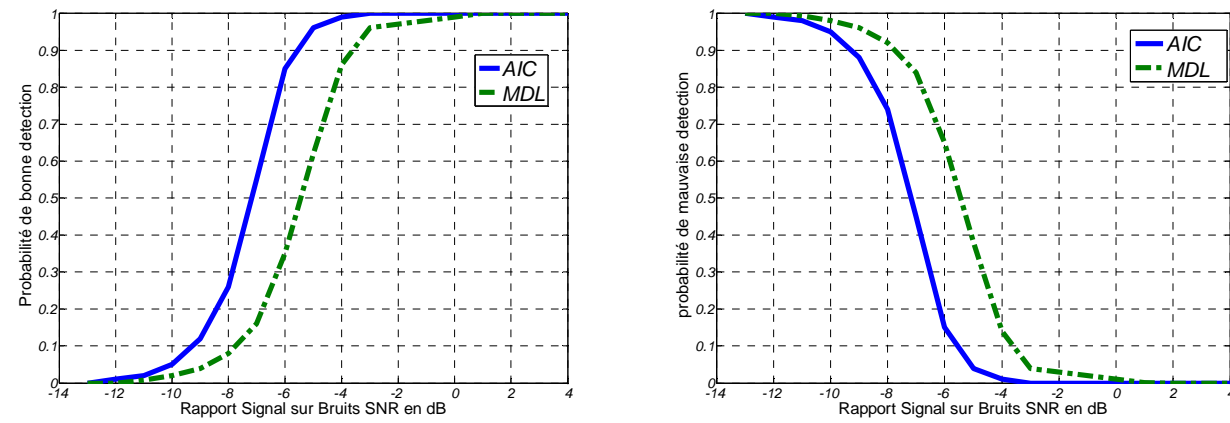


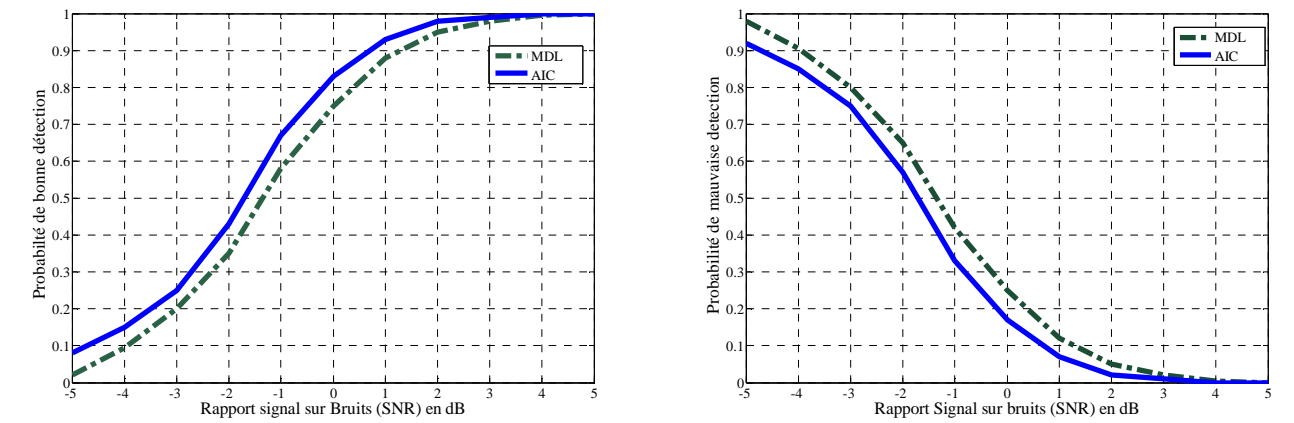
Figure-II-2- Réseau linéaire uniforme et régulier.

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 estimée par (II-6).

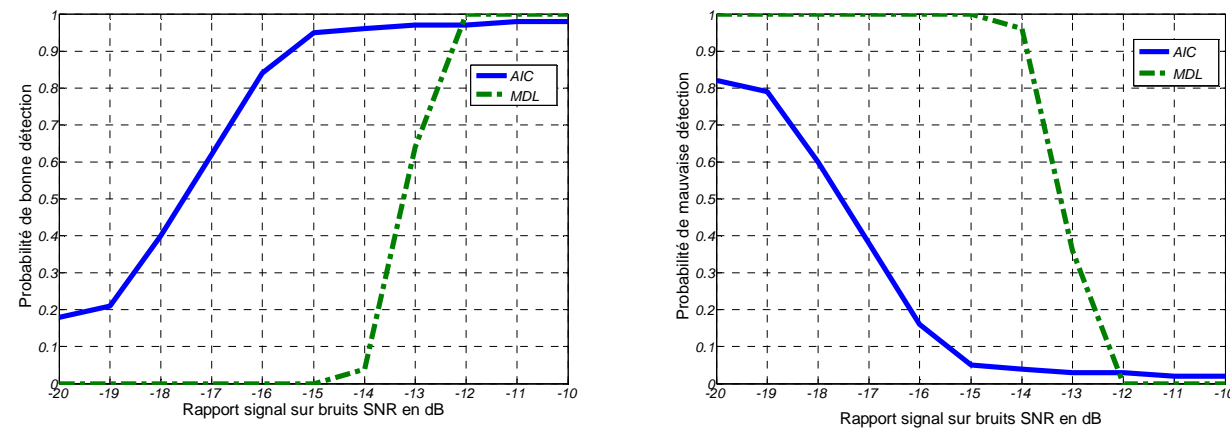
- ✓ Influence des bruits : l'influence des bruits sur la détection du nombre de sources, sera analysée en exploitant le rapport signal sur bruits. Analysons la détection d'une seule source de direction  $0^\circ$  avec un réseau linéaire respectivement de 3 et 14 capteurs. Les probabilités obtenues sont représentées sur la figure-II-3. En observant la figure-II-3, il apparait 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. Les résultats obtenus sont tout à fait similaires à ceux trouvés par Qunfei Z., Juan M. et Jianguo H. [103].
- ✓ Effet de la séparation angulaire : l'effet de la séparation angulaire entre sources combiné avec l'effet du rapport signal sur bruits est analysé respectivement par un réseau à 8 et 14 capteurs sur les figures-II-3-d, II-3-e et II-3-f. Il apparait que pour une faible séparation de l'ordre de  $1^\circ$ , 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 en concordance avec les résultats cités dans [91] et [103].



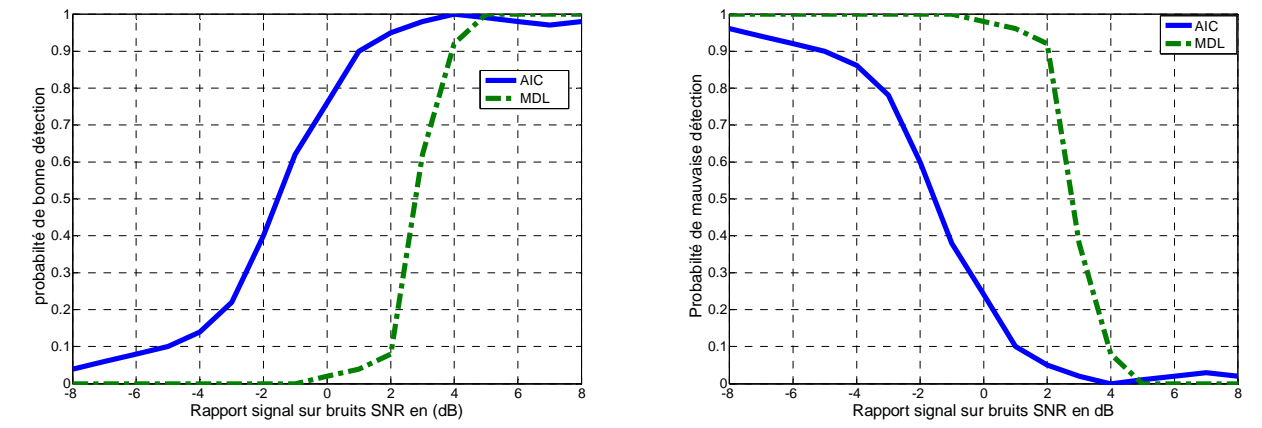
a- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 3 capteurs, un seul signal avec une direction de  $0^\circ$ . SNR=-6dB  $N_{AIC}=1$   $N_{MDL}=0$ , SNR=-4dB  $N_{AIC}=1$   $N_{MDL}=1$ , SNR=2dB  $N_{AIC}=2$   $N_{MDL}=1$ .



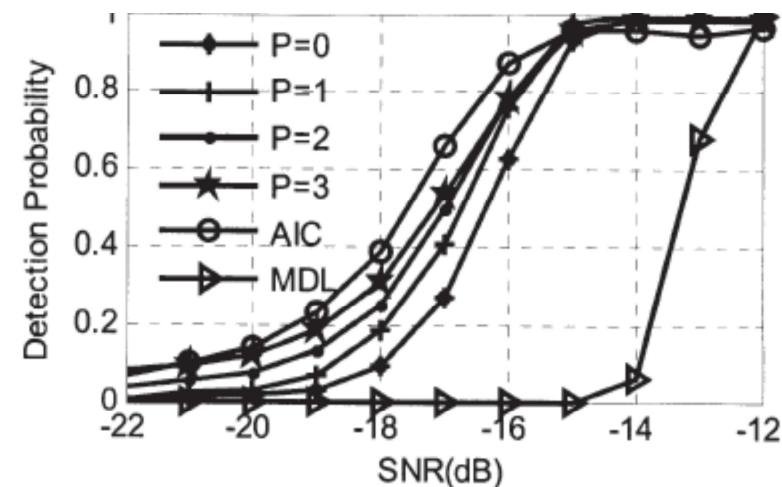
d- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 8 capteurs, deux sources incidentes de directions  $10^\circ$  et  $15^\circ$ . SNR=-3dB  $N_{AIC}=1$   $N_{MDL}=0$ , SNR=0dB  $N_{AIC}=2$   $N_{MDL}=2$ , SNR=5dB  $N_{AIC}=3$   $N_{MDL}=2$ .



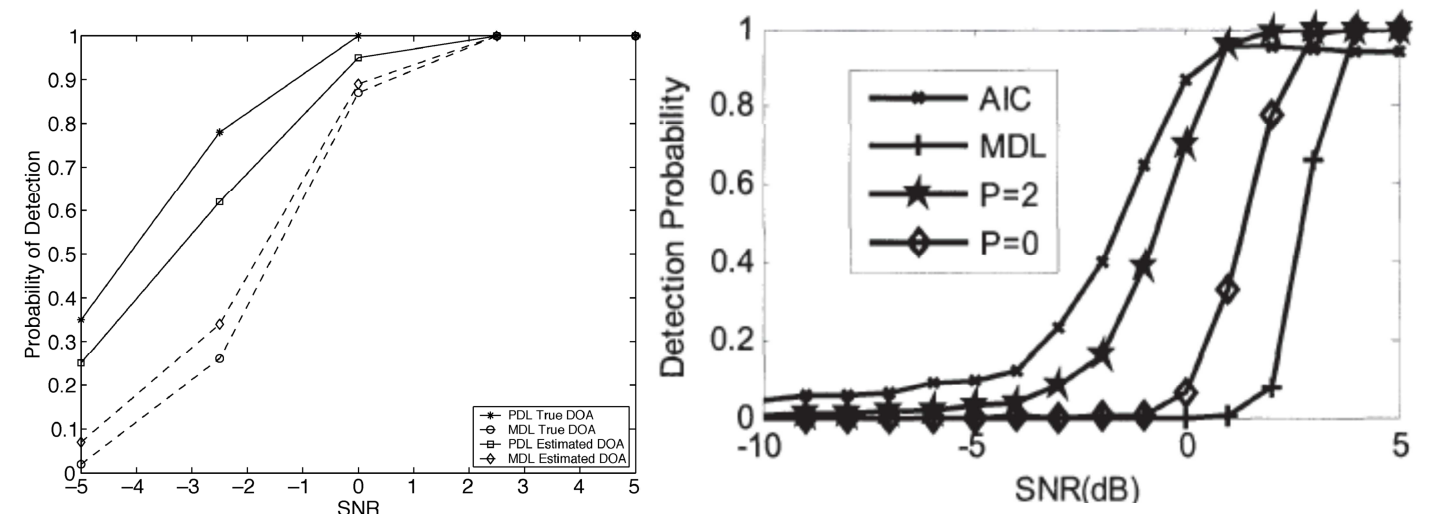
b- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 14 capteurs, un seul signal avec une direction de  $0^\circ$ . SNR=-17,5dB  $N_{AIC}=1$   $N_{MDL}=0$ , SNR=-12,5dB  $N_{AIC}=1$   $N_{MDL}=1$ , SNR=-11dB  $N_{AIC}=2$   $N_{MDL}=1$ .



e- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 14 capteurs, deux sources incidentes de directions  $0^\circ$  et  $1^\circ$ . 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  $N_{AIC}=3$   $N_{MDL}=2$ .



c- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 14 capteurs, un seul signal avec une direction de  $0^\circ$  [103].



f- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 8 capteurs, deux sources incidentes de directions  $10^\circ$  et  $15^\circ$  [91].

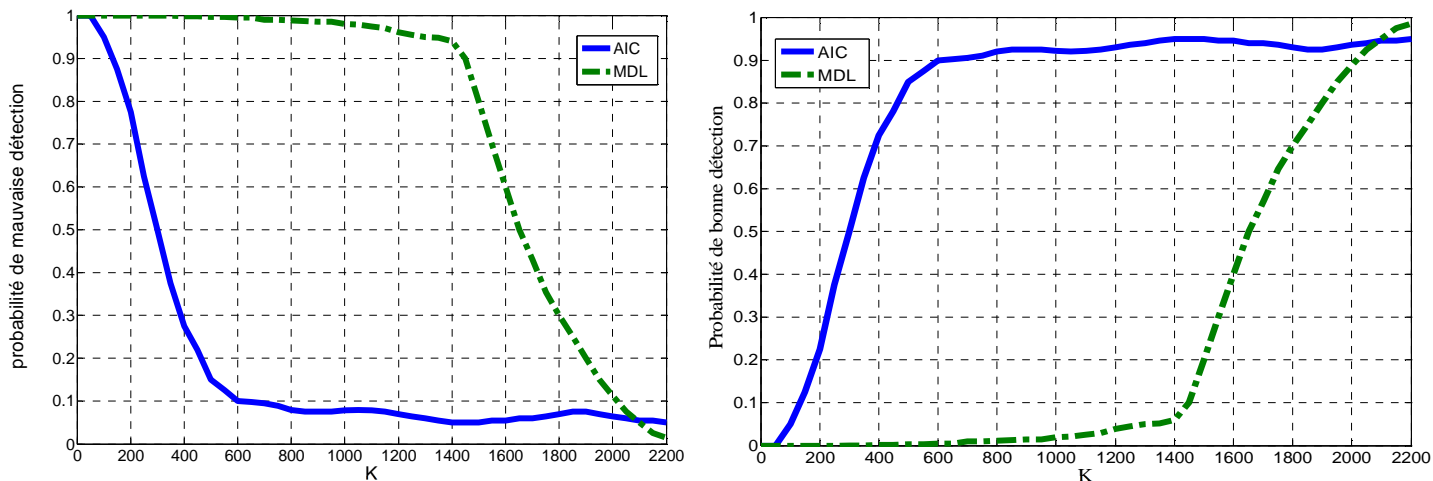
g- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 14 capteurs, deux sources incidentes de directions  $0^\circ$  et  $1^\circ$  [103].

Figure-II-3- Effet des bruits et de la séparation angulaire sur la détection du nombre des signaux incidents.

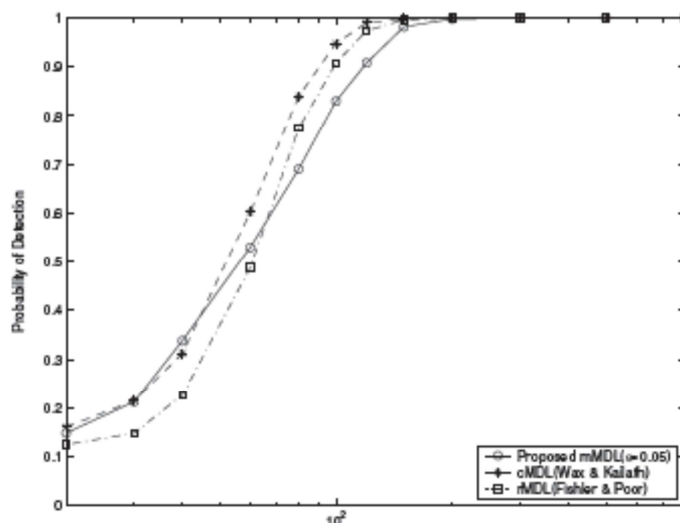
✓ **Effet des échantillons d'estimation de la matrice de corrélation :** nous allons présenter dans ce paragraphe, les performances des deux techniques de détection AIC et MDL par rapport au nombre d'échantillons « K » utilisé dans (II-6) pour estimer la matrice de corrélation «  $\hat{R}$  ». Au niveau de la *figure-II-4-a* nous présentons les résultats de simulation, des probabilités de mauvaise détection exprimées respectivement par (II-21) pour l'approche MDL et (II-24) pour l'approche AIC, 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-II-4-a* 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. Sur la *figure-II-4-b*, nous présentons les résultats d'une analyse similaire sur des techniques de détections similaires à AIC et MDL qui valide de manière catégorique les précédentes conclusions [93, 100].

### **III. Détection des directions**

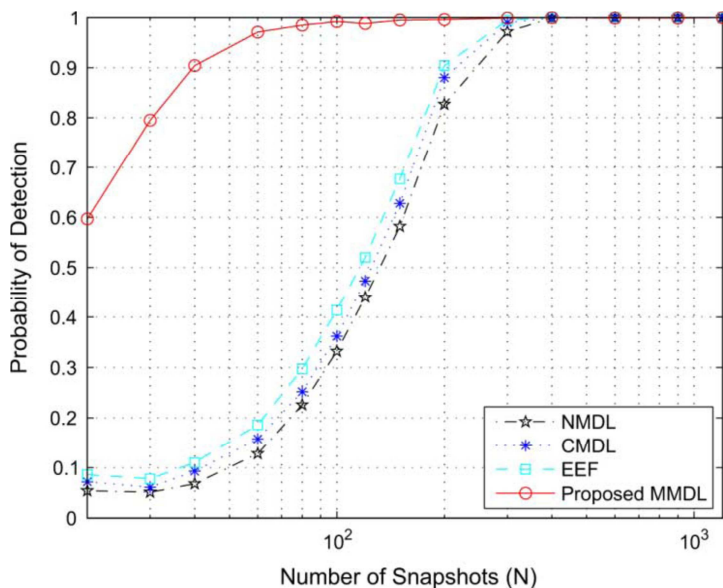
Le deuxième problème à résoudre, consiste à détecter les directions incidentes des différents signaux présents sur le réseau de capteurs, connaissant leurs nombre. Effectivement, la détection du nombre des signaux vient du fait que la quasi-totalité des algorithmes de détection des directions incidentes, supposent le nombre des signaux connu d'avance. Nous pouvons même affirmer qu'un mauvais filtrage spatial peut survenir si le nombre des signaux incidents est méconnu [107-127]. De même, les algorithmes d'estimation haute résolution que nous allons présenter dans cette section, peuvent présenter des erreurs d'estimation si le nombre des signaux incidents est inconnu [107-127]. Par conséquent, nous supposons le nombre des signaux incidents tout à fait connu à travers une étape de détection de leur nombre selon une coopération entre les approches citées précédemment et suivant le modèle schématisé par la *figure-II-5*. Ce qui explique la collaboration réalisée entre les deux approches pour la détection du nombre des signaux incidents sur le réseau de capteurs, avec la détection des directions incidentes.



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.



b- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 10 capteurs, deux signaux incidents  $[2,5^\circ \ 7,8^\circ]$  et rapport signal sur bruits SNR=0dB [93].



c- Performances de détection d'un réseau linéaire uniforme de 6 capteurs, deux signaux incidents  $[0^\circ \ 5,5^\circ]$  et rapport signal sur bruits SNR=0dB [100].

Figure-II-4- Effet du nombre d'échantillons utilisé pour l'estimation de la matrice de corrélation sur la détection du nombre des signaux incidents.

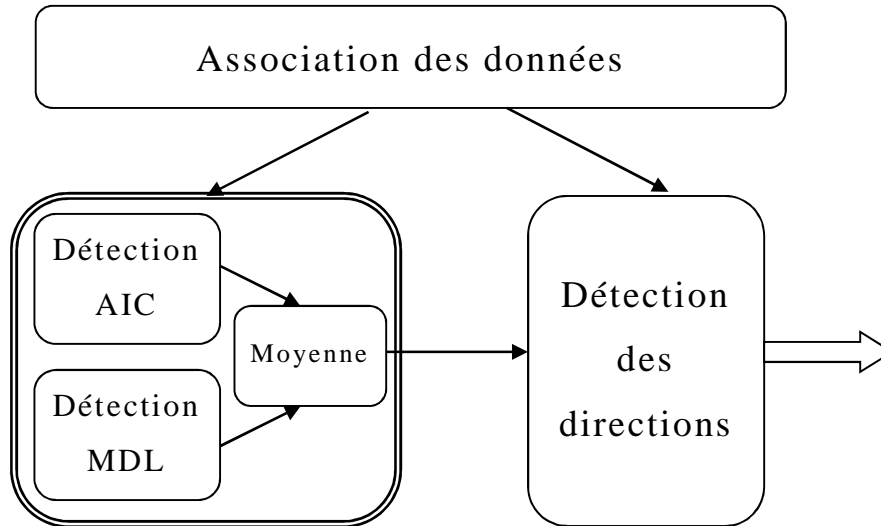


Figure-II-5- Détections des directions incidentes sur le réseau de capteurs en aval d'une estimation du nombre des signaux.

### III.1. Détection basée sur l'erreur quadratique moyenne

#### III.1.a. Présentation de la méthode

Classée parmi les techniques non paramétriques, cette méthode dite MVDR (*Minimum Variance Distortion Less Response*) ou bien CAPON [33-35,107-114], 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-II-6*, quelques résultats ont été publiés dans [114].

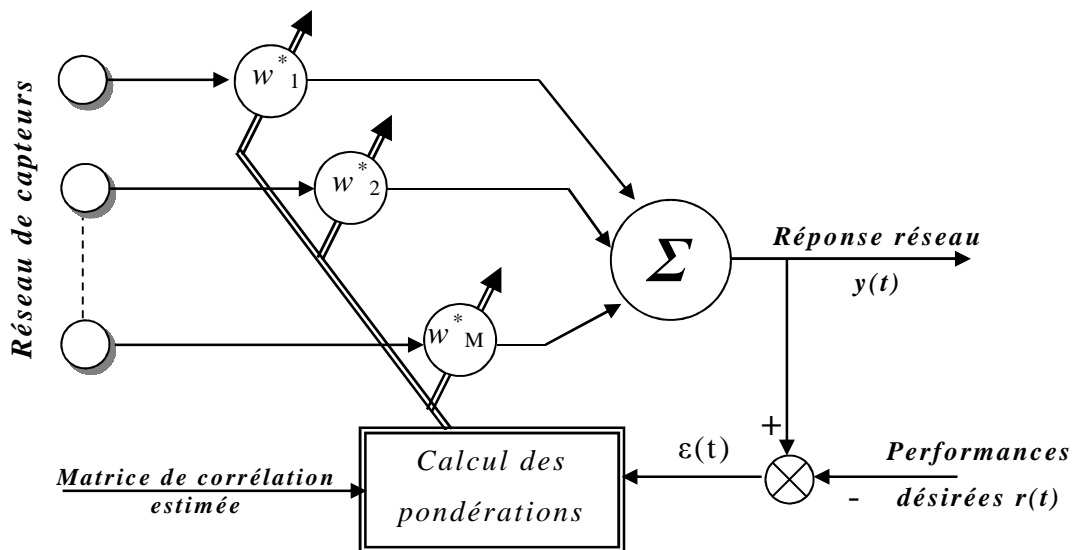


Figure-II-6- Schéma synoptique de l'algorithme de filtrage et de détection spatial implémenté.

