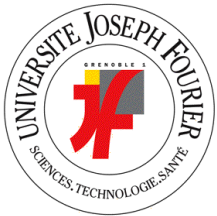




# ARCHITECTURE ET INTEGRATION D'UN MODULE DE TYPE « SMART DUST »



**Guillaume Bacles**

**Soutenance de thèse**

**Préparée à l'IMEP-LAHC**

**Sous la direction de Fabien Ndagijimana**

**Travaux financés par la région Rhône-Alpes**

**RhôneAlpes** Région

# Smart Dust?

Littéralement « Poussière intelligente »

Capteur autonome communicant

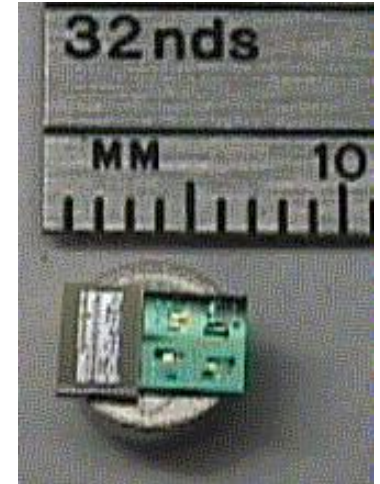


Déploiement de ces capteurs dans un environnement



**Création d'un réseau de capteurs sans fil**

- Prélèvement et traitement de données
- Informer un utilisateur ou agir sur une commande



Smart Dust, Berkeley 1991

## Domaine des capteurs sans fil

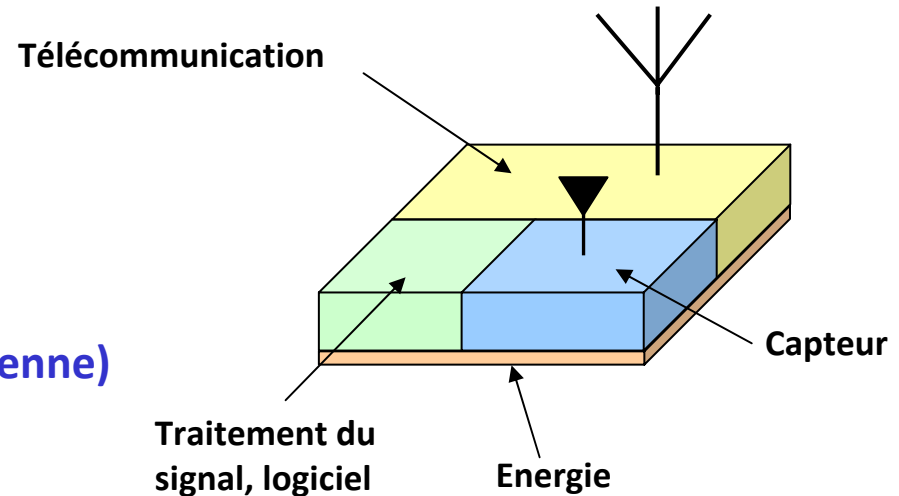
# Introduction aux capteurs sans fil

1991: Mark Weiser<sup>1</sup>, « ubiquitous computing », collaboration d'objets communicants intelligents

Notion d'environnements sensibles et intelligents.

Un module est composé :

- d'un capteur
- d'une partie logicielle
- d'une partie communicante (circuit + antenne)
- d'une source d'énergie ou transducteur



## Carrefour de thématiques:

Energie, conception RF, traitement du signal, génie logiciel, protocoles de communication, capteurs.

<sup>1</sup>Weiser, M., *Scientific American*, vol. 265 n° 3, p. 94-104, 1991

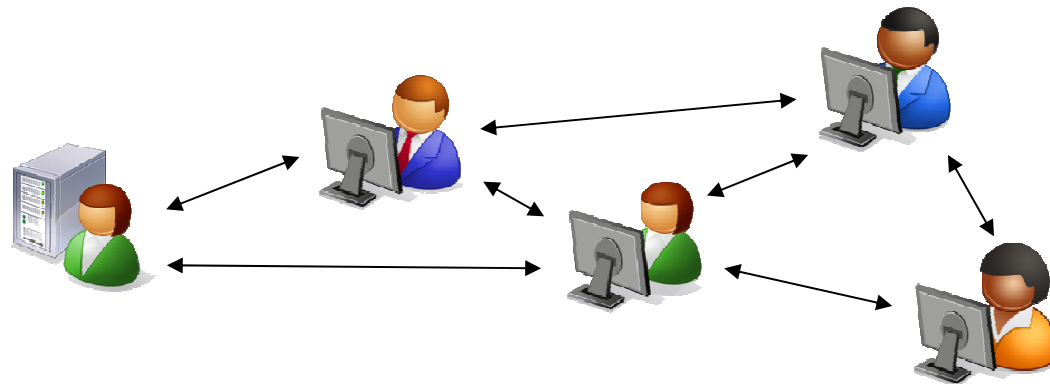
# Introduction aux capteurs sans fil

Intégration dans des **objets du quotidien** ou déploiement dans un **environnement**.

## Réseaux de capteurs :

- échanges de données pour traitement
- transmission de données vers un point

**=> Intelligence réseau**



Réseau ad-hoc

## Contraintes:

- énergétiques : grande autonomie
- dimensionnelles : objets compacts et discrets



## ***Applications***

**Grand nombre d'applications**

**Le médical**



- Surveillance et suivi de patients
- Détection d'accidents

**Le militaire**

**L'environnement**

**Les environnements intelligents**

**Les transports**

**La sécurité**

**L'industrie**



## ***Applications***

**Grand nombre d'applications**

**Le médical**

**Le militaire**



**L'environnement**

**Les environnements intelligents**

**Les transports**

**La sécurité**

**L'industrie**

- **Reconnaissance et surveillance d'une zone**
- **Détection d'activités**
- **Détection de gaz ou agents chimiques**



## ***Applications***

**Grand nombre d'applications**

**Le médical**

**Le militaire**

**L'environnement** →

**Les environnements intelligents**

**Les transports**

**La sécurité**

**L'industrie**

- Mesures physiques avec faible impact
- Détection d'entités chimiques
- Etude d'êtres vivants
- Détection de catastrophes
- Surveillance de structures « naturelles »



## ***Applications***

### **Grand nombre d'applications**

**Le médical**

**Le militaire**

**L'environnement**

**Les environnements intelligents**

**Les transports**

**La sécurité**

**L'industrie**

- **Optimisation du chauffage/climatisation/éclairage**
- **Localisation**
- **Identification**
- **Gestion d'un parc mobilier**







## ***Applications***

**Grand nombre d'applications**

**Le médical**

**Le militaire**

**L'environnement**

**Les environnements intelligents**

**Les transports**

**La sécurité**

**L'industrie**

- 
- **Sécurisation**
  - **Surveillance du trafic**



## ***Applications***

**Grand nombre d'applications**

**Le médical**

**Le militaire**

**L'environnement**

**Les environnements intelligents**

**Les transports**

**La sécurité** → **Localisation (pompiers, sauveteurs, enfants, animaux)**

**L'industrie**



## ***Applications***

**Grand nombre d'applications**

**Le médical**

**Le militaire**


**L'environnement**

**Les environnements intelligents**

**Les transports**

**La sécurité**

**L'industrie**

- 
- Maintenance
  - Localisation
  - Suivi de produits

**Cependant pas d'application phare**

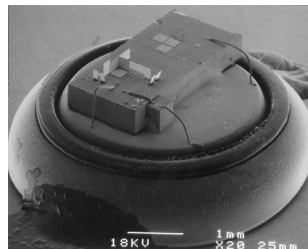
## Etat de l'art

Beaucoup de projets

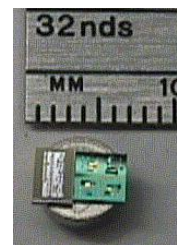
Un projet marquant : « Smart Dust » de l'université de Berkeley en 1991.



Golem Dust



Daft Dust



Smart Dust



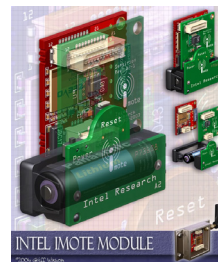
MASS, 2005



BTnode, ETH Zurich



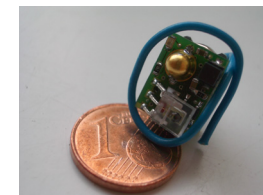
Cricket, Crossbow



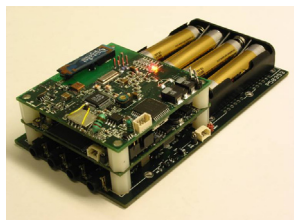
Imote, Intel



Smart-It, ETH Zurich



µPart, U. de Karlsruhe



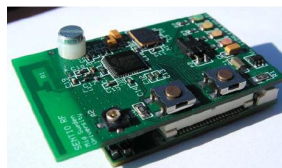
µAmp, MIT



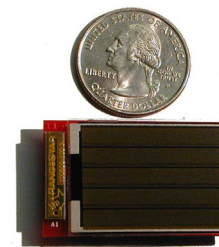
MicaZ, Crossbow



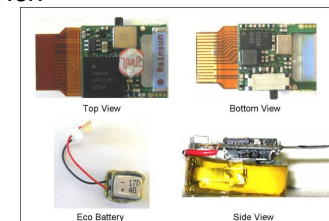
TecO z U, de Karlsruhe



Sentio U, Mid Sweden



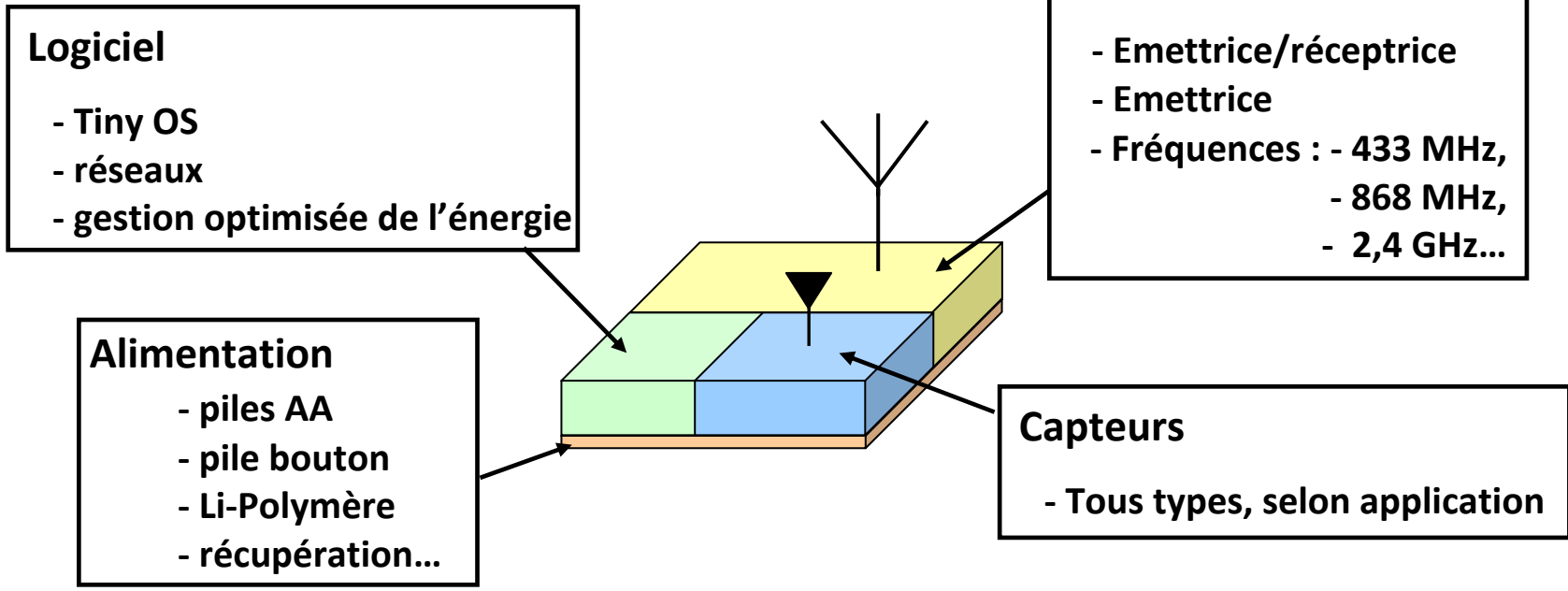
Pico beacon, Berkeley



ECO sensor, U de Californie

**Pas de consensus**

## Synthèse de l'état de l'art



Architectures dédiées ou modulaires

Pas ou peu de travaux sur les antennes



## *Orientation des travaux*

**Objectif: apporter une contribution au domaine des réseaux de capteurs**

Antennes peu étudiées et optimisées, rayonnement omnidirectionnel

GDR Micro et Nano Systèmes



**TRAVAIL SUR L'ANTENNE DE LA PARTIE COMMUNICANTE**



**1. Les réseaux d'antennes**

**2. Conception d'antennes**



# ***Plan de la présentation***

## **1. Les réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs**

1. Hypothèses – 2 scénarios
2. Motivations
3. Outils
4. Conditions
5. Traitement des scénarios 1 & 2
6. Conclusions

## **2. Conception d'antennes**

1. Concept d'antennes-package
2. Antennes étudiées
3. Design d'antennes – Antennes Dé, Cube et demi-boule agile
4. Conclusion

## **3. Conclusion et perspectives**



# ***Plan de la présentation***

## **1. Les réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs**

1. Hypothèses – 2 scénarios
2. Motivations
3. Outils
4. Conditions
5. Traitement des scénarios 1 & 2
6. Conclusions

## **2. Conception d'antennes**

1. Concept d'antennes-package
2. Antennes étudiées
3. Design d'antennes – Antennes Dé, Cube et demi-boule agile
4. Conclusion

## **3. Conclusion et perspectives**



## 2.

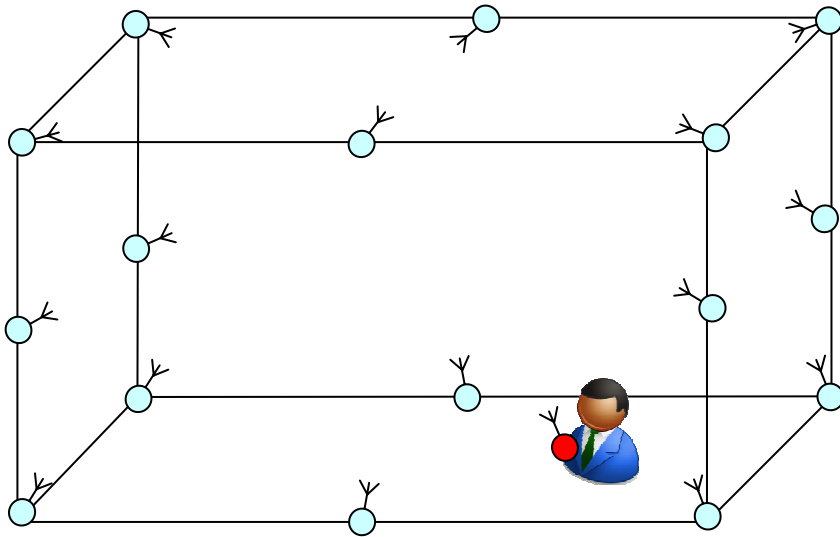
# Les réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs

## Hypothèses : 2 scénarios

### Répartition manuelle en intérieur

Récupération des informations par un utilisateur au sol

Mesure de la température

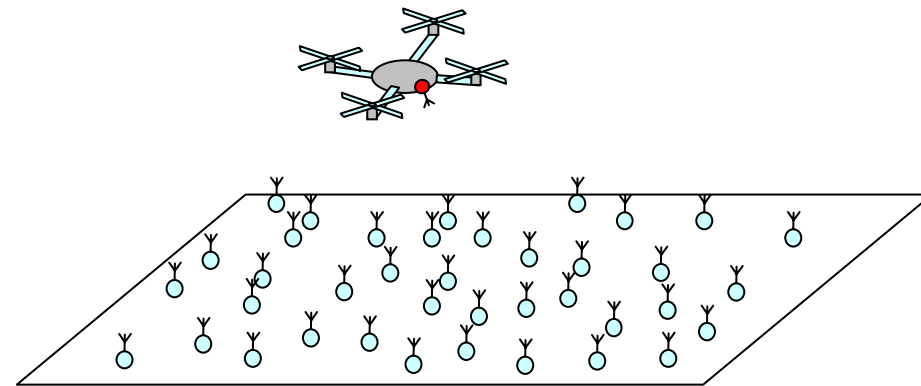


Scénario 1

### Répartition aléatoire en extérieur

Récupération des informations par voie aérienne.

