



21ème Colloque International & Exposition sur la Compatibilité Électromagnétique



13 au 15 juin 2023 - Toulouse INP - ENSEEIHT

Mesure par Substitution de découplage d'antenne avec une antenne hyperfréquence

A. Alcaras, O. Ripoche, G. Brélivet

THALES - Lab for the control of **E3** (electromagnetic environment effects) and
onboard **V**erifications testing (LEV)

THALES
Building a future we can all trust

❑ Intégration radio sur porteur terrestre

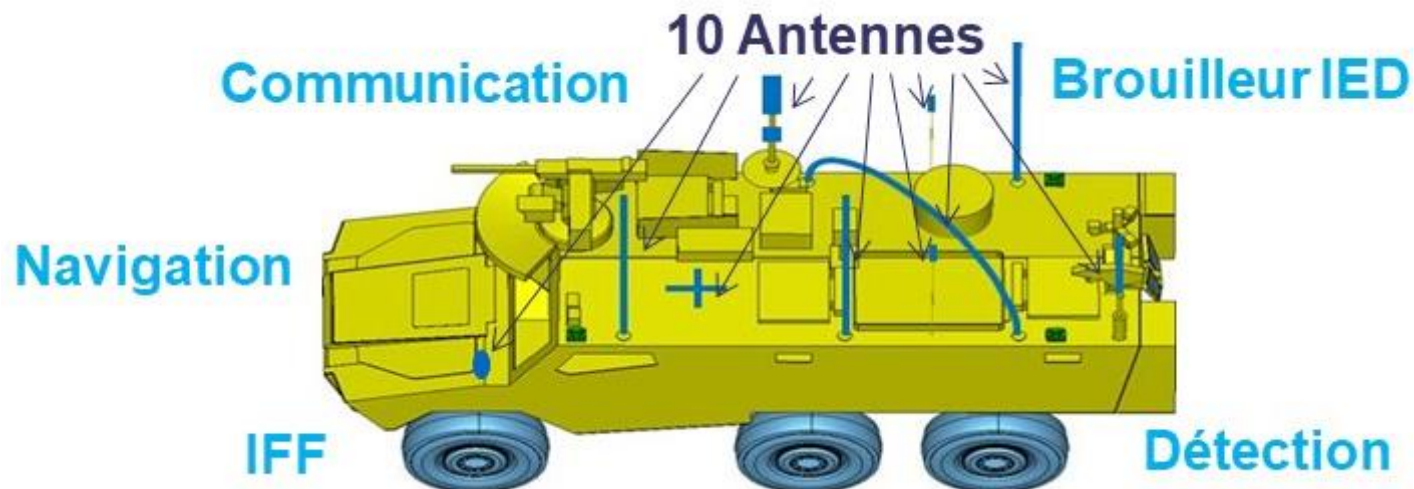
- Nombre de plus en plus grand de sous-systèmes radio
- **Criticité** croissante des fonctions radioélectriques
- **Complexité** croissante du parc radioélectrique

❑ Exigence d'études et de validations

- Etudes et Validations **Plus rigoureuses**
- Dans des **délais contraints**

❑ Un des risques principaux : CRE

- Compatibilité RadioElectrique (cosite; co-existence radio)
- Etude **ingénierie** : Placement optimisé des antennes sur le toit (Radio; CRE)
- Validation CRE : **Mesure des découplages antennaires**



❑ Problématique de mesure de découplage d'antenne

- 1) Le porteur ne dispose pas encore d'une antenne directive hyperfréquence
- 2) Les mesures de validation doivent être faites pour anticiper les risques
➔ Mesure de découplage sans l'antenne hyper-fréquence ?

