

Bilans de liaison simples pour la propagation dans le corps: un rêve impossible ?

Anja K. Skrivervik, EPFL
Anja.skrivervik@epfl.ch

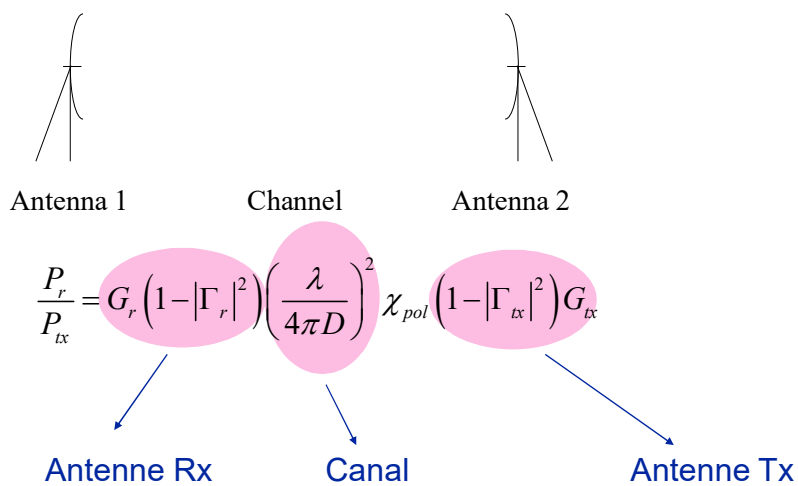
Remerciements

- Zvonimir Sipus et Marko Bosilievac (Université de Zagreb)
- Mingxiang Gao et Francesco Merli (EPFL)
- Denys Nikolayev (IETR)

Apperçu

- Pourquoi des bilans de liaison
- Quel est le problème
- Approches possible
- La suite

Bilan de liaison: le cas facile



Un peu plus sophistiqué



$$\frac{P_r}{P_{tx}} = G_r (1 - |\Gamma_r|^2) \text{Canal} (1 - |\Gamma_{tx}|^2) G_{tx}$$

Bilans de liaison

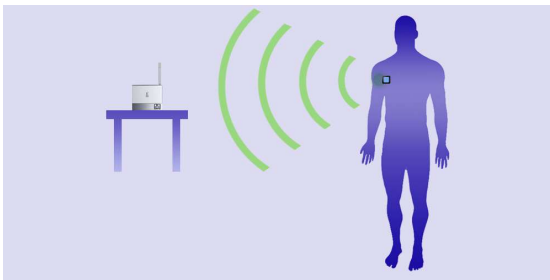
- L'émission, la réception et le canal peuvent être étudiés séparément
- Les antennes sont définies par
 - Leur diagramme de rayonnement
 - Leur impédance d'entrée
 - Leur polarisation
 - Leur gain
- L'environnement est pris en compte par le canal

Bilans de liaison

- L'émission, la réception et le canal peuvent être étudiés séparément
- Les antennes sont définies par
 - Leur diagramme de rayonnement
 - Leur impédance d'entrée
 - Leur polarisation
 - Leur gain
- L'environnement est pris en compte par le canal

Le problème difficile (étude du canal) est résolu par les spécialistes en propagation ☺

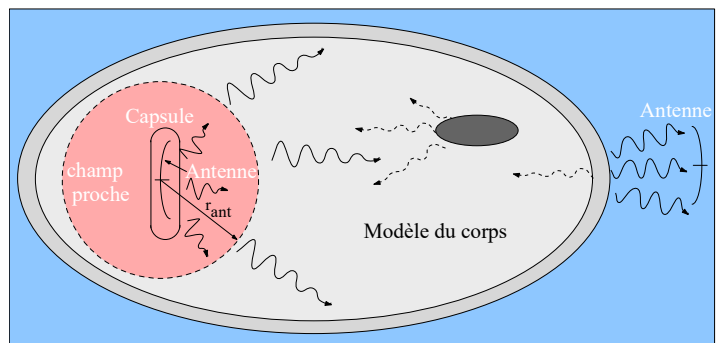
Alors, quel est le problème?