Détection d'un gaz spécifique



Scénario 2

2.1

# Motivations

Rayonnement omnidirectionnel des antennes des nœuds



Pertes d'énergie



Minimiser les pertes

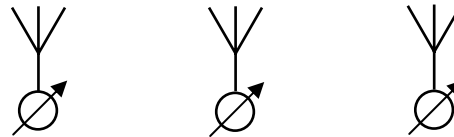
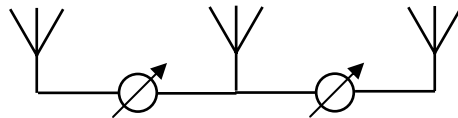


*Utiliser les antennes des nœuds en réseau*

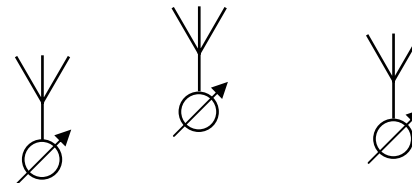


Innovation:

Réseaux classiques



Antennes non liées



Placement aléatoire

**Réseaux aléatoires d'antennes non liées**

2.2

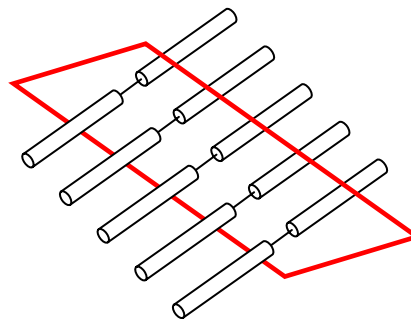
Outils

Simulation de réseaux d'antennes

- CST microwave studio
  - EMPIRE Xccel
  - Matlab => développement de codes
- } Logiciels commerciaux

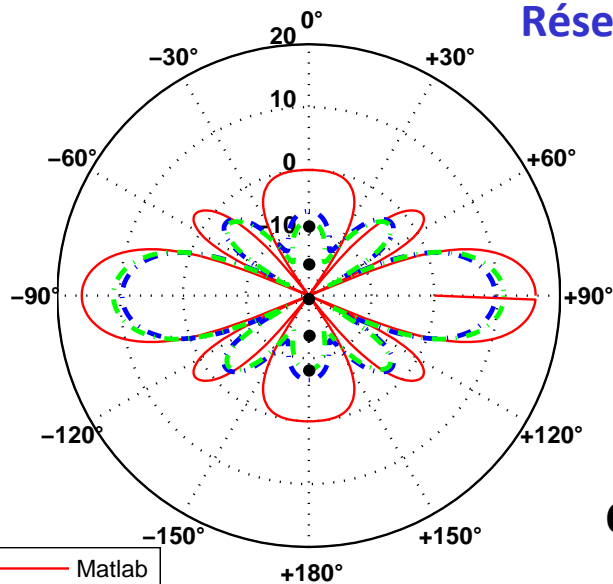
Calibrage de Matlab

Réseau de 5 dipôles espacés de  $\lambda/2$

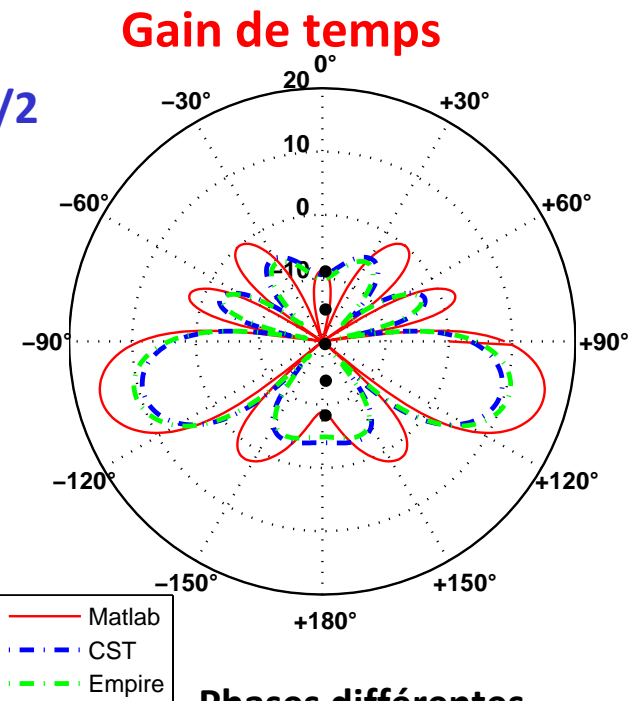


Décalage en amplitude

Concordance en termes de directions des lobes



Amplitudes et phases identiques



Gain de temps

Phases différentes

2.2

Outils

Simulation de réseaux d'antennes

- CST microwave studio
  - EMPIRE Xccel
  - Matlab => développement de codes
- } Logiciels commerciaux

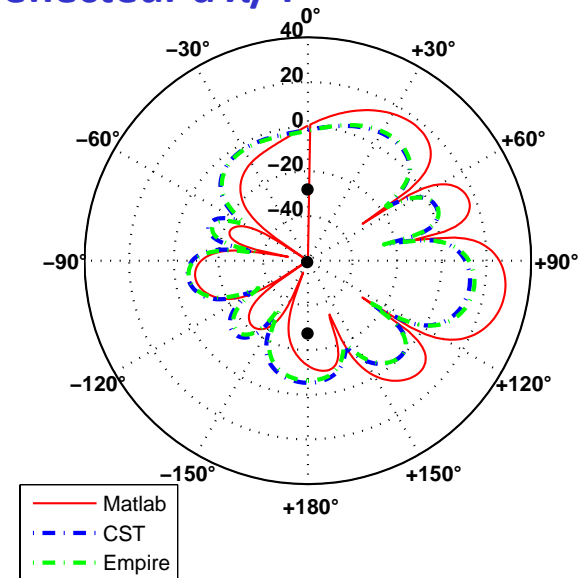
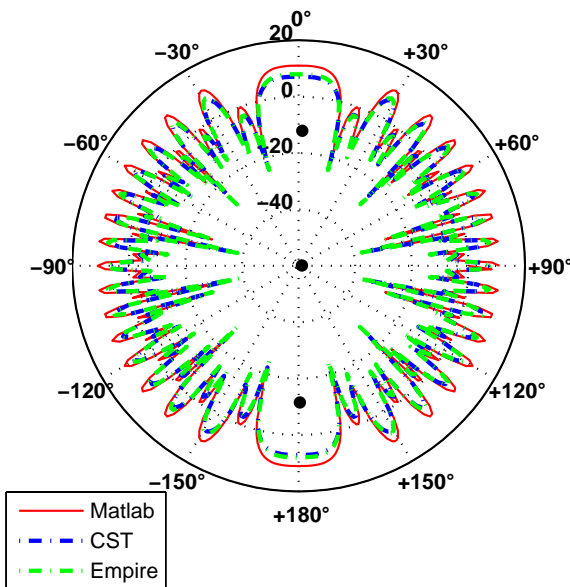
Calibrage de Matlab

Réseau de 3 dipôles espacés de  $\lambda$   
avec réflecteur à  $\lambda/4$

Réseau de 3 dipôles espacés de  $8\lambda$

Non prise en compte du  
couplage

Validation de Matlab



2.3

Conditions

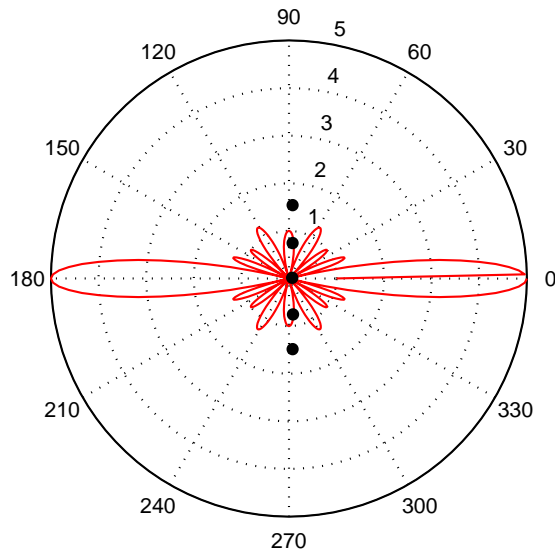
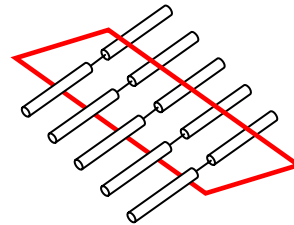
Est-ce que tous les nœuds peuvent participer au réseau?

Influence de la distance entre antennes

$$\phi_N = \frac{2\pi \sum_{x=0}^{N-1} d_x}{\lambda} \sin \theta$$

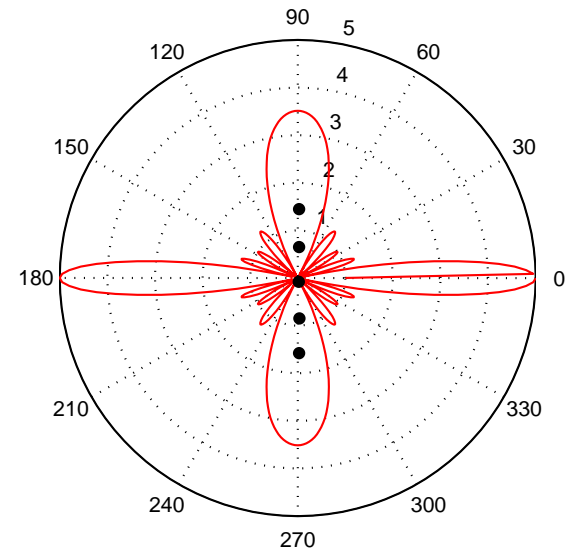
Phase de la N<sup>ième</sup> antenne

Variation de la distance entre antennes,  
 $\lambda/1.2 < d < \lambda/0.8$



$d = \lambda/1.2$

$d < \lambda$ : petits lobes secondaires



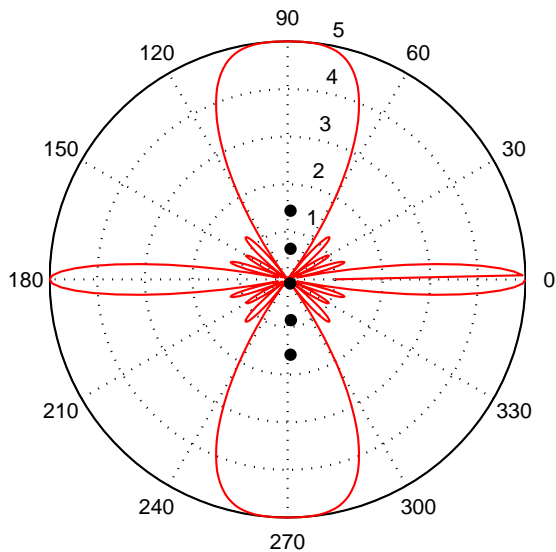
$d = \lambda/1.1$

2.3

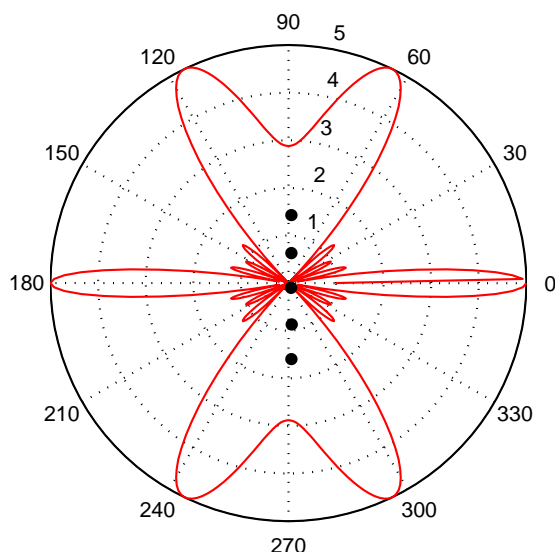
Conditions

Est-ce que tous les nœuds peuvent participer au réseau?

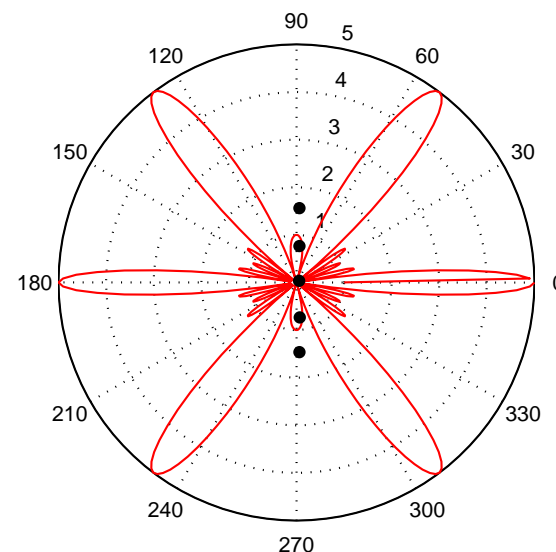
Influence de la distance entre antennes



$d = \lambda$



$d = \lambda/0.9$



$d = \lambda/0.8$

$d \geq \lambda$ : gros lobes secondaires, perte de la directivité

Condition:  $d < \lambda$ !!

Fréquence	$\lambda$
433 MHz	69 cm
868 MHz	34 cm
2,4 GHz	12,5 cm

2.4

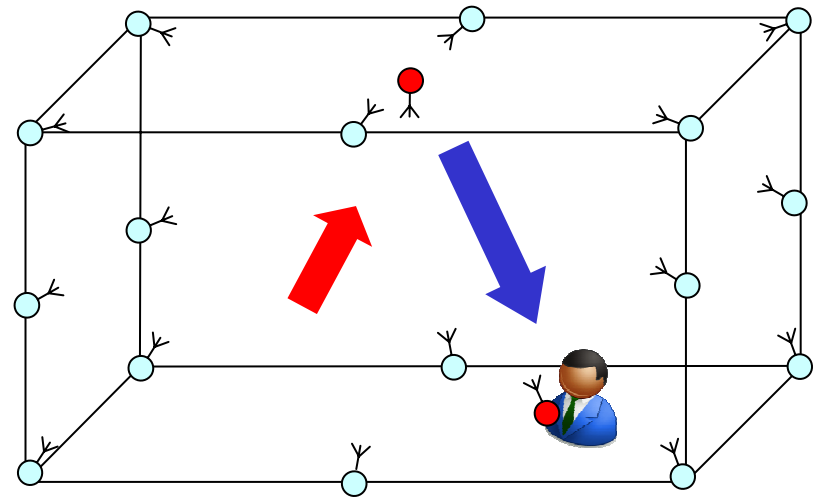
Traitement du scénario 1 (1)

Répartition manuelle en intérieur

Insertion d'une base fixe

2 phases:

- Emission des capteurs vers la base
- Emission de la base vers utilisateur final



Environnement intérieur :

- Encombrement
- Cloisons

Placement « intelligent » des capteurs

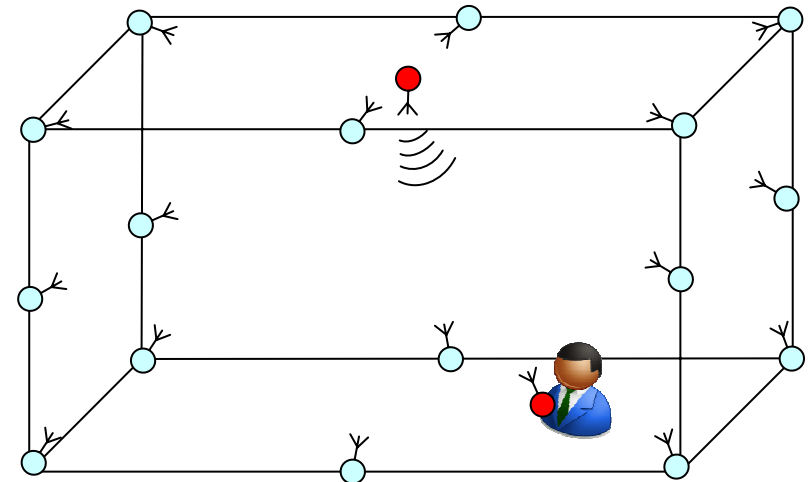
Impossibilité de créer un réseau d'antennes non liées avec les fréquences déjà utilisées ( $d > \lambda$ )

2.4

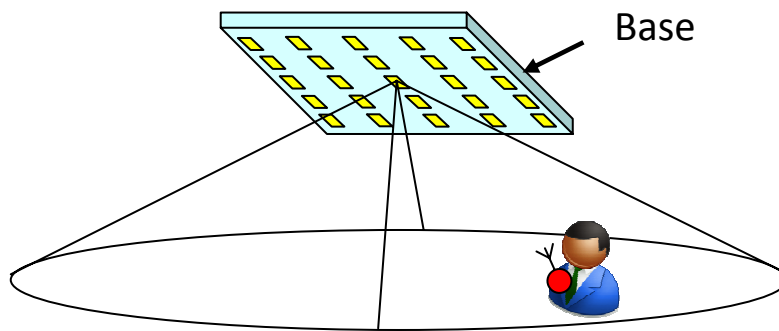
Traitement du scénario 1 (2)

Emission de la base vers utilisateur final

Intérêt pour utiliser un réseau d'antenne classique si utilisateur mobile



Réseau d'antennes planaires



Ecriture d'un code Matlab pour simuler un réseau d'antennes

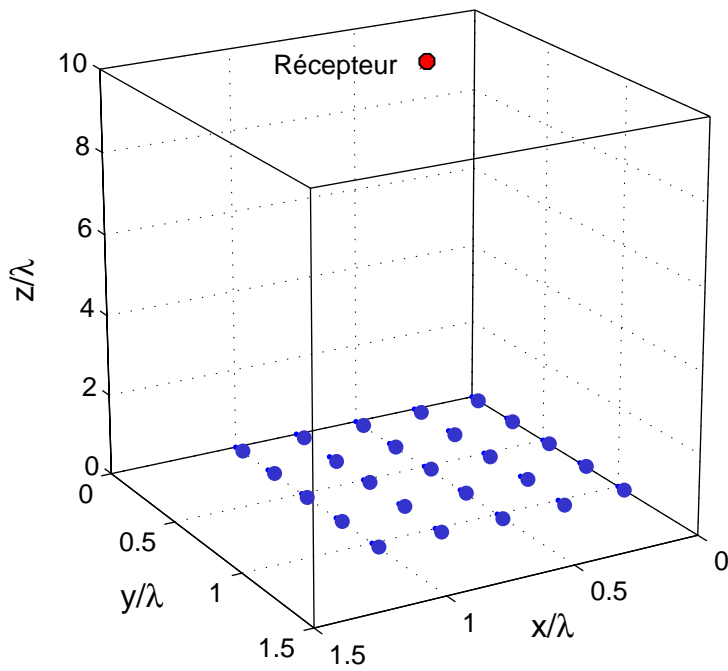


2.4

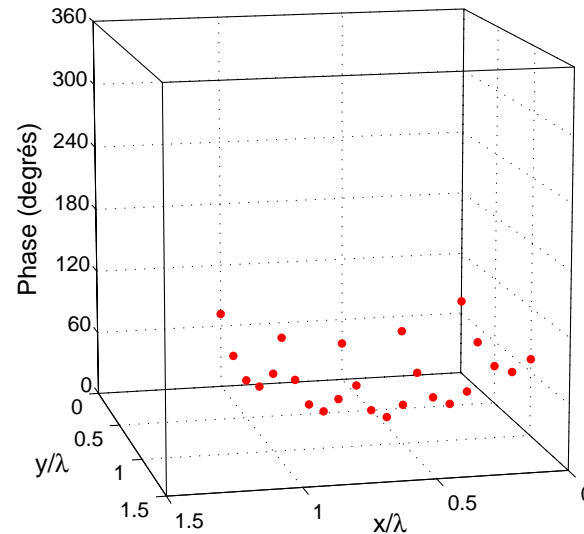
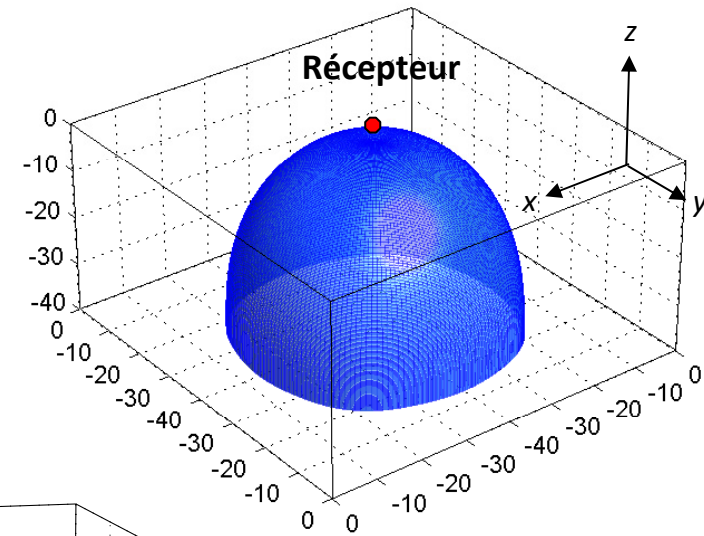
Traitement du scénario 1 (3)

Emission de la base vers utilisateur final

Simulation d'un réseau linéaire de 5×5 antennes,  $d=\lambda/4$ , récepteur à  $10\lambda$ .