Pour implémenter cette méthode, premièrement une erreur est estimée entre un signal de référence  $r(t)$  et la réponse du réseau  $y(t)$  données par (II-27). Cette erreur prend la forme (II-28).

$$y(t) = W^H X(t) \quad (II-27)$$

$$e(t) = r(t) - W^H X(t) \quad (II-28)$$

Avec  $w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_M] \in \mathbb{C}$  poids de pondération complexe, toute modification de ces coefficients engendre une nouvelle réponse du réseau de capteurs. Nous rappelons que chacun de ces coefficients est réalisé pratiquement par un déphaseur (voir §IV chapitre 1). L'espérance calculée sur l'erreur quadratique est donnée par (II-29).

$$E\{e(t)^2\} = E\{r(t)^2\} - 2 \times RE\{W^H rxd\} + W^H \hat{R} W \quad (II-29)$$

Où :  $\hat{R}$  désigne la matrice de corrélation estimée par (II-6) et

$$rxd = \begin{bmatrix} E\{x_1(t)r(t)\} \\ \vdots \\ E\{x_M(t)r(t)\} \end{bmatrix}.$$

Cette méthode consiste à choisir les valeurs du vecteur  $W$  qui vont minimiser la moyenne (II-29). La solution optimale est calculée par le résultat d'une minimisation analytique (II-30) [33-35,71,84,107-114].

$$W_{opt} = \hat{R}^{-1} rxd \quad (II-30)$$

Il est clair que la solution  $W_{opt}$  ainsi obtenue minimise la moyenne de la puissance de sortie du réseau calculée par (II-31)[33].

$$E\{|y(t)|^2\} = W^H \hat{R} W \quad (II-31)$$

Si nous supposons que le signal de référence est fortement corrélé avec les signaux mesurés, alors il est possible d'écrire (II-30) sous la forme (II-32).

$$W_{opt} = P_s \hat{R}^{-1} S(\mathbf{d}) \quad (II-32)$$

$S(\mathbf{d})$  est le vecteur d'espace associé avec le réseau de capteurs qui dépend des directions incidentes  $\mathbf{d}$  (voir figure-I-25) et  $P_s$  désigne la puissance des signaux

mesurés. En se basant sur les équations (II-29), (II-30) et (II-31), la pondération optimale peut être exprimée par (II-33).

$$W_{opt} = \frac{\hat{R}^{-1} S(\mathbf{d})}{S(\mathbf{d})^H \hat{R}^{-1} S(\mathbf{d})} \quad (II-33)$$

D'après (II-32) et (II-33), la puissance  $P_s$  des signaux mesurés s'écrit alors sous la forme (II-34).

$$P_s(\mathbf{d}) = \frac{1}{S(\mathbf{d})^H \hat{R}^{-1} S(\mathbf{d})} \quad (II-34)$$

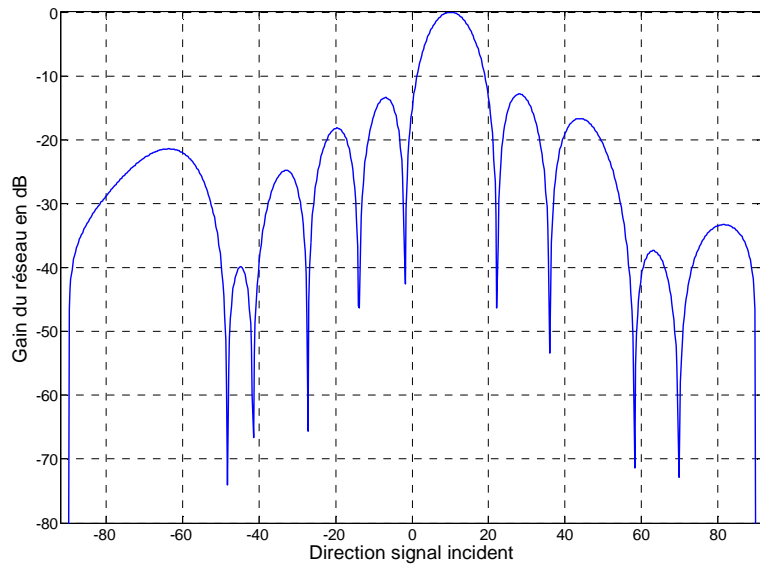
Les maxima de la puissance  $P_s$  permettront de détecter les directions des signaux incidents.

### III.1.b. Simulations et résultats

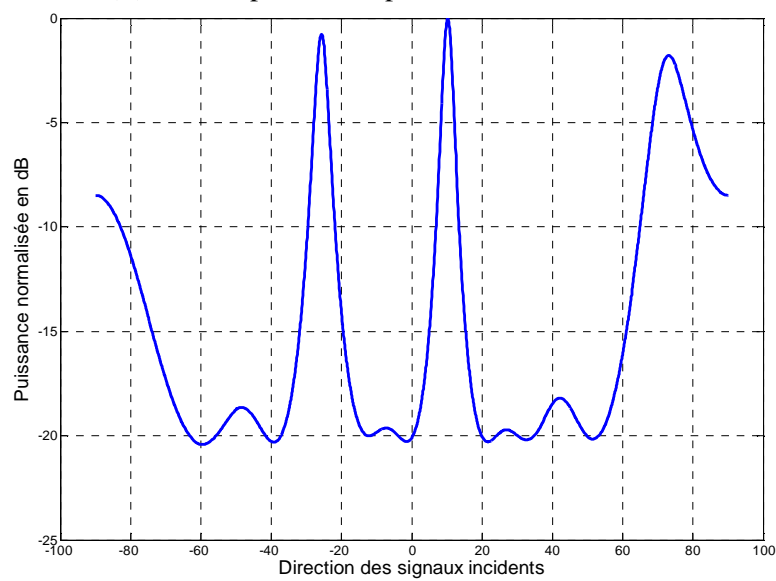
Il est clair que cette méthode basée sur l'erreur quadratique moyenne effectue une détection en même temps qu'un filtrage spatial. Nous allons l'appliquer sur quelques architectures de réseaux de capteurs pour analyser les performances.

✓ **Réseau rectiligne uniforme** : Commençons par appliquer ce procédé de détection sur un réseau rectiligne et régulier (*figure-II-2*) comportant 10 capteurs élémentaires. Les sources ont été placées sur les directions  $-25^\circ$ ,  $10^\circ$  et  $70^\circ$ . la directivité obtenue est schématisée sur la *figure-II-7*, nous avons supposé la source avec la direction  $10^\circ$  comme étant la source d'intérêt.

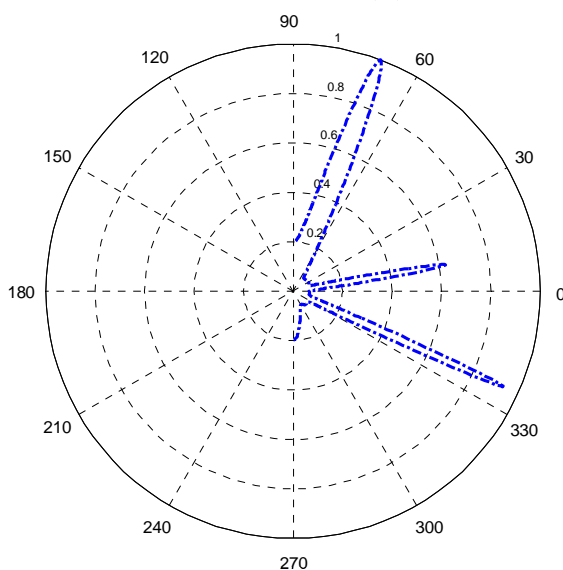
Les résultats représentés sur la *figure-II-7* montrent des niveaux variant entre  $-70\text{dB}$  et  $-80\text{dB}$  pour les directions supposées. Le nombre des sources détectées est égal à trois. La représentation polaire de la *figure-II-7-c* témoigne d'une bonne détection des directions associées avec les trois signaux. Les résultats de notre implémentation sont similaires à ceux obtenus par K.Kim [107] représentés sur la *figure-II-7-d*.



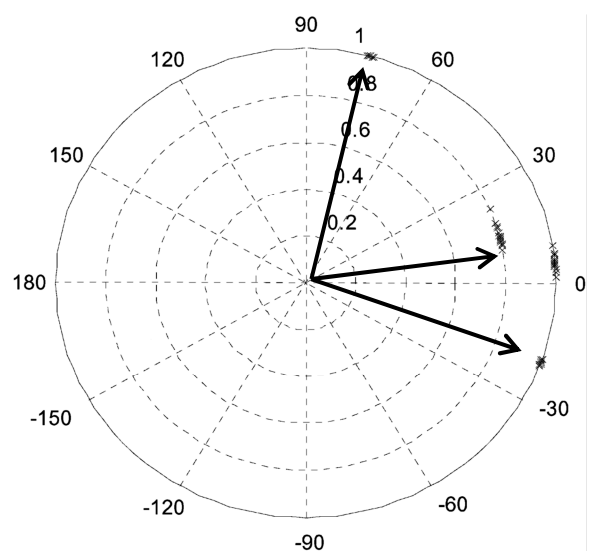
(a) Gain spatiale représentation normale



(b) Directions détectées



(c) Directions détectées en représentation polaire

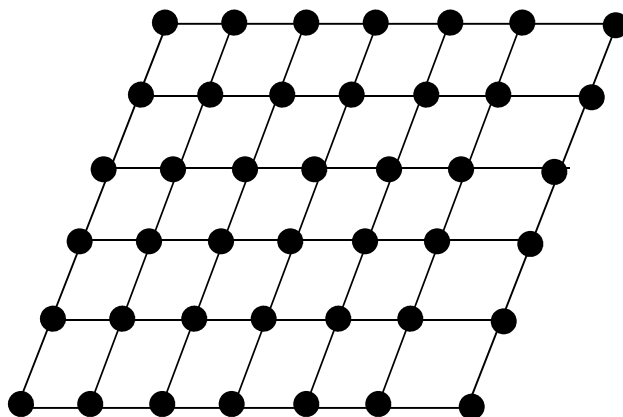


(d) Détection obtenue par K.Kim [107]

Figure-II-7- Détection MSE effectuée sur un réseau linéaire et régulier de 10 capteurs. Les sources sont supposées aux directions :  $-25^\circ$ ,  $10^\circ$  et  $70^\circ$



- ✓ Réseau plan : nous allons à présent appliquer cette méthode sur un réseau plan régulier schématisé par la *figure-II-8*. 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-II-9*.

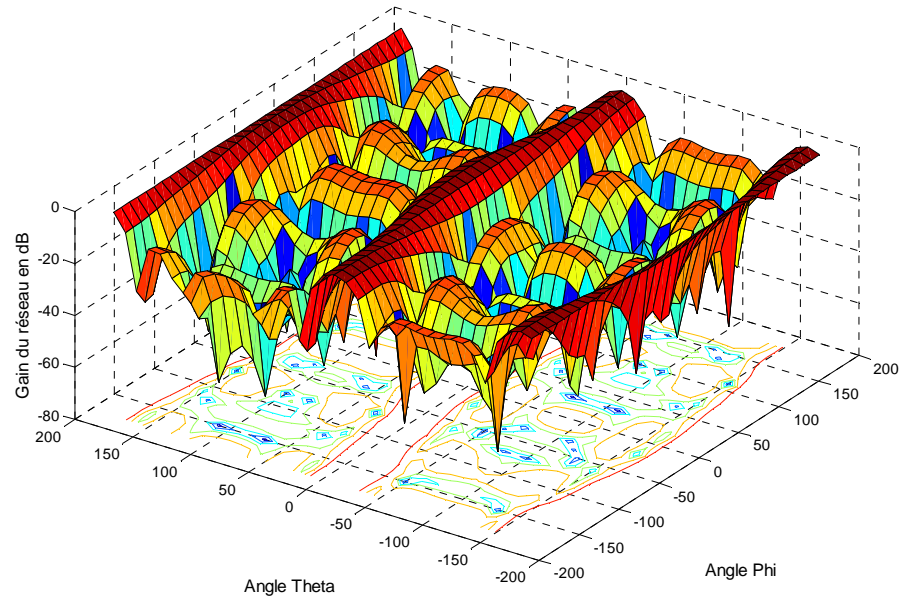


*Figure-II-8- Réseau plan de capteurs.*

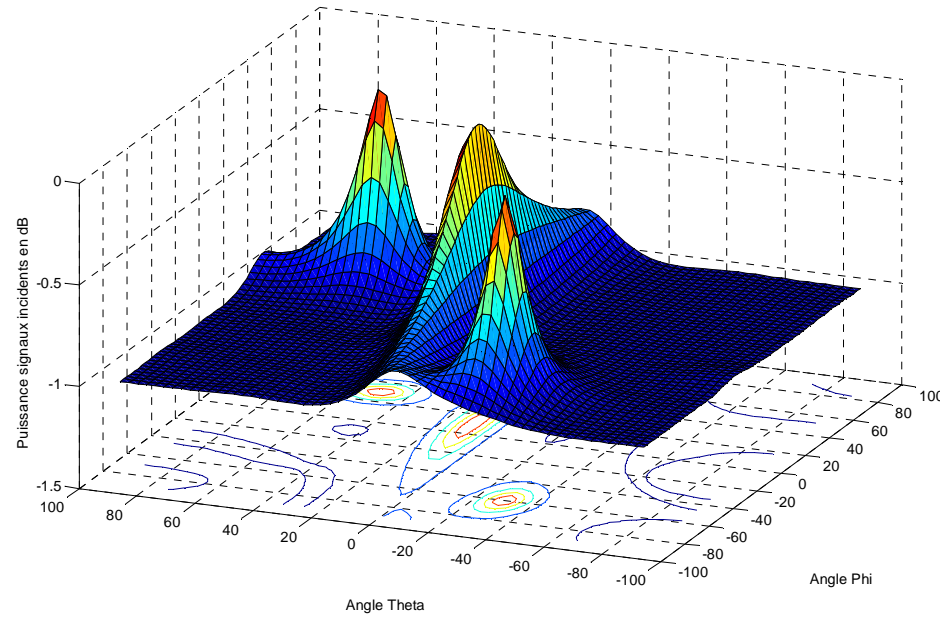
Les résultats obtenus sur la *figure-II-9* montrent des niveaux entre  $-40\text{dB}$  et  $-60\text{dB}$  pour les directions des sources détectées. D'après les diagrammes du gain spatial du réseau, il apparaît clairement que la représentation spatiale et la représentation en courbe de niveaux de la puissance de sortie du réseau permet d'identifier trois sources autour des directions données.

Un second cas d'étude est présenté pour une comparaison avec les résultats de Nikolaos [108] sur une méthode de détection similaire. Cette fois-ci, le réseau plan et régulier est composé de  $10 \times 10$  capteurs avec une seule source simulée à  $(30^\circ, 45^\circ)$ . Les résultats que nous avons obtenus sont représentés par la *figure-II-10*, restent similaires (presque identiques) à ceux obtenus dans les mêmes conditions par Nikolaos [108].

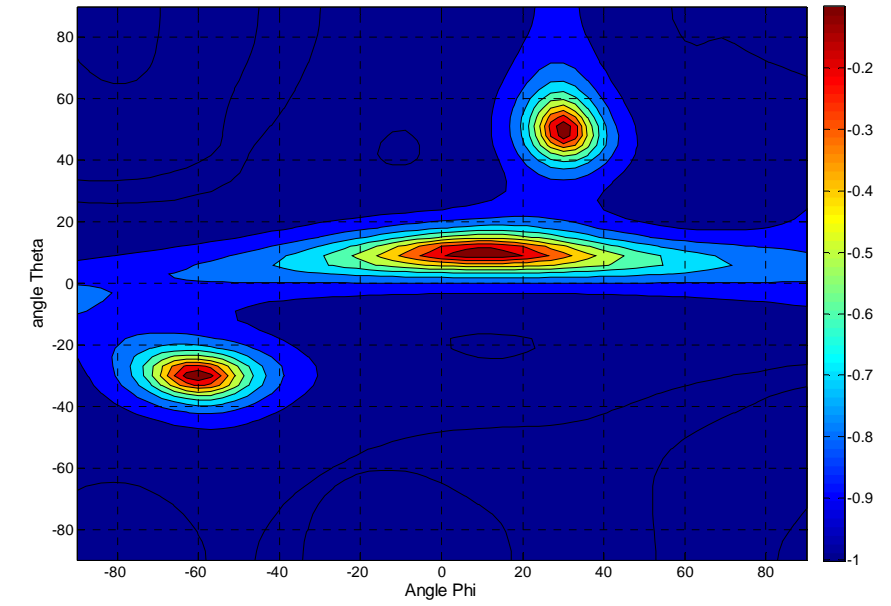
En analysant ces résultats, il apparaît clairement que cette méthode de détection des directions incidentes est efficace. Seulement, elle ne permet d'avoir que des résolutions de mauvaise précision. De plus, si les sources sont corrélées entre elles alors elle devient quasiment inexploitable.



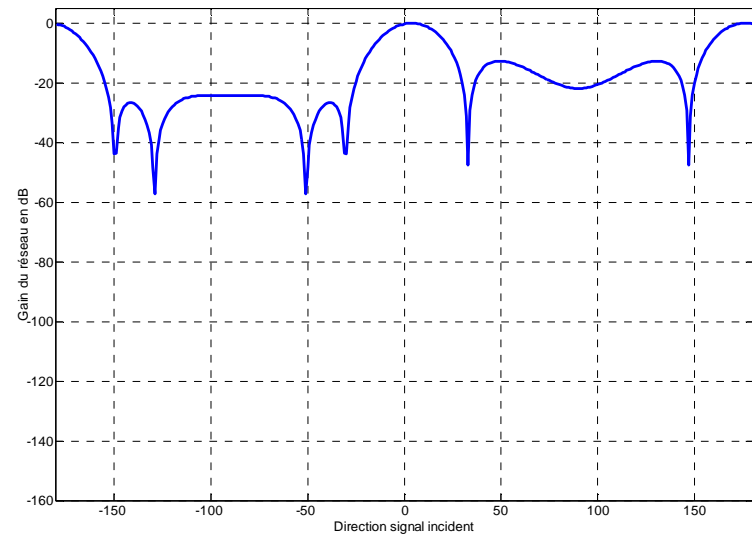
a-Gain spatial du réseau



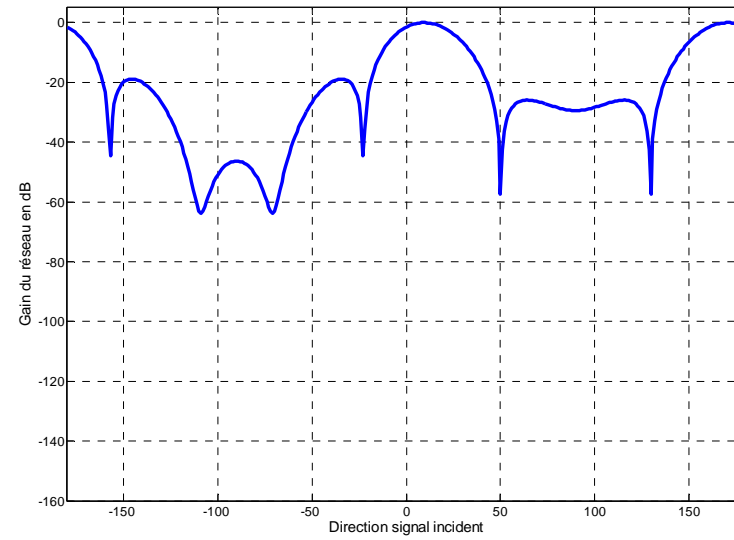
b-Représentation spatiale des directions détectées.



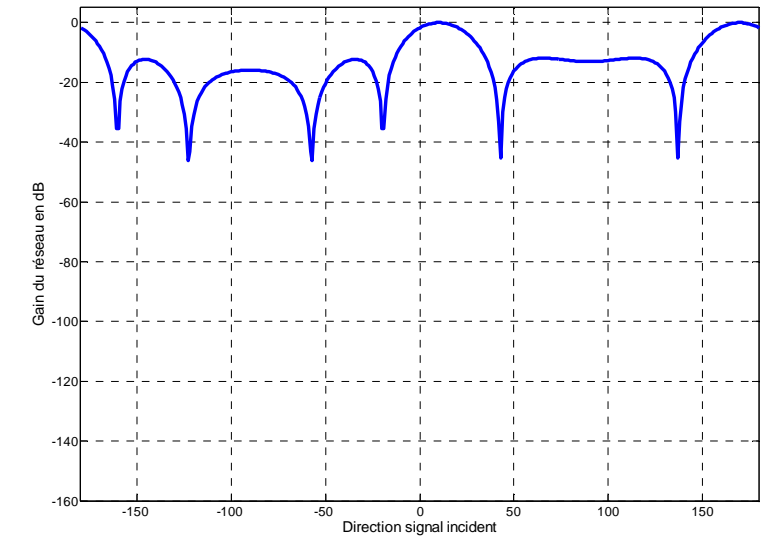
c-Représentation par des courbes iso-niveaux des directions détectées.



d-Projection du gain pour  $\Phi = -60^\circ$ .

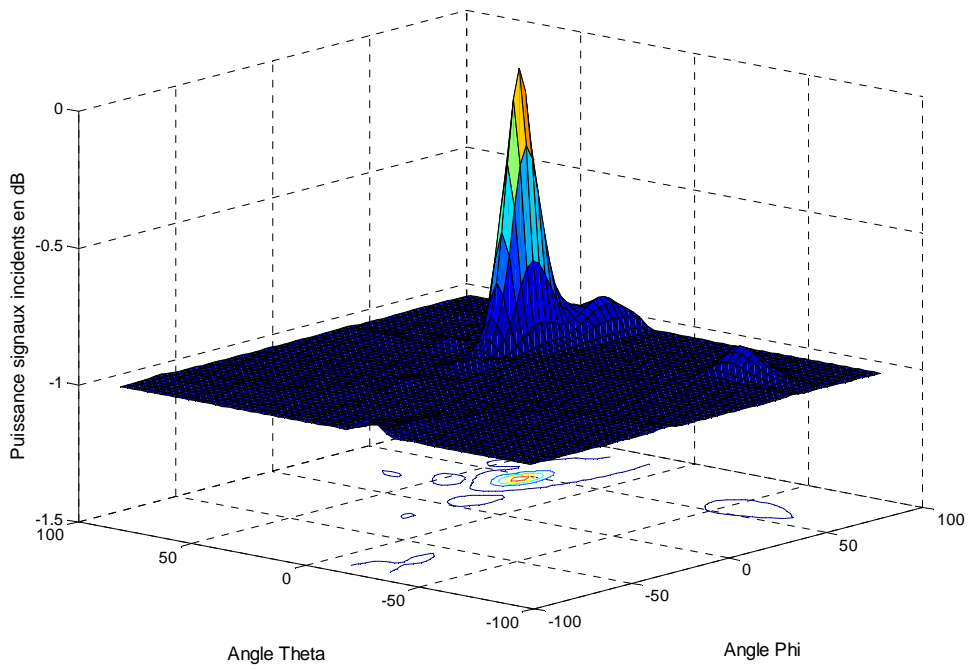


e-Projection du gain pour  $\Phi = 30^\circ$ .

