

OPTIMISATION TOPOLOGIQUE D'ANTENNES SPATIALES



Projet OTOP retenu par l'ANR-RNRT coordonné par MIP

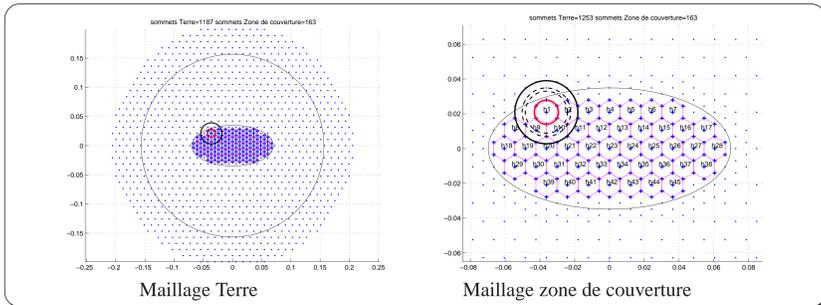
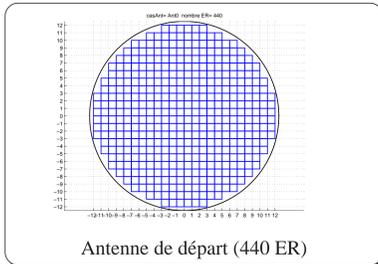
Thierry TOUYA, Didier AUROUX, Mohamed MASMOUDI



PRÉSENTATION DU PROBLÈME

DONNÉES DE L'ÉTUDE :

- Une antenne de diamètre 1.35 m à remplir avec n Eléments Rayonnants, nommés ER, rectangulaires, constitués de sources élémentaires (n= 440).
- n alimentations complexes $a_j = A_j e^{i\phi_j}$ pour contrôler en module et en phase tous les ER.
- s spots circulaires sur la Terre définissent une zone de couverture de forme elliptique (s= 45).



OBJECTIF :

- L'étude doit présenter une méthode pour réduire significativement le nombre de contrôles utilisés en regroupant des ER tout en continuant à satisfaire au mieux des contraintes sur le rayonnement.

PREMIÈRE PARTIE : Calcul des alimentations optimales

- Directivité de l'antenne (avant conversion en dB) :

$$\tilde{D}(a, x) = 4\pi \frac{|E(a, x)|^2}{\iint_{\Omega} |E(a, x)|^2 \sin \theta \, d\theta d\varphi} \quad E(a, x) = \sum_{j=1}^n \underbrace{a_j e^{i2\pi(\overline{OM}_j \cdot \overline{Ox})}}_{\mathcal{C}} \frac{\sin(\psi_u P_j) \sin(\psi_v Q_j)}{\sin(\psi_u) \sin(\psi_v)} \cos\left(\frac{\pi\theta}{2\theta_1}\right)^\alpha$$

Données :

- $a = (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{C}^n$ vecteur loi d'alimentation.
- $x = (u, v)$ coordonnées cartésiennes d'un point de la Terre.
- ER de centre M_j par rapport au centre de l'antenne constitué de Q_j patches en hauteur et P_j patches en longueur.
- $\lambda = 15mm$: longueur d'onde, $d = 0.9\lambda$: distance entre deux patches, $\alpha = 3.48023$ et $\theta_1 = \frac{2\pi}{3}$.
- (P_k) Pour un spot k et une antenne à n ER fixés, calculer l'alimentation a qui vérifie les contraintes. La directivité doit satisfaire certains niveaux en dB :
 - puissance maximale sur le spot k : on veut dépointer le signal.
 - isolation, rapport signal-bruit : la puissance doit être inférieure à certains seuils hors du spot.
- Idée clef : **minimiser à l'extérieur du spot au lieu de maximiser à l'intérieur.**
 - D'après la loi de conservation de l'énergie, si on arrive à baisser la valeur du rayonnement partout hors du spot, il va alors se concentrer à l'intérieur.
 - (P1) $\max_a \left(\min_{x \in \Omega_0} \mathcal{D}(a, x) \right)$ admet de l'ordre de 2^n solutions locales, alors que
 - (P2) $\min_a \left(\max_{x \in \Omega \setminus \Omega_0} \mathcal{D}(a, x) \right)$ admet une seule solution.
 - On impose la contrainte sur le bord du spot, et on n'a plus besoin de mailler l'intérieur.
- On définit une fonction coût qui évalue les contraintes en chaque point du maillage Terre :