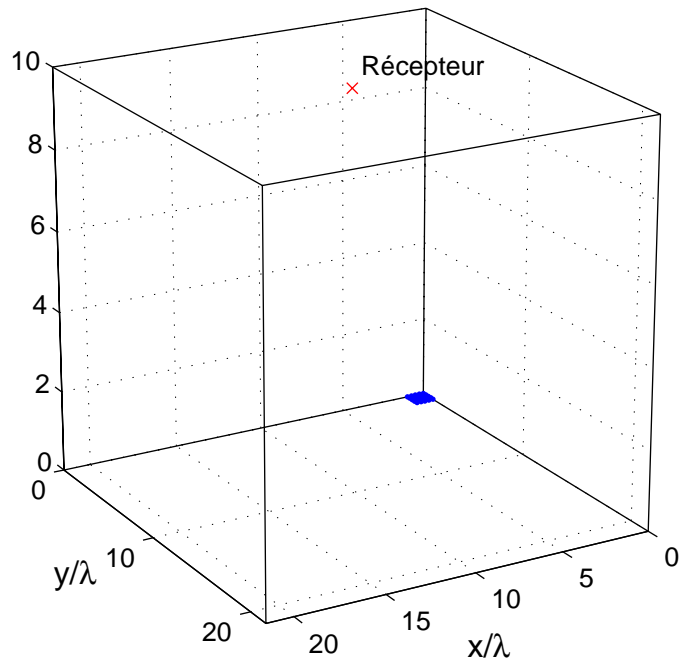
Récepteur à la verticale



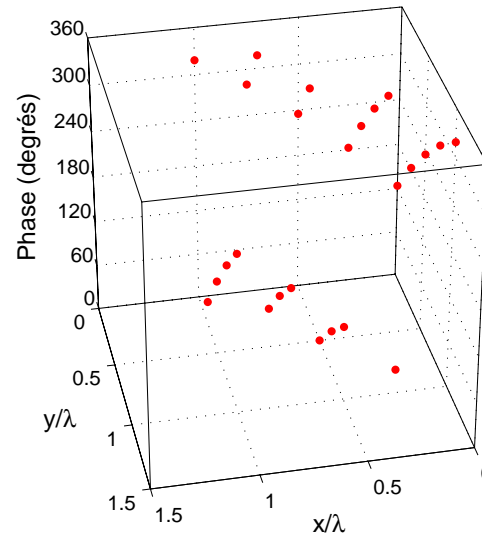
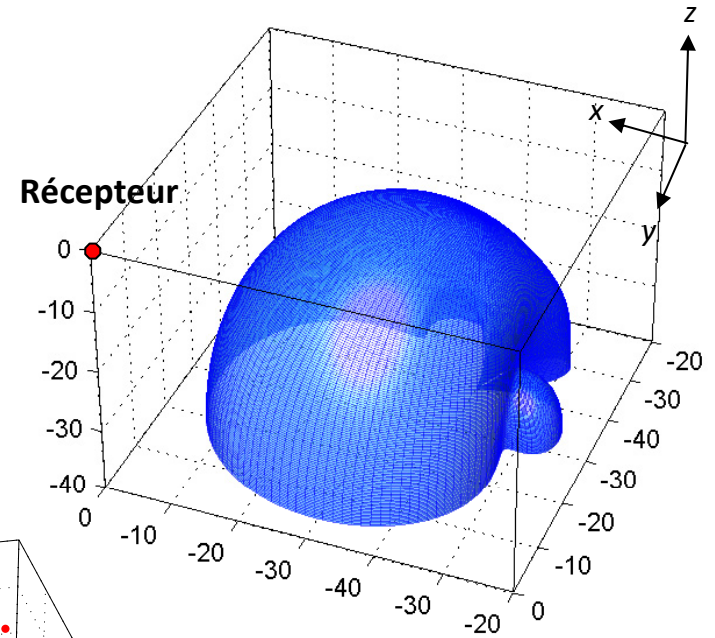
2.4

Traitement du scénario 1 (3)

Emission de la base vers utilisateur final



Récepteur à 45°



**Conclusion du scénario 1**  
- Impossibilité en l'état  
- Utilisation d'un réseau  
« classique »

2.4

## Traitement du scénario 2

### Répartition aléatoire en extérieur

**Environnement extérieur:**

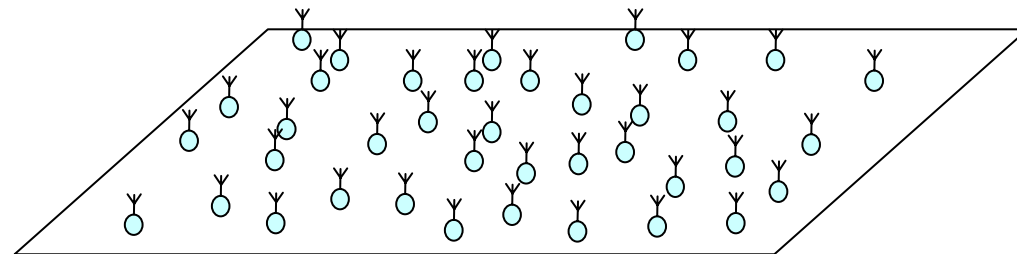
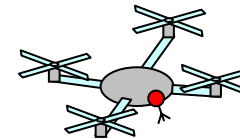
- Environnement dégagé
- Grandes distances

Placement aléatoire des capteurs par voie aérienne

**Probabilité de créer un réseau d'antennes**

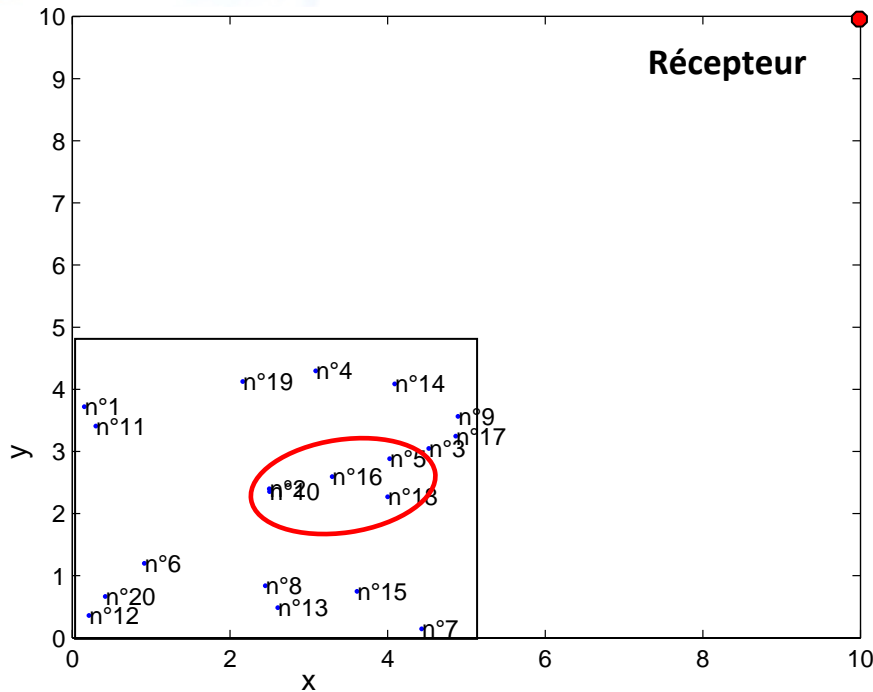
### Simulation de la constitution du réseau sous Matlab

- 1) Répartition aléatoire de modules
- 2) Sélection des antennes du réseau ( $d < \lambda$ )
- 3) Choix du réseau
- 4) Calcul des phases



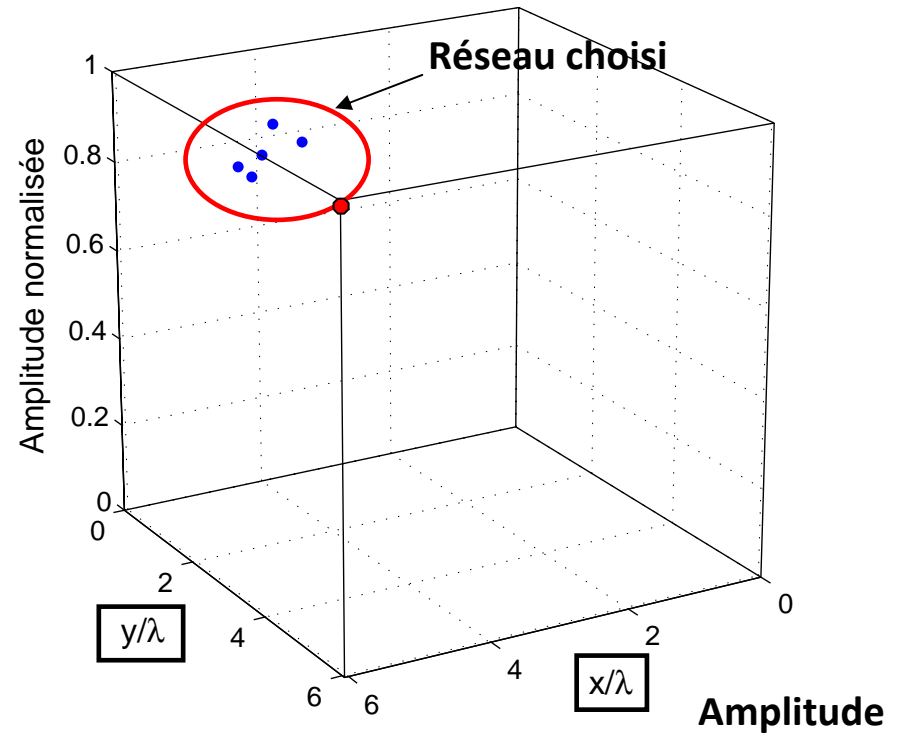
2.4

Traitement du scénario 2 - Simulation



Exemple:

- 20 antennes sur 25m<sup>2</sup>
- Fréquence 433 MHz
- Récepteur à 10m de haut

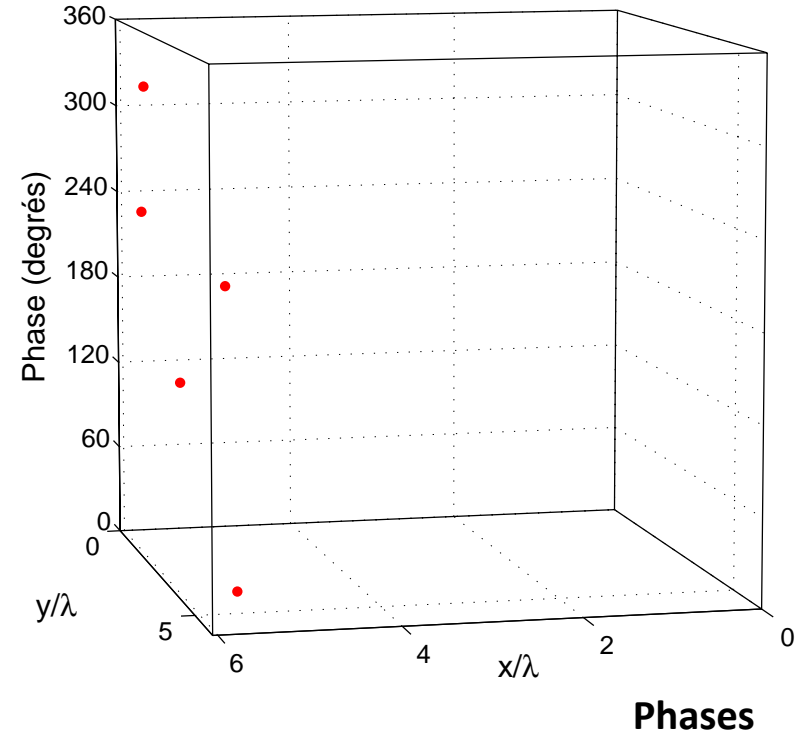


Résultat:

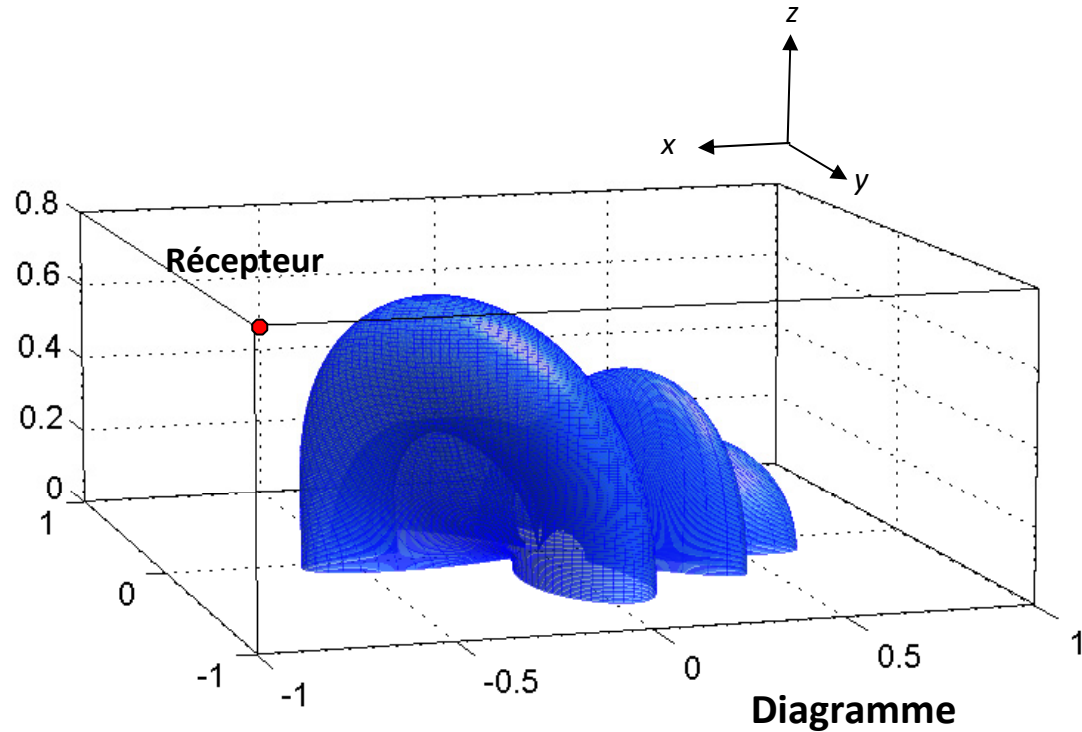
- 5 réseaux créés au total
- 1 réseau de 5 antennes

2.4

Traitement du scénario 2 - Simulation



Calcul des phases pour émettre vers le récepteur



Lobe principal orienté vers le récepteur

2.4




## Traitement du scénario 2 - Application du code

### Nombre de capteurs à déployer?

**Objectif:** réseaux d'au moins 2 antennes

**Méthode statistique:** 50 expériences pour chaque combinaison densité/fréquence sur 100m<sup>2</sup>

Fréquences: 433 MHz, 868 MHz, 2,4 GHz

Fréquence	$\lambda$	Nombre minimal d'antennes
433 MHz	69 cm	 (80)
868 MHz	34 cm	 (120)
2,4 GHz	12,5 cm	 (800)