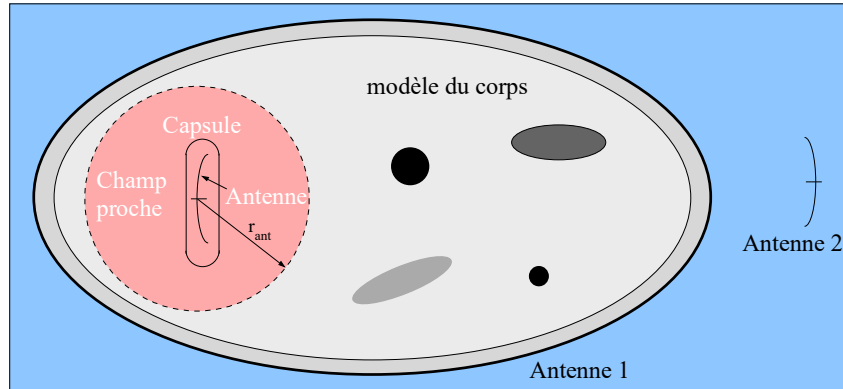
Effets à prendre en compte:

- Pertes de propagation
- Inhomogénéité du corps
- Pertes en champ proche
- Réflexions
- Diffraction

Peut-on découpler les antennes du canal?



La solution facile

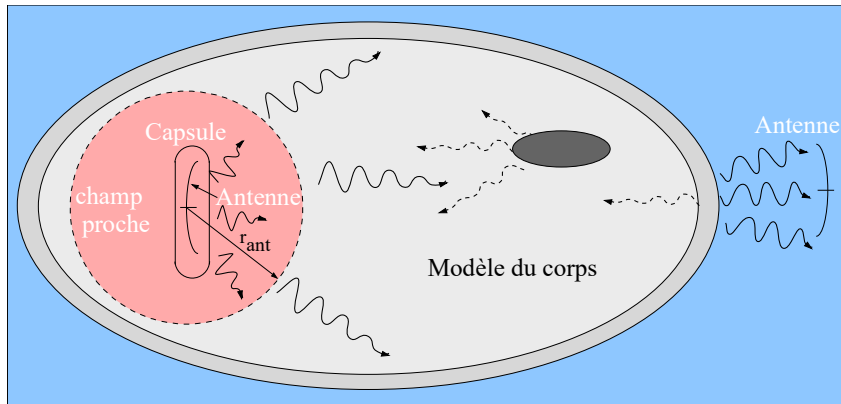


$$\frac{P_2}{P_1} = G_1 (1 - |\Gamma_1|^2) \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \chi_{pol} (1 - |\Gamma_2|^2) G_2$$

Ce n'est pas vraiment satisfaisant

- Les caractéristiques de l'antenne 1 dépendent du corps
- Il est difficile de comparer des antennes
- L'antenne 2 pourrait être dans le champ proche de l'antenne 1
- L'approche n'est pas applicable pour des liens internes ou sur la surface du corps

Solution plus adaptée



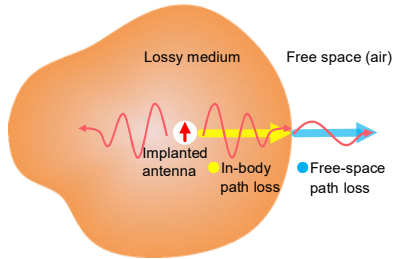
On intègre les pertes dues aux champs proches au gain de l'antennes

$$P_r|_{dB} = P_{tr}|_{dB} + G_r(d_0)|_{dB} - PL_{Body}|_{dB} - L_{refl}|_{dB} - PL_{espace\ libre}|_{dB} + A_r|_{dB}$$

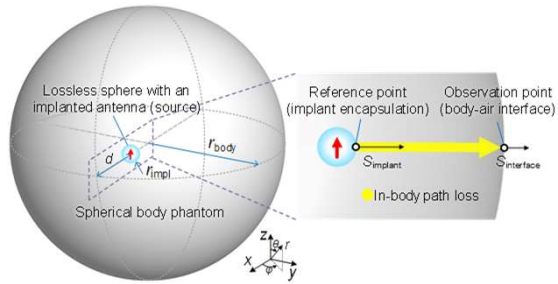
Points à étudier

- Pertes dues aux champs proches
- Propagation dans le corps
 - Modèles disponibles dans la littérature valables à partir "d'une certaine distance" de l'antenne
- Réflexion et réfraction aux interfaces
- Effet des dimensions en fonctions de la longueur d'onde (résonances)