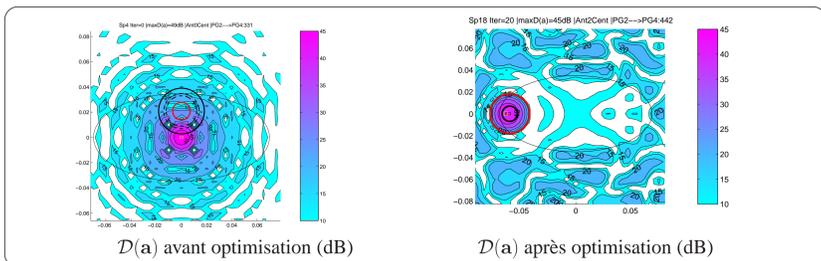
$$F(a) = \begin{pmatrix} F_1(a) \\ \vdots \\ F_p(a) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{I_1} g_{I_1}^+(a, x_1) \\ \vdots \\ \lambda_{I_p} g_{I_p}^+(a, x_p) \end{pmatrix}$$

avec les poids λ_j associés aux contraintes de type $\mathcal{D}(a) \leq M_i \implies g_i(a, x) \leq 0 \quad i = 1 \dots 4$

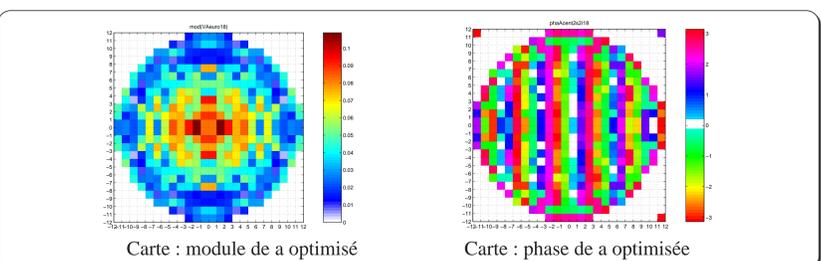
- Optimisation :

- La méthode de Gauss-Newton donne le système linéaire suivant pour trouver la direction de descente :

$$(DF^T(X_k) DF(X_k) + \rho I_n) \, d = -DF^T(X_k) F(X_k)$$



- Pour une loi d'alimentation $a = (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{C}^n$ donnée, on trace une carte de l'antenne où on représente soit le module, soit la phase du vecteur a, par une échelle de couleurs.



DEUXIÈME PARTIE : Construction d'une antenne optimisée

Méthode 1 : GRADIENT TOPOLOGIQUE

- Soit F la fonction coût différentiable, $F : L^p(\Omega) \rightarrow \mathbb{R} \quad (p < 2)$

telle que $F'(a) \delta a = \int_{\Omega} g \, da$, avec g régulière.

- On note

- $\omega(x_0, \epsilon) = x_0 + \epsilon w$, où ω est un domaine de référence contenant l'origine
- $\delta a = \delta$ dans $\omega(x_0, \epsilon)$ et 0 ailleurs.
- $\rho(\epsilon) = \text{mes}(B(x_0, \epsilon))$

alors on a

$$F(a + \delta a) = F(a) + g(x_0) \delta \rho(\epsilon) + o(\rho(\epsilon))$$

- g est appelé le gradient topologique.

- On commence avec un maillage fin (voir antenne de départ), et on regroupe alors les ER aux endroits où le gradient topologique est le plus faible pour obtenir la nouvelle géométrie de l'antenne.