Plus la fréquence est haute, plus il faut de capteurs pour créer un réseau

**Dilemme:** monter en fréquence diminue les chances de créer un réseau

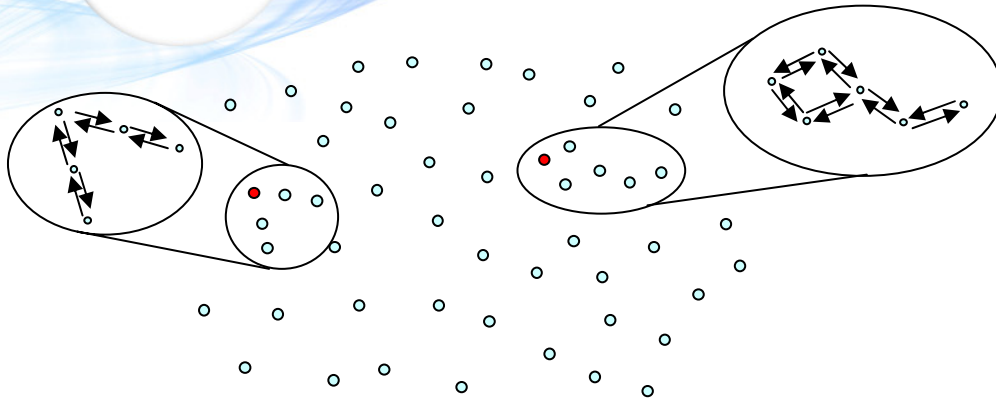
Constitution des réseaux



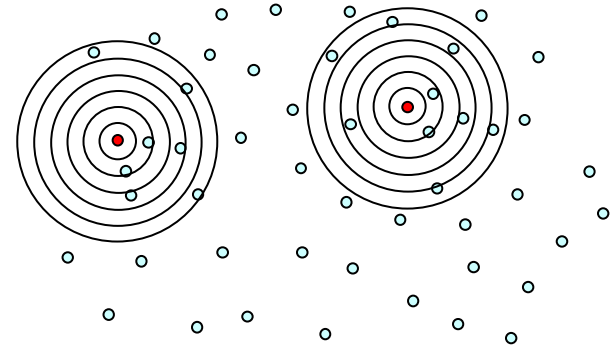
- Localisation physique: RSS, TOA, AOA
- Regroupement d'antennes et choix: algorithme

2.4

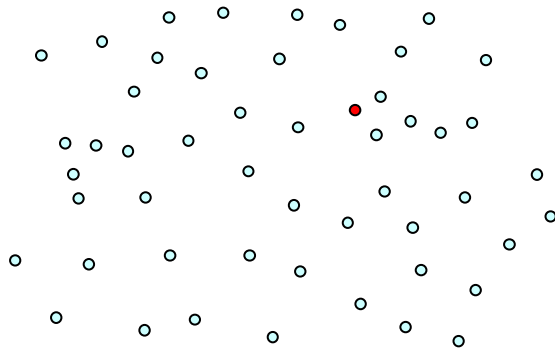
Traitement du scénario 2 - Application du code



1) Regroupement d'antennes en réseaux, désignation de MAITRES



2) Comparaison entre réseaux



3) Choix du réseau et de son MAITRE

**Conclusion du scénario 2:**

- Possibilité sous certaines conditions
- Dilemme
- Probabilité d'échec non nulle!

2.4

## Conclusion

2 scénarios

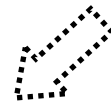
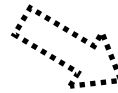


**Répartition manuelle en intérieur**

Impossibilité aux  
fréquences usuelles

**Répartition aléatoire en extérieur**

Probabilité non nulle  
si densité suffisante



**Basses fréquences**

**Bénéfice: Optimisation du rayonnement**

Mais...

=> **Enorme besoin en logiciel**

=> **Difficilement applicable dans le cas de capteurs mobiles**





# ***Plan de la présentation***

## **1. Les réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs**

1. Hypothèses – 2 scénarios
2. Motivations
3. Outils
4. Conditions
5. Traitement des scénarios 1 & 2
6. Conclusions

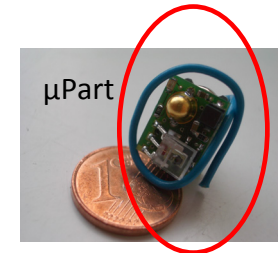
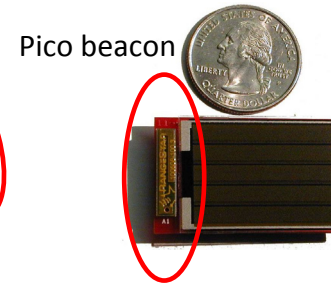
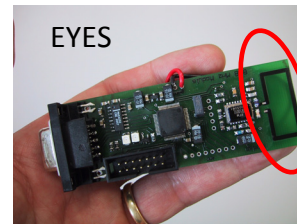
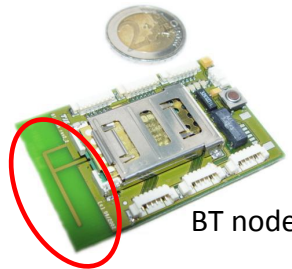
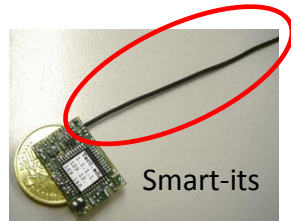
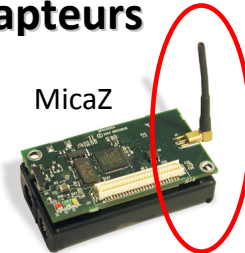
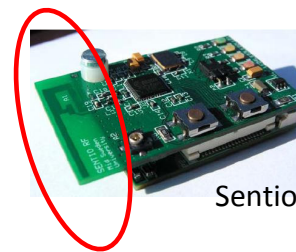
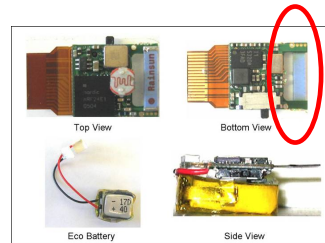
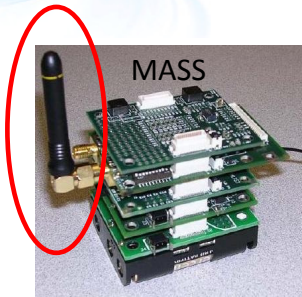
## **2. Conception d'antennes**

1. Concept d'antennes-package
2. Antennes étudiées
3. Design d'antennes – Antennes Dé, Cube et demi-boule agile
4. Conclusion

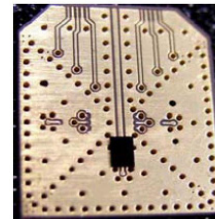
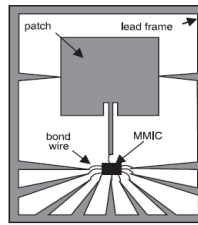
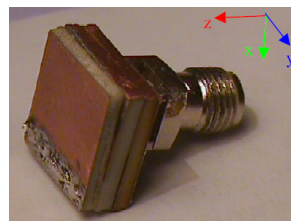
## **3. Conclusion et perspectives**

# Conception d'antennes

## Antennes utilisées dans les réseaux de capteurs



### Travaux sur les antennes:



Antennes monopôle ¼ d'onde, dipôle ½ onde, hélicoïdale, PIFA, céramique, boucle... intégrées ou non, très rarement « packagées ».

Peu de travaux sur les antennes, souci d'intégration mais non prise en compte du package.

## Etude de nouvelles antennes

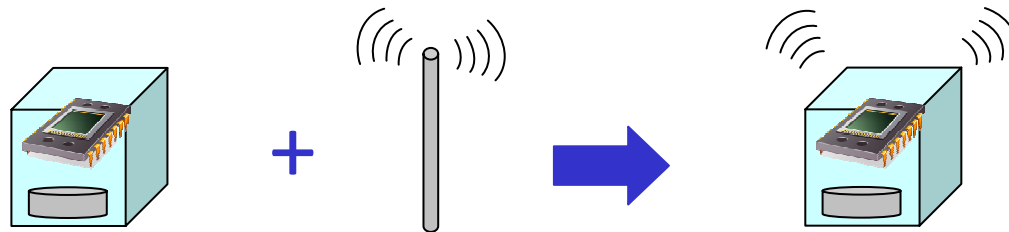
<sup>1</sup> Mendes P. et al., *Radio and Wireless IEEE Conference*, pp.419 – 422, 2004

<sup>2</sup> Song, P. et al., *Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 150, No. 4 pp.290 – 294, 2003

<sup>3</sup> Talukder, P. et al., *IEEE International Microwave Symposium Digest*, pp. 1776-1779, 2006

## Concept d'antennes-package

Réponse au problème de l'encombrement des antennes et du packaging

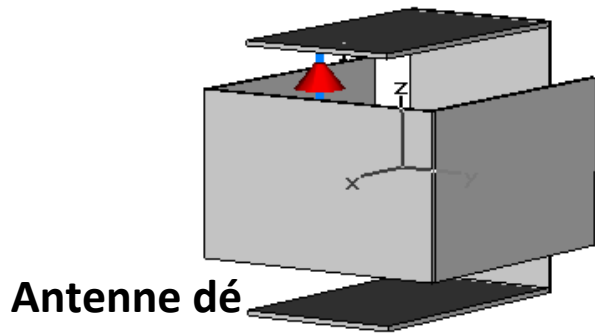


Dans les réseaux de capteurs:

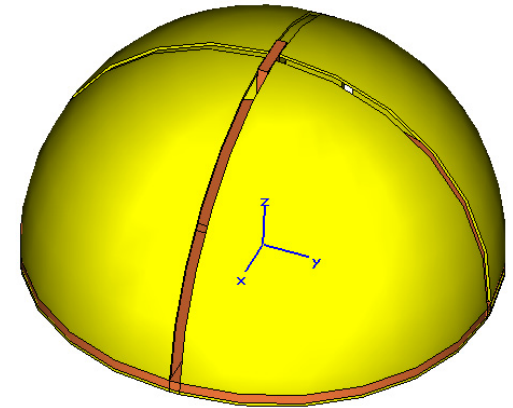
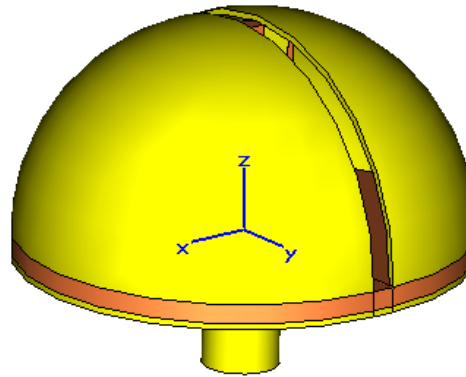
- communication entre nœuds ou nœuds/base
- faible encombrement: antennes compactes
- efficacité: souci d'économie d'énergie
- robustesse: tenue mécanique et climatique
- positionnement: émission bien orientée

Antennes étudiées

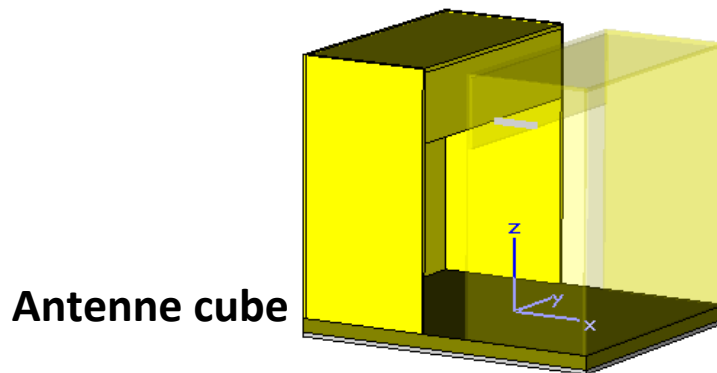
Simulation d'antennes cubiques et sphériques à 2,4 GHz



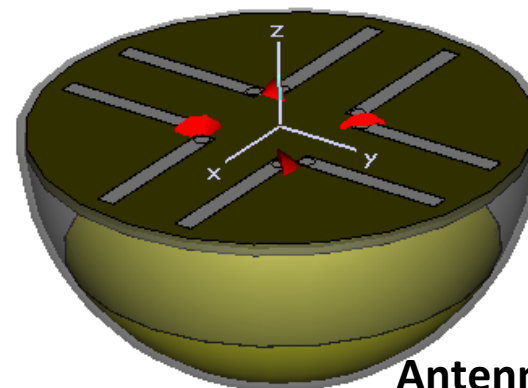
Antenne dé



Antennes hémisphériques



Antenne cube

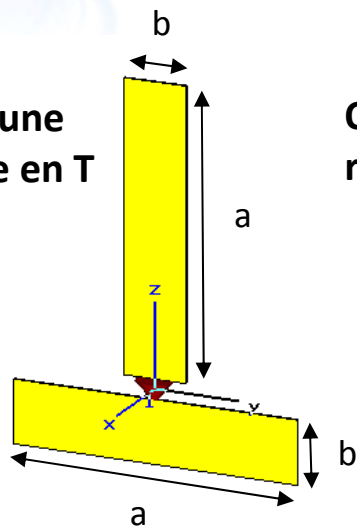


Antenne demi-boule agile

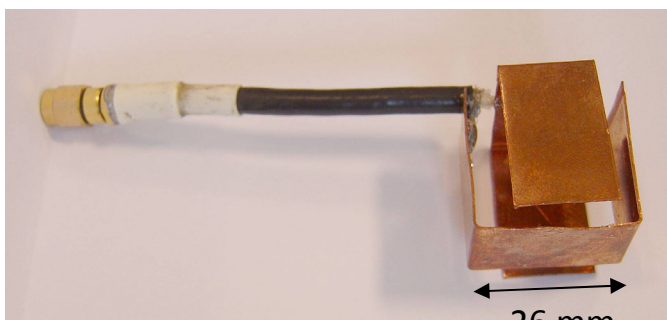
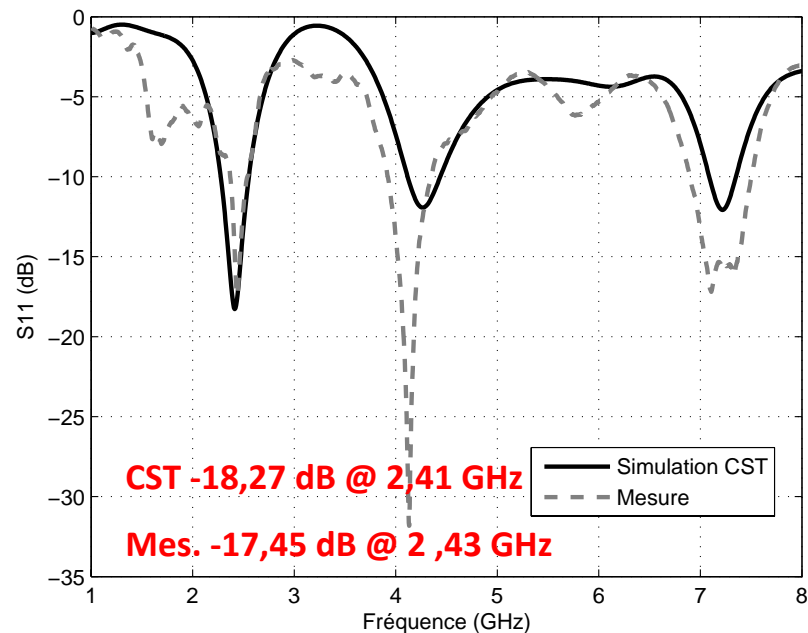
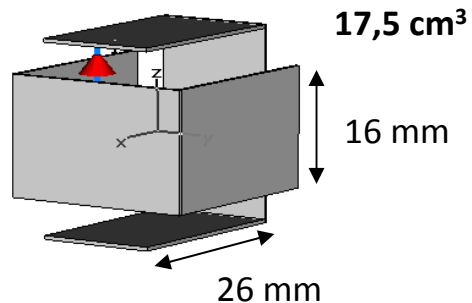
## 2.3

### Antenne dé

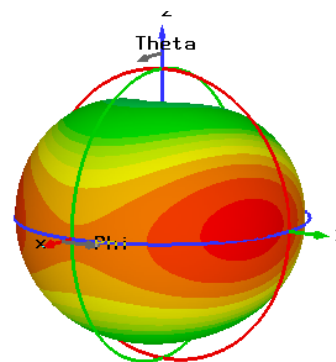
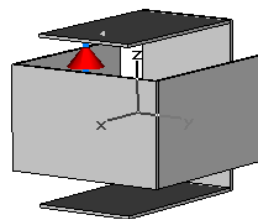
Piage d'une structure en T