Méthode pour estimer les pertes dues aux champ proches



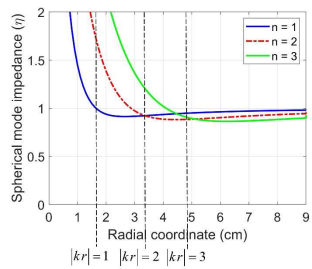
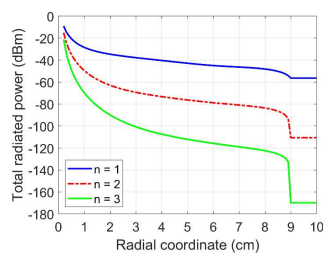
Est approximé par



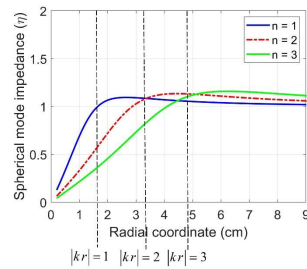
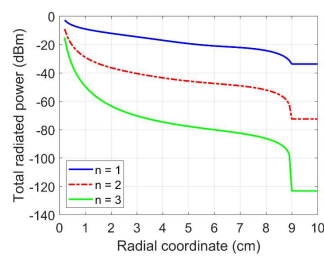
Les champs rayonnés sont exprimées en modes sphériques

Quelques exemples

Modes TM
(source électrique)



Modes TE
(source magnétique)

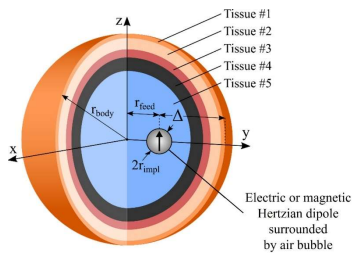


Observations

- Les pertes augmentent avec l'ordre du mode
 - Le coefficient de perte augmente avec l'ordre du mode
 - La distance d'influence des champs proches augmente avec l'ordre du mode
- La distance d'influence du champ proche d'un mode peut être estimée par la relation:

$$d_0 = \frac{n}{k} \quad n \text{ est l'ordre du mode, TE}_{nm} \text{ or TM}_{nm}, k \text{ est le nombre d'onde}$$

Pertes pour le premier mode



$$W_{\text{espace libre}} = W_{\text{quittant l'antenne}} \cdot \frac{r_{\text{impl}}^2}{\Delta^2} \cdot e_{\text{champ proche}} \cdot e_{\text{propagation dans le corps}} \cdot e_{\text{reflexions}}$$

$$e_{\text{propagation dans le corps}} = \exp(-2\alpha(\Delta - r_{\text{impl}}))$$

$$\text{TM} \quad e_{\text{champ proche}} = \frac{f_1(\Delta)}{f_1(r_{\text{impl}})},$$

$$e_{\text{reflexions}} = \frac{\text{Re}\{|T|^2/Z_{\text{air}}\}}{\text{Re}\{1/Z_{\text{corps}}\}}, \quad T = \frac{2Z_{\text{air}}}{Z_{\text{air}} + Z_{\text{corps}}}$$