❑ Mesure de découplage par **substitution**

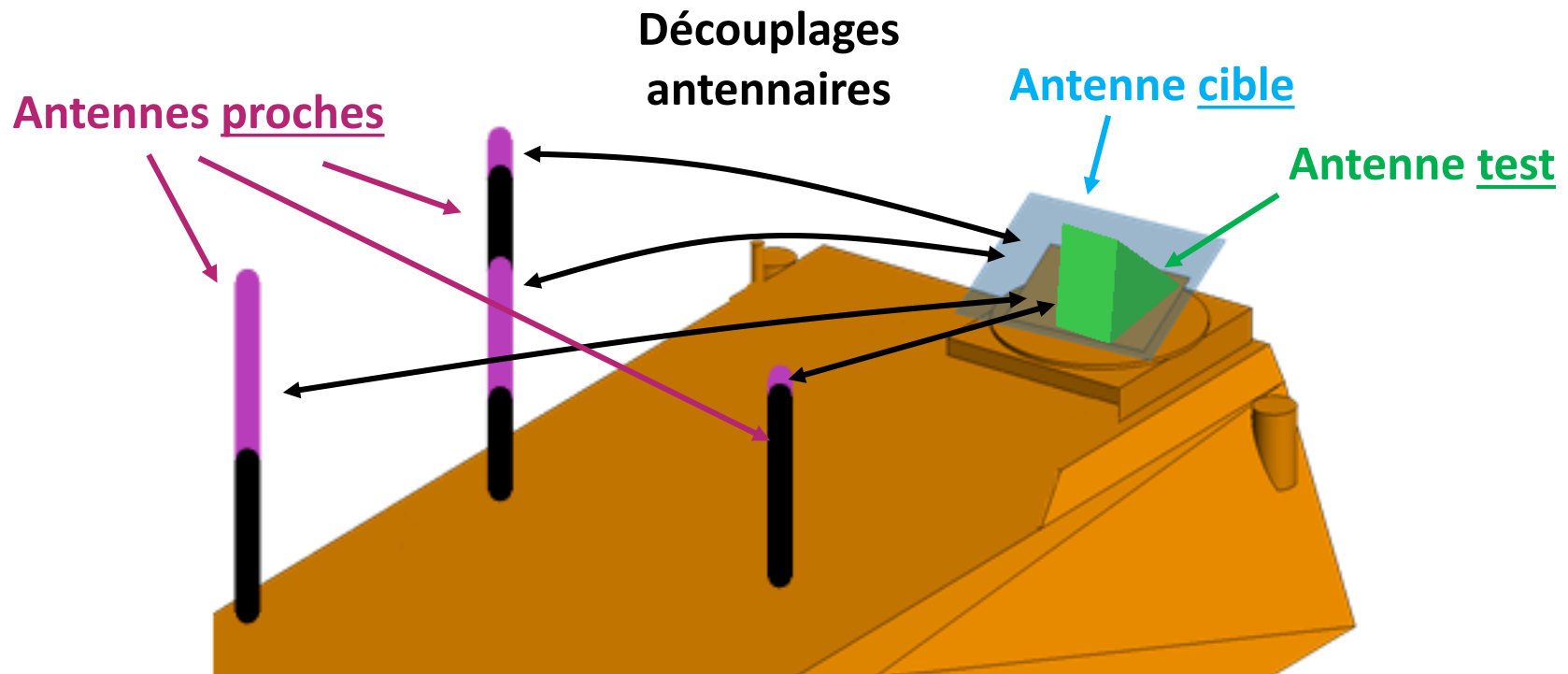
- L'antenne « cible » manquante **est remplacée** par une antenne « test »
- **Découplages** mesurés entre les **antennes « proches »** et l'**antenne « test »**
- Les découplages « test » sont **extrapolés** aux découplages « cible » en comparant les gains de l'antenne test et de l'antenne cible.

❑ Gain en champ proche des Antennes directives

- Les gains d'antenne sont des gains en champ lointain
- Installation sur véhicule : antennes très proches
- ➔ **Gain à corriger (gain champ proche)** pour corriger les découplages extrapolés

❑ Définition Antenne :

- ❑ Antenne « **cible** » : antenne opérationnelle non disponible lors des essais
- ❑ Antenne « **test** » : antenne de substitution remplaçant l'antenne cible en essais
- ❑ Antenne « **proche** » : antenne opérationnelle du véhicule autres que l'antenne cible, dont on veut mesurer le découplage avec l'antenne cible.

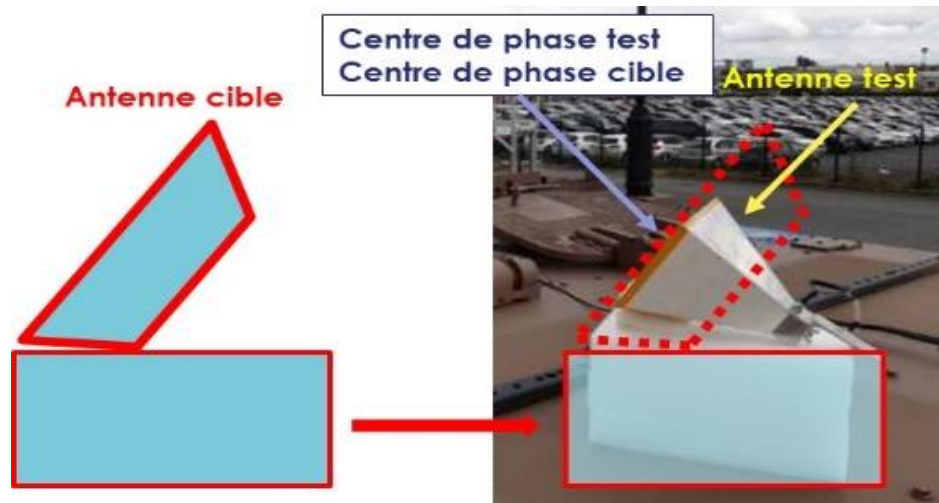


❑ Mesure de découplage sans l'antenne cible directive

- Gain de l'antenne cible directive : 28 dBi
- Antenne non disponible aux essais de validation

❑ Détermination de l'antenne test de substitution

- Il faut une antenne test directive
- Caractéristique et installation de l'antenne test :
 - ✓ Gain et ouverture connus et « équivalent » à l'antenne cible
 - ✓ Centre de phase de l'antenne test = Centre de phase de l'antenne cible



➤ Remarque :

- ✓ **Disponibilité** usuelle et **facile à installer** en temporaire
= antenne directive de petite taille → Gain inférieur au gain de l'antenne cible

□ Antennes test à disposition

- Antenne « cornet » (12 dBi) ou antenne « lentille » (15 dBi)



□ Mesure découplage antennaire et extrapolation

- Mesure des découplages entre l'antenne test et les antennes proches du véhicule : **Découplage**_{Mesure}