Optimisation sur  $a$  et  $b$  pour résonner entre 2,4 et 2,45 GHz



Réalisation



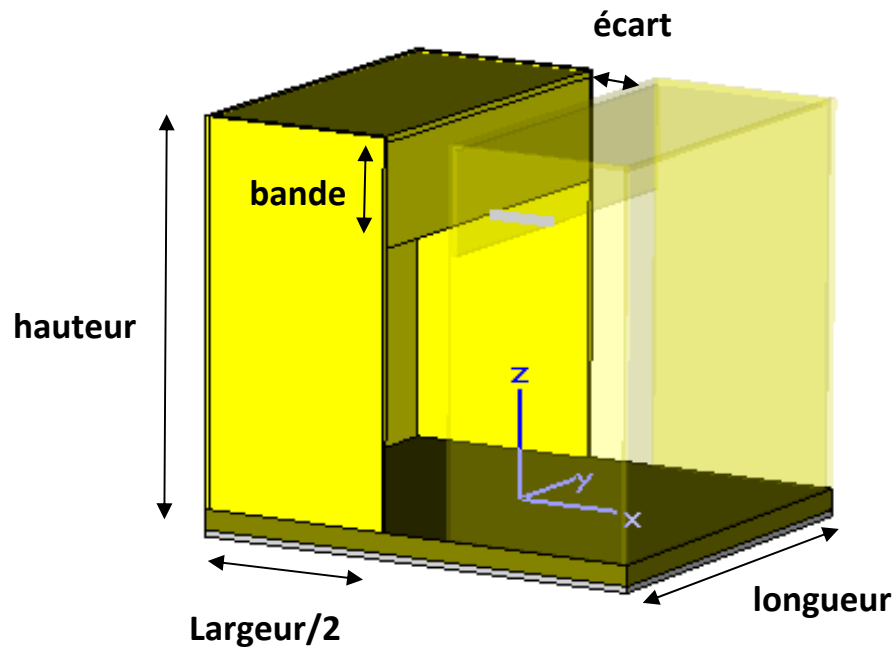
Gain 2,5 dBi

Ouverture de  $114^\circ$  en  $x$  et de  $92^\circ$  en  $y$

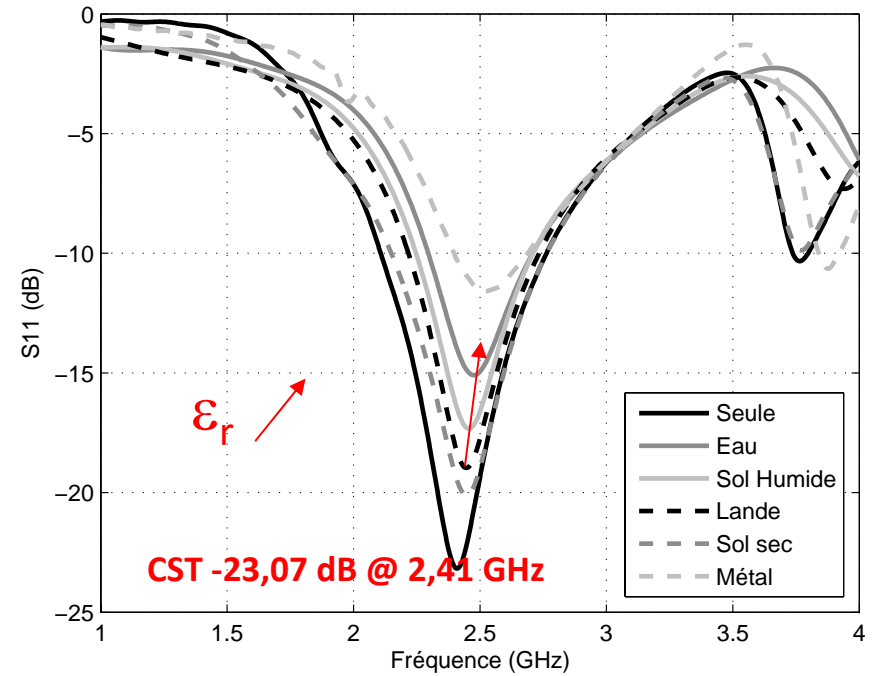
Intérêt si bien positionnée

### Antenne cube

#### Design

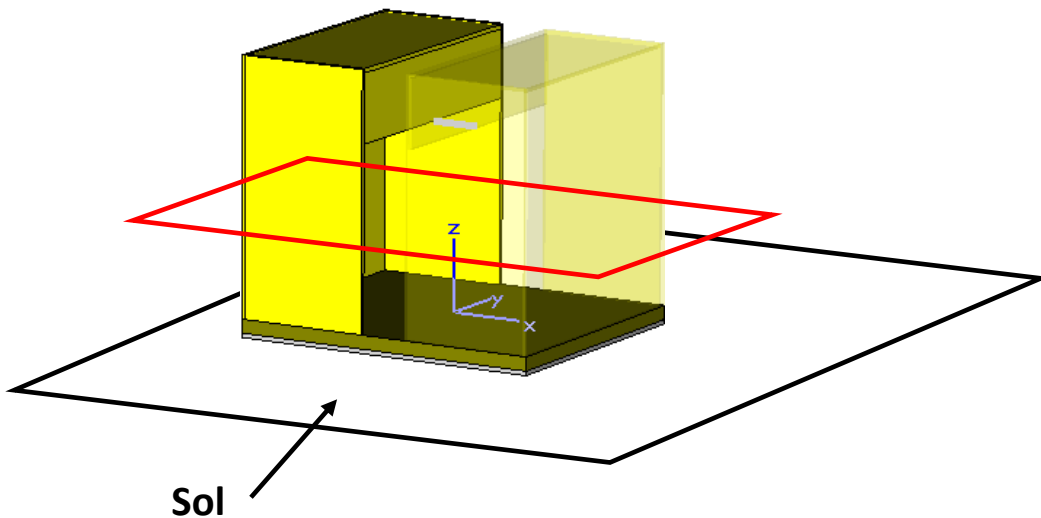


#### Sensibilité à l'environnement extérieur

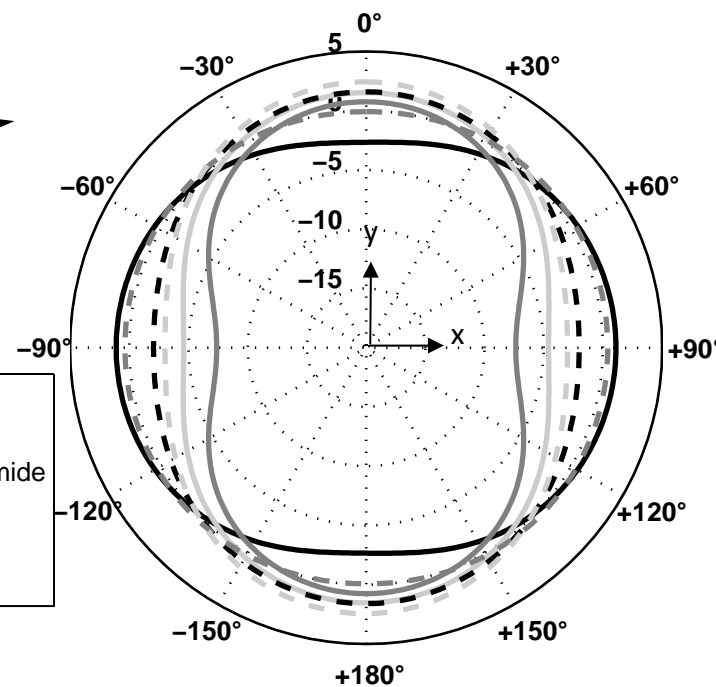


# Antenne cube

## Sensibilité à l'environnement extérieur



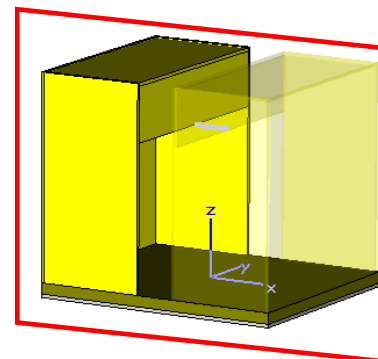
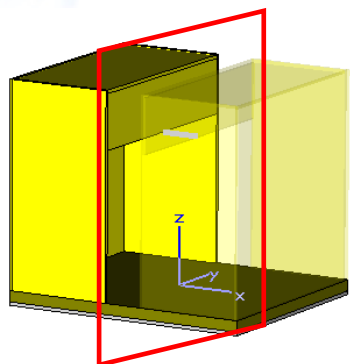
- Seule
- Eau
- Sol Humide
- - - Lande
- - - Sol sec
- - - Métal



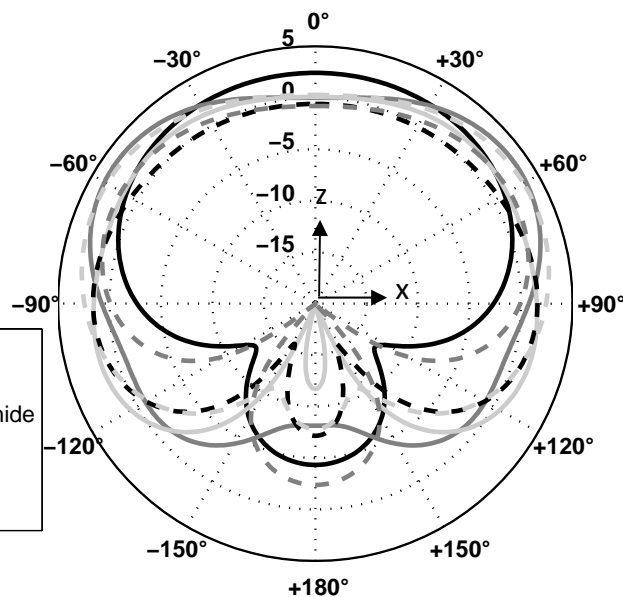
**Influence de l'environnement sur le diagramme de rayonnement**

# Antenne cube

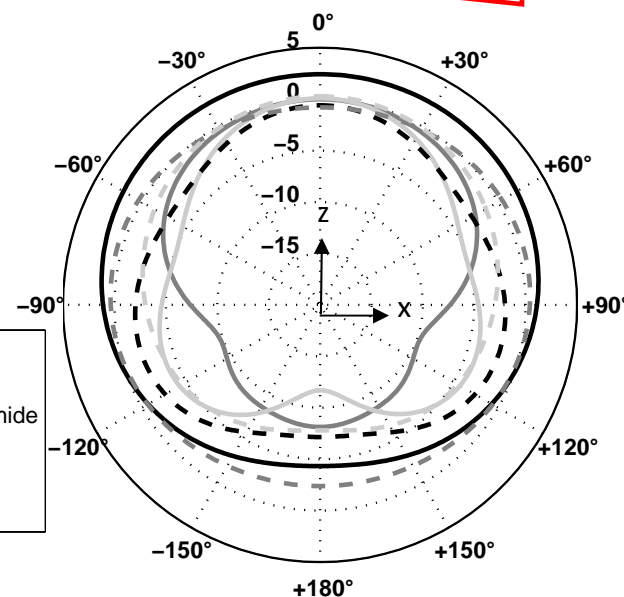
## Sensibilité à l'environnement extérieur



**Bon fonctionnement  
du plan réflecteur**



- Seule
- Eau
- Sol Humide
- - - Lande
- - - Sol sec
- - - Métal

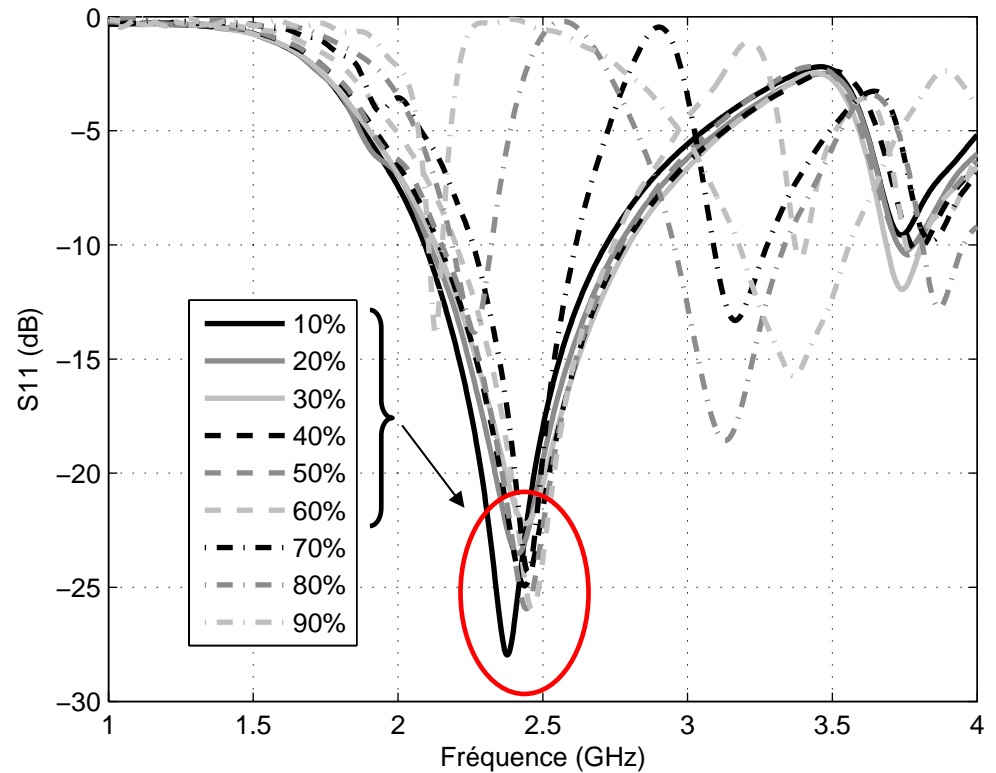
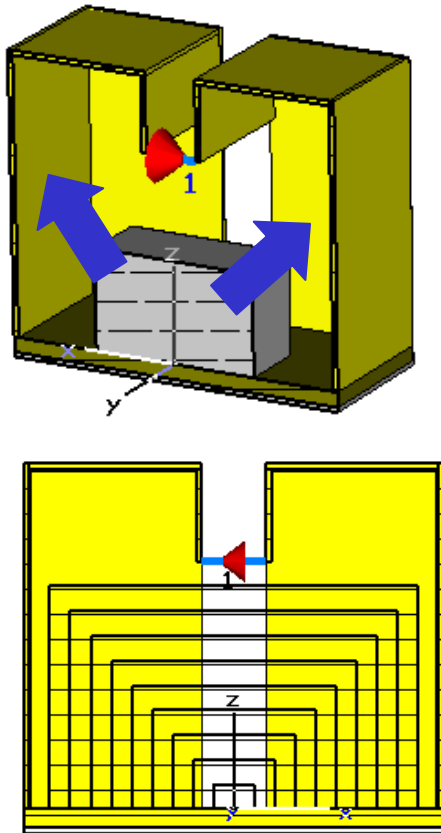


- Seule
- Eau
- Sol Humide
- - - Lande
- - - Sol sec
- - - Métal



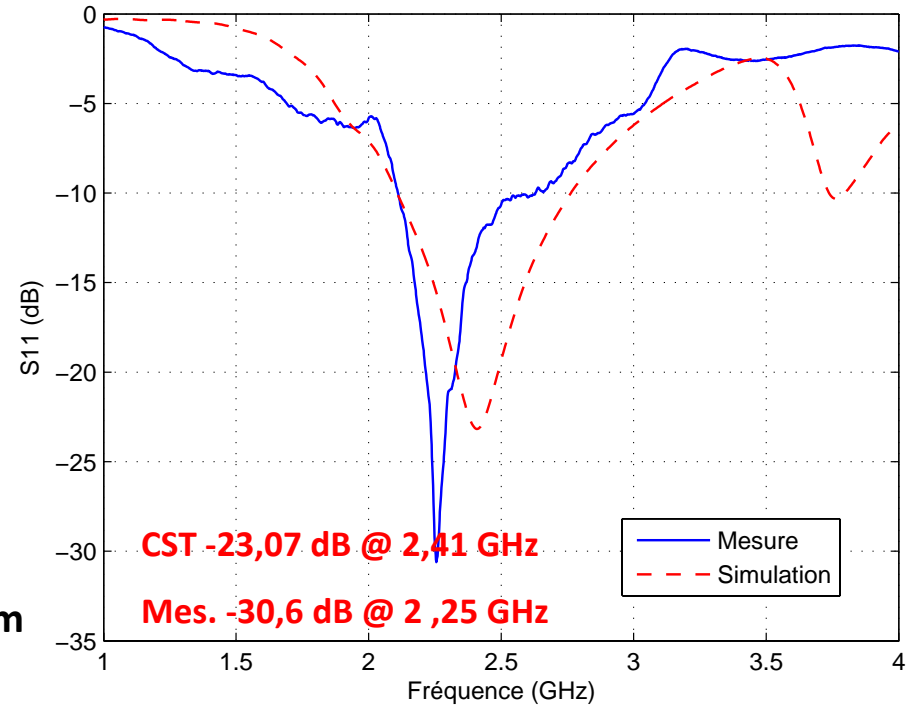
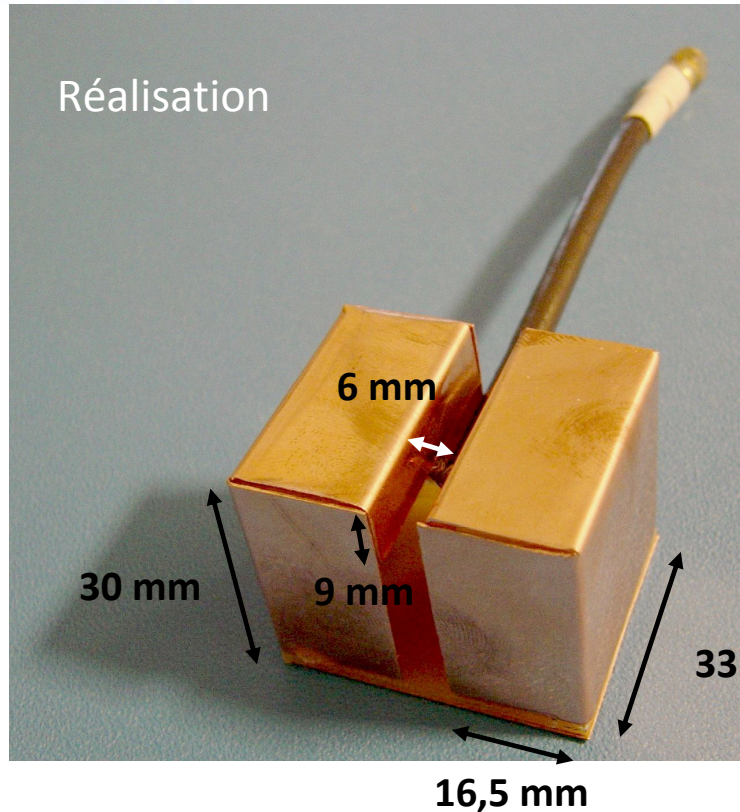
# Antenne cube