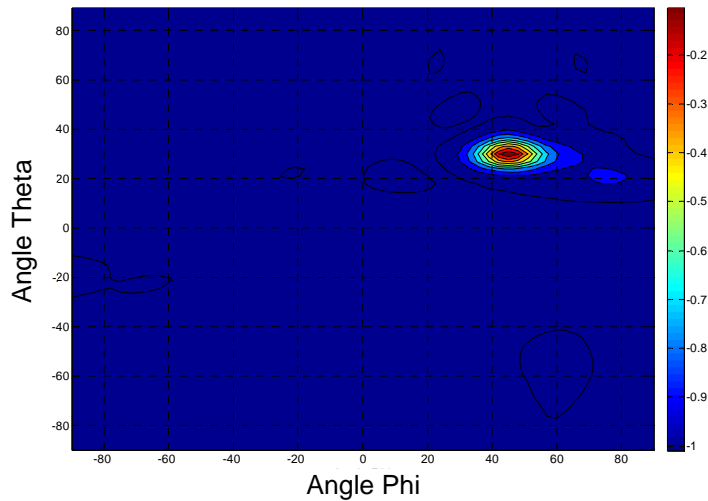


f-Projection du gain pour  $\Phi = 10^\circ$ .

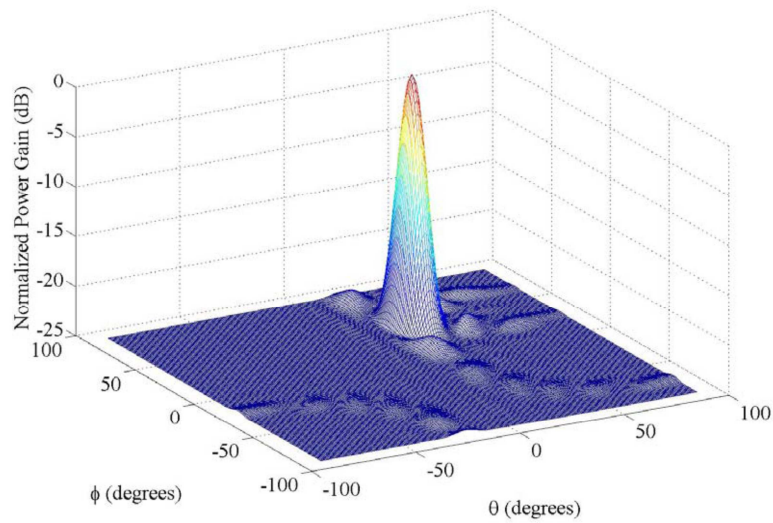
Figure-II-9- Détection MSE effectuée sur un réseau plan et régulier de 16 capteurs. Sources aux directions :  $(-30^\circ, -60^\circ)$ ,  $(50^\circ, 30^\circ)$  et  $(10^\circ, 10^\circ)$ .



*a- Représentation spatiale de la direction détectée.*



*b- Représentation via des courbes iso-niveaux de la direction détectée.*



*c- Résultat obtenu par Nikolaos [108]*

*Figure-II-9- Détection MSE effectuée sur un réseau plan et régulier à 10x10 capteurs, avec une seule source de direction : (30°, 45°) [108].*

### III.2. Méthode de détection MUSIC

#### **III.2.a. Présentation de la méthode :**

Cette méthode dite Multiple Signal Classification Algorithm (MUSIC), est classée parmi les techniques de détection super-résolution [115-121]. L'algorithme MUSIC se base sur les valeurs propres de la matrice de corrélation  $\hat{R}$  pour réduire la complexité des calculs. Notre implémentation de cet algorithme est réalisée en respectant les étapes suivantes :

- ✓ Calculer les vecteurs et valeurs propre de la matrice de corrélation  $\hat{R}$ .
- ✓ Les plus petites valeurs propres sont supposées représenter la puissance du bruit et possèdent une multiplicité de  $N=M-L$ . évidemment  $L$  : le nombre des signaux incidents sur le réseau, est obtenu à partir d'une détection du nombre de sources ( $M$  est le nombre des capteurs).
- ✓ Grouper les vecteurs propres associés avec les petites valeurs propres dans un sous espace vectoriel dit sous espace des bruits de base (II-35).

$$E = [e_{L+1} \quad e_{L+2} \quad \dots \quad e_M] \quad (II-35)$$

- ✓ Effectuer une orthogonalisation entre les vecteurs d'espace et le sous espace des bruits, ce qui permet d'écrire le critère MUSIC par (II-36).

$$C_{Music} = \frac{S(\mathbf{d})^H S(\mathbf{d})}{\sum_{i=L+1}^M [S(\mathbf{d})^H e_i]^2} \quad (II-36)$$

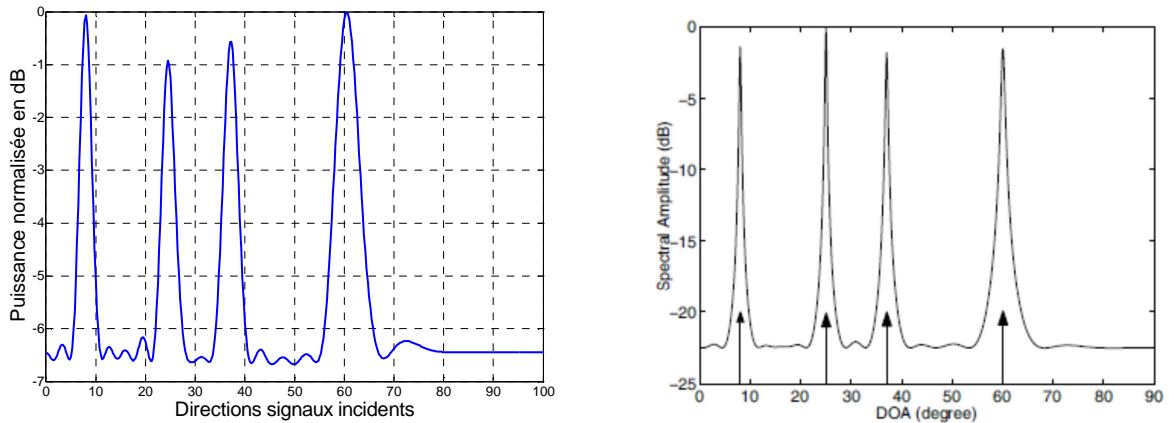
Les maximas du critère  $C_{Music}$  permettent de déterminer les directions des différents signaux mesurés.

#### **III.2.b. Simulations et résultats**

L'algorithme de la méthode MUSIC est plus évolué que celui basé sur l'erreur quadratique moyenne. Nous allons tester cet algorithme sur des réseaux linéaires uniformes et cylindrique pour étudier ses performances.

- ✓ **Réseau rectiligne uniforme** : en premier, cette procédure sera appliquée sur un réseau rectiligne et régulier (*figure-II-2*) comportant 32 capteurs élémentaires. Les sources ont été simulées sur les directions  $8^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $37^\circ$  et  $60^\circ$ . La détection obtenue par notre implémentation de l'algorithme MUSIC comparée aux résultats obtenus par : Yanbo Xue, Jinkuan Wang, Zhigang Liu [115], sont

représentés sur la *figure-II-10*. Il apparaît clairement une similitude entre les deux résultats du point de vue performance de détection.



a- Direction détectées par notre implémentation générique de l'algorithme MUSIC.

b- Détection MUSIC obtenu par : Yanbo Xue, Jinkuan Wang, Zhigang Liu [115].

Figure-II-10- Détection MUSIC effectuée sur un réseau rectiligne et régulier de 32 capteurs, avec 4 sources de direction :  $(8^\circ, 25^\circ, 37^\circ, 60^\circ)$  [115].

✓ Réseau cylindrique : nous allons appliquer maintenant cette méthode sur deux réseaux cylindriques réguliers dont la structure est représentée par la *figure-II-11*. Le premier cas est basé sur un réseau cylindrique de 20 éléments : 4 niveaux circulaires de 5 capteurs chacun. 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  $(80^\circ, 110^\circ)$ . Les résultats de cette détection comparés aux résultats de Jian-Wu Tao, Wen-Xiu Chang [116] sont représentées par la *figure-II-12*. Dans ce cas les résultats de notre implémentation sont meilleurs que ceux de Jian-Wu Tao, Wen-Xiu [116].

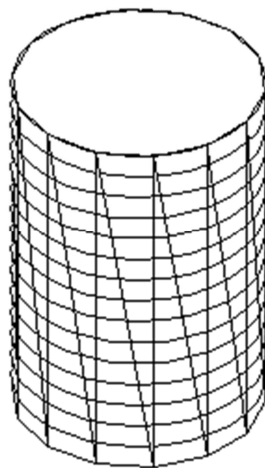
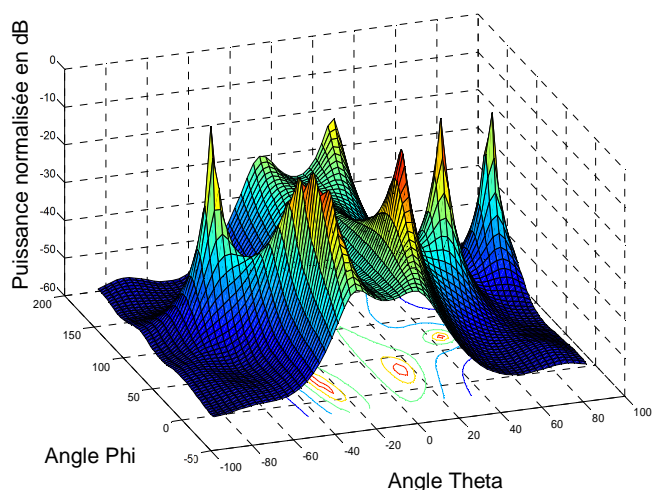
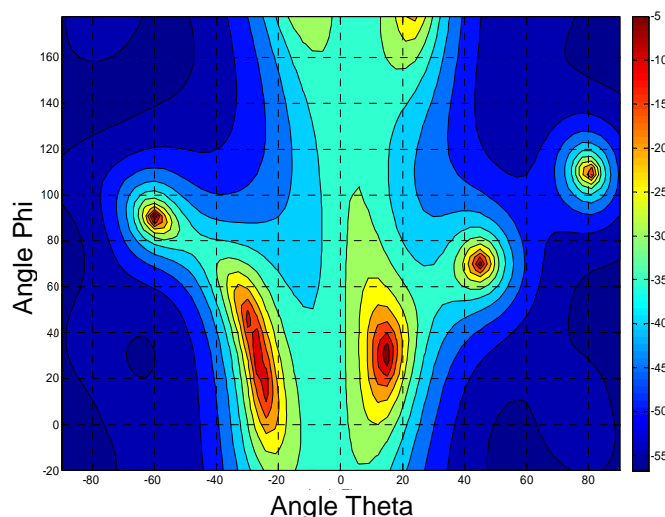


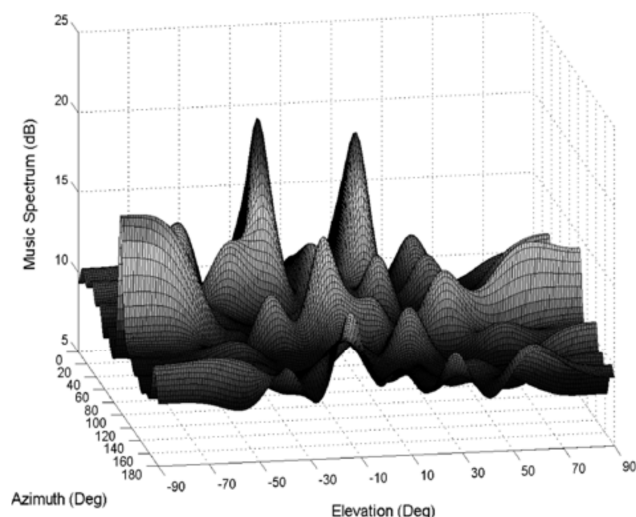
Figure-II-11- Configuration cylindrique pour un réseau de capteurs.



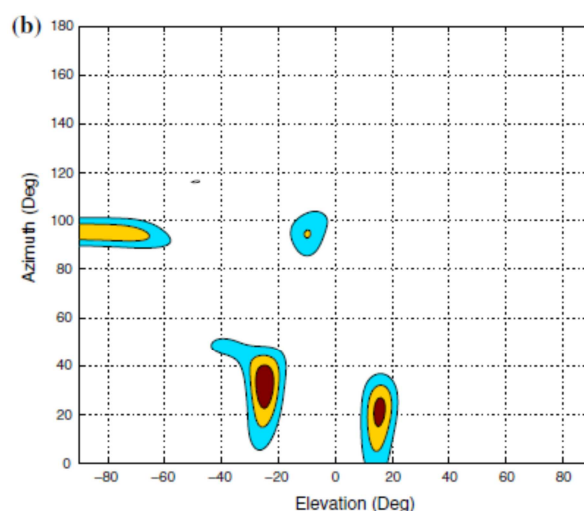
*a- Représentation spatiale des directions détectées.*



*b- Représentation via des courbes iso-niveaux des directions détectées.*



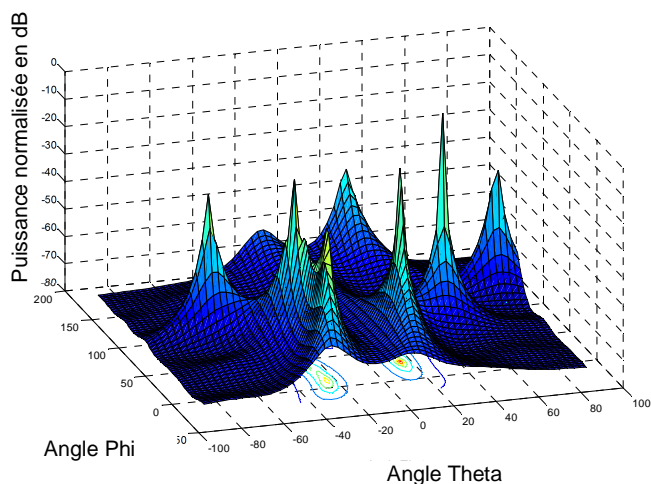
*c- Représentation spatiale des directions détectées par la méthode de Jian-Wu Tao, Wen-Xiu [116].*



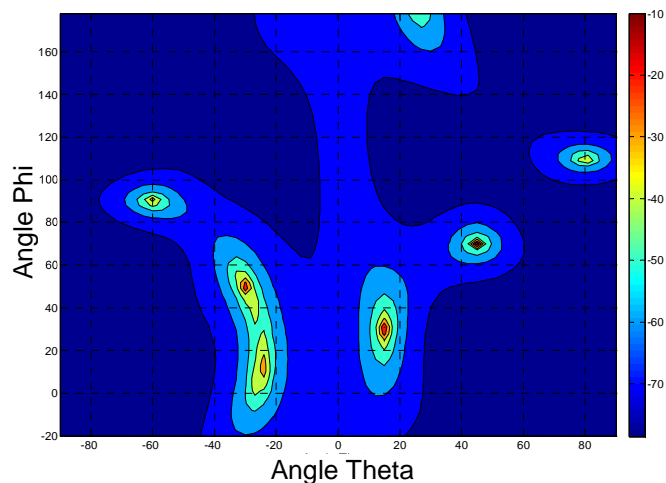
*d- Représentation via des courbes iso-niveaux des directions détectées par la méthode de Jian-Wu Tao, Wen-Xiu [116].*

*Figure-II-12- Détection MUSIC effectuée sur un réseau cylindrique de 20 capteurs : 4 niveaux circulaires de 5 capteurs chacun. Sources simulées suivant les directions :  $(-25^\circ, 10^\circ)$ ,  $(15^\circ, 30^\circ)$ ,  $(-30^\circ, 50^\circ)$ ,  $(45^\circ, 70^\circ)$ ,  $(-60^\circ, 90^\circ)$  et  $(80^\circ, 110^\circ)$  [116].*

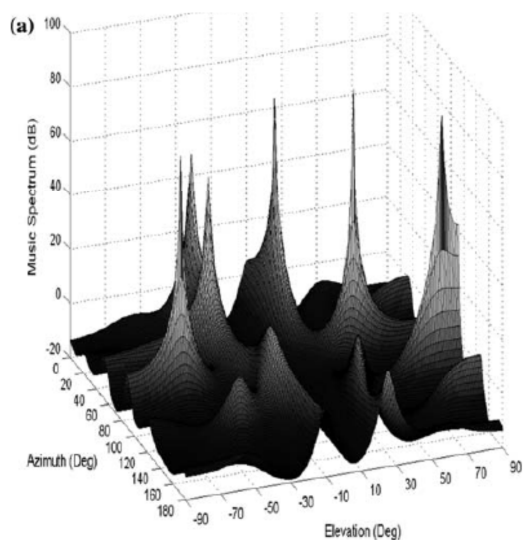
Le second cas est basé sur un réseau cylindrique de 27 éléments : 3 niveaux circulaires de 9 capteurs chacun. Six sources ont été simulées selon les directions  $(-25^\circ, 10^\circ)$ ,  $(15^\circ, 30^\circ)$ ,  $(-30^\circ, 50^\circ)$ ,  $(45^\circ, 70^\circ)$ ,  $(-60^\circ, 90^\circ)$  et  $(80^\circ, 110^\circ)$ . Les résultats de cette détection comparés aux résultats de Jian-Wu Tao, Wen-Xiu Chang [116] sont représentées par la *figure-II-13*. Dans ce cas, du point de vue performances, les résultats de notre implémentation sont identiques à ceux de Jian-Wu Tao, Wen-Xiu [116].



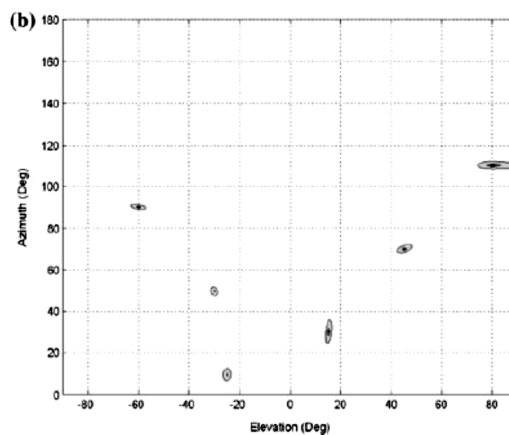
*a- Représentation spatiale des directions détectées.*



*b- Représentation via des courbes iso-niveaux des directions détectées.*



*c- Représentation spatiale des directions détectées par la méthode de Jian-Wu Tao, Wen-Xiu [116].*



*d- Représentation via des courbes de niveaux des directions détectées par la méthode de Jian-Wu Tao, Wen-Xiu [116].*

*Figure-II-13- Détection MUSIC effectuée sur un réseau cylindrique de 27 capteurs : 3 niveaux circulaires de 9 capteurs chacun. Sources simulées suivant les directions :  $(-25^\circ, 10^\circ)$ ,  $(15^\circ, 30^\circ)$ ,  $(-30^\circ, 50^\circ)$ ,  $(45^\circ, 70^\circ)$ ,  $(-60^\circ, 90^\circ)$  et  $(80^\circ, 110^\circ)$  [116].*

### III.3. Méthode ESPRIT

#### III.3.a. Présentation de la méthode

La méthode ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) permet d'éviter la calibration et la recherche, nécessaires avec la méthode MUSIC [115-127]. En effet, la méthode MUSIC n'est fonctionnelle que si le rang de la matrice  $(R - R_{GWN})$  est de rang L, ce qui permet

d'avoir des avantages en rapidité de détection. Seulement, cette condition n'est pas vérifiée dans tous les cas de figure où les réseaux de capteurs sont utilisés [115-127]. L'algorithme ESPRIT permet de remédier à ce problème en exploitant l'invariance rotationnelle de la matrice de corrélation  $R$  [117-127].

Soit un réseau de  $M$  capteurs. Les mesures peuvent être scindées en deux sous-groupes de capteurs de dimension  $M$ , selon la forme (II-37).

$$\begin{cases} X_a(t) = [x_1(t) \quad \dots \quad x_M(t)] \\ X_b(t) = [x_2(t) \quad \dots \quad x_M(t) \quad x_1(t)] \end{cases} \quad (II-37)$$

Qui peuvent être exprimées par (II-38).

$$\begin{cases} X_a(t) = A S(t) + \eta_a(t) \\ X_b(t) = A \phi S(t) + \eta_b(t) \end{cases} \quad (II-38)$$

Sachant que  $\phi$ , est une matrice diagonale qui prend la forme (II-39).

$$\phi = \begin{bmatrix} e^{d_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{d_2} & \dots & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & e^{d_L} \end{bmatrix} \quad (II-39)$$

Les deux réponses (II-37) et (II-38) peuvent être regroupées en un seul vecteur  $X(t)$  par (II-40).

$$X(t) = \begin{bmatrix} X_a(t) \\ X_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A \phi \end{bmatrix} S(t) + \begin{bmatrix} \eta_a(t) \\ \eta_b(t) \end{bmatrix} \quad (II-40)$$

Qui se ramène à une réponse généralisée d'un réseau de capteur unique (II-41).

$$X(t) = B S(t) + \eta(t) \quad (II-41)$$

Le principe de la méthode ESPRIT consiste à estimer les éléments de la matrice  $\phi$  qui contiennent les informations sur les directions incidentes sans avoir à reconstruire la matrice  $B$ . Il est évident que les matrices de corrélations sont calculées à partir de (II-40) par (II-42).

$$\begin{cases} R_a = E\{X_a(t) X_a(t)^H\} = A S A^H + A \sigma^2 I A^H \\ R_b = E\{X_b(t) X_b(t)^H\} = A \phi S \phi^H A^H + A \phi \sigma^2 I \phi^H A^H \end{cases} \quad (II-42)$$

À partir de (II-41) la matrice de corrélation est obtenue par (II-43).



$$R = B (S + \sigma^2 \Omega) B^H \quad (II-43)$$

$\Omega$  est une matrice qui prend la forme (II-44).

$$\Omega = \begin{bmatrix} I & Q_{-1} \\ Q_{+1} & I \end{bmatrix} \quad (II-44)$$

Avec  $Q_{-1}$  une matrice triangulaire unitaire inférieure et  $Q_{+1}$  une matrice triangulaire unitaire supérieure. Avec ces considérations il y a «  $2M-L$  » valeurs propres égale à la puissance des bruits «  $\sigma^2$  ». Nous rappelons que ce modèle est obtenu à partir des mesures décalées d'un seul réseau de  $M$  capteurs. Par conséquent, il existe une matrice unique  $\psi$  qui permet de transformer le sous espace des signaux  $E_a$  (déterminé par les vecteurs propres) en sous espace  $E_b$  (II-45) [105,106].

$$E_a \psi = E_b \quad (II-45)$$

De même une seule transformation «  $T$  » non singulière existe, qui permet d'avoir le sous espace des signaux à partir des matrices manifolde du réseau (II-46).

$$E_s = B T = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A T \\ A \phi T \end{bmatrix} \quad (II-46)$$

A partir de (II-45) et (II-46) il possible d'écrire (II-47).

$$T \psi T^{-1} = \phi \quad (II-47)$$

Il s'agit alors d'un simple problème algébrique de décomposition matricielle. L'estimation de la matrice  $\psi$  permet d'avoir les informations nécessaires pour détecter les directions des signaux incidents sur le réseau de capteurs. Pour cela il suffit de suivre les étapes suivantes, que nous avons élaborées pour l'algorithme ESPRIT :

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 (II-48). Effectuer par la suite une décomposition en valeurs et vecteurs propres de cette matrice pour former l'espace  $E_c$ .

$$C = \begin{bmatrix} E_a^H \\ E_b^H \end{bmatrix} [E_a \quad E_b] \quad (II-48)$$

6. Décomposer l'espace  $E_c$  suivant le modèle (II-49).

$$E_c = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \quad (II-49)$$

7. La matrice  $\psi$  est alors estimée par (II-50).

$$\psi = -E_{12}E_{21} \quad (II-50)$$

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

### III.3.b. Simulations et résultats

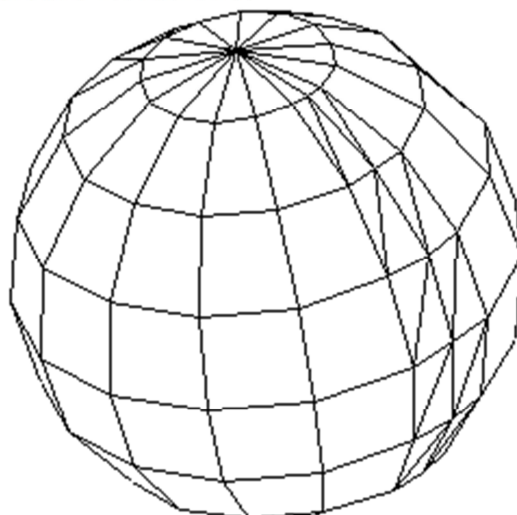
Il est clair que l'algorithme ESPRIT permet d'obtenir directement les directions des sources de l'environnement et par conséquent est plus fiable que la méthode MUSIC. A présent, nous allons étudier ses performances en exploitant cet algorithme de détection des directions incidentes sur des réseaux linéaire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

- ✓ **Réseau rectiligne uniforme** : Cette procédure est appliquée sur un réseau rectiligne et régulier (*figure-II-2*) comportant 3 capteurs élémentaires. Les sources ont été simulées sur les quatre directions  $-43^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $-40^\circ$  et  $30^\circ$ . La détection obtenue par notre implémentation de l'algorithme ESPRIT est fournie dans le *Tableau-II-1*. Sur ce même Tableau nous allons fournir les résultats obtenus par Yung-Yi Wang, Jiunn-Tsair Chen et Wen-Hsien Fang dans [122, pp123-141]. Il apparait clairement que les résultats obtenus avec la méthode ESPRIT, ne comportent qu'un faible décalage par rapport aux valeurs imposées pour les directions.