- **Extrapolation (dB) = Gain_{Cible} (dBi) – Gain_{Test} (dBi)**

- **Découplage_{Cible} (dB) = Découplage_{Mesure} (dB) – Extrapolation (dB)**

□ Mesure de découplage entre antennes sur véhicule



Analyseur de réseau



□ Particularité sur toit de véhicule

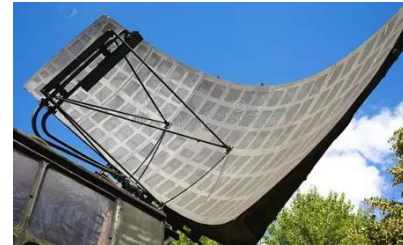
- Les **distances** entre antennes sont **proches** (< 2,5 m)
- $\text{Gain}_{\text{Cible}}$ et $\text{Gain}_{\text{Test}}$ = Gain champ lointain (**extrapolation erronée**)
- ➔ Correction de gain nécessaire en champ proche

□ Méthode de « Gross » pour correction champ proche

➤ Méthode dédiée aux **antennes directives**

✓ Réflecteur parabolique, Cornet, Réseau de dipôle, Réseau de patch,...

➤ Utilisée par les groupes normatifs pour définir les HIRF (MIL-STD)



□ Principe

➤ Evaluation du champ proche en corrigeant le gain

➤ Le gain est corrigé pour distance « r » < R_{lim} :

✓ D : Plus grande dimension de l'antenne; λ : longueur d'onde

➤ Le gain proche < gain lointain; varie avec « r »

$$R_{lim} = \frac{2 D^2}{\lambda}$$

❑ Détermination de la correction du gain pour R proche

➤ Paramètres d'antenne à renseigner:

- ✓ le « Gain » en champ lointain du lobe principal,
- ✓ les dimensions de la partie rayonnante de l'antenne,
- ✓ la fréquence d'intérêt (ou longueur d'onde),
- ✓ l'angle d'ouverture du lobe principal,
- ✓ la distance r ($r \leq R_{lim}$).

❑ Le calcul diffère selon le type d'antenne directive :

➤ Antennes « rectangulaires »

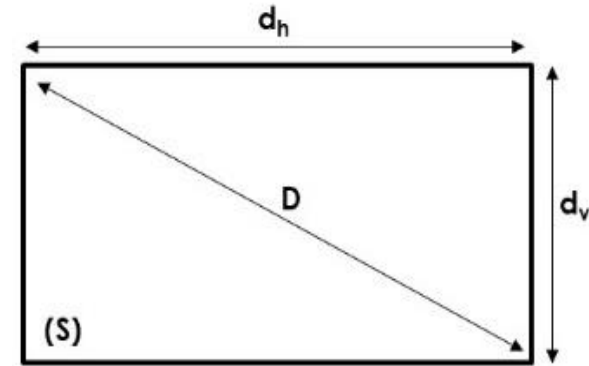
➤ Antennes « circulaires »



Antenne cible = Rectangulaire → Correction pour antenne rectangulaire

Dimensions de l'antenne (hors radôme)

- d_h et d_v (en mètre)



Taux de distance normalisé

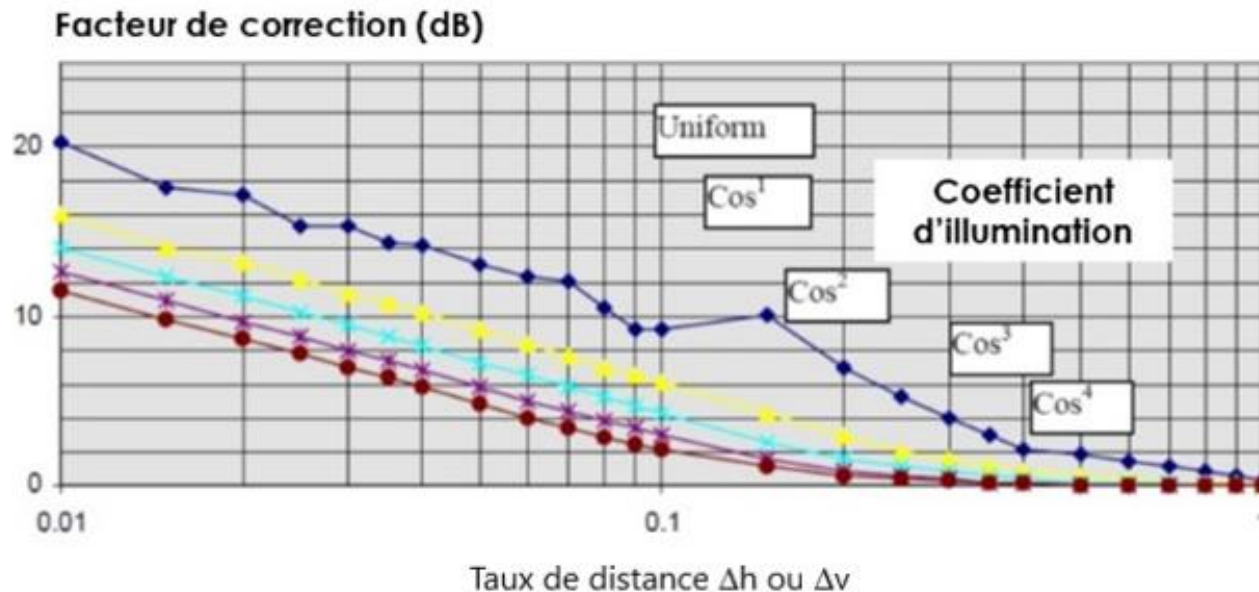
- Δh et Δv : $\Delta h = \frac{r \cdot 300}{d_h^2 \cdot f}$ $\Delta v = \frac{r \cdot 300}{d_v^2 \cdot f}$