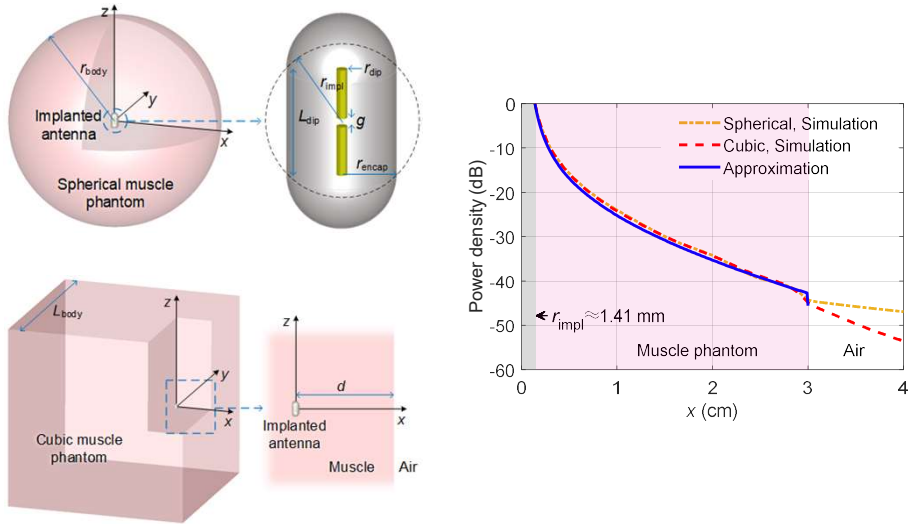
$$f_1(r) = \text{Re} \left\{ \eta \cdot \left(|k|^2 + \frac{2\alpha}{r} + \left(1 - \frac{k^*}{k} \right) \frac{1}{r^2} - j \frac{1}{kr^3} \right) \right\} \quad \eta = \eta_0 / \sqrt{\epsilon_r}$$

$$\text{TE} \quad e_{\text{champ proche}} = \frac{f_2(\Delta)}{f_2(r_{\text{impl}})},$$

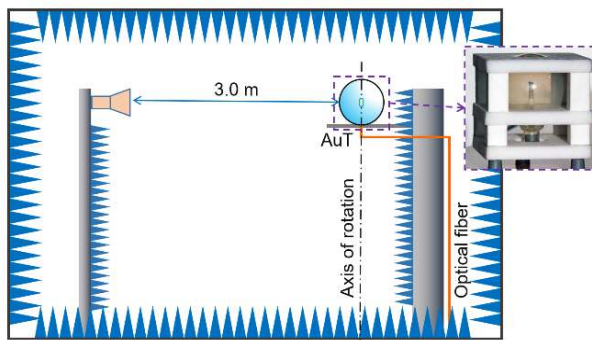
$$f_2(r) = |k|^2 + 2\alpha/r$$

$$e_{\text{reflexion}} \approx \left| \frac{2\sqrt{\epsilon_{\text{corps}}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{\text{corps}}}} \right|^2 / \text{Re}\{\sqrt{\epsilon_{\text{corps}}}\}$$

Validation 1



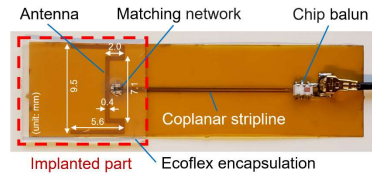
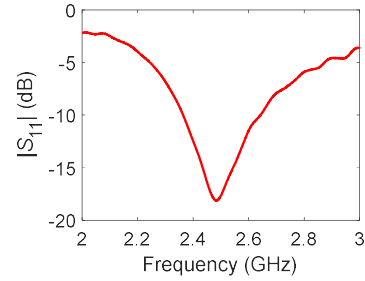
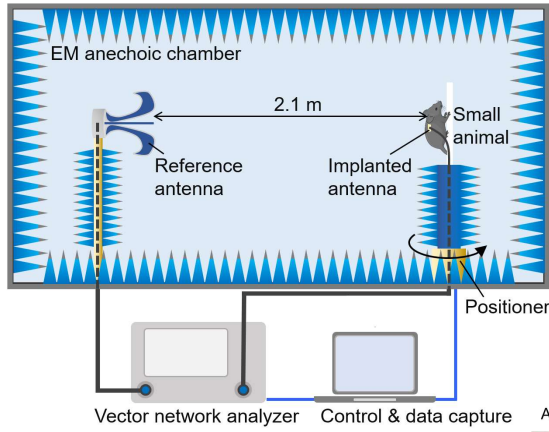
Validation 2: Gain d'une antenne dans une bouteille sphérique



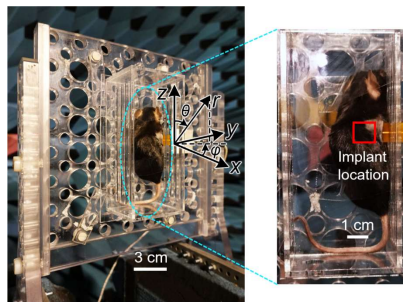
Frequence	Simulation	Measure	Approximation
434 MHz	-28.9 dBi	-29.6 dBi	-27.65 dBi
2.45 GHz	-18.6 dBi	-22.1 dBi	-18.72 dBi