<i>directions simulées</i>	<i>Directions détectées</i>	<i>Directions détectées par Yung-Yi Wang, Jiunn-Tsair Chen et Wen-Hsien Fang [122]</i>
-43	-43.1270	-41±3
27	27.0000	28±4
-40	-39.6184	-41±3
30	29.2048	28±4

*Tableau-II-1 : résultat d'une détection ESPRIT sur un réseau linéaire de 3 capteurs.*

✓ **Réseau sphérique** : Cette méthode est appliquée sur un réseau sphérique régulier schématisé par la *figure-II-14* 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-II-2*, alors que la *figure-II-15* représente l'évolution sur plusieurs itérations.



*Figure-II-14- 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-II-2 : résultat d'une détection ESPRIT sur un réseau sphérique de 36 capteurs.*

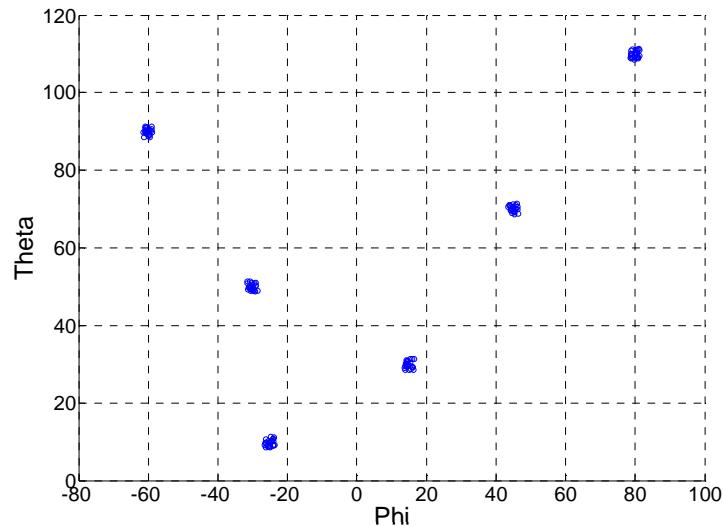


Figure-II-15- Détection MUSIC effectuée sur un réseau sphérique de 36 capteurs.

Sources simulées suivants les directions :  
 (-25°,10°), (15°,30°), (-30°,50°),  
 (45°,70°), (-60°,90°) et (80°,110°).

✓ Architecture spéciale : Nous allons comparer notre implémentation de la méthode ESPRIT avec celle réalisée par XIA TieQi, WAN Qun, WANG XueGang et ZHENG Yi [123]. La structure du réseau de capteurs utilisée, est représentée par *figure-II-16*. le *tableau-II-3* expose un échantillon des résultats obtenus et comparés. Les *figures -II-17et 18*, représentent les détections effectuées par des exécutions continues de notre implémentation d'ESPRIT. Il apparait clairement, que nos résultats sont pour le premier cas meilleurs et pour le second cas similaires à ceux présentés dans [123].

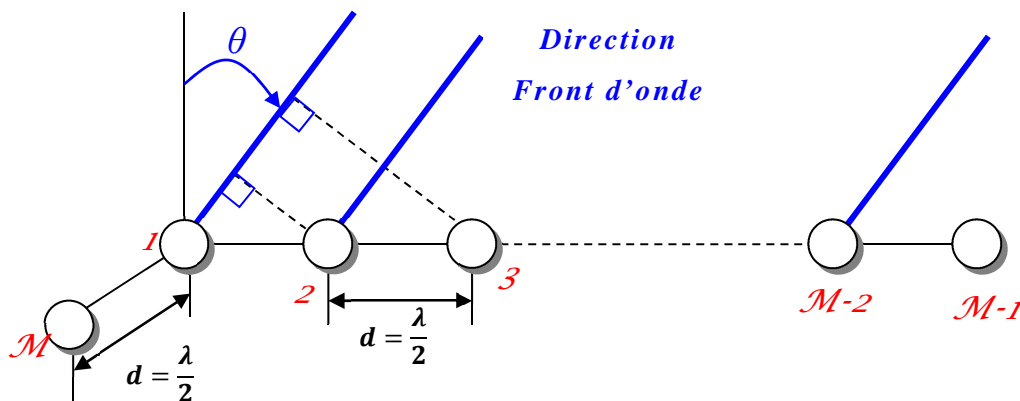
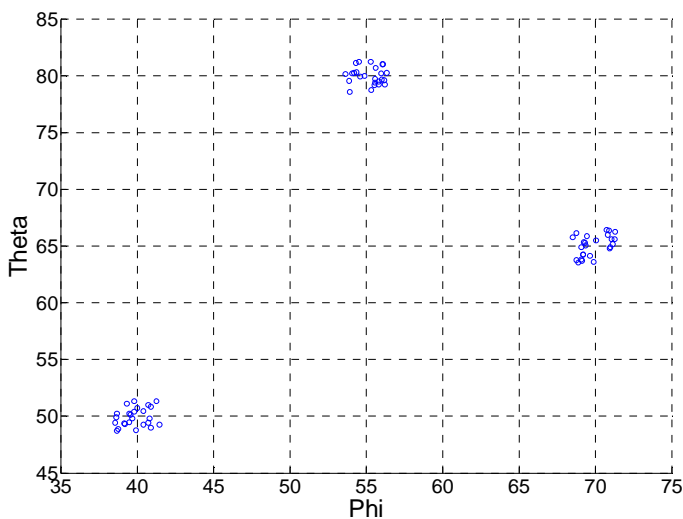


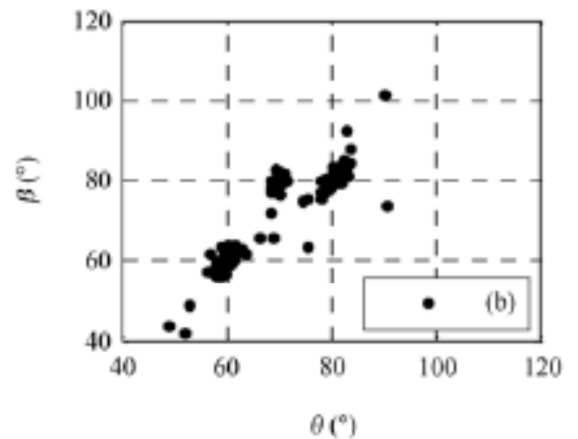
Figure-II-16- Réseau linéaire deux dimensions.

<i>directions simulées</i>	<i>Directions détectées</i>	<i>Directions détectées par XIA TieQi, WAN Qun, WANG XueGang et ZHENG Yi [123]</i>
<i>Cas d'un réseau M=6</i>		
40 ; 50	39.6186 ; 49.6347	-
55 ; 80	54.4750 ; 80.3766	58 ; 82
70 ; 65	69.2901 ; 66.2462	60 ; 60
<i>Cas d'un réseau M=4</i>		
59 ; 59	58.1754 ; 58.5712	59 ; 59
70 ; 80	68.8694 ; 80.8517	70 ; 80
80 ; 80	80.0809 ; 78.8312	80 ; 80

Tableau-II-3 : Résultats comparaison avec [123].

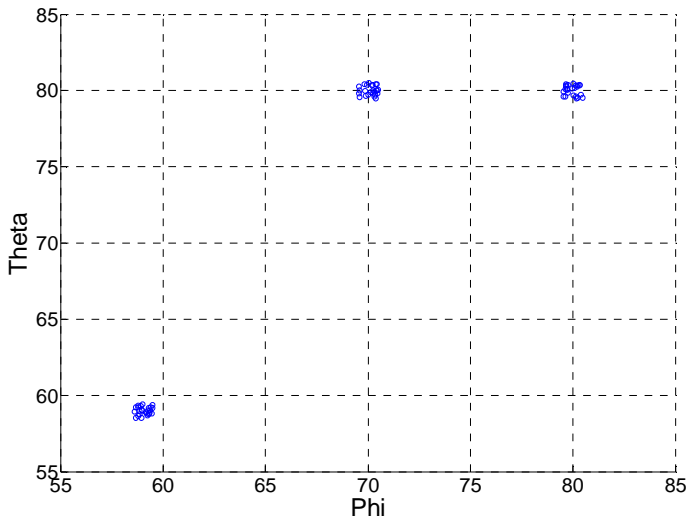


a- Résultats de notre implémentation de la méthode ESPRIT.

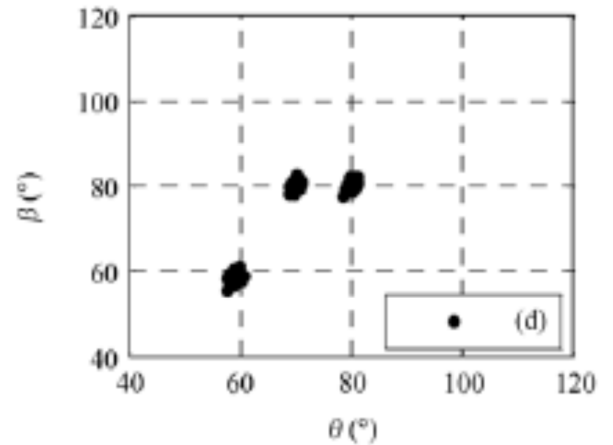


b- Résultats de XIA TieQi, WAN Qun, WANG XueGang et ZHENG Yi [123]

Figure-II-17- Confrontation avec [123] pour les directions : (40,50) ; (55,80) et (70,65)



a- Résultats de notre implémentation  
de la méthode ESPRIT.



b- Résultats de XIA TieQi,  
WAN Qun, WANG XueGang  
et ZHENG Yi [123]

Figure-II-18- Confrontation avec [123] pour les directions :  
(59,59) ; (70,80) et (80,80)

En analysant les différents résultats de détection obtenus, nous avons remarqué que ceux de la méthode ESPRIT sont directes et plus précis. C'est la raison pour laquelle nous avons adopté cet algorithme (ESPRIT) pour l'intégrer au niveau du système multiagents que nous allons développer au chapitre 4.

#### **IV. Conclusion :**

Obtenir des informations sur les sources et les signaux de l'environnement est une opération relativement délicate à mettre en œuvre, particulièrement avec les effets du milieu de propagation. Notre intention dans cette phase des travaux réalisés, vise à fournir les principes des techniques de détection en expliquant clairement les intérêts qui se présentent comme une étape critique pour l'amélioration du fonctionnement des réseaux de capteurs avec les problèmes de conflits imposés par les canaux de transmission. Nous avons bien exposé que la solution du problème de détection dépend statistiquement des signaux mesurés. Des signaux qui peuvent apparaître et disparaître, voir changer de directions dans le temps. Il devient alors utile, de détecter continuellement et avec intelligence, ces permanentes modifications des paramètres des signaux à écouter. Une solution multiagents est une alternative fort-intéressante.

# *Chapitre III*

## *Notions sur les systèmes multiagents*

## **I. Introduction**

Les systèmes multiagents sont actuellement considérés comme l'un des paradigmes les plus importants amenés à améliorer voire révolutionner les techniques actuelles de conception, d'études, création et implémentation voir même faciliter les problèmes d'intégration [128-135]. Les systèmes multiagents sont actuellement vus comme un outil émergeant et les mécanismes nécessaires pour leurs exploitations ne sont pas complètement définis [128-135]. En effet, ces systèmes ont été proposés pour la première fois en 1980 alors que leur utilisation en technologie n'a commencé qu'au milieu des années 90 [128-131]. Il nous est possible d'affirmer que la technologie des systèmes multiagents fait l'objet de discussions et investigations considérables ces dernières années, avec des applications commerciales et industrielles variées [130]. Notre but dans ce chapitre consiste à décrire une sélection de méthodes de modélisation avec des détails sur l'interaction et le comportement des agents au sein du système. Ces notions vont nous servir à proposer un système multiagents pour une détection coopérative avec les réseaux de capteurs.

## **II. Principes des agents**

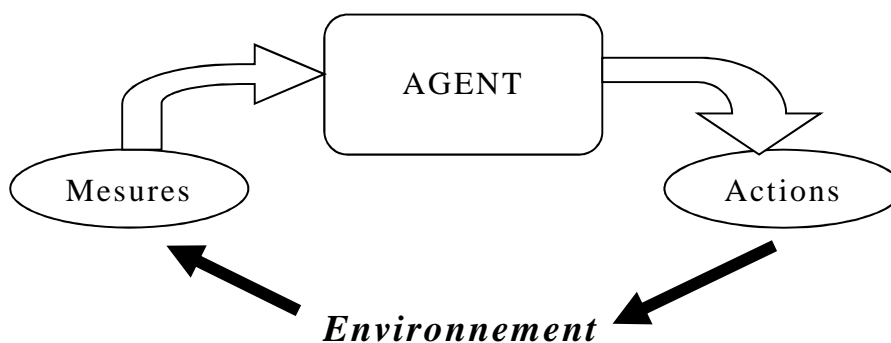
Le terme agent est rencontré dans plusieurs techniques : intelligence artificielle, base de données, systèmes d'exploitation et réseaux de télécommunications, avec d'innombrables définitions [141]. Néanmoins, toutes les définitions tombent en commun accord qu'un agent est essentiellement un système informatique spécifique possédant : une autonomie, un comportement proactif et un mécanisme de communications [128-135] :

- ✓ L'autonomie : permet à un agent de résoudre, tantôt avec des exécutions à long termes, des tâches complexes. Sans l'intervention d'un humain et possède le contrôle de ces actions et états internes.
- ✓ Comportement proactive : permet à un agent de prendre des initiatives et décisions pour effectuer une tâche sans stimuli explicite d'un utilisateur. Répondre par conséquent à des instants opportuns aux modifications de l'environnement.
- ✓ Mécanisme de communications : permet à un agent d'interagir avec d'autres entités pour une demande d'assistance ou émission d'informations dans le cadre d'objectifs globaux.



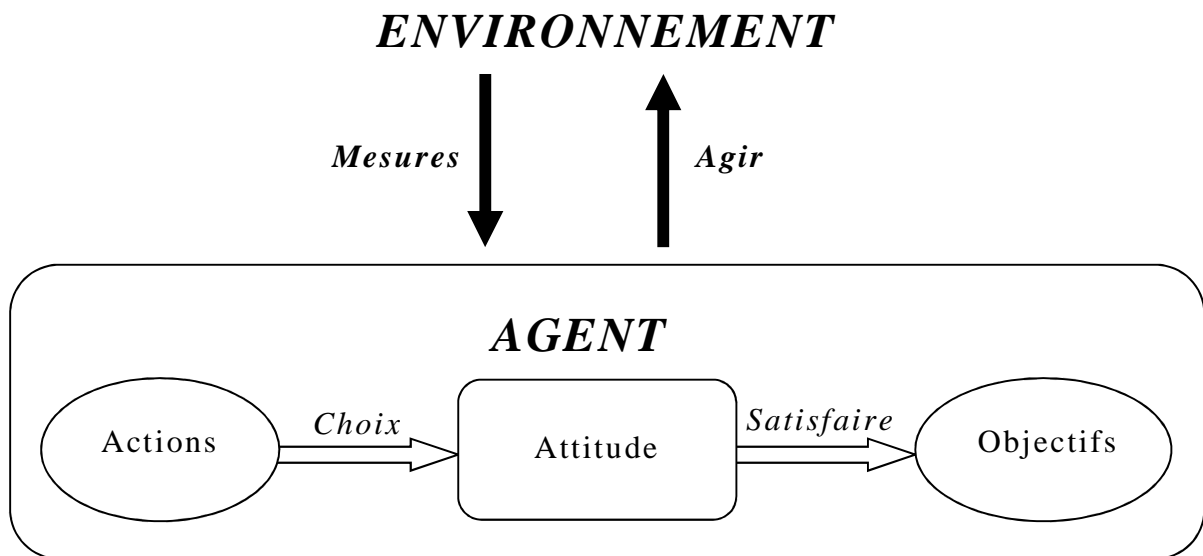
De plus, un agent fournit une interface interopérable pour d'autres systèmes ou bien agir à l'image d'un humain entraîné de satisfaire un client en respectant un agenda [133-135].

Un tel système informatique indépendant se trouve dans un environnement et il est capable d'actions indépendantes sur ce même milieu (*figure-III-1*). Cette figure illustre qu'un agent possède la possibilité d'agir directement sur son environnement. Quoique, pour des applications réelles, un agent ne peut pas avoir un contrôle complet et direct sur son environnement [131-135]. Par conséquent, un agent est social car il a la possibilité de coopérer avec d'autres agents ou éventuellement des humains. Beaucoup plus, un agent peut être mobile si nécessaire, c'est-à-dire possède la possibilité de voyager entre différents nœuds d'un réseau de télécommunications [136].



*Figure-III-1- Interaction d'un agent avec son environnement*

Normalement un agent possède un répertoire d'actions à exécuter pour agir sur l'environnement (*figure-III-2*). Il faut noter, que l'utilisation d'une action dépend des observations effectuées par l'agent. Des conditions d'exécutions sont associées avec chaque action [131-135]. Il faut également prévoir un éventuel échec d'un agent à exécuter l'action appropriée. Un bon agent est celui qui est capable de choisir les meilleures décisions, un choix qui dépend fortement de la nature de l'environnement. Le problème majeur pour la conception d'un agent concerne l'implémentation d'une attitude qui permet la sélection d'une action dans le but de satisfaire les objectifs et agir sur l'environnement (*figure-III-2*).



*Figure-III-2- Structure logique d'un agent.*

### II.1. Classification des environnements

Point de vu agent, les environnements peuvent être classés selon les caractéristiques suivantes [131-135]:

- ✓ Accessibilité : Un environnement accessible est celui où l'agent peut avoir des informations précises, récentes et complètes sur son état actuel.
- ✓ Déterminisme : Un environnement déterministe est celui où une action va avoir un effet bien défini avec un état unique. Par contre les agents opérants dans des environnements non déterministes possèdent des possibilités limités d'influences sur les états.
- ✓ Statique/dynamique : un environnement statique est celui qui demeure inchangé sauf à travers des actions émanantes des agents. Par contraste un environnement dynamique est celui ou l'état peut éventuellement changé entre deux instants. Avant de sélectionner l'action appropriée un agent est obligé de rassembler des informations sur l'état actuel. Ce qui explique que la conception des agents pour des environnements statiques est beaucoup plus simple que celle des environnements dynamiques.
- ✓ Discret/continu : un environnement discret est celui qui possède un ensemble fini d'états, alors qu'un environnement continu possède un nombre infini d'états.

Il est alors évident que la conception d'un agent pour des environnements inaccessibles, non déterministes, dynamique et continu est assez délicate.

## II.2. Agents intelligents

Par définition un agent intelligent est celui qui possède les caractéristiques suivantes [128-147]:

- ✓ Réactivité : les agents intelligents sont capables d'observer leur environnement et répondre à des instants opportuns aux changements.
- ✓ Comportement Proactive : concerne l'aptitude à prendre des initiatives et décision dans une tâche.
- ✓ aptitude sociale : avec cette caractéristique les agents sont capables d'interactions et coopérations pour atteindre un objectif commun.

## III. Description des systèmes multiagents

Un système multiagents est une composition de plusieurs agents. Même si un système est composé d'un seul agent il est dit multiagents. En effet, cet agent unique travail dans un environnement et certainement interagit avec ces utilisateurs (qui peuvent être considérés à leur tour comme des agents) [131]. Les systèmes multiagents sont capables de modéliser des systèmes et comportement complexes [135,136]. De plus, les agents qui doivent interagir et coopérer pour résoudre une tâche commune peuvent avoir chacun des objectifs similaire voir même contradictoires. Les agents vont interagir les uns avec les autres de manières [136, 137, 139] :

- ✓ directe à travers une communication, voire une négociation,
- ✓ de manière indirecte en agissant sur l'environnement.

Il faut également noter que dans ce type de système un agent a le droit d'estimer l'utilité d'une coopération pour servir l'intérêt commun ou bien l'autonomie pour servir des intérêts propres [135,139].

## IV. Architecture des systèmes multiagents

L'architecture des systèmes multiagents est intrinsèquement peer-to-peer [134]. En effet, un agent peut initier un dialogue avec n'importe quel autre agent ou bien percevoir des stimuli d'autres agents de manière aléatoire et à n'importe quel moment [134]. Dans le monde réel : dynamique et ouvert, les systèmes

multiagents peuvent être considérés comme un mécanisme composé avec plusieurs entités matériels (entité mécanique, électromécanique, circuits électrique ou électronique) et logiciels avec un comportement coopératif [133]. Actuellement aucun standard n'est défini pour l'architecture des systèmes multiagents, toutefois dans la littérature, il existe quatre principaux groupes définissant l'architecture des systèmes multiagents : Logique, Réactive, BDI (Belief Desire Intention), modélisation à base de couches [128-146].

#### IV.1. Architecture logique

Il s'agit d'une description similaire au raisonnement humain de nature symbolique avec un codage simplifié de l'information reçue. Cette représentation dite également symbolique, tire ces fondements à partir des connaissances traditionnelles sur l'environnement et les entités du système à concevoir. En effet un environnement symboliquement représenté, peut être manipulé avec plusieurs entités possédant leurs propres raisonnements. L'avantage de cette approche réside dans le fait que les connaissances humaines sont de nature symbolique facilement codée à travers un algorithme dont la logique est compréhensible par un humain, l'inconvénient, est qu'il est tordu de traduire symboliquement le monde réel en une description symbolique adéquate.

#### IV.2. Architecture réactive

Cette architecture implémente un comportement avec prise de décision comme situation directe de l'action à entreprendre pour un stimulus parvenu de l'environnement. Cette architecture comme la précédente ne possède pas une représentation symbolique dédiée ou une forme de raisonnement graphique compliqué. L'idée dans ce cas, réside dans le fait, qu'il est possible d'obtenir un système intelligent sans générer explicitement une représentation abstraite ou symbolique, l'intelligence du dispositif complet est le résultat de la coopération de complexes techniques, de différentes priorités, dans le système.

#### IV.3. Architecture BDI (Belief, Desire, Intention)

Cette architecture dont la forme générale est schématisée par la *figure-III-3*, s'inspire d'une étude philosophique du comportement mental d'un humain. En effet, pour un humain l'action à prendre est le résultat d'un raisonnement qui fait combiner les objectifs, les opinions, les intentions et domaines de connaissances. Bien évidemment les opinions sont les fruits d'un monitoring de l'environnement

à travers les sens. Les actions entreprises par le biais d'un générateur de commande découlent des intentions, résultats des résonnements. Plusieurs applications exploitent cette architecture des systèmes multiagents.