- r (m) : distance de l'antenne; f : fréquence (MHz)

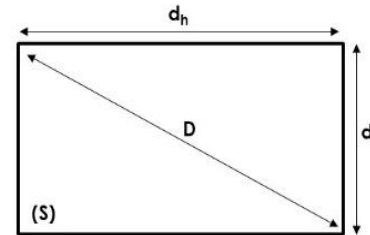
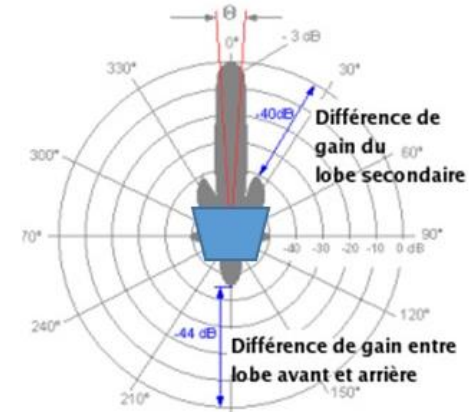
Détermination du coefficient d'illumination I_d

$$I_d = (5,8384 \cdot 10^{-5}) \cdot f \cdot B \cdot D \rightarrow B \text{ (degré)} : \text{angle d'ouverture 3 dB}; D : \text{diagonale}$$

- Allure de correction : Uniform, Cos^1 , Cos^2 , Cos^3 , Cos^4



Ouverture du lobe à -3 dB



Principales conditions de validité de correction

- Gain/Directivité de l'antenne non influencé par le porteur
- Faible angle d'ouverture dans le lobe principal
- Forte valeur du gain « Gain »
- ➔ Ces conditions sont liées

Méthode applicable pour « r » < R_{lim} ➔ Définition de Gain_{min}

- Gain_{min} = niveau de gain minimal nécessitant une correction champ proche
- Proposition de calcul de Gain_{min} :

✓ Posons $S = d_h * d_v$; $D = \sqrt{d_h^2 + d_v^2}$; $\alpha = \frac{d_h}{d_v}$.

✓ Après développement $S = \frac{\alpha}{1+\alpha^2} D^2$

✓ Surface physique $S \approx$ Surface de réception $S_r = G \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} = S = \frac{\alpha}{1+\alpha^2} D^2$

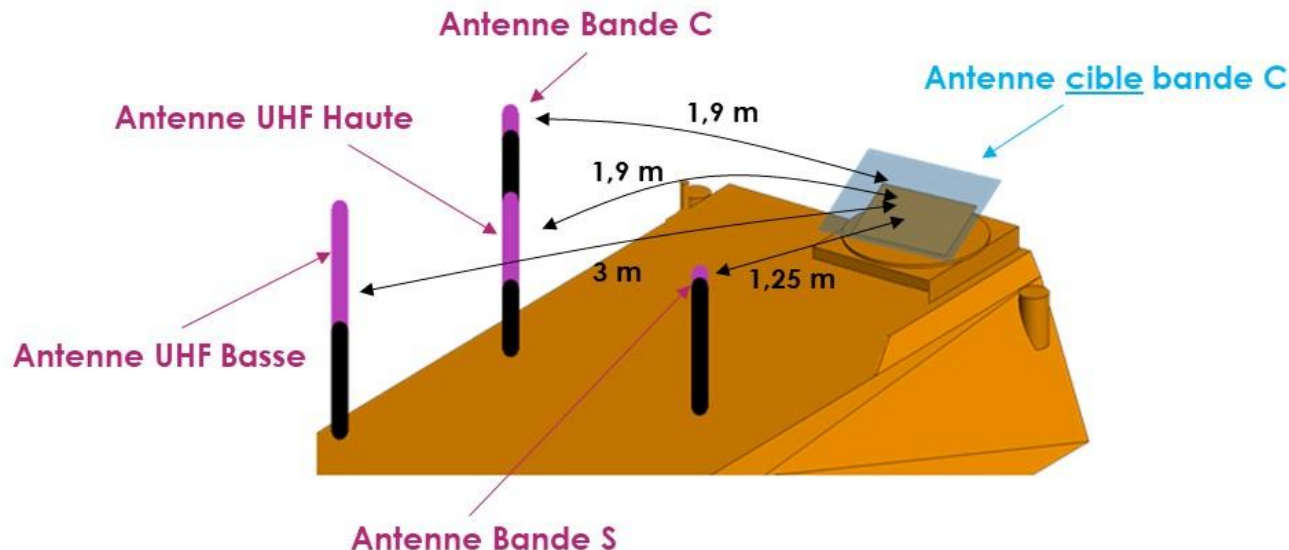
✓ Avec $R_{lim} = \frac{2 D^2}{\lambda}$ la condition $R_{lim} > D$ conduit à $G > 2\pi \frac{\alpha}{1+\alpha^2} \frac{D}{\lambda}$