## Sensibilité à l'environnement intérieur



**Insensibilité jusqu'à 60% des dimensions intérieures**

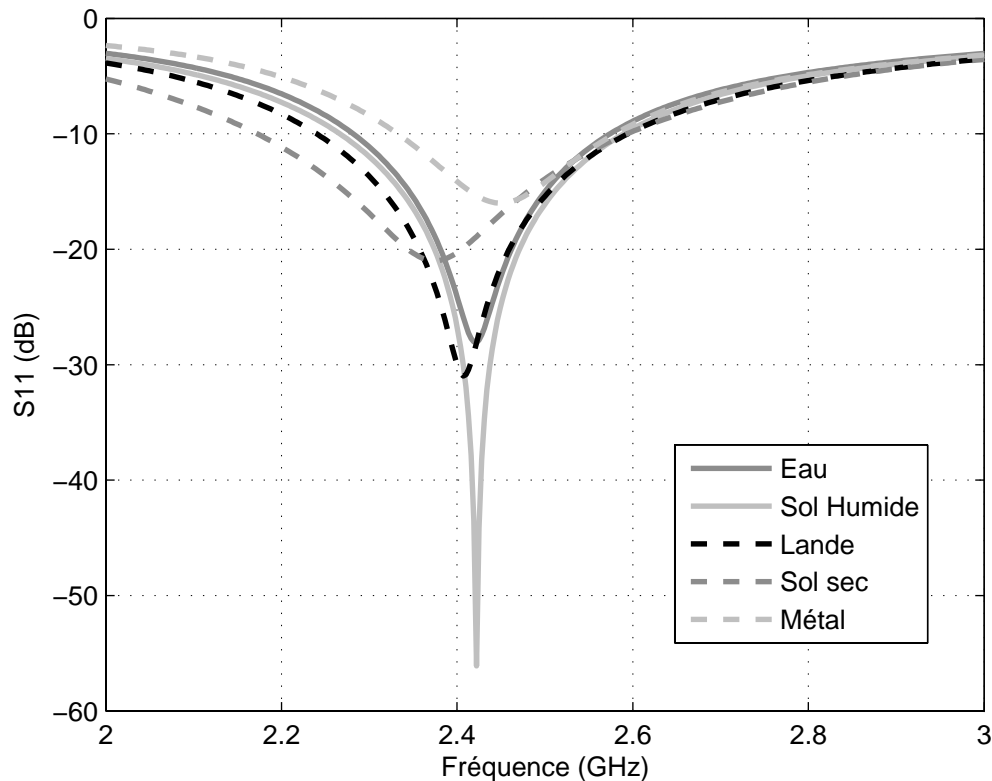
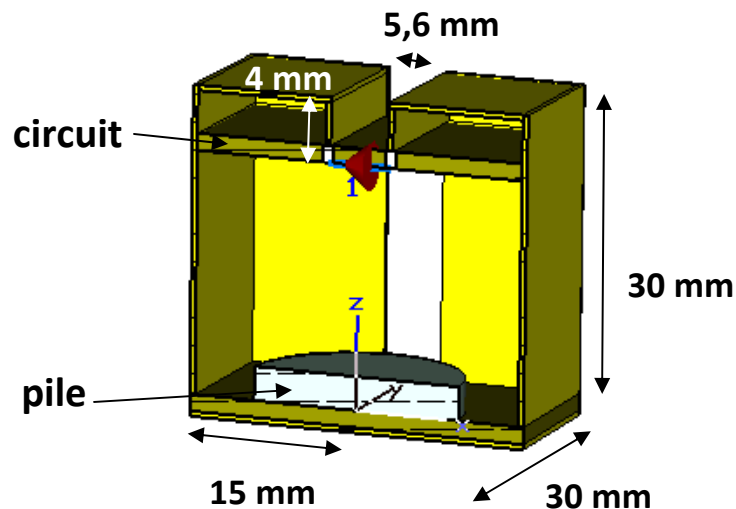
# Antenne cube



Problèmes mécaniques du au pliage du cuivre et à la soudure du port.

Antenne cube

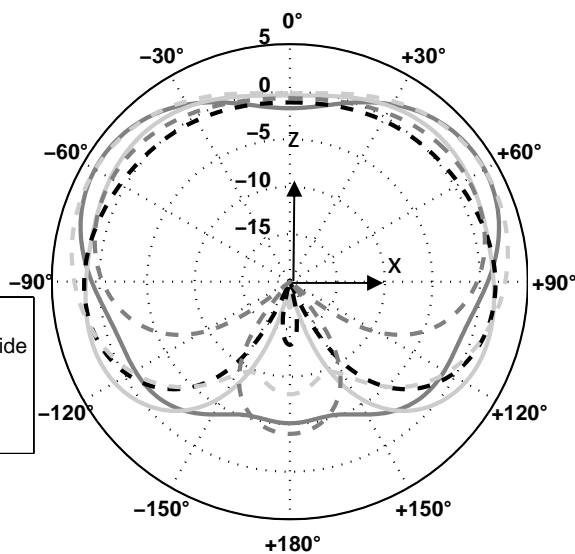
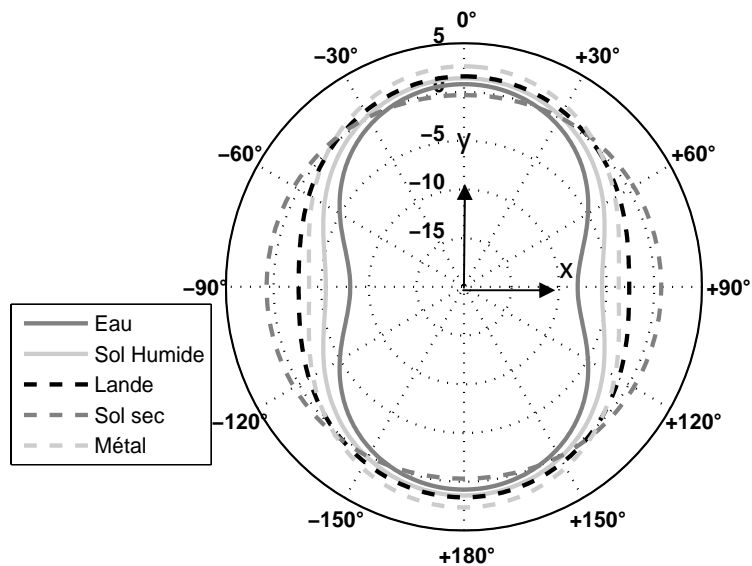
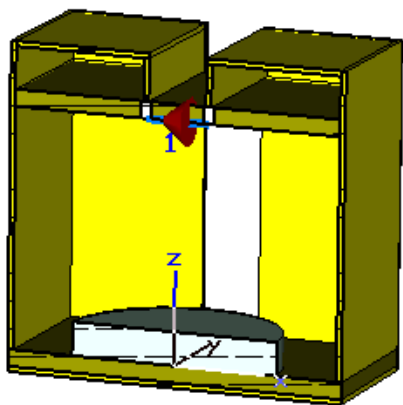
Optimisation avec ajout de composants sur sol humide



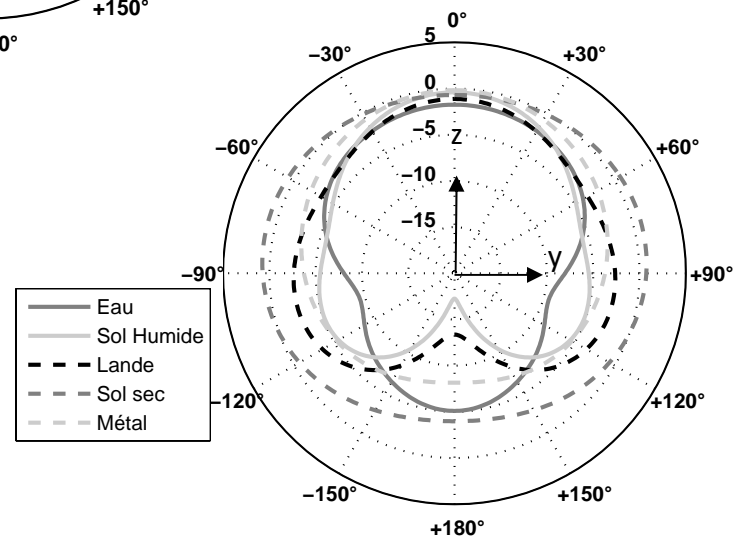
Sol	Fréquence	Adaptation
Eau	2,42 GHz	-28,07 dB
Sol humide	2,42 GHz	-56,10 dB
Lande	2,407 GHz	-30,98 dB
Sol sec	2,374 GHz	-21,01 dB
Métal	2,449 GHz	-16,01 dB

## 2.3

### Antenne cube



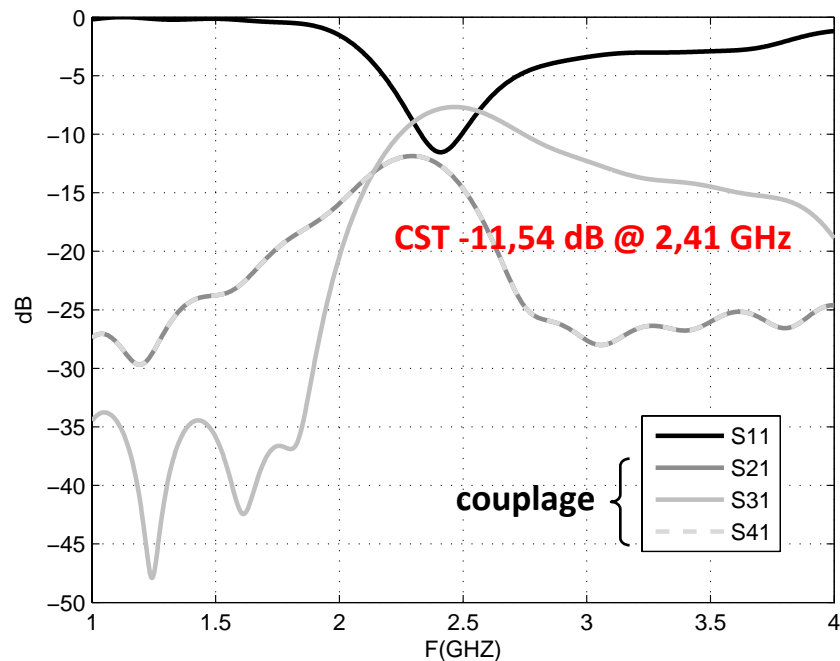
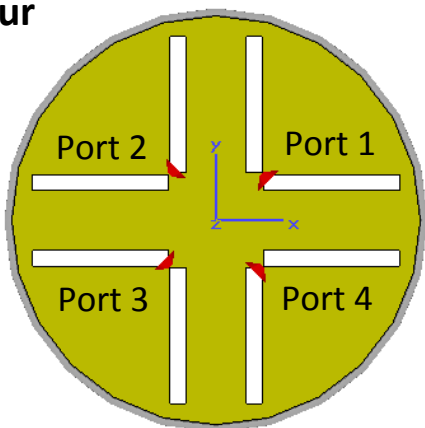
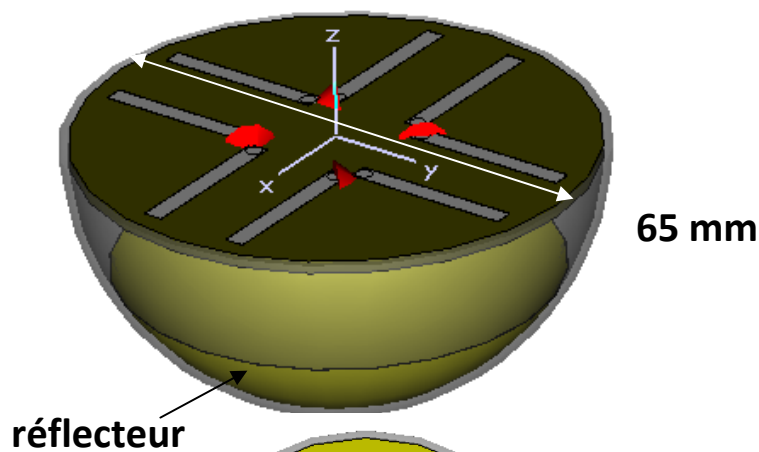
**Plus faible  
dépendance du  
diagramme de  
rayonnement**



# Antenne demi-boule agile

Demi-boule: face plane horizontale

Agile: plusieurs directions d'émission



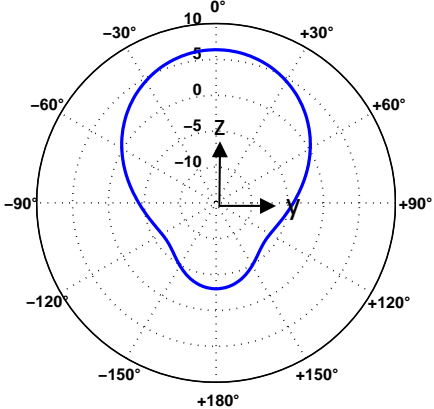
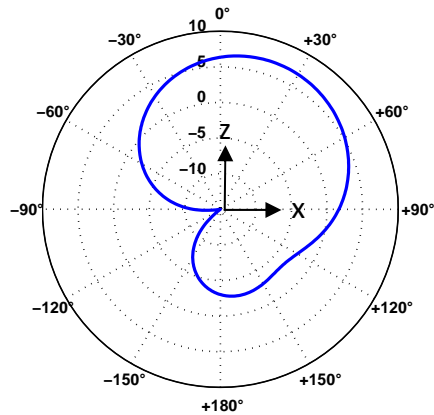
## Chute d'une demi-sphère

Configuration	$\lambda$
Seule	50
Lestée	50
Élément flottant	85

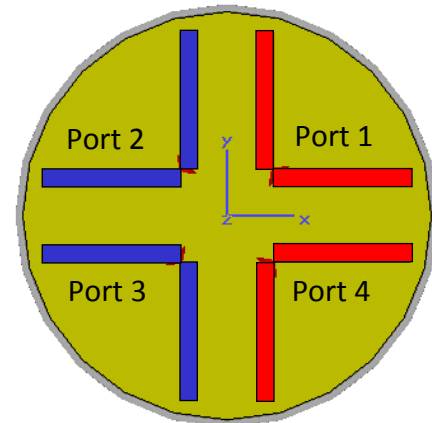
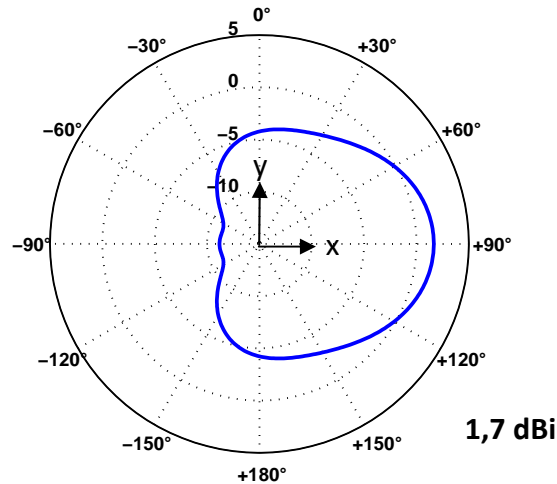
### Antenne demi-boule agile

Déphasages des ports entre eux, 3 cas intéressants.

#### 1<sup>er</sup> cas avec 4 ports



Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
A	90°	0°	0°	90°
B	0°	0°	90°	90°
C	0°	90°	90°	0°
D	90°	90°	0°	0°



Efficacité totale 57 %

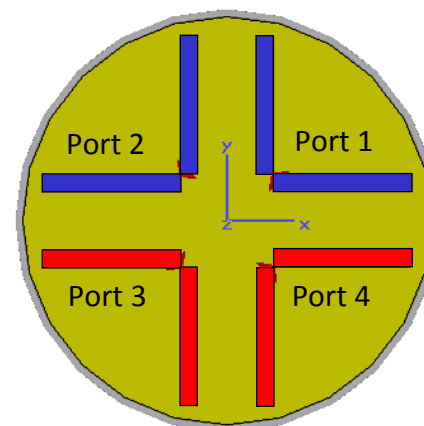
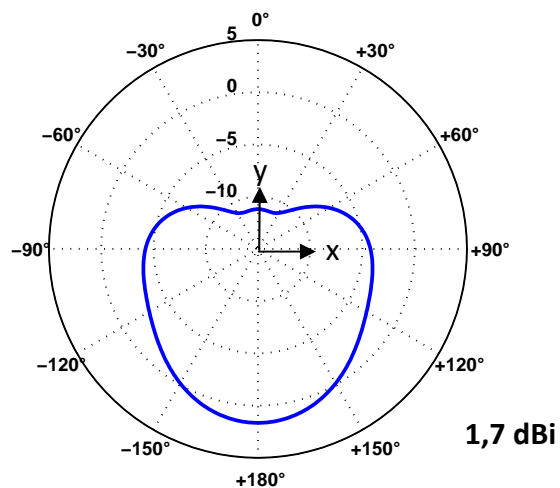
### Antenne demi-boule agile

Déphasages des ports entre eux, 3 cas intéressants.