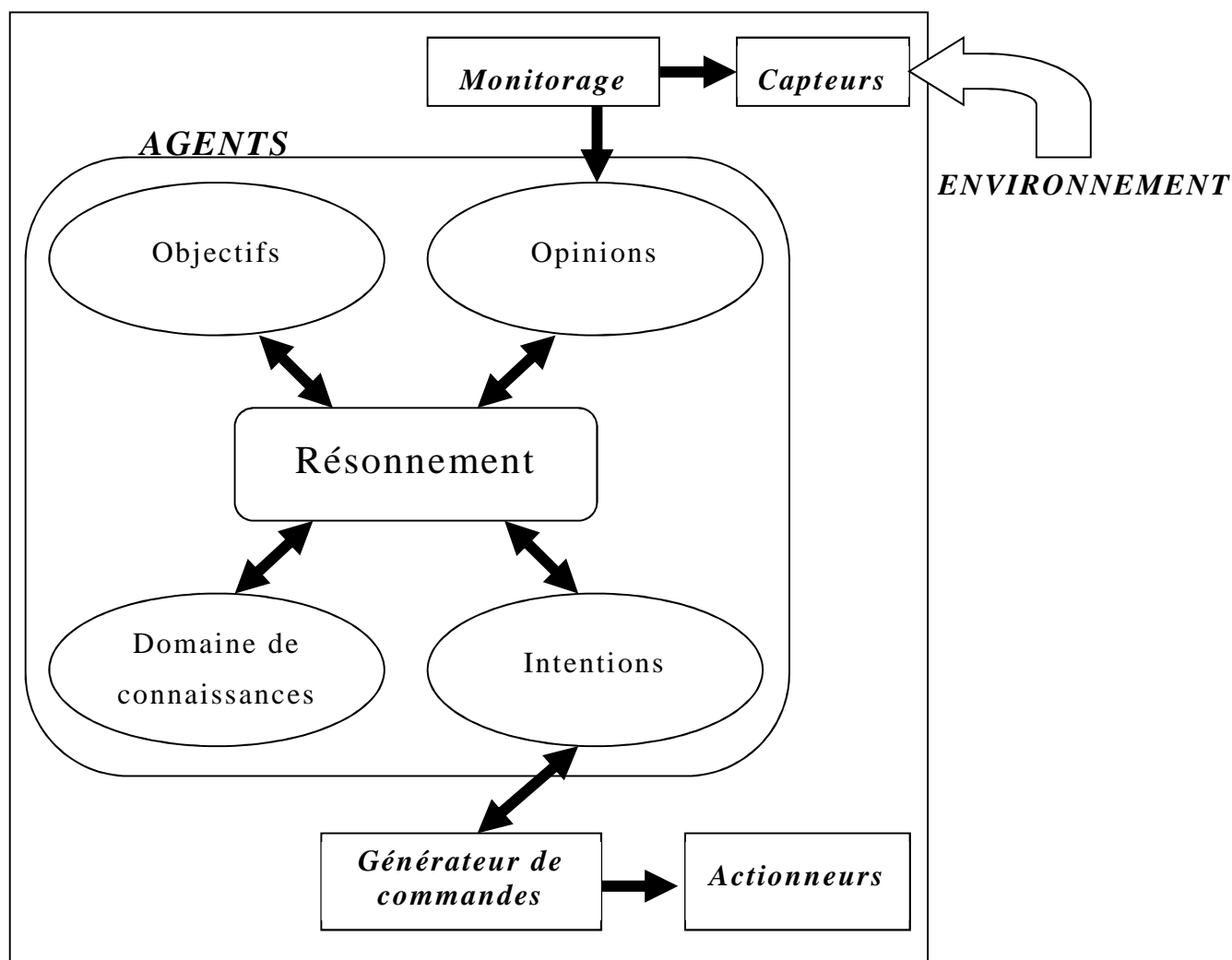


Figure-III-3- Architecture BDI (Belief, Desire, Intention) d'un système

#### IV.4. Architecture à couches

C'est une architecture simple qui consiste à organiser le système en plusieurs couches. Chaque couche peut matérialiser un ou plusieurs agents. Pour ce type d'architecture, il existe deux modes opératoires :

- ✓ **Mode horizontal :** dans cette forme, les différentes couches sont connectées aux capteurs et vont par conséquent agir, simultanément chacun avec sa propre action, sur l'environnement (figure-III-4). La simplicité d'implémentation est le principal avantage de ce mode.

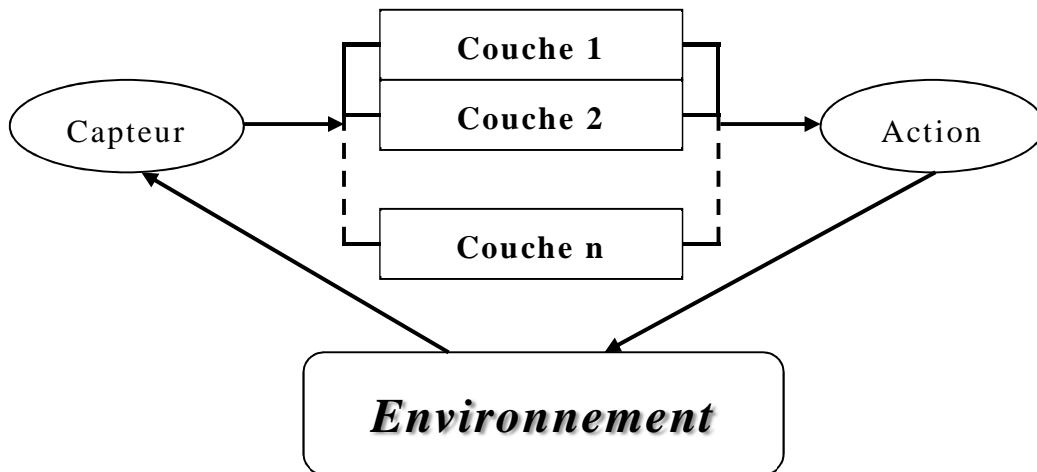


Figure-III-4- Architecture à couches en mode horizontal des systèmes multiagents.

- ✓ **Mode Vertical :** dans cette forme la première couche est connectée aux capteurs, les différentes couches vont coopérer pour atteindre les objectifs tracés, seulement une seule couche est capable d'agir sur l'environnement (figure-III-5). Ce modèle reste relativement associé avec des cas de régulation automatique ou robotique [135].

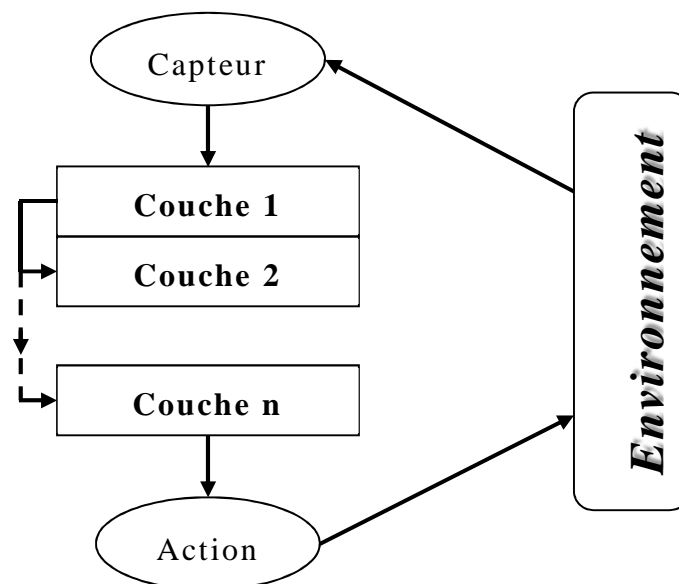


Figure-III-5- Architecture à couches en mode vertical des systèmes multiagents.

## **V. Communication et coordination entre agents**

La communication et la coordination entre agents est l'élément clé d'un système multiagents [133,134,137,139]. En effet, les agents ont besoins de communiquer avec les utilisateurs, avec les ressources du système et les uns avec les autres pour coopérer dans une tâche spécifique. Particulièrement, les agents doivent interagir les uns avec les autres en exploitant un langage de communication spécifique, dit langages de communication agents (agent communication langages ACL) [133,137].

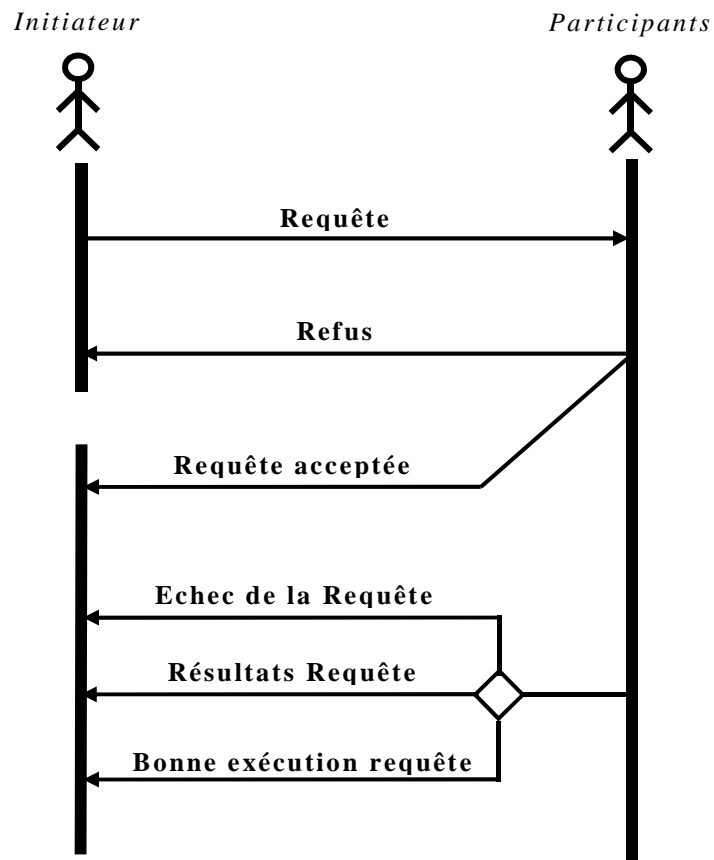
L'ACL le plus utilisé actuellement est celui défini par la FIPA (the Fondation for Intelligent Physical Agent) [128,130-137]. Ce dernier possède l'avantage de pouvoir gérer une conversation à travers des protocoles prédéfinis en vue de faciliter une coordination entre agents. La coordination réalisée par ce langage de communication est efficace et permet :

- ✓ de gérer les conflits liés aux objectifs au niveau du système,
- ✓ de valider les objectifs indépendants réalisés par les différents agents,
- ✓ un échange des connaissances acquises à propos de l'environnement,
- ✓ une réalisation rapide de l'objectif primordial du système.

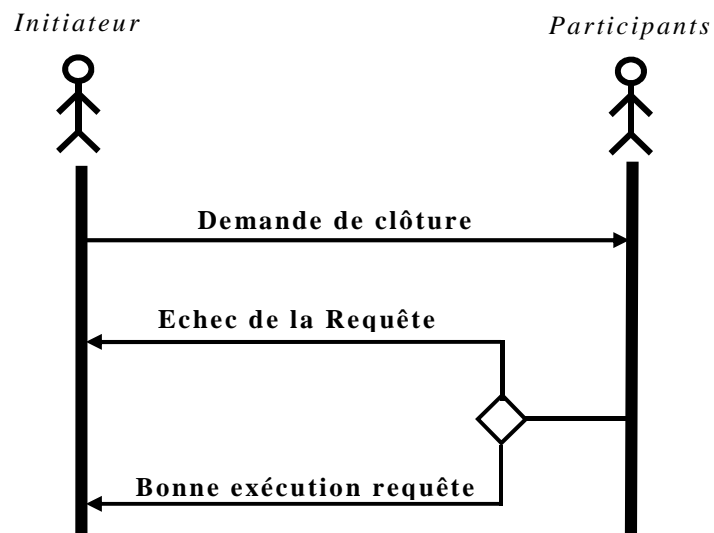
Pour l'ACL FIPA, le déroulement d'une conversation entre agents doit satisfaire les scénarios représentés au niveau de la *figure-III-6* [133,134]. Les deux scénarios expliquent qu'une conversation est entamée par un agent dit initiateur avec d'autres agents dits participants. Chaque participant a le droit d'accepter ou de refuser une conversation. Une fois la conversation acceptée, après chaque requête émise par l'initiateur vers les participants, ces derniers doivent obligatoirement répondre par :

- ✓ l'échec de la requête, si elle ne peut être exécutée par le participant,
- ✓ les résultats de la requête,
- ✓ la bonne exécution de la requête.

La clôture d'une conversation est effectuée obligatoirement par l'initiateur, et confirmée par la totalité des participants. En effet, la confirmation des participants permet d'éviter l'abandon des requêtes en cours d'exécution.



a- Scénario initiation d'une communication entre agents.



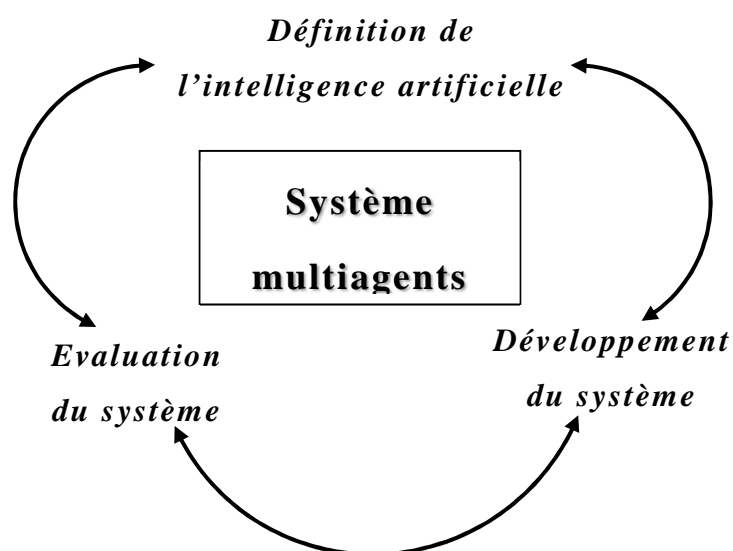
b- Scénario terminaison d'une conversation entre agents.

Figure-III-6- Scénarios de déroulement d'une communication entre agents à travers l'ACL FIPA [133,134].



## VI. Outils pour l'intégration des systèmes multiagents

Les applications des systèmes multiagents restent un domaine émergent, les outils utilisés pour leur intégration sont actuellement en pleine expansion [130,141]. La structure des agents et systèmes multiagents, est principalement une architecture logicielle dédiée à la prise de décision et à l'intelligence artificielle. Le cycle de vie de développement, de conception et d'intégration dédié aux systèmes multiagents est représenté par la *figure-III-7*.



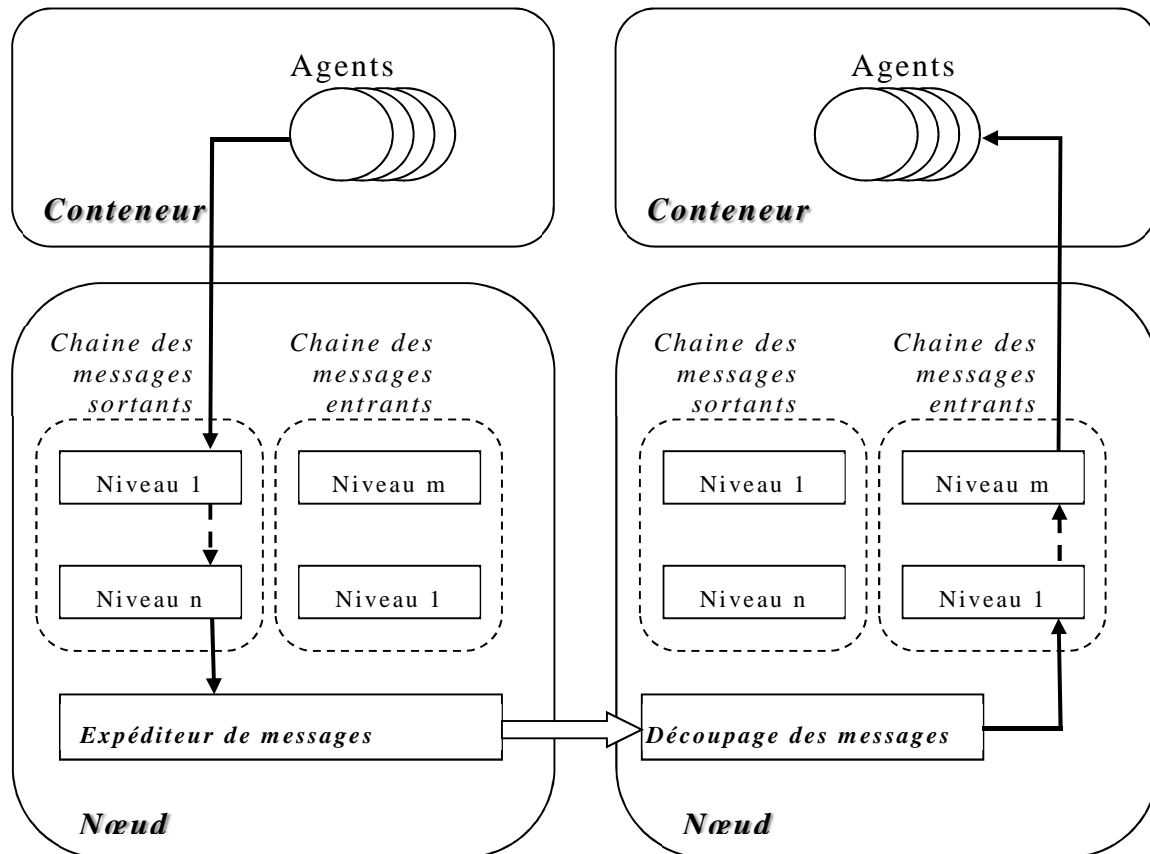
*Figure-III-7- Cycle de vie conception d'un système multiagents.*

Il est possible de développer un système multiagents directement avec un langage de base (JAVA, C++, C#...)[138,140]. Seulement, pour se focaliser sur une application particulière des systèmes multiagents, il est préférable de se baser sur des outils d'intégration existants [128-146]: JADE, AGV, A&A, VDL, CLAIM, JASON, AGENT-0, NETLOGO...[138,141-146]. Toutefois, dans ce travail nous nous sommes intéressés uniquement à l'outil d'exploitation des systèmes multiagents dit JADE. Les raisons d'un tel choix se résument dans le fait que JADE [138,141-146]:

- ✓ est un outil open source distribué sous la licence LGPL (Library Gnu Public Licence),
- ✓ est développé avec JAVA et par conséquent s'adapte facilement sur différentes plateformes,
- ✓ se présente comme des API JAVA et peut être facilement combiné avec SCILAB© ou MATLAB©,

- ✓ La documentation et le support technique sont largement disponibles.

Bien évidemment JADE implémente la totalité des notions présentées dans ce chapitre avec l'architecture et le comportement schématisé par la *figure-III-8* [145].



*Figure-III-8- Architecture et mode opératoire de la plateforme JADE [133,134].*

## **VII. Conclusion**

Pour clôturer ce chapitre consacré aux systèmes multiagents, nous mettons l'accent sur le fait que, ces systèmes ont été favorisés par le déploiement des nouvelles architecture d'ordinateurs, des processeurs, microcontrôleurs et DSP, connectés à travers un réseaux de transmission de données, avec une orientation vers les techniques de calcul parallèles et distribuées. En effet, en combinaison avec les réseaux de capteurs, ces dispositifs se présentent comme une infrastructure de base pour implémenter et faire coopérer différents algorithmes et logiciels de détection et filtrage spatial, que nous allons développer dans le chapitre suivant.

# *Chapitre IV*

## *Détection et filtrage spatial multiagents*

## **I. Introduction**

Les notions des systèmes multiagents se présentent dans cette recherche comme un nouveau paradigme de conception réfléchi qui permet d'exploiter efficacement les architectures distribuées et multiprocesseurs largement disponibles et préférées actuellement. Bien plus, dans notre cas, les systèmes multiagents, permettent de porter les notions de l'intelligence artificielle, principes de collaboration, autonomie, comportement proactive et possibilité de communications vers des entités composantes d'un systèmes de télécommunications sans-fil, éventuellement à base de réseaux de capteurs. En adoptant une approche multiagents pour résoudre le problème de détection pour les réseaux de capteurs, plusieurs issues restent ouvertes :

- ✓ acquisition simultanée de plusieurs sources,
- ✓ filtrage spatial efficace,
- ✓ réaction optimisée et performante selon les circonstances imposées par l'environnement,
- ✓ rapidité de réaction et traitement.

Il devient alors important de trouver une approche adéquate à exploiter pour résoudre le problème de détection formulé au niveau du deuxième chapitre.

L'objectif de cette recherche qui exploite les notions des systèmes multiagents, consiste à trouver des méthodes et procédés pour construire un système complexe composé d'agents autonomes opérants avec leurs propres connaissances. En effet, dans ce travail, nous nous sommes orientés à effectuer une conception générique d'un système multiagents complet, avec une vision d'une architecture quelconque pour les réseaux de capteurs. Les fruits de cette conception vont être présentés dans ce chapitre. Une validation sera effectuée à travers des implémentations cette fois-ci sur des architectures et applications spécifiques pour les réseaux de capteurs.

## **II. Problématique**

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 manières indépendante. Le dispositif global est représenté par la *figure-IV-1*. 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 : bornes GSM, WIFI, ZeegBee... 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 : plusieurs entrées plusieurs sorties (Multiple Input Multiple Output),
- ✓ 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.

### **III. 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.

La procédure qui va prendre en charge le comportement et les décisions du système multiagents est dite stratégie. Le système proposé doit être capable de discriminer des signaux noyés dans du bruit et ayant subis des distorsions introduites par le canal. Une première version de cette stratégie a été proposée pour la modélisation d'un réseau rectiligne et uniforme dans notre publication [147] (*figure-IV-2*).