Antenne de forme rectangulaire : pas de correction nécessaire si le

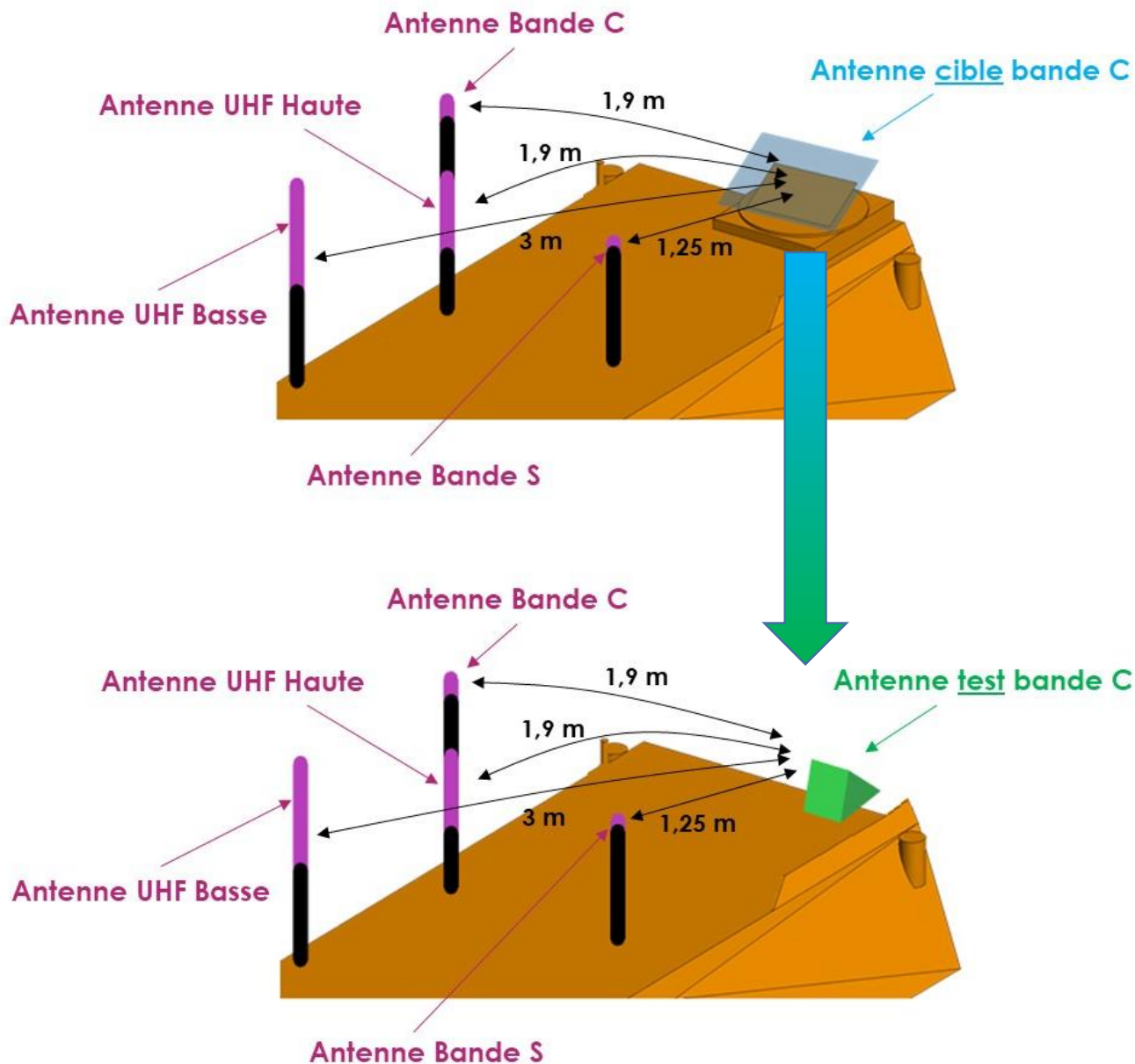
gain est inférieur à : $Gain_{min} = 2\pi \frac{\alpha}{1+\alpha^2} \frac{D}{\lambda}$

□ Description du problème posé en validation véhicule

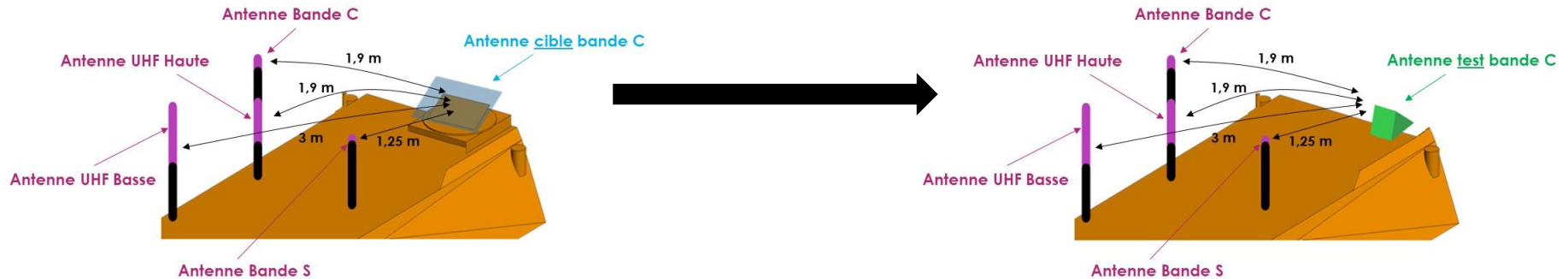
- Une antenne est manquante sur le véhicule : antenne directive
 - Antenne directive de réception en bande C (6,8 GHz)
 - Découplages critiques à connaître entre cette antenne et 4 autres antennes proches, omnidirectionnelles :
 - ✓ une antenne bande « UHF basse » (400 MHz) à 3 m de l'antenne cible
 - ✓ une antenne bande « UHF haute » (800 MHz) à 1,9 m de l'antenne cible
 - ✓ une autre antenne bande « C » (4 GHz) à 1,9 m de l'antenne cible
 - ✓ une antenne bande « S » (2 GHz) à 1,25 m de l'antenne cible
- ➔ Ces antennes ont toutes une polarisation verticale