#### 1<sup>er</sup> cas avec 4 ports

Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
<i>A</i>	90°	0°	0°	90°
<i>B</i>	0°	0°	90°	90°
<i>C</i>	0°	90°	90°	0°
<i>D</i>	90°	90°	0°	0°

Efficacité totale 57 %



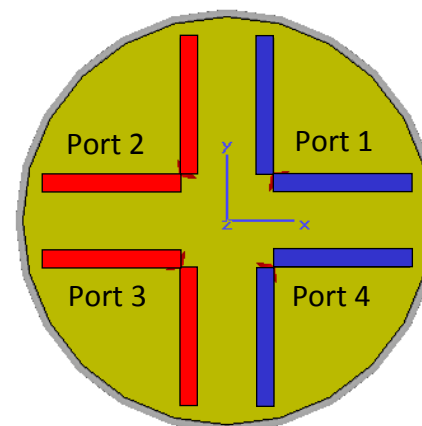
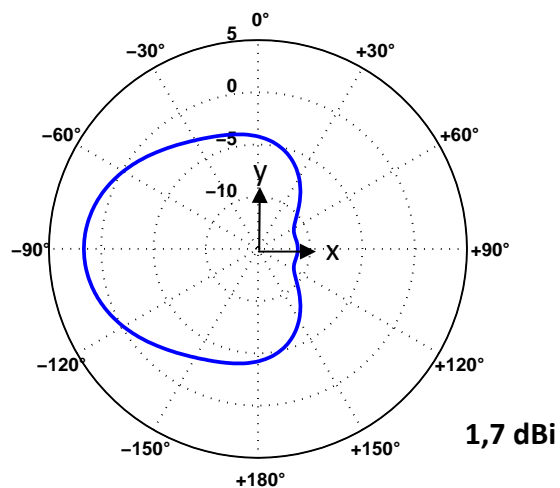
### Antenne demi-boule agile

Déphasages des ports entre eux, 3 cas intéressants.

#### 1<sup>er</sup> cas avec 4 ports

Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
<i>A</i>	90°	0°	0°	90°
<i>B</i>	0°	0°	90°	90°
<i>C</i>	0°	90°	90°	0°
<i>D</i>	90°	90°	0°	0°

Efficacité totale 57 %





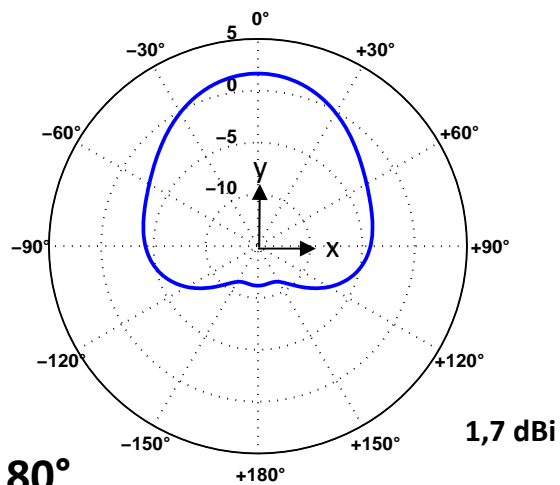
### Antenne demi-boule agile

Déphasages des ports entre eux, 3 cas intéressants.

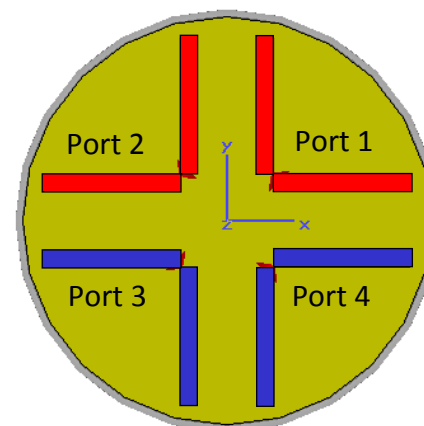
#### 1<sup>er</sup> cas avec 4 ports

Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
<i>A</i>	90°	0°	0°	90°
<i>B</i>	0°	0°	90°	90°
<i>C</i>	0°	90°	90°	0°
<i>D</i>	90°	90°	0°	0°

Efficacité totale 57 %



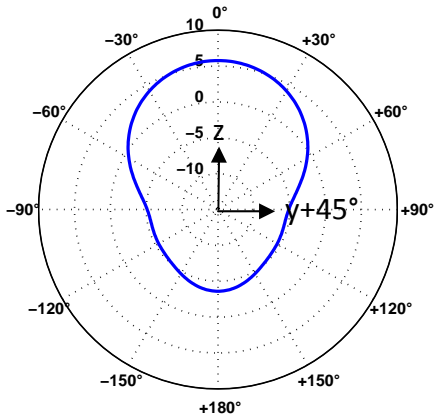
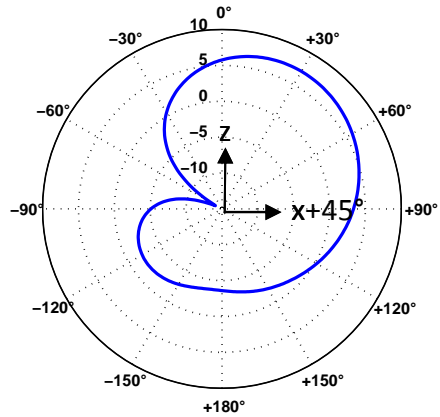
Emissions vers 0°, ±90°, et 180°  
dans le plan horizontal



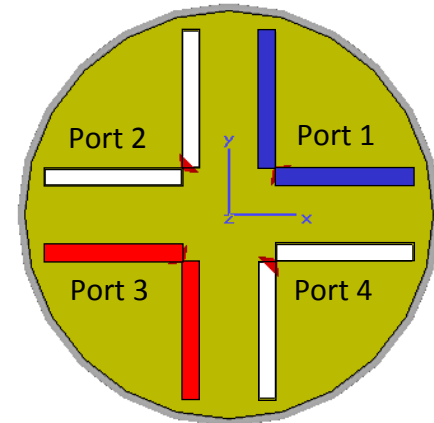
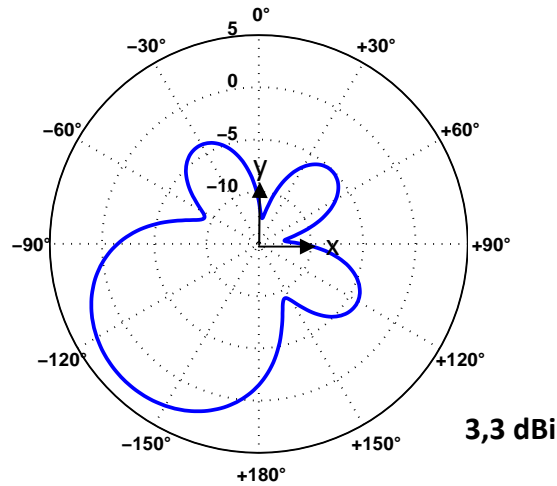
### Antenne demi-boule agile

Déphasages des ports entre eux, 3 cas intéressants.

#### 2<sup>ème</sup> cas avec 2 ports



Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
<i>E</i>	0°	NA	90°	NA
<i>F</i>	90°	NA	0°	NA
<i>G</i>	NA	0°	NA	90°
<i>H</i>	NA	90°	NA	0°



Efficacité totale 65 %

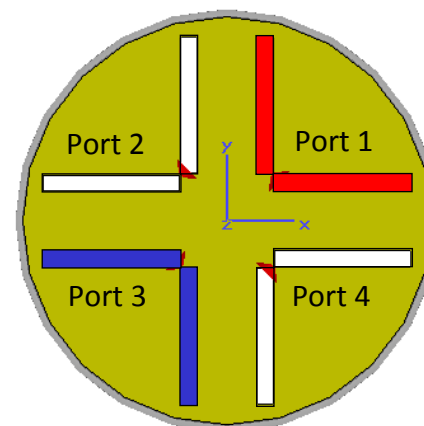
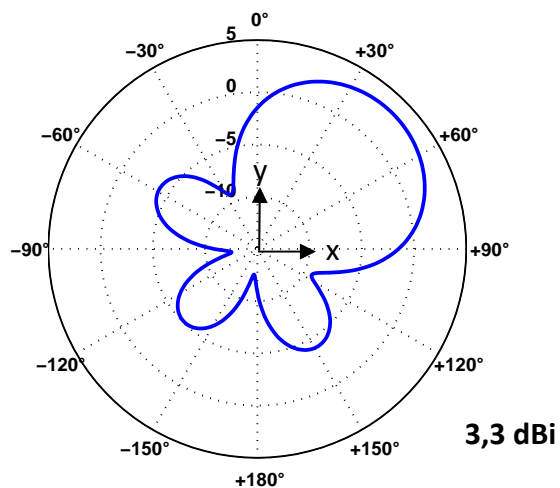
### Antenne demi-boule agile

Déphasages des ports entre eux, 3 cas intéressants.

2<sup>ème</sup> cas avec 2 ports

Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
<i>E</i>	0°	NA	90°	NA
<i>F</i>	90°	NA	0°	NA
<i>G</i>	NA	0°	NA	90°
<i>H</i>	NA	90°	NA	0°

Efficacité totale 65 %



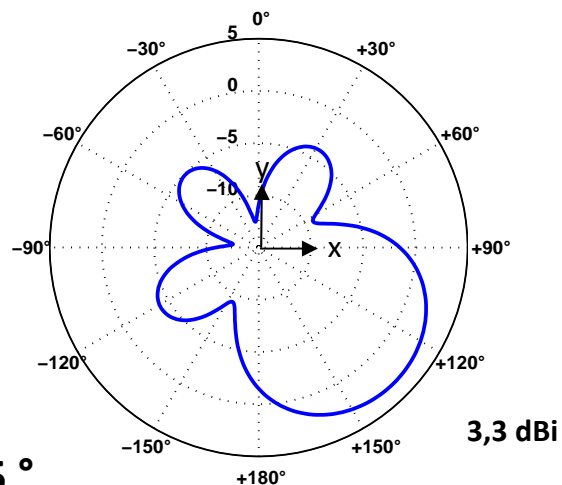
### Antenne demi-boule agile

Déphasages des ports entre eux, 3 cas intéressants.

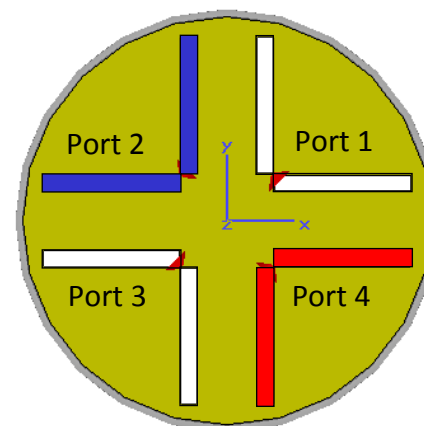
2<sup>ème</sup> cas avec 2 ports

Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
<i>E</i>	0°	NA	90°	NA
<i>F</i>	90°	NA	0°	NA
<b><i>G</i></b>	NA	<b>0°</b>	NA	<b>90°</b>
<i>H</i>	NA	90°	NA	0°

Efficacité totale 65 %



Emissions vers  $\pm 45^\circ$  et  $\pm 135^\circ$   
dans le plan horizontal



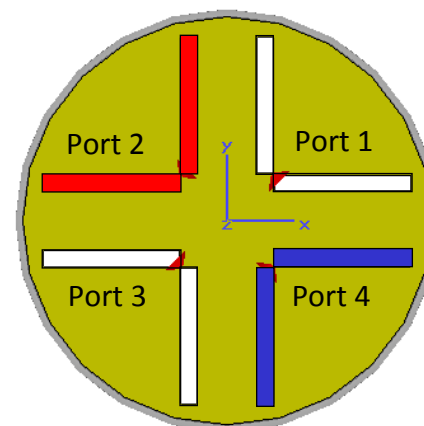
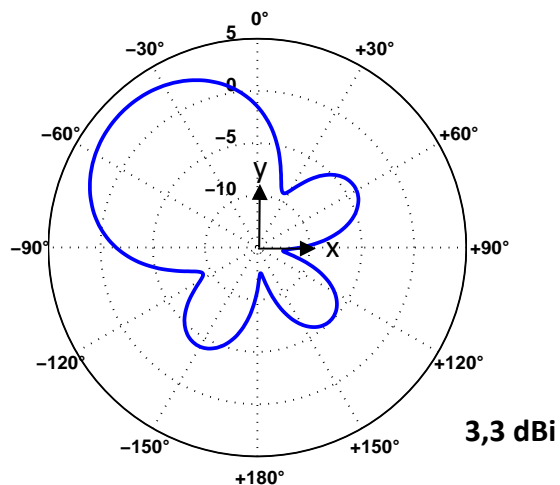
### Antenne demi-boule agile

Déphasages des ports entre eux, 3 cas intéressants.

2<sup>ème</sup> cas avec 2 ports

Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
<i>E</i>	0°	NA	90°	NA
<i>F</i>	90°	NA	0°	NA
<i>G</i>	NA	0°	NA	90°
<i>H</i>	NA	90°	NA	0°

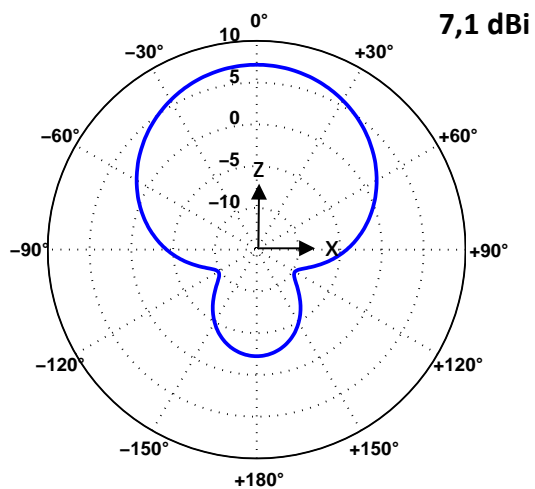
Efficacité totale 65 %



# Antenne demi-boule agile

Déphasages des ports entre eux, 3 cas intéressants.

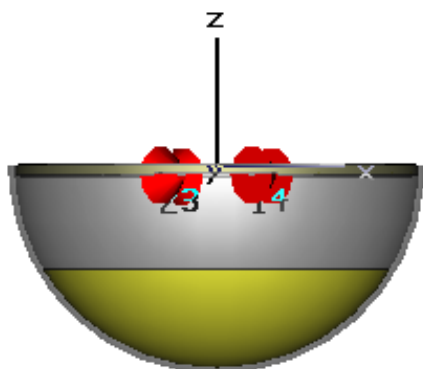
3<sup>ème</sup> cas avec 2 ports



Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
<i>I</i>	0°	NA	180°	NA
<i>J</i>	180°	NA	0°	NA
<i>K</i>	NA	0°	NA	180°
<i>L</i>	NA	180°	NA	0°

Efficacité totale 95 %

Emission vers 0° dans le plan vertical

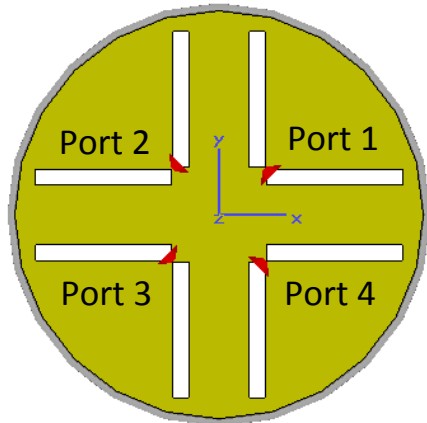


## Antenne demi-boule agile

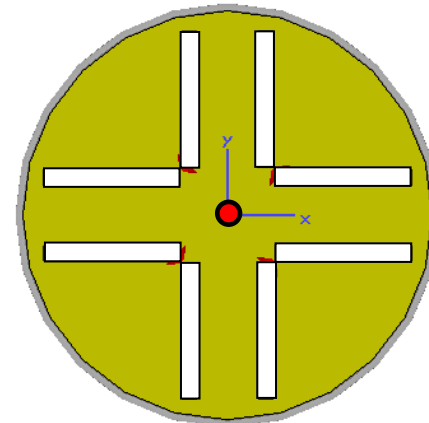
- Couverture du demi-espace situé au-dessus de la structure avec 9 directions.
- Faible impact de l'environnement extérieur.