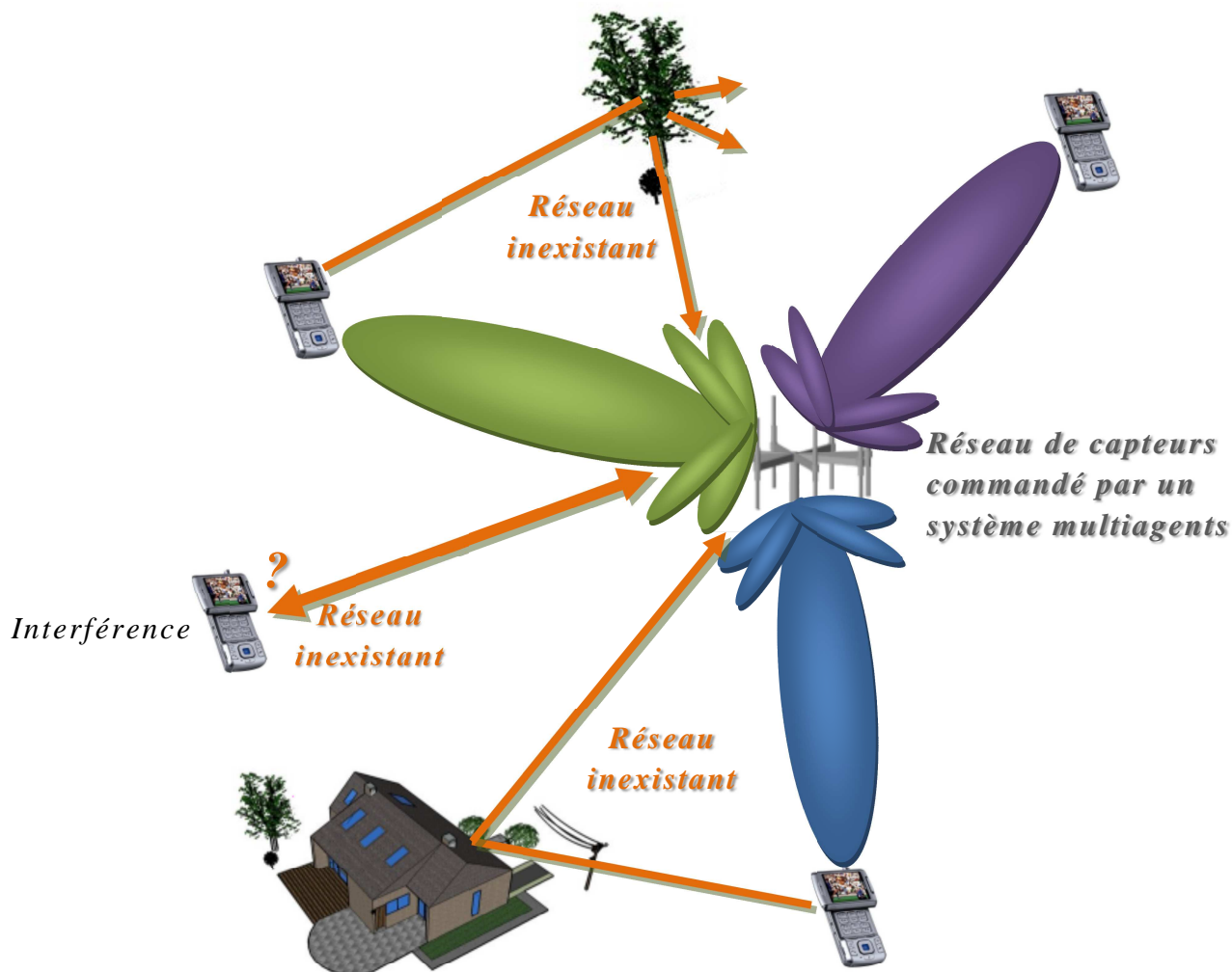


Figure-IV-1- Principe général de la détection coopérative multiagents.

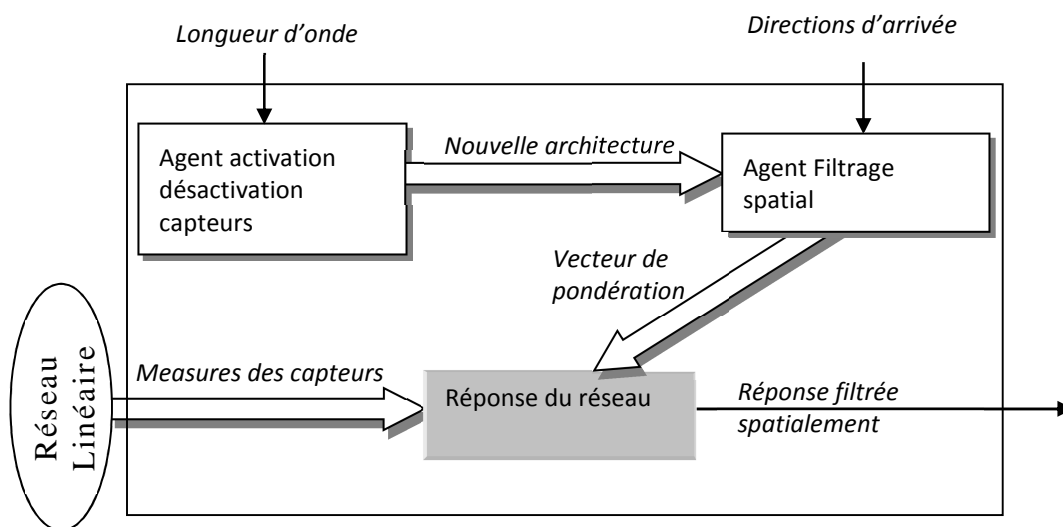
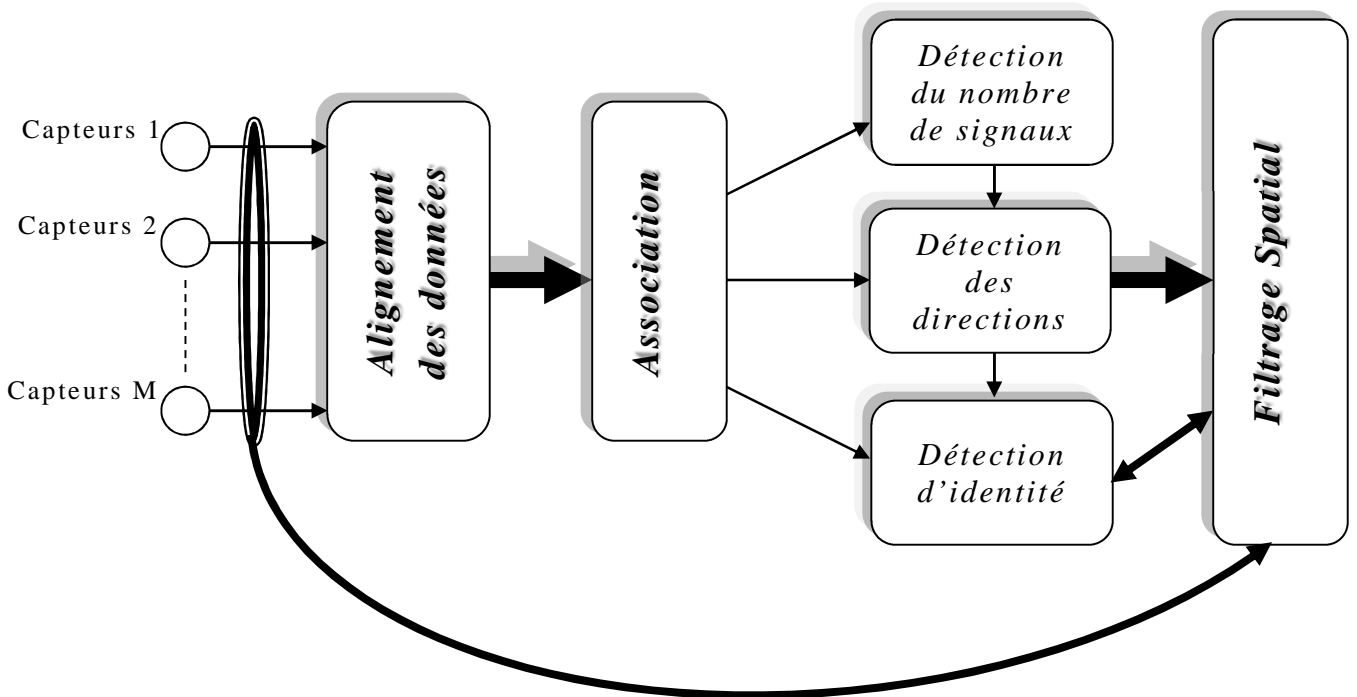


Figure-IV-2- Schéma synoptique du système multiagents proposé.

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. Une version améliorée de la stratégie de la *figure-IV-2* est proposée et schématisé sur la *figure-IV-3*.



*Figure-IV-3- Stratégie adoptée pour le système multiagents dédié à la détection et au filtrage spatial par réseaux de capteurs.*

Cette fois-ci, il s'agit de prendre en considération des architectures de réseau de capteurs à trois dimensions et effectuer une détection détaillée et coopérative pour une efficacité absolue. 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.

Le problème que nous avons rencontré lors de la conception des agents concerne la définition des actions, dans le but de satisfaire les objectifs globaux du système. L'architecture globale du système multiagents proposée est représentée au niveau de la *figure-IV-4*, avec une indication des principales conversations échangées. Cette architecture est proposée en exploitant les principes des architectures : logique, réactive et BDI présentées au niveau du chapitre précédent. Les sections suivantes vont détailler la structure de chaque agent séparément. L'intelligence et les comportements des différents agents qui vont implémenter cette stratégie seront détaillés dans les paragraphes suivants.

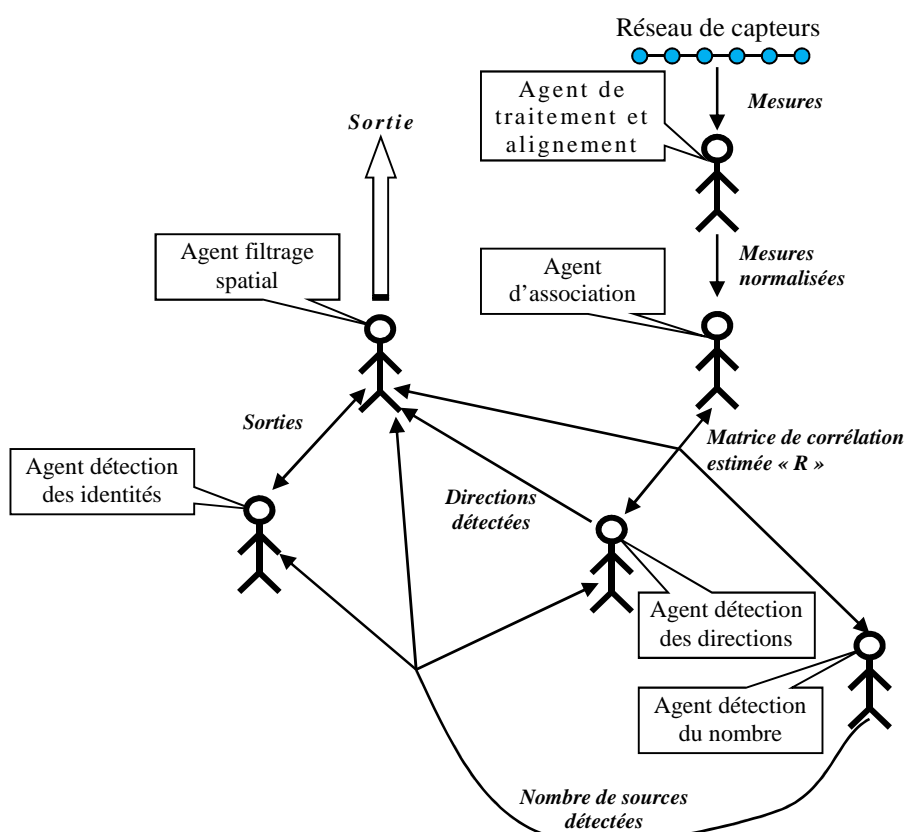


Figure-IV-4- Schéma synoptique du système multiagents proposé.

### III.1. Agent de traitement et d'alignement

Cet agent supposé agir sur un environnement dynamique et continu, doit effectuer un filtrage et une normalisation des mesures effectuées par les différents capteurs pour les ramener au même niveau de puissance. De même cet agent est responsable d'améliorer les performances du système en agissant sur les informations à transmettre aux autres agents, particulièrement l'agent



d'association des données. Ceci en activant ou désactivant des lignes de mesures (capteurs du réseau), dans le but d'agir sur la complexité des calculs, la résolution et la sensibilité. L'intelligence adoptée au niveau de cet agent est détaillée dans les paragraphes suivants.

### **III.1.a. Activation désactivation des capteurs**

Dans cette recherche, nous exploitons une répartition spatiale quelconque (linéaire, plane, circulaire, cylindrique, sphérique, ...) des capteurs constituant le réseau. Par conséquent, il est pratiquement inutile de prendre en considération une ligne de mesure associée avec un capteur qui pointe dans une mauvaise direction (opposée à celle des signaux à mesurer). Afin de mieux appréhender cette approche, considérons un réseau de forme circulaire schématisé sur la *figure-IV-5*. Il apparaît clairement que les différents capteurs ne reçoivent pas les signaux avec la même puissance. Dans ce cas l'agent d'alignement doit éteindre les capteurs du réseau qui reçoivent des signaux possédant une puissance au-dessous d'un seuil égal à -3dB de la puissance normalisée ou bien des copies de signaux mesurés (effet multi-trajets). Sur la *figure-IV-5*, les capteurs du réseau global, vides (en blanc), sont éteints par conséquent supposés inexistantes ou absents. Le nouveau réseau est formé uniquement par les capteurs actifs pleins (en noir) recevant les signaux avec une intensité au-dessus du seuil. Prendre en considération uniquement les lignes actives permet d'alléger les calculs qui devront être effectués par l'agent d'association des données.

### **III.1.b. Influence du nombre des capteurs**

La résolution est une caractéristique du réseau en relation directe avec sa taille. Par conséquent elle dépend du nombre des capteurs formant ce dernier. L'impact du nombre de capteurs constituant le réseau sur sa résolution sera présenté en exploitant des réseaux linéaires et uniformément répartis (*figure-II-2*). En effet, le réseau rectiligne et régulier de capteurs, possède un modèle simple et se prête facilement pour les études portant sur les caractéristiques fondamentales des réseaux. La réponse généralisée du réseau de capteur est exprimée par (IV-1) selon le principe de la *figure-IV-6*, utilisé pour le filtrage spatial [148-151]. En effet, la détermination des poids de pondération  $w_i$  sera effectuée par l'agent responsable du filtrage spatial. Actuellement, pour intégrer l'influence du nombre des capteurs au sein de l'agent traitement et alignement, nous nous considérons

qu'une pondération uniforme de valeur :  $\forall i : w_i = \frac{1}{M}$  avec M nombre des capteurs du réseau.

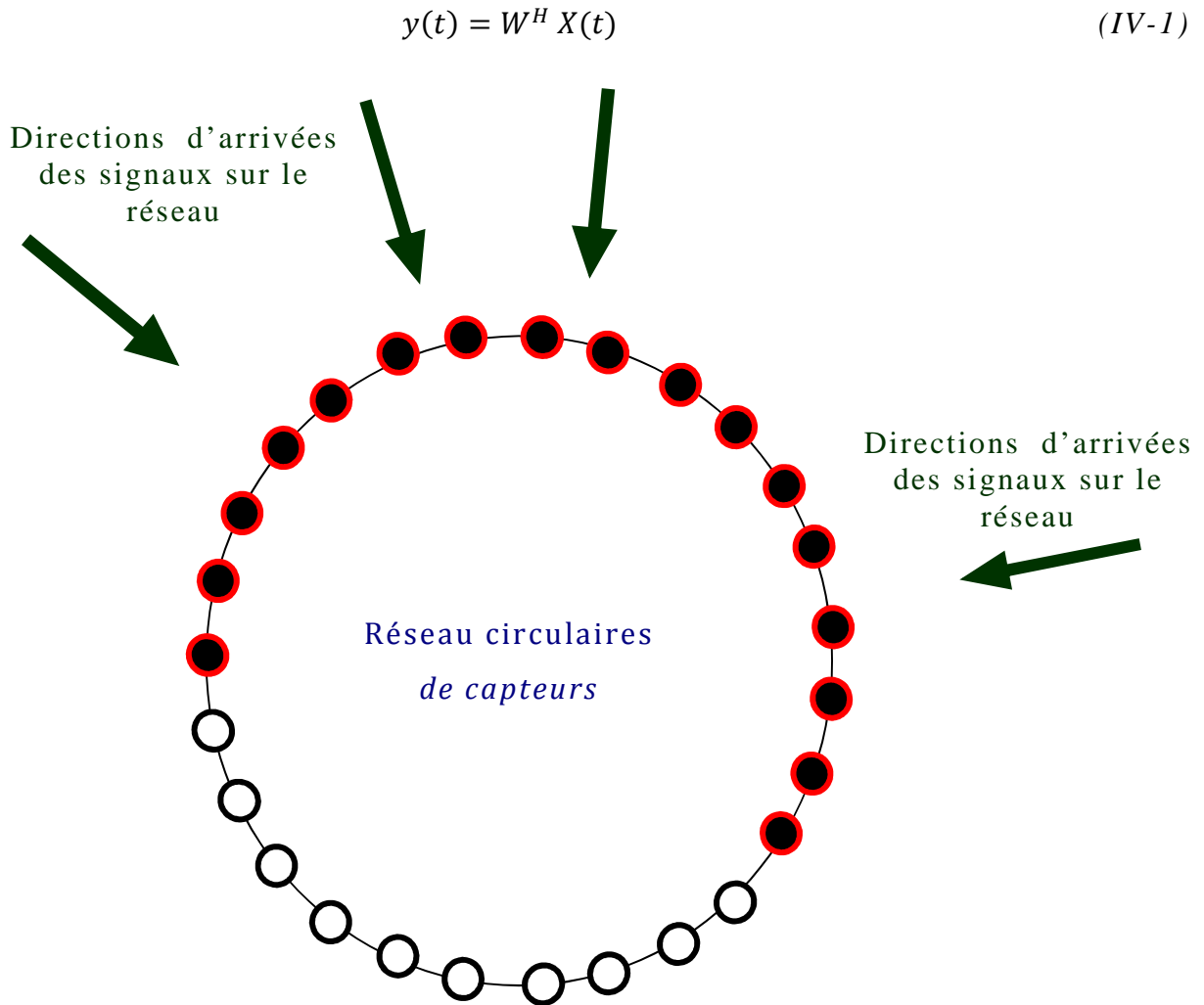


Figure-IV-5- Principe d'activation désactivation des capteurs du réseau.

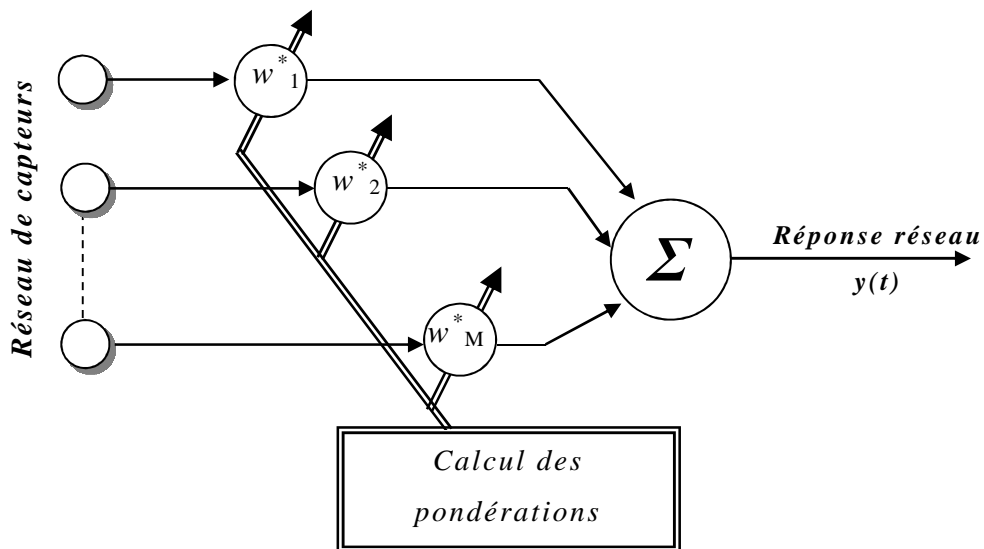


Figure-IV-6- Schéma synoptique de l'algorithme filtrage spatial implémenté.

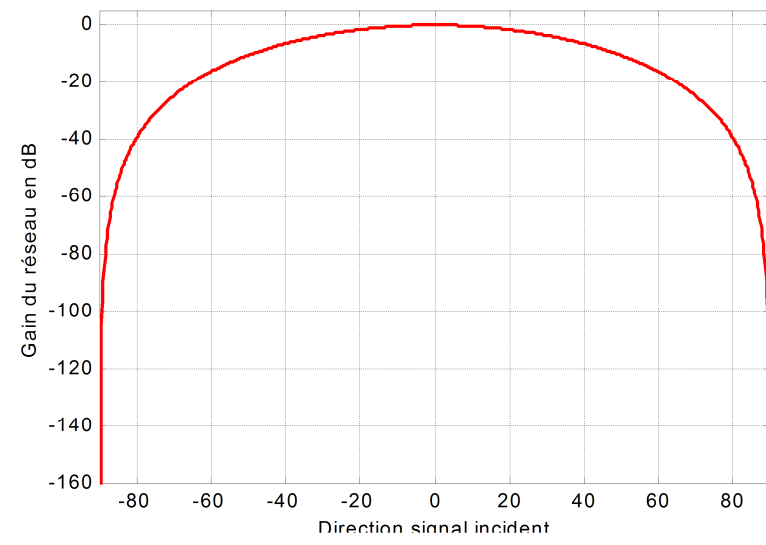
La *figure-IV-7* schématise différents gains de réseaux de capteurs pour  $M=2, 3, 4, 5, 7$  et  $10$ . En analysant ces différents diagrammes (*figure-IV-7*), nous remarquons que si le nombre de capteurs augmente, la largeur du lobe principal diminue, le réseau devient ainsi plus sélectif. En effet, dans le diagramme (a) pour un réseau à deux capteurs, le lobe principal occupe tout l'intervalle  $[-90, 90]$ , dans (b) pour un réseau à trois capteurs, ce lobe occupe l'intervalle  $[-40, 40]$  et plus le nombre de capteurs augmente, plus sa largeur diminue pour atteindre en (f) pour 10 capteurs une largeur de  $[-11, 11]$ .

### III.1.c. Influence de l'espacement entre capteurs

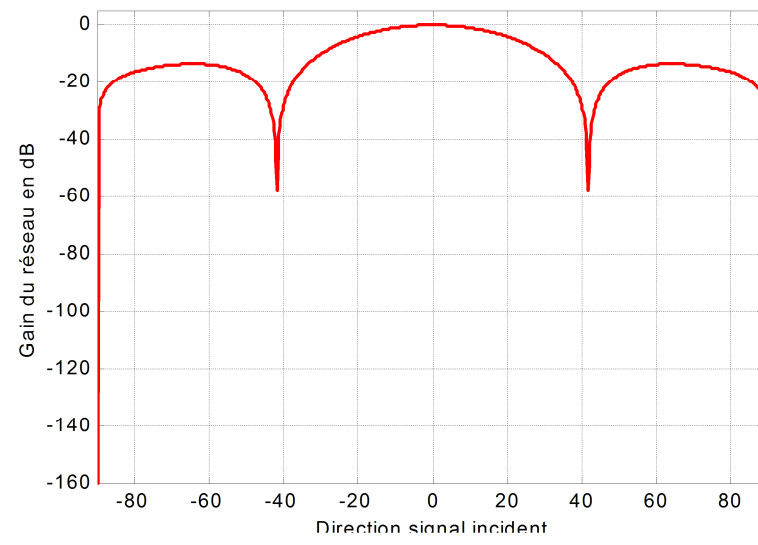
L'espacement entre capteurs influence la sensibilité du réseau. Pour élucider cette caractéristique, nous allons représenter plusieurs gains de réseau rectiligne, régulier et uniformément pondérés avec des rapports espacement capteurs sur longueur d'onde exprimé selon la suite (IV-2), pour un réseau à sept éléments (*figure-IV-8*).

$$\frac{d}{\lambda} = 0.1 ; 0.2 ; 0.5 ; 1 ; 1.5 \text{ et } 2 \quad (\text{IV-2})$$

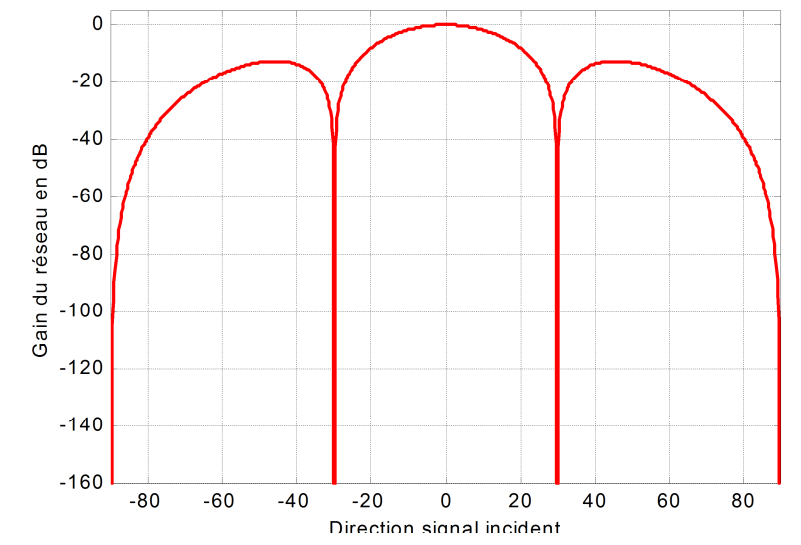
Nous constatons tout d'abord, que si le rapport  $\frac{d}{\lambda}$  est inférieur ou égal à  $\frac{1}{M}$  :  $\frac{1}{7}$  étudié pour un réseau à sept éléments, représenté sur la *figure-IV-8*, le gain ne possède pas de zéros exacts. Il est facile de remarquer d'après les *figures-IV-8 a et b* que plus l'espacement s'approche de zéro, plus la différence entre la réponse du réseau et celle de l'élément indépendant devient insignifiante. Dès lors, les réseaux possédants des capteurs collés les uns aux autres (avec un faible espacement) sont pratiquement inefficaces. Pour  $\frac{d}{\lambda}=0.5$  il est clair que le réseau à sept éléments, six zéros (*figure-IV-8-c*). A partir du moment où la distance inter-éléments dépasse cette valeur, la largeur du lobe principal commence à diminuer considérablement en améliorant ainsi la résolution (*figures-IV-8 d,e et f*). Cependant, si l'espacement croît au-dessus de  $\frac{\lambda}{2}$ , nous remarquons un dédoublement au niveau de la réponse du réseau.