Application à un cas réel - Substitution



Application à un cas réel – Gain proche des antennes cibles et test



❑ Antenne cible (6,8 GHz)

- Réseau de patch
- Gain = 28 dBi
- $d_h=0,5$ m et $d_v=0,3$ m ($S=0,15$ m²)
- Angle ouverture : 2°
- $R_{lim} = 15$ m à 6,8 GHz

➔ $Gain_{min} = 16$ dBi < 28 dBi

➔ Correction champ proche nécessaire

❑ Correction champ proche

- $r = 3$ m : - 2 dB ➔ $Gain_{proche} = 26$ dBi
- $r = 1,9$ m : - 5 dB ➔ $Gain_{proche} = 23$ dBi
- $r = 1,25$ m : - 9 dB ➔ $Gain_{proche} = 19$ dBi

❑ Antenne test (6,8 GHz)

- Cornet
- Gain = 12 dBi
- $d_h=0,24$ m et $d_v=0,15$ m ($S=0,036$ m²)
- Angle ouverture : 28°
- $R_{lim} = 3,6$ m à 6,8 GHz

➔ $Gain_{min} = 13$ dBi > 12 dBi

➔ Pas de Correction champ proche

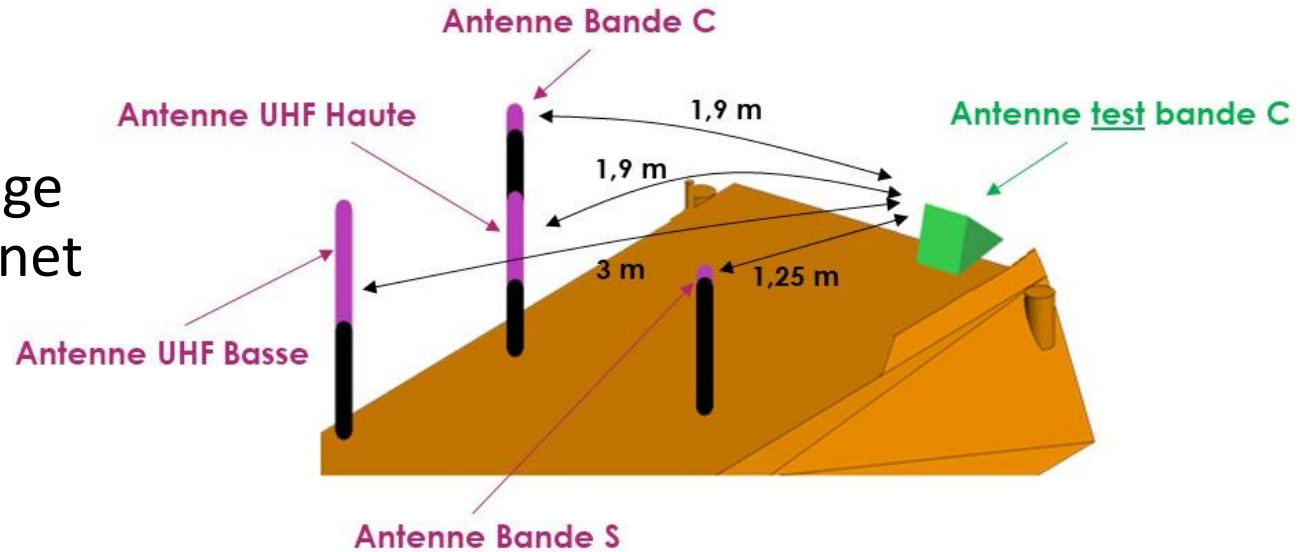
❑ Correction champ proche

- Pas nécessaire
- Vérification : 0 dB à 70 cm

Sans correction, les mesures de découplages peuvent être majorants jusqu'à 9 dB après extrapolation par les gains en champ lointain