Méthode 2 : RÉDUCTION DE DONNÉES : DÉCOMPOSITION EN VALEURS SINGULIÈRES (DVS)

- Les s alimentations optimales sont rangées dans une matrice $A \in \mathcal{M}_{n \times s} \quad (s < n)$.

- La DVS permet de décomposer A sous la forme $A = USV^*$ avec

- $S \in \mathcal{M}_{s \times s}$ est une matrice diagonale. Les éléments diagonaux sont les valeurs singulières $\{\sigma_j, j = 1 \dots s\}$ de A , positives et rangées par ordre décroissant (généralement, elles décroissent très vite).
- $U \in \mathcal{M}_{n \times s}$ est une matrice rectangulaire dont les vecteurs colonnes sont orthonormés.
- $V \in \mathcal{M}_{s \times s}$ est une matrice orthogonale.

- On peut reconstruire A à partir de U comme somme de matrices de rang 1 :

$$A \approx \sum_{j=1}^r \sigma_j U_j V_j^* \quad \text{avec } r \ll s \quad \text{et } U_j, V_j, j = 1 \dots s \text{ les vecteurs colonnes de } U \text{ et } V$$

CARTES ISSUES DE LA SVD :

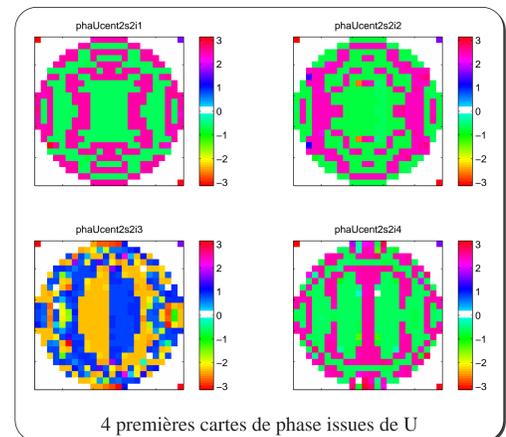
- Les premières cartes issues des vecteurs colonnes de U contiennent l'information stockée dans A , donc sont un résumé des lois d'alimentations optimales.

- On construit une carte avec des lignes de découpage qui approchent au mieux celles qui sont communes aux premières cartes issues de U

- On obtient l'antenne optimisée Antenne1 en regroupant d'après cette carte finale certains ER de Antenne0.

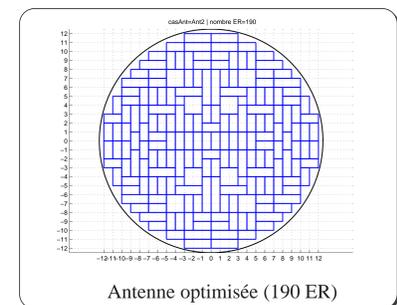
ANTENNE OPTIMISÉE :

- On utilise le **gradient topologique** pour automatiser le passage des cartes d'alimentations issues de U à la **carte de l'antenne optimisée** (c'est à dire le regroupement des ER).



- Pour valider l'antenne finale : on applique l'algorithme d'optimisation aux s spots pour vérifier si les contraintes sont encore satisfaites.

- Pour un autre test avec la zone de couverture située sur l'Europe, où les contraintes sont plus difficiles à respecter, on a construit une antenne optimisée à 198 ER.



CONCLUSION

- Remarque : la qualité de l'optimisation des lois d'alimentation conditionne la qualité de la DVS, et donc des cartes issues de U .

- Perspectives : le projet suivant doit permettre de concevoir une antenne lacunaire, des sources sont éteintes et peuvent être réactivées afin de pallier à des pannes éventuelles d'autres sources. Le but est de garantir la durée de vie de l'antenne.

Remerciements

Cette étude a été financée par Alcatel-Alenia Space.

Elle a servi de base de travail pour la création du projet OTOP coordonné par le laboratoire MIP, retenu par l'ANR-RNRT (Réseau National de la Recherche Telecom) avec pour partenaires principaux Alcatel-Alenia, France Telecom et le CNES.