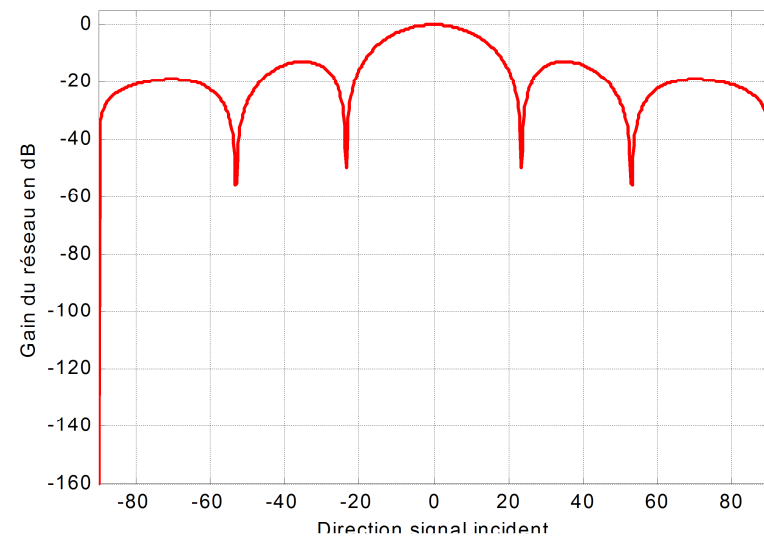
(a) 2 capteurs



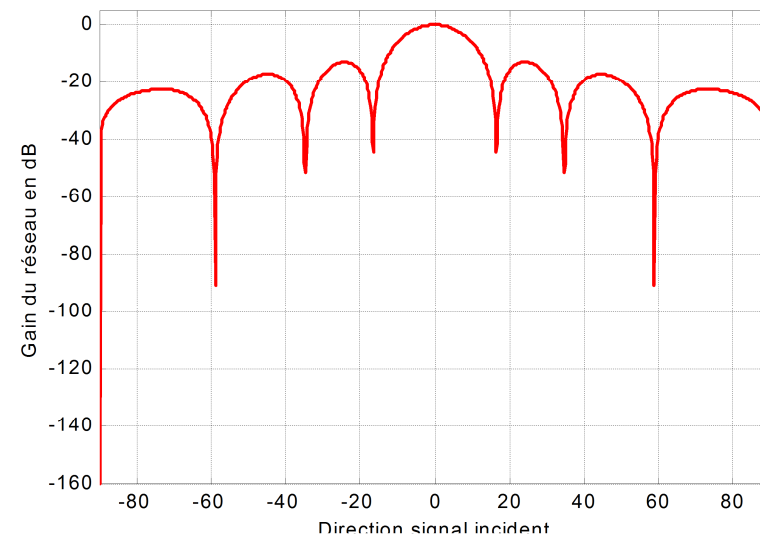
(b) 3 capteurs



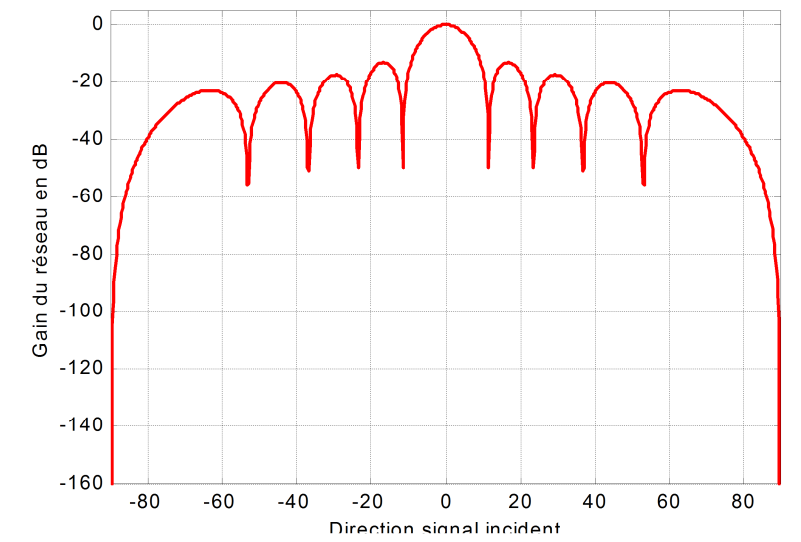
(c) 4 capteurs



(d) 5 capteurs



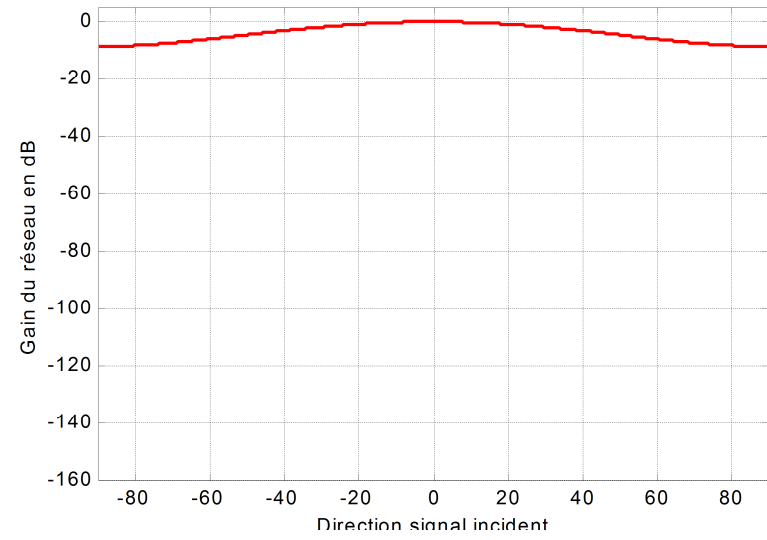
(e) 7 capteurs



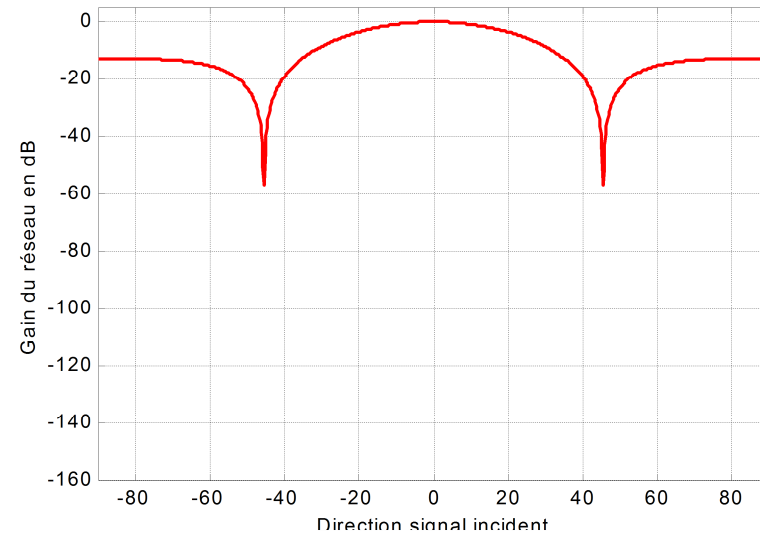
(f) 10 capteurs

Figure-IV-7- Gains spatiaux d'un réseau rectiligne et uniforme pour des nombres différents de capteurs.

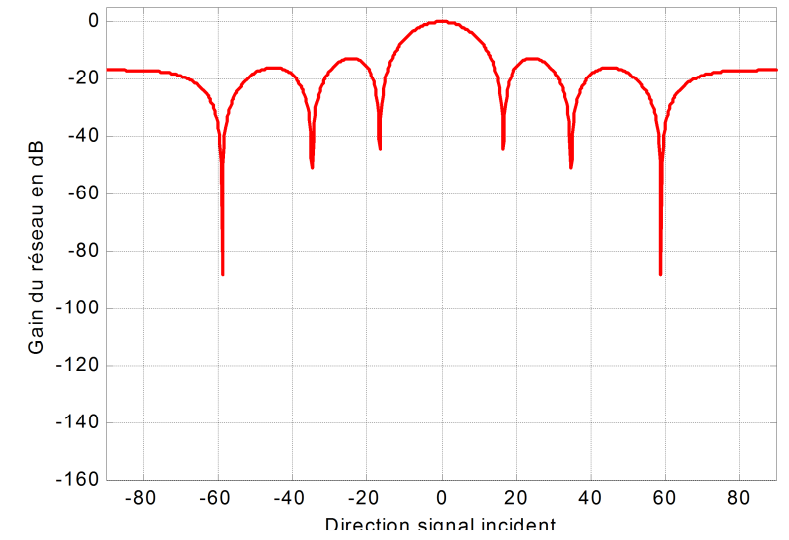
(a)  $M=2$ , (b)  $M=3$ , (c)  $N=4$ , (d)  $M=5$ , (e)  $M=7$ , (f)  $M=10$  [147].



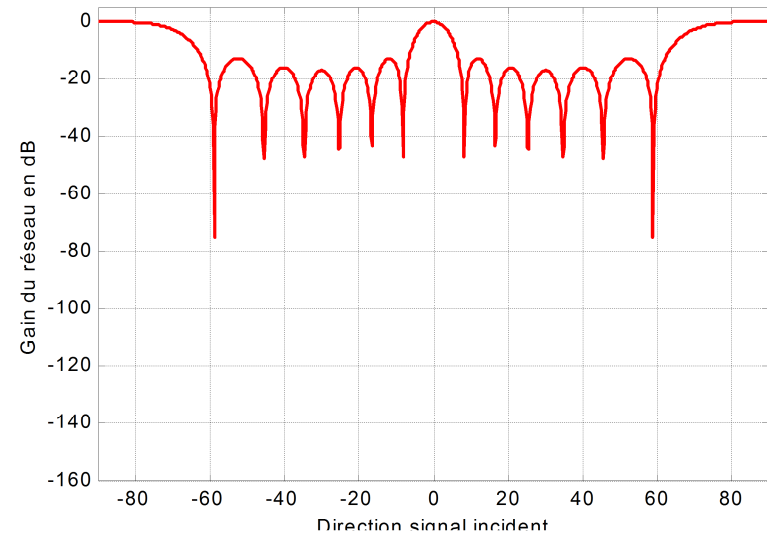
(a) pour un espacement  $d=0,1\lambda$ .



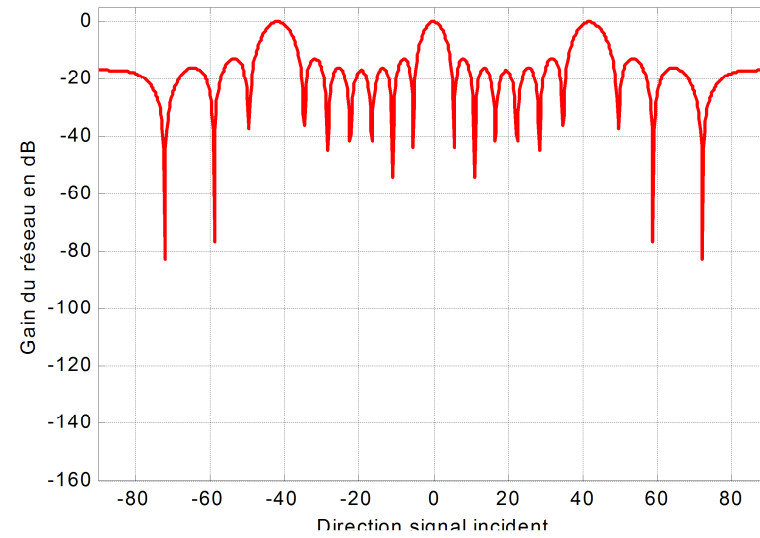
(b) pour un espacement  $d=0,2\lambda$ .



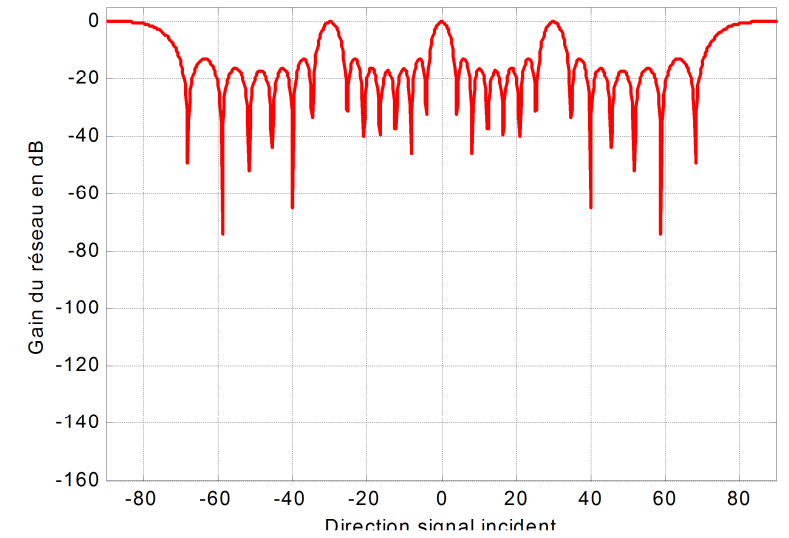
(c) pour un espacement  $d=0,5\lambda$ .



(d) pour un espacement  $d=\lambda$ .



(e) pour un espacement  $d=1,5\lambda$ .



(f) pour un espacement  $d=2\lambda$ .

Figure-IV-8-Gains spatiaux d'un réseau rectiligne et régulier à sept éléments pour différentes distances inter éléments.

(a)  $d=0,1\lambda$  ; (b)  $d=0,2\lambda$  ; (c)  $d=0,5\lambda$  ; (d)  $d=\lambda$  ; (e)  $d=1,5\lambda$  ; (f)  $d=2\lambda$  [147].

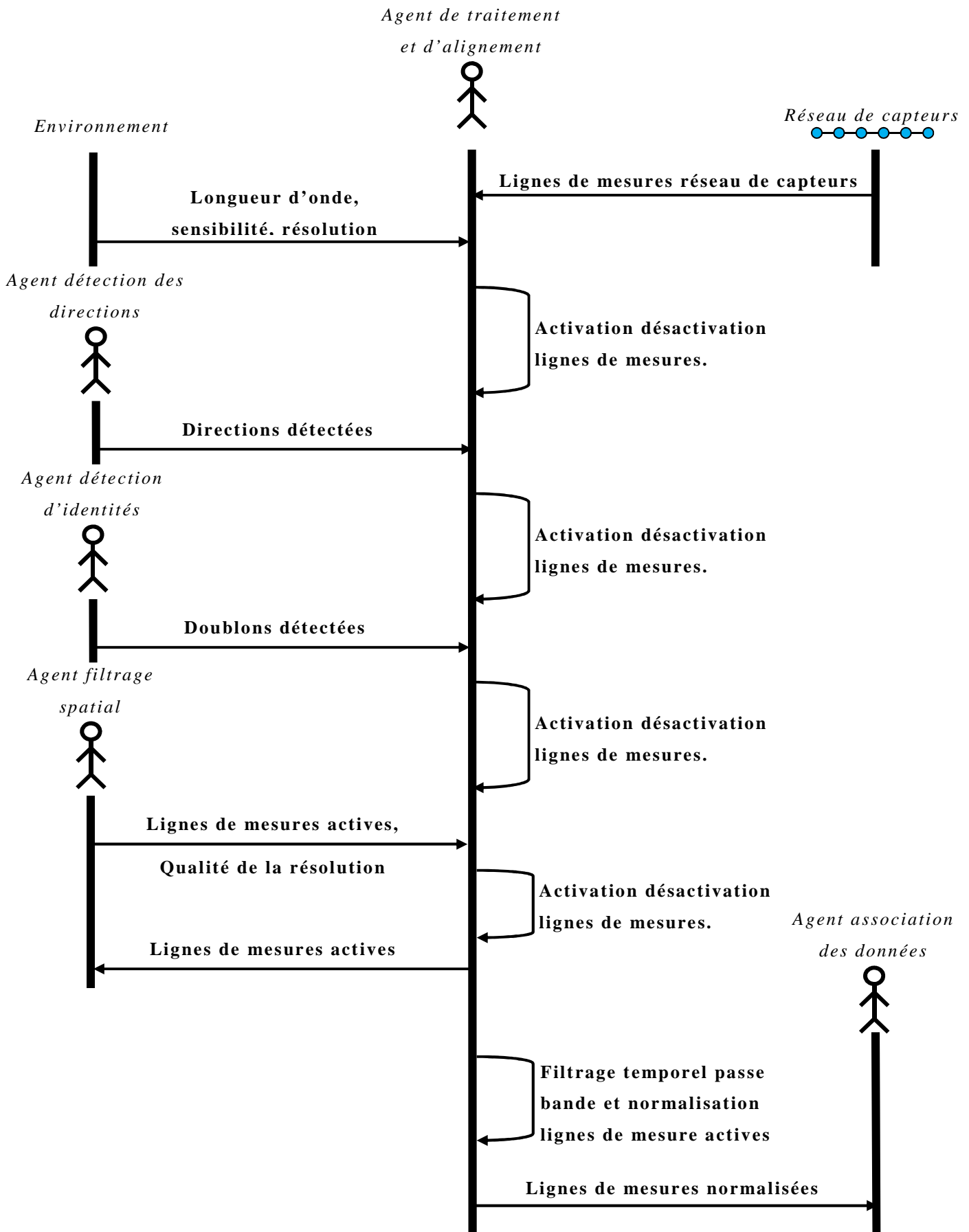


Figure-IV-9- Scénario du comportement général de l'agent traitement et alignement des données.

### III.1.d. Comportement général de l'agent

En fonction de l'application désirée (longueur d'onde) l'agent va activer/désactiver les capteurs pour respecter le principe de l'espacement entre capteurs tout en gardant le nombre utile pour le bon fonctionnement du réseau. Le comportement général de l'agent de traitement et d'alignement va respecter le scénario de la *figure-IV-9*. En analysant ce scénario il apparaît que cet agent pour activer/désactiver des lignes de mesures, va collaborer avec : l'agent de détection des directions incidentes, l'agent de détection d'identité et l'agent de filtrage spatial. Une importance capitale et une priorité importante sont données à ce dernier agent (agent filtrage spatial).

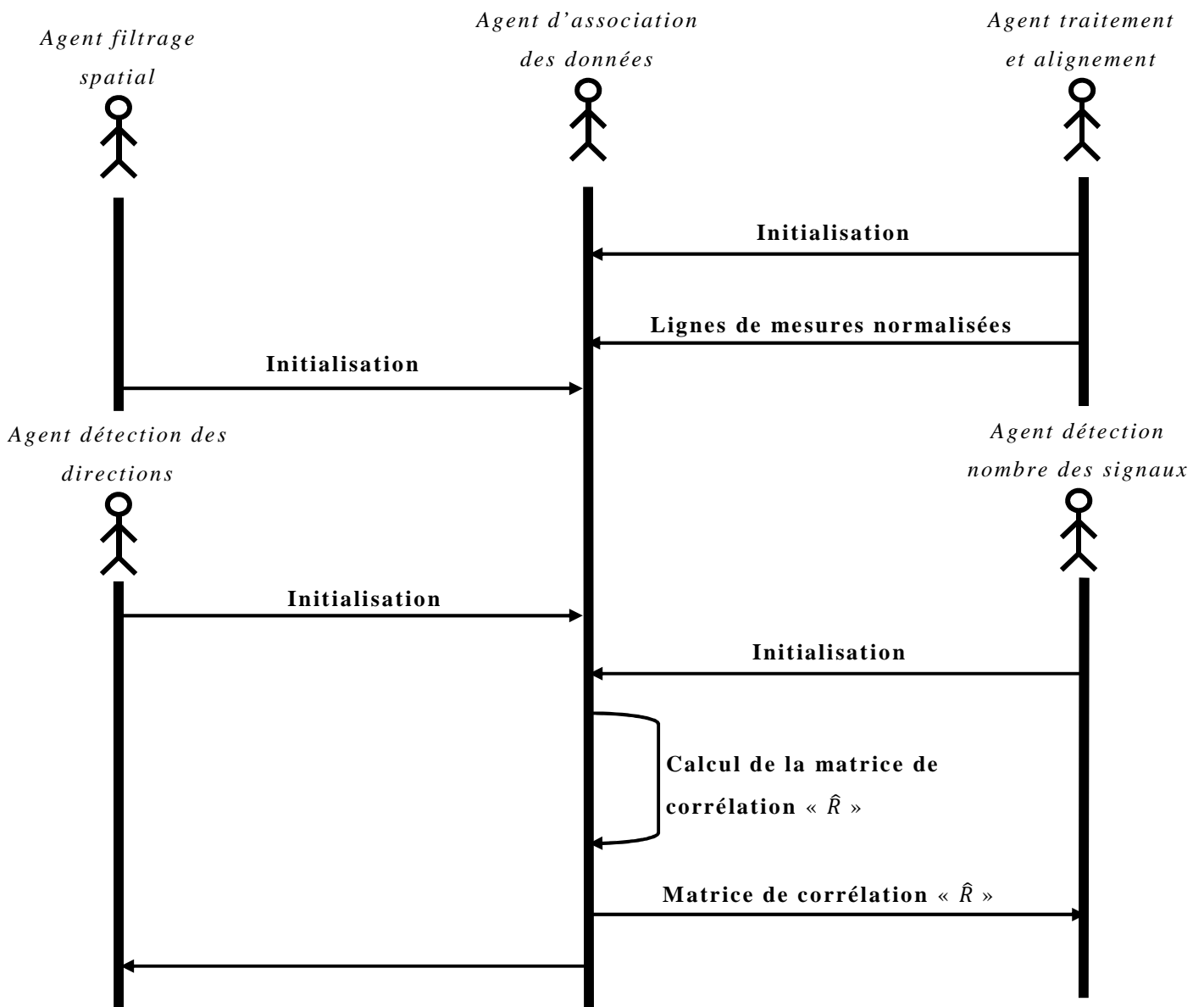


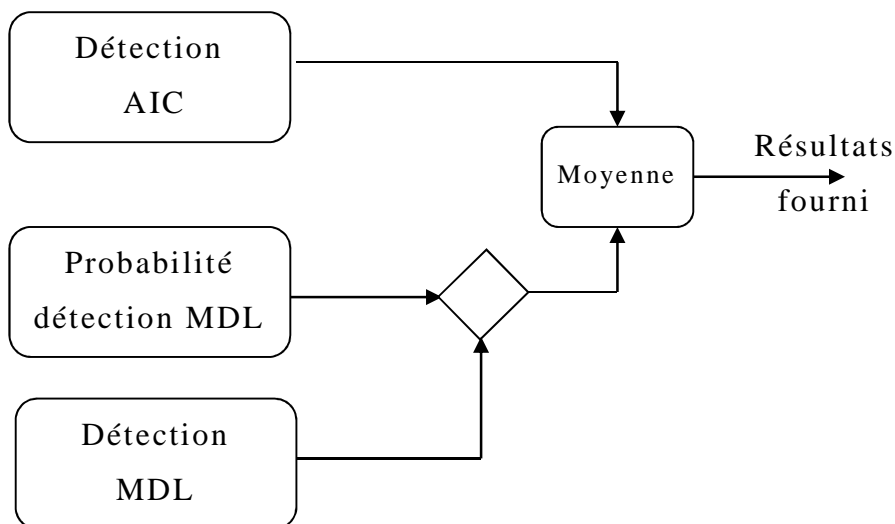
Figure-IV-10- Scénario du comportement général de l'agent association des données.