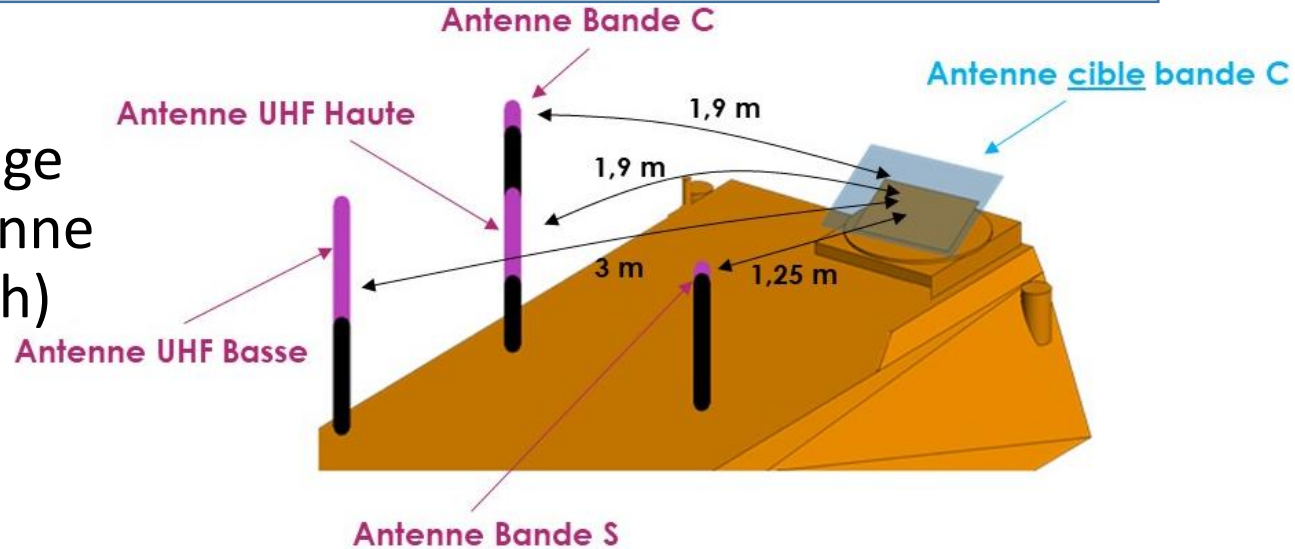
Application à un cas réel – Résultat de découplage par substitution

☐ Mesure de découplage à 6,8 GHz avec le cornet



Antenne proche	Distance entre antennes	Découplage brut mesuré avec antenne cornet (Gain = 12 dBi)	Gain en champ proche de l'antenne cible (Gain lointain = 28 dBi)	Découplage extrapolé avec antenne cible en gain champ proche
Antenne bande S	1,25 m	52 dB	19 dBi	45 dB
Antenne UHF bande haute	1,9 m	59 dB	23 dBi	48 dB
Antenne bande C	1,9 m	50 dB	23 dBi	39 dB
Antenne UHF bande basse	3 m	62 dB	26 dBi	48 dB

☐ Mesure de découplage à 6,8 GHz avec l'antenne cible (réseau de patch)



Antenne proche	Découplage réel mesuré avec antenne cible	Découplage avec antenne cible mesuré par substitution	Ecart entre mesure réelle et mesure par substitution
Antenne bande S	42,3 dB	45 dB	-2,7 dB
Antenne UHF bande haute	51,4 dB	48 dB	3,4 dB
Antenne bande C	41,9 dB	39 dB	2,9 dB
Antenne UHF bande basse	43,7 dB	48 dB	-4,3 dB

- Ecart < 4,5 dB
- Moins de 10% d'écart
- Exigence découplage projet 20-30 dB
- ➔ Ecart acceptable
- Pas de risque de sur- ou sous-évaluation

Des écarts acceptables en considérant les incertitudes

❑ Plusieurs sources d'incertitude

- Incertitudes de mesure
- Incertitudes d'évaluation
- Incertitudes « physique »

❑ Incertitudes de mesure

- Incertitude de **mesure par analyseurs de spectre** (ou analyseurs de réseau).
- Incertitude sur **les cordons de mesures** qui peuvent être **différents** entre la mesure par substitution et la mesure réelle (quelques mois plus tard).
- Incertitude de **l'environnement de mesure** qui peut être **différent** entre la mesure par substitution et la mesure réelle (**éléments parasites** environnants, **placement relatif** des antennes).
- Incertitudes sur les **caractéristiques de position** et de **pointage relatives** entre l'antenne test de substitution et l'antenne cible

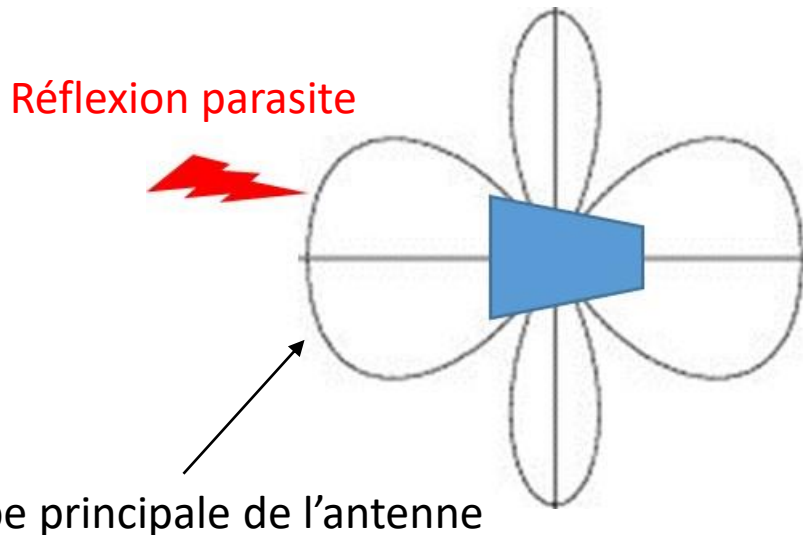
❑ Incertitudes d'évaluation

- Incertitude du gain en champ lointain des antenne cible et test.
- Incertitude des dimensions d'antennes (parties rayonnantes).
- Incertitude des distances entre centre de phase des antennes.
- Incertitude du facteur de correction en champ proche (approximation).
- Incertitude de l'angle d'ouverture à 3 dB.