Measures : D. Nikolayev, et al., "Reconfigurable Dual-Band Capsule-Conformal Antenna Array for In-Body Bioelectronics," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 70, no. 5, pp. 3749-3761, May 2022

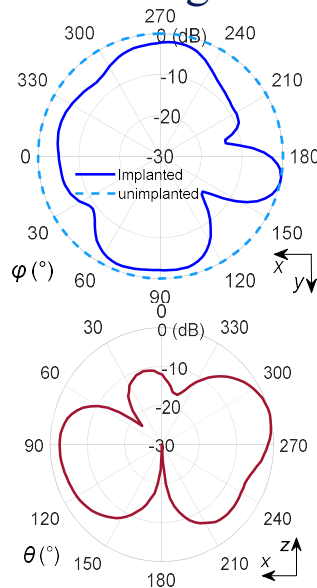
Que se passe t'il dans le cas d'un corps de dimensions similaires à la longueur d'onde?



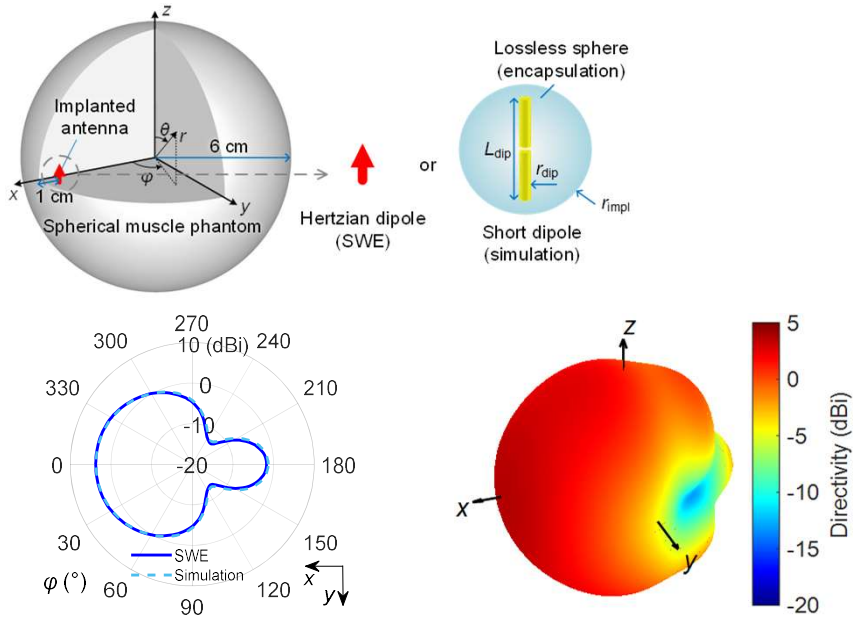
Que se passe t'il dans le cas d'un corps de dimensions similaires à la longueur d'onde?



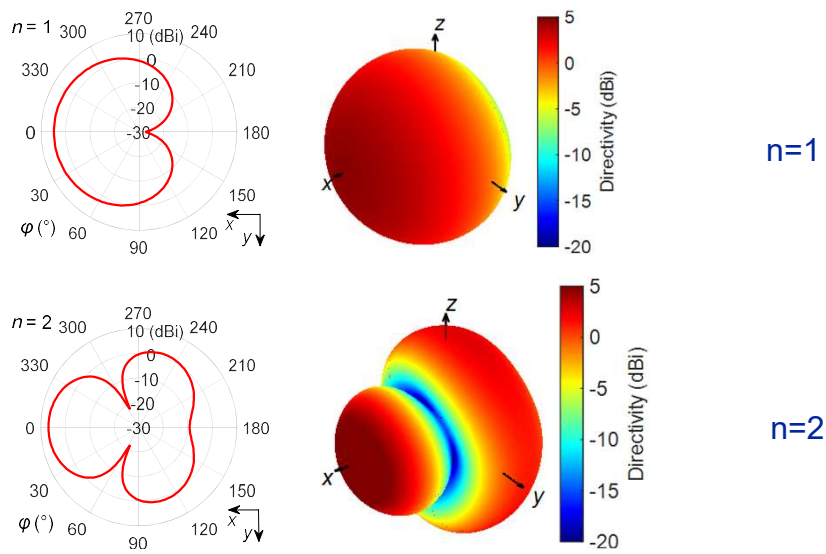
Le corps se comporte comme un résonateur diélectrique à pertes