### III.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 au niveau du deuxième chapitre par (II-6). Le comportement de cet agent est schématisé par la *figure-IV-10* si dessus.

### III.3. Agents pour la détection du nombre de sources

Cet agent va effectuer une implémentation intelligente des deux approches de détection détaillées au niveau du deuxième chapitre. En fonction de la qualité de la matrice de corrélation (II-6) (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-IV-11* le comportement de l'agent détection du nombre de source est schématisé par la *figure-IV-12*.



*Figure-IV-11- principe utilisé pour combiner AIC et MDL au niveau de l'agent détection du nombre des sources.*



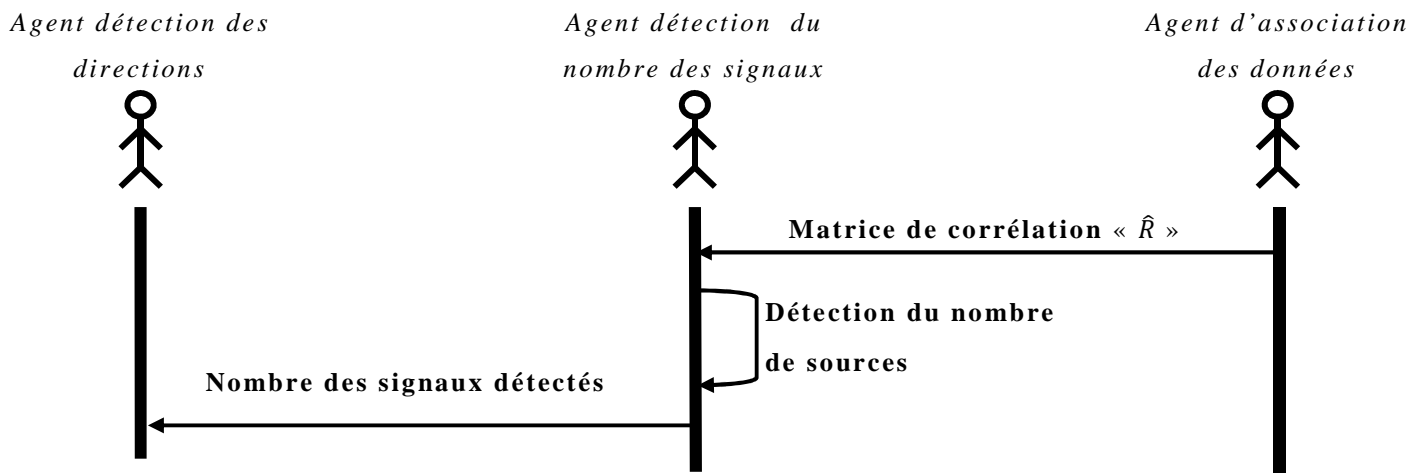


Figure-IV-12- Scénario du comportement général de l'agent de détection du nombre de sources.

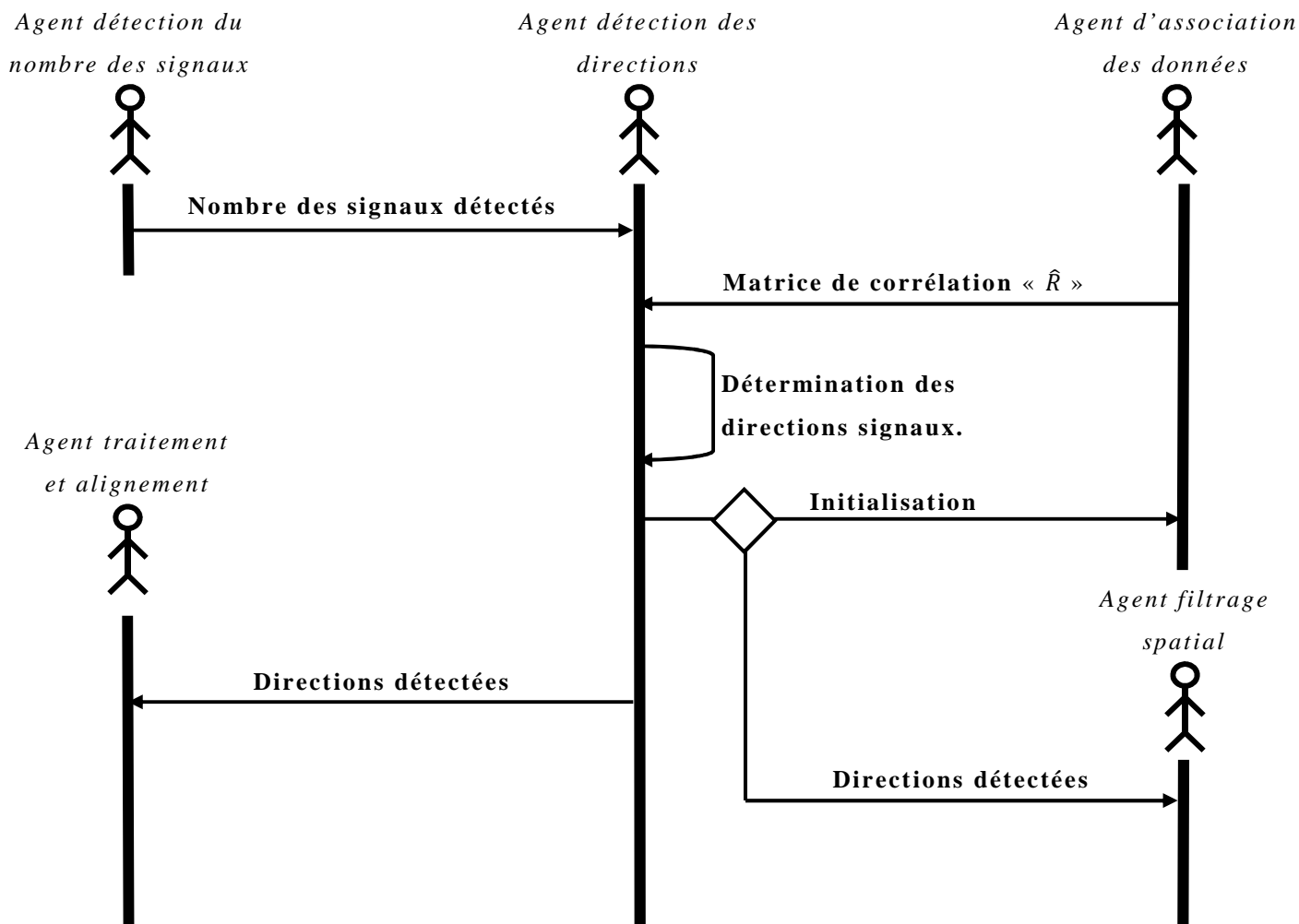


Figure-IV-13- Scénario du comportement général de l'agent de détection des directions incidentes.

### III.4. Agents pour la détection des directions

Cet agent implémente la méthode ESPRIT développée au niveau du second chapitre. En effet, nous avons montré que cette méthode de détection des directions incidentes est celle qui permet d'avoir des estimations directes avec d'excellentes résolutions. Le comportement de cet agent est représenté par le scénario de la *figure-IV-13* si dessus. 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.

### III.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-IV-6*). Les algorithmes utilisés pour le filtrage spatial ont largement évolué [16,23-25,33,148-153], 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 (IV-1).

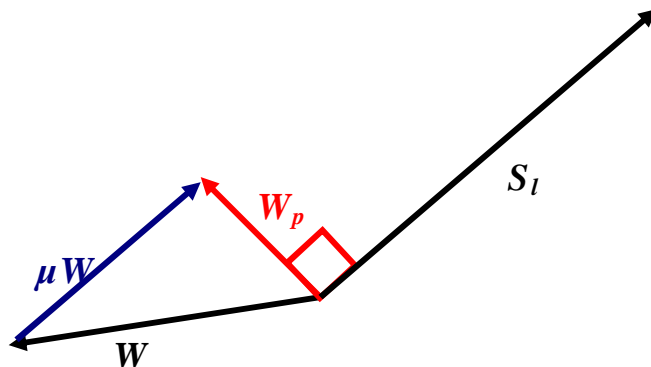
#### **III.5.a. Présentation de l'algorithme**

C'est une procédure itérative qui permet de déterminer les coefficients de pondération complexes «  $w_i$  » associés aux M capteurs du réseau pour que la réponse du réseau ait un niveau théoriquement nul suivant des directions considérées sans intérêt. Cette condition s'écrit selon l'équation (IV-3) qui n'est rien d'autre qu'un produit scalaire entre les poids de pondération complexes et les colonnes de la matrice manifold  $A = [S(d_1) S(d_2) \dots S(d_L)]$  présentée préalablement au second chapitre [19,26,27].

$$S_l^H \cdot W = 0 \quad (IV-3)$$

Où  $l=1,2,\dots,i-1,i+1,\dots,L$  L'indice de référence des « L-1 » directions détectées à ignorer. L'indice « i » fait référence à la direction supposée représenter le signal utile.

Autrement dit, le vecteur de pondération  $W$  est orthogonal au sous espace vectoriel  $C^{L-1}$  constitué des vecteurs d'espace  $\{S_1, S_2, \dots, S_{i-1}, S_{i+1}, \dots, S_L\}$  relatifs aux directions à ignorer. Mathématiquement, la méthode la plus efficace qui permet d'obtenir une orthogonalité entre deux vecteurs est celle de la projection dont le principe est schématisé par la *figure-IV-14*.



*Figure-IV-14- Principe d'une projection entre deux vecteurs.*

Il suffit de faire pivoter le vecteur  $W$ , en lui ajoutant un autre vecteur parallèle à  $S_i$ , pour aboutir à l'orthogonalité. Cette transformation s'exprime par :

$$W_p = W + \mu S_i \quad (IV-4)$$

Où  $\mu$  est une constante à déterminer en faisant appel à la condition d'orthogonalité entre les deux vecteurs, soit :

$$S_i^H \cdot W_p = S_i^H \cdot W + \mu S_i^H S_i = 0 \quad (IV-5)$$

La valeur de  $\mu$  est déduite à partir (IV-5) par :

$$\mu = -\frac{S_i^H \cdot W}{S_i^H S_i} \quad (IV-6)$$

En substituant (IV-6) dans (IV-4), nous pouvons écrire :

$$W_p = W - \frac{S_i \cdot S_i^H}{S_i^H S_i} W \quad (IV-7)$$

Ce principe qui vient d'être appliqué pour deux vecteurs peut être appliqué pour un ensemble de signaux interférents répartis dans l'espace  $\{S_1, S_2, \dots, S_{i-1}, S_{i+1}, \dots, S_L\}$ , en suivant la procédure itérative suivante :

$$X_1 = S_1 \quad (IV-8)$$

$$X_l = S_l - \frac{X_{l-1} \cdot X_{l-1}^H}{X_{l-1}^H \cdot X_{l-1}} S_l \quad (IV-9)$$

et la pondération optimale est donnée par :

$$W_{opt} = W - \sum_l \frac{X_l \cdot X_l^H}{X_l^H \cdot X_l} W \quad (IV-10)$$

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

Il apparait clairement que le vecteur  $W_{opt}$  est une différence entre la pondération initiale  $W$  et sa projection sur l'ensemble des vecteurs orthogonaux  $X_l$ , préalablement déterminées. Il est donc orthogonal à tous ces vecteurs.

### **III.5.b. Comportement de l'agent**

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 au premier chapitre 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 (IV-10) 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. Ceci est obtenu en faisant varier  $i$  de 1 à  $L$ , pour chaque direction lors de la détermination des poids  $W_{opt}$ . 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. Le scénario schématisant le comportement de cet agent est représenté par la figure-IV-15.

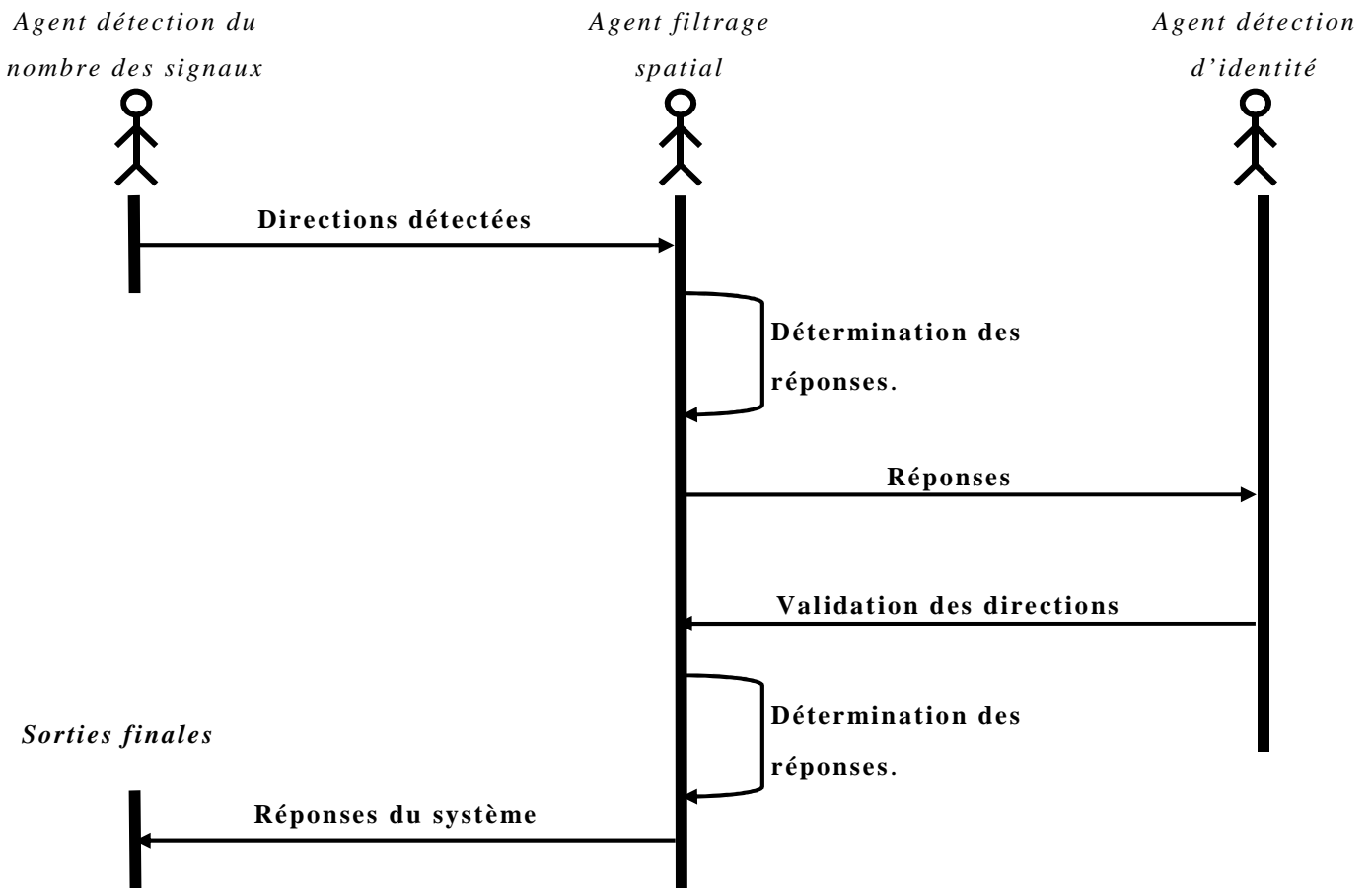


Figure-IV-15- Scénario du comportement général de l'agent filtrage spatial.

III.6. gents 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 [1,2,3,154]. Pour ce travail la détection des identités des sources, nous avons utilisé des trames avec le format représenté par la figure-IV-16.

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

Figure-IV-16- Mise en forme des données utilisée dans notre cas.

CodeS : code associé avec la source

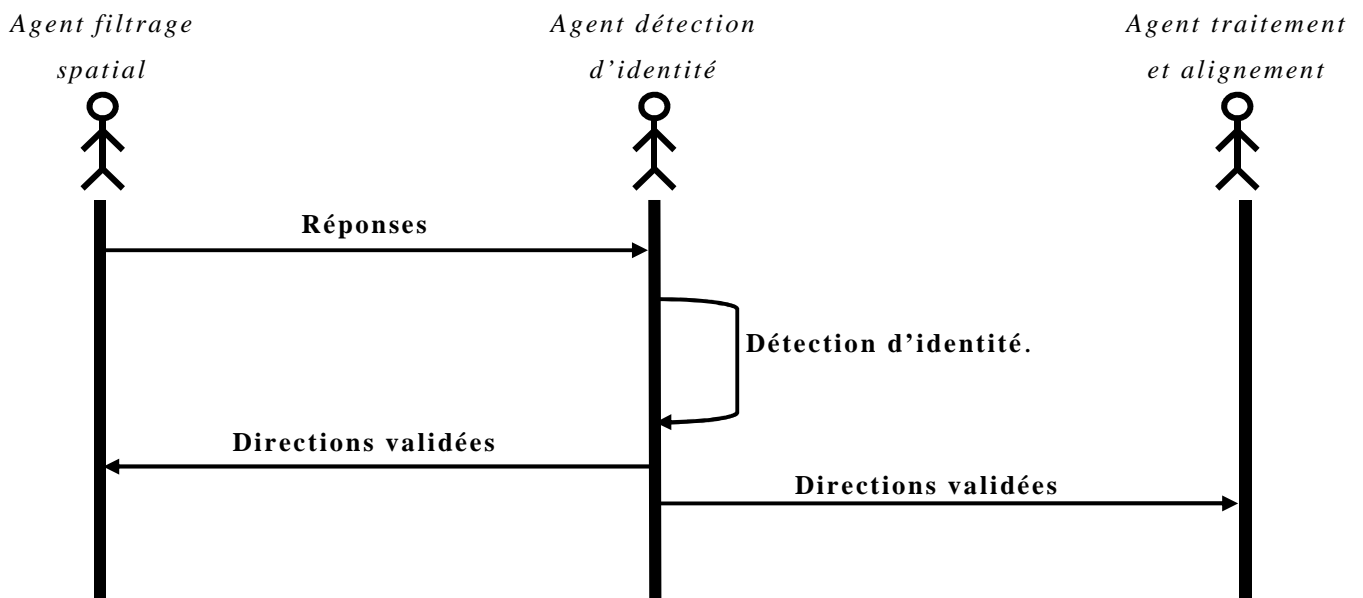
InfU : partie Information utile générée de manière aléatoire.

Pour rester dans le cadre d'une transmission bande étroite nous exploitons une modulation QPSK [1,2,3,154] 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). En effet, en pratique toutes les trames qui arrivent identifient de manière unique l'expéditeur, quel que soit la nature de l'information ou les spécifications de la transmission [2,3-15].

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.

Le comportement de l'agent détection d'identité est représenté sur la *figure-IV-17*.



*Figure-IV-17- Scénario du comportement général de l'agent détection des identités réponses.*

## **IV. Résultats et applications**

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

### **IV.1. Réseau rectiligne et uniforme**

Le *tableau-IV-1* 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  $30^\circ$ . Une seule source a été introduite suivant la direction  $10^\circ$ . La *figure-IV-18* montre le filtrage spatial réellement effectué par le système. Il apparaît clairement que le système a choisi  $0^\circ$  comme direction utile, évitant toute redondance inutile. Nous avons également remarqué que le lobe principal est relativement large et couvre la direction  $10^\circ$ . Un tel résultat est obtenu uniquement avec une réduction du nombre de capteurs dans le réseau.

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

*Tableau-IV-1 : Sorties de l'agent détection des directions incidentes sans corrections.*

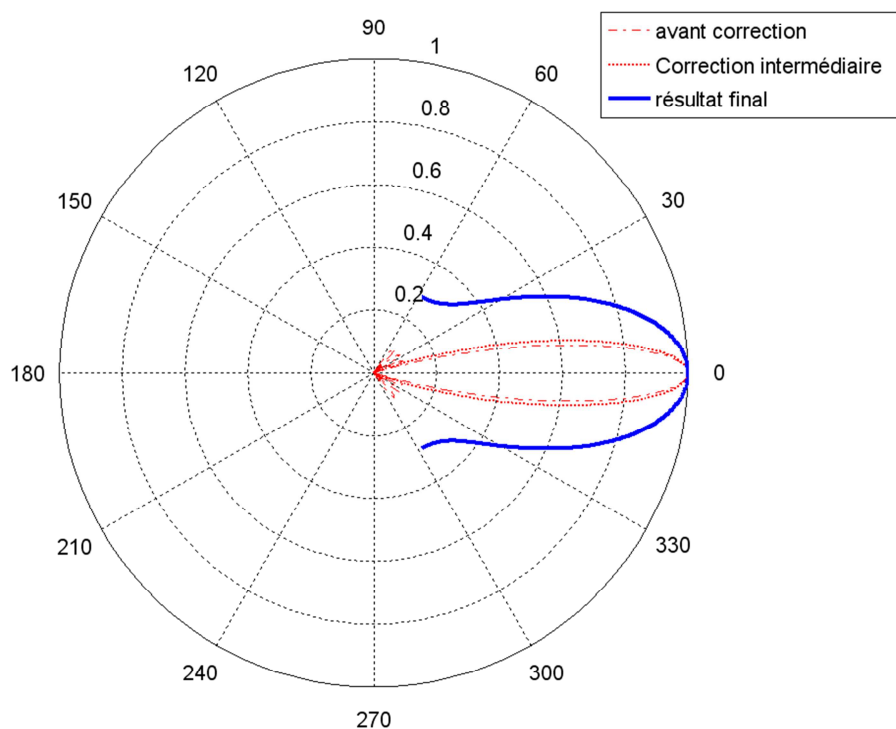


Figure-IV-18-Filtrage spatial réellement réalisé par le réseau après les corrections introduites par le système multiagents.

#### IV.2. Architecture spécifique en deux dimensions

Nous allons à présent, utiliser notre système multiagents sur un réseau plan de sept éléments, dont l'architecture a été définie par Pantelis K. Varlamos, Christos N. Capsalis, dans leur publication [155]. Dans cette architecture arbitraire les capteurs vont avoir les positions spécifiées dans le *Tableau-IV-2* [155]. Dans ce même article, les auteurs utilisent l'algorithme génétique, avec une implémentation similaire au principe des systèmes multiagents, pour effectuer une acquisition simultanée des signaux de l'environnement (*figure-IV-19*). Les résultats que nous avons obtenus pour la même architecture, sont représentés par la *figure-IV-20*. Ces résultats ne sont pas identiques à ceux obtenus dans la publication [155]. En effet, pour les directions :  $-150^\circ$  et  $30^\circ$ , nous avons obtenu un excellent filtrage en accord avec les résultats de la *figure-IV-19*. Pour les directions :  $-90^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $150^\circ$ , les résultats obtenus par notre système multiagents sont soit de grande résolution soit dépointés de  $20^\circ$  des directions désirées. De plus les gains relatifs au filtrage multiagents sont plus faibles que ceux présentés dans l'article [155]. Nous avons conclu que ceci est principalement dû au nombre de sources élevés vis-à-vis du nombre de capteurs utilisé dans le réseau ainsi que l'architecture de ce dernier.