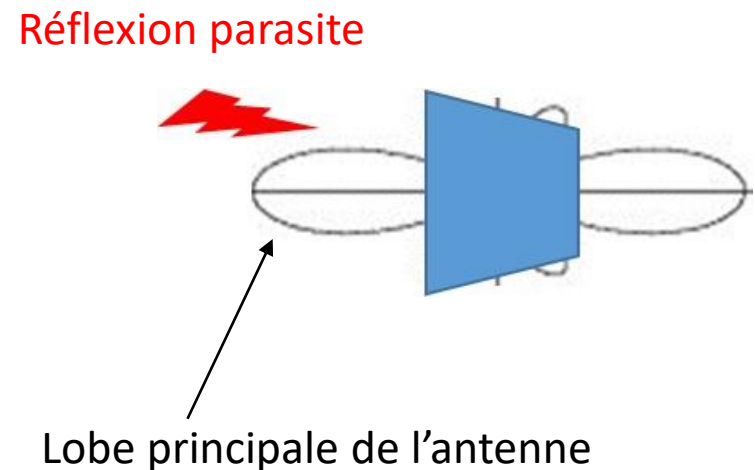
❑ Incertitude « physique »

- Surface antenne test \neq Surface antenne cible (Gain test \neq Gain cible)
- Différence des angles d'ouverture en champ proche
- Captation différente des réflexions parasites de l'environnement du toit

Réflexion parasite captée par
l'antenne moins directive



Réflexion parasite captée par
l'antenne plus directive



❑ Méthode de substitution en émission

- Cas étudié ici : antenne cible en réception et dans sa bande
- Méthode applicable avec la même précision pour une antenne cible directive en émission dans sa bande.

❑ Découplage hors bande de l'antenne cible

- La méthode de substitution a été testée en découplage hors bande de l'antenne cible.
- **Validation en cours.**
- Incertitude principale = différence de comportement hors bande entre l'antenne cible et l'antenne test.
- **Remarque** : les exigences de découplage hors bande peuvent supporter plus d'écart.

❑ Antenne cible omnidirectionnelle (non directive)

- Méthode Gross non applicable
- **Champ proche omnidirectionnelle plus complexe**
- Caractéristiques antennaires dépendant de l'environnement (gain, ROS)
- **Substitution par « antenne équivalente » : A analyser (expériences existantes)**

❑ Utilisation de la méthode de Gross en simulation

- Utilisation de la méthode Gross pour pallier le manque de modèle d'antenne ou la difficulté de modélisation d'antenne hyper véhicules terrestres

❑ Méthode de substitution par « Gross »

- Méthode approchée **simple** et **efficace** pour l'évaluation anticipée de découplage

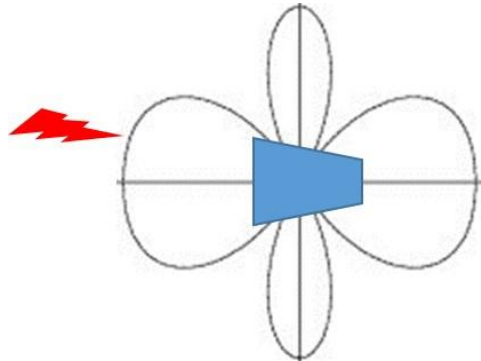
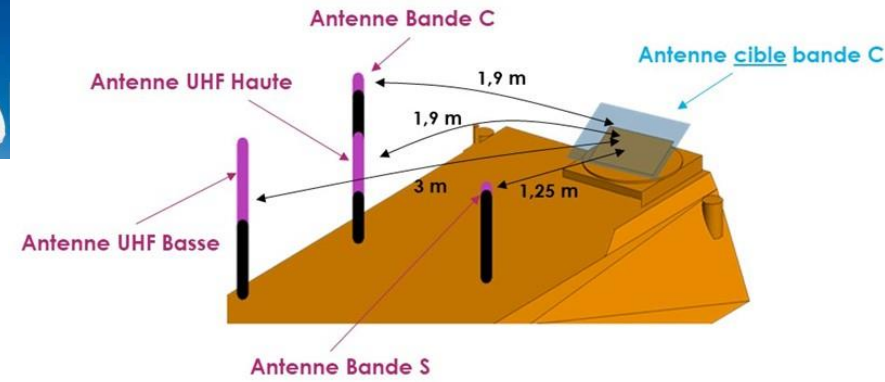
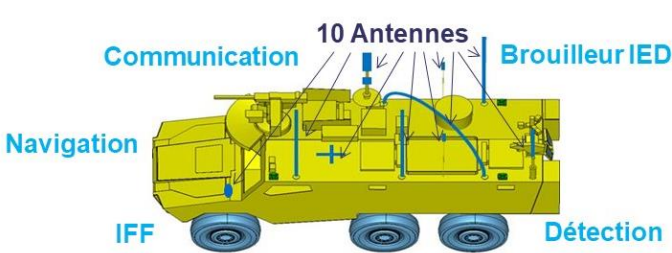
❑ Validation méthode

- Validations **encourageantes** : **débloquage** de projets **critiques**
- Incertitude et limite présentées : maîtrise complète atteignable pour antennes directives

❑ A venir

- Élargissement de la méthode de substitution aux antennes omnidirectionnelles (Gross non applicable)
- Application de la méthode de Gross à la simulation numérique de découplage avec des antennes directives complexes.

Mesure par Substitution de découplage d'antenne avec une antenne hyperfréquence



Merci pour votre attention