Grand modèle: $r=6\text{cm}$ $f=2.45\text{ GHz}$

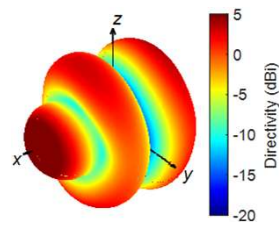
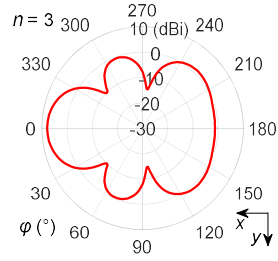


Grand modèle



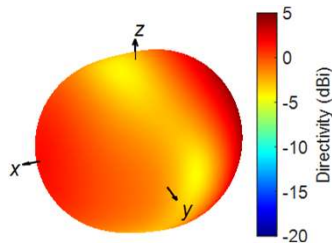
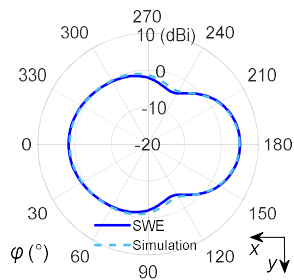
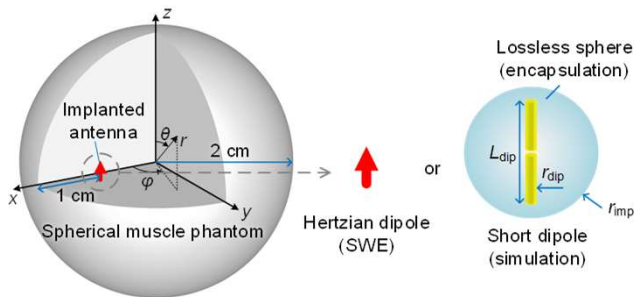
Champ lointain dû à l'interaction des mode TM_{mn} (groupés) avec le corps

Grand modèle

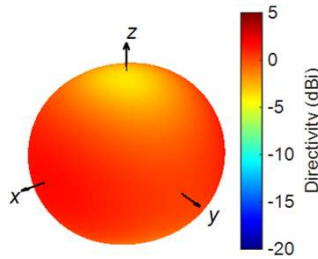
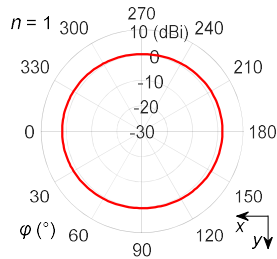


$n=3$

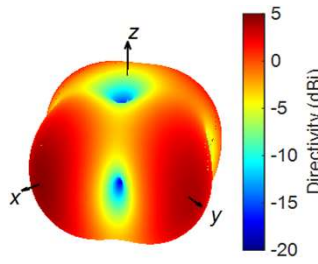
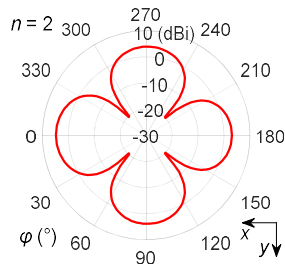
Petit modèle: $r=2\text{cm}$, $f=2.45\text{GHz}$



Petit modèle



$n=1$



$n=2$

Observations

Dans ce cas, on ne peut vraiment pas découpler l'antenne du corps hôte



- Un bilan de liaison simple est possible pour plusieurs cas
 - Hôte relativement grand
 - Interface corps espace libre simple (assimilable à un plan, une sphère, ou autre forme simple)
- Nous sommes encore très loin d'une formulation générale:
 - Améliorer le modèle de la réflexion aux interfaces
 - Diffraction aux interfaces