### Création des déphasages

4 ports



1 port



Alimentation par le centre + circuits

# Antenne demi-boule agile

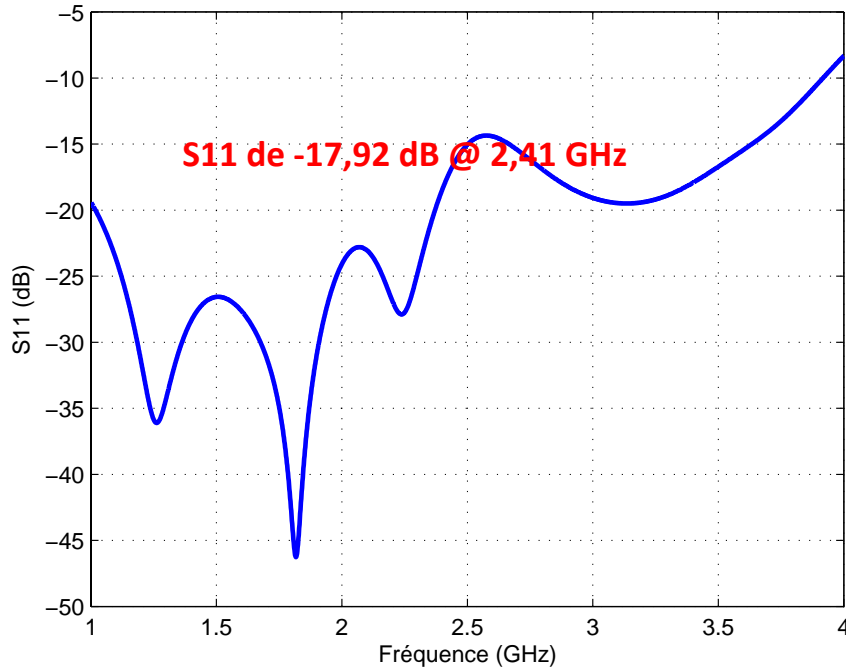
Remplacement des ports discrets par des circuits déphaseurs

Circuit pour configuration à 2 ports (E à F)

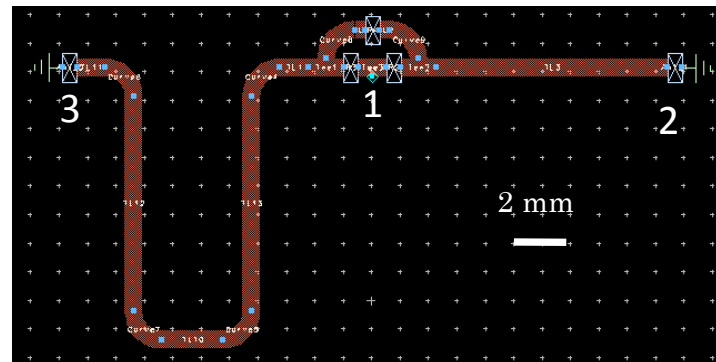
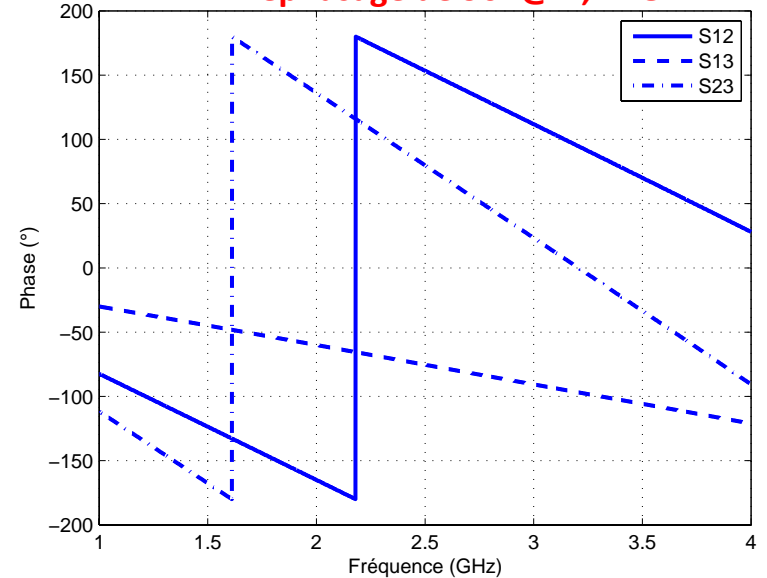
Utilisation de lignes  $\lambda/4$  pour déphaser de  $90^\circ$

Circuit asymétrique

Pertes d'insertion -7 dB



Déphasage de  $90^\circ$  @ 2,41 GHz



21x14 mm<sup>2</sup>



# Antenne demi-boule agile

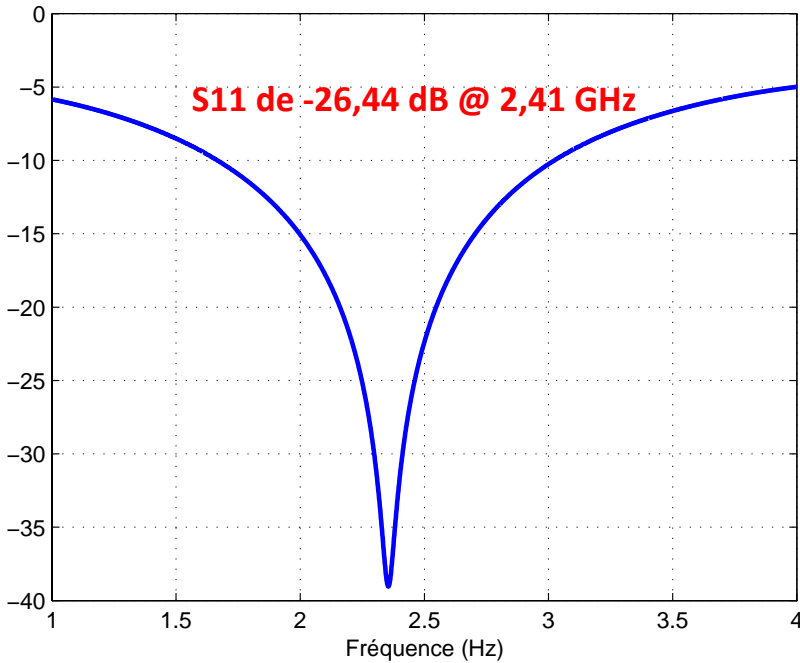
Remplacement des ports discrets par des circuits déphaseurs

Circuit pour configuration à 4 ports (A à D)

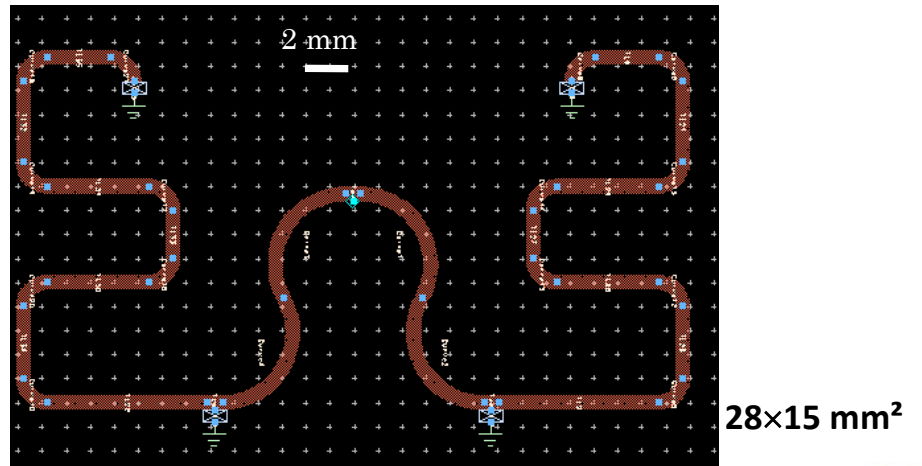
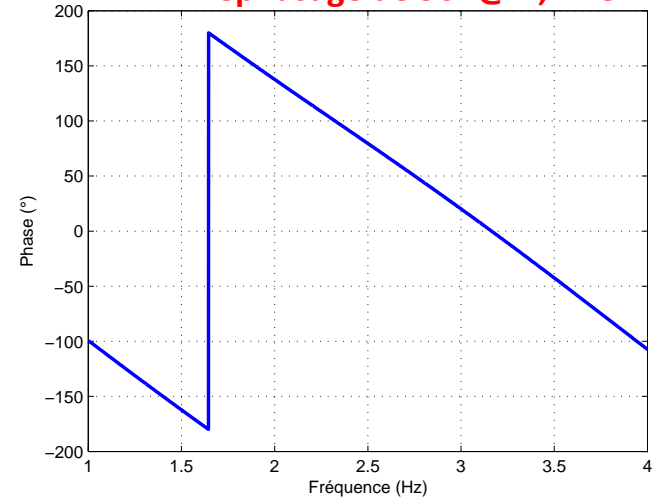
Utilisation de lignes  $3\lambda/4$  pour déphaser de  $90^\circ$

Circuit symétrique

Pertes d'insertion -6 dB



Déphasage de  $90^\circ$  @ 2,41 GHz



## Conclusion

### Démonstration du concept d'antenne-package

#### Antenne demi-boule agile



Capteur isolé, réseau peu dense

Réponse au dilemme

- Compacité,  $\approx 30 \text{ cm}^3$
- Faible sensibilité à l'environnement
- Possibilité de réduction des dimensions en montant en fréquence

Améliorations: test, fabrication, solidité

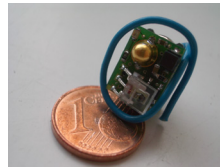
# 3.

## Conclusion et perspectives

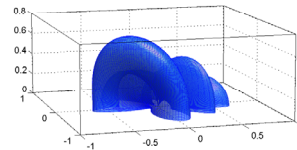
### Conclusion

#### Contribution au développement des réseaux de capteurs

- ✓ Approche descendante, du système au composant
- ✓ Etat de l'art: évolution des ambitions, beaucoup de travaux faits mais restent aussi à faire.



- ✓ Réseaux d'antennes: démonstration du concept adapté aux réseaux sans fil, cadre et conditions limitantes.



- ✓ Antennes spécifiques: conception de structures répondant à la problématique dimension/packaging



# 3.

## Conclusion et perspectives

### Perspectives

- ✓ Antennes-packages: amélioration de la robustesse mécanique et isolation des facteurs climatiques;



**Utilisation de résine dure**

- ✓ Partie communicante: modulation directe de l'alimentation d'un oscillateur;
- ✓ Architecture des plates-formes: emplacement du capteur;

### Enjeu

- ✓ Méthodes de travail: difficultés car domaine pluridisciplinaire, pas de débouchés industriels...



**Application précise, plate-forme toute intégrée (~~modulaire~~), favoriser les contacts entre communautés, financement**

**Beaucoup de défis à relever dans les domaines informatique et énergétique**

*FIN*

*Dernière page*

**Remerciements**

***MERCI DE VOTRE  
ATTENTION...***

*Et d'être venus*

# Les réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs

## Théorie classique

### Réseaux linéaire 2D de M×N antennes

Déphasages:

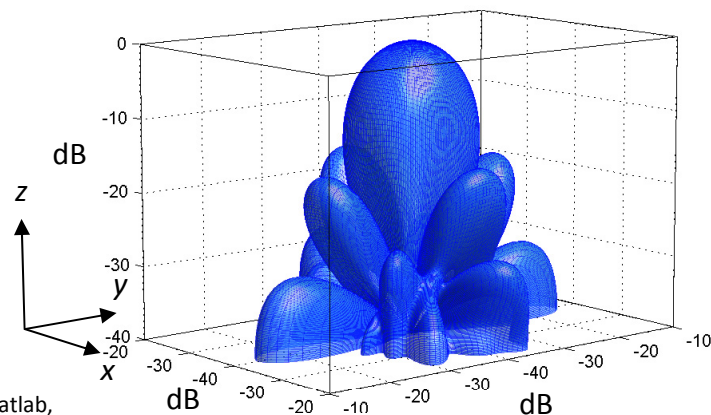
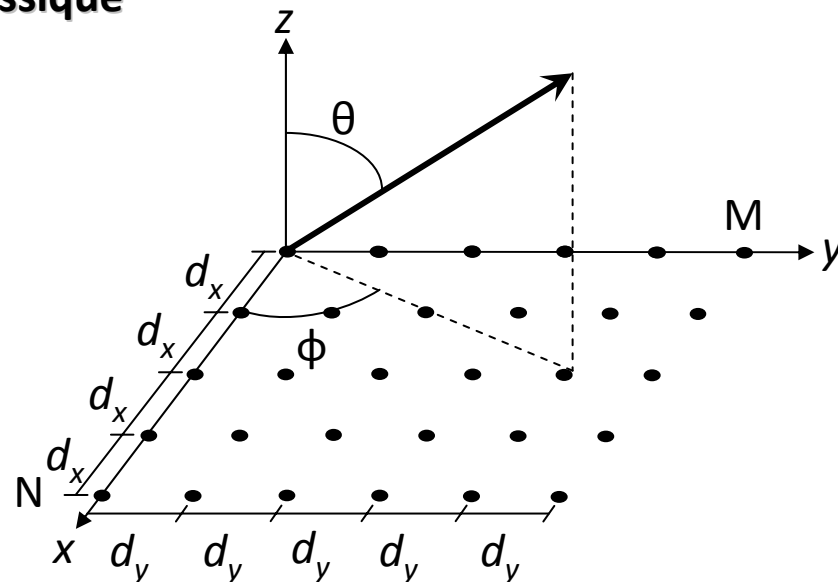
$$\phi_x = \frac{2\pi \cdot d_x}{\lambda} \sin\theta \cos\phi \quad \phi_y = \frac{2\pi \cdot d_y}{\lambda} \sin\theta \cos\phi$$

$$B_x = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{in\phi_x} \quad B_y = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{im\phi_y}$$

$$B = B_x \times B_y$$

Avec M=6 et N=5,  $d=d_x=d_y$ ,  $A_n=A_m=A_0$ :

Réalisé avec le code Matlab de Brégains\*



\* Brégains, J., Ares, F. & Moreno, E., Visualizing the 3D polar power patterns and excitations of planar arrays with Matlab, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Avr. 2004, vol. 46 n°2, p. 108-112



# Conception d'antennes

## Design d'antennes

### Antenne hémisphérique

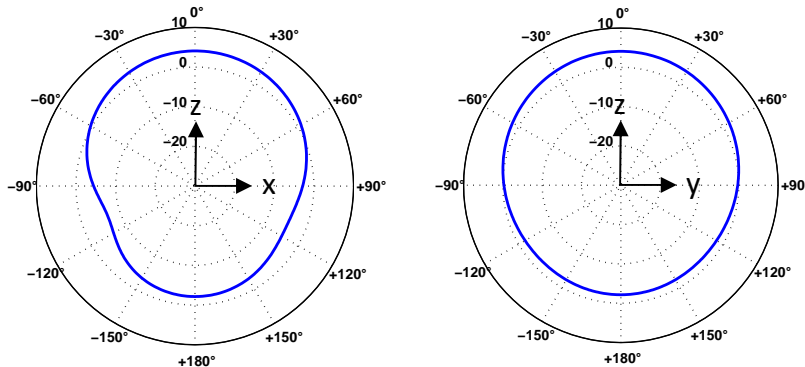
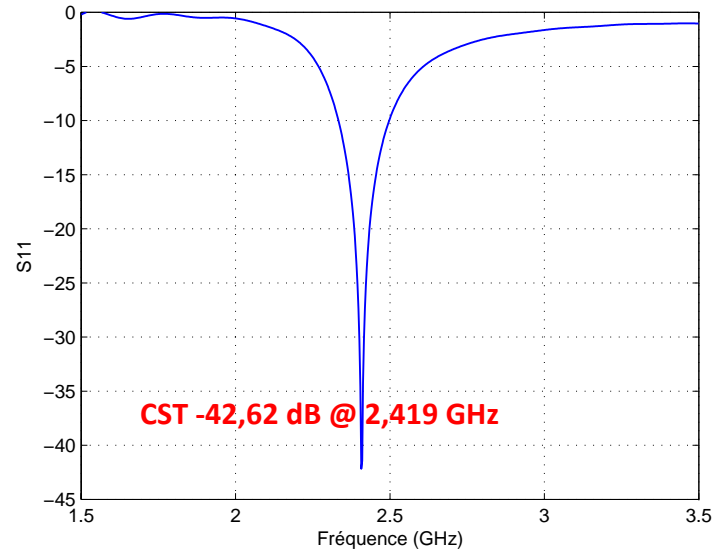
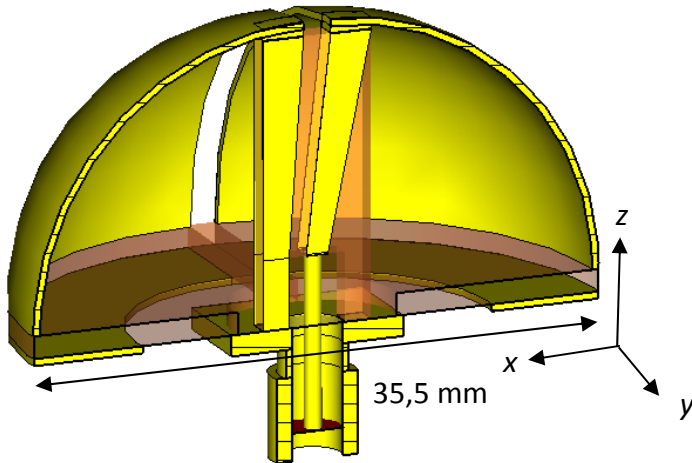


Diagramme omnidirectionnel vers z+;  
Réalisation difficile, robustesse non assurée;  
Réflecteur peu efficace



# Conception d'antennes

## Design d'antennes

### Antenne hémisphérique

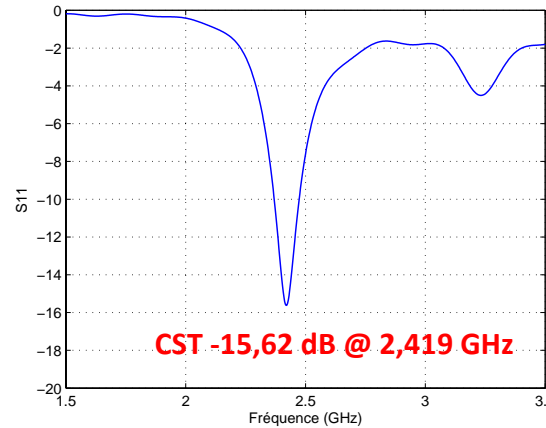
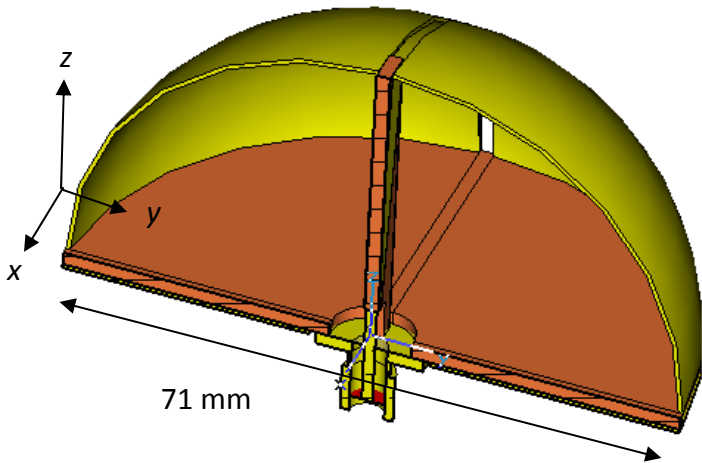


Diagramme omnidirectionnel vers z+;

Réalisation difficile, robustesse non assurée;

Réflecteur peu efficace

