



**Etude et modélisation des performances
du radar bistatique EISS conçu et développé
pour le sondage profond des sous-sols planétaires**

Marc BIANCHERI-ASTIER

Soutenance de thèse – 02 décembre 2010
sous la direction de Valérie CIARLETTI

Université Versailles St-Quentin ; CNRS/INSU, LATMOS-IPSL



- ➔ Envoi d'une onde EM qui se propage & Interaction avec les hétérogénéités du milieu sondé

Différents types de radars :

- radars en orbite :

MARSIS (1,5-5,5MHz / MarsExpress 2004)

SHARAD (15-25MHz / MarsGlobalOrbiter 2006)

- AVANTAGES :

- cartographie globale (à l'échelle planétaire)

- INCONVENIENTS :

- fortes atténuations (distance & à l'ionosphère)

- impossibilité de faire de l'intégration de mesures

- radars posés à la surface :

PRISM (10-20MHz / MARS'98)

GPR de NetLander (2-4MHz / NetLander)

EISS (2-4MHz / StationNetwork 2020 ?)

- AVANTAGES :

- pas de pertes dû à la traversé de l'ionosphère

- possibilité de faire de l'intégration de mesures

- INCONVENIENTS :

- sondage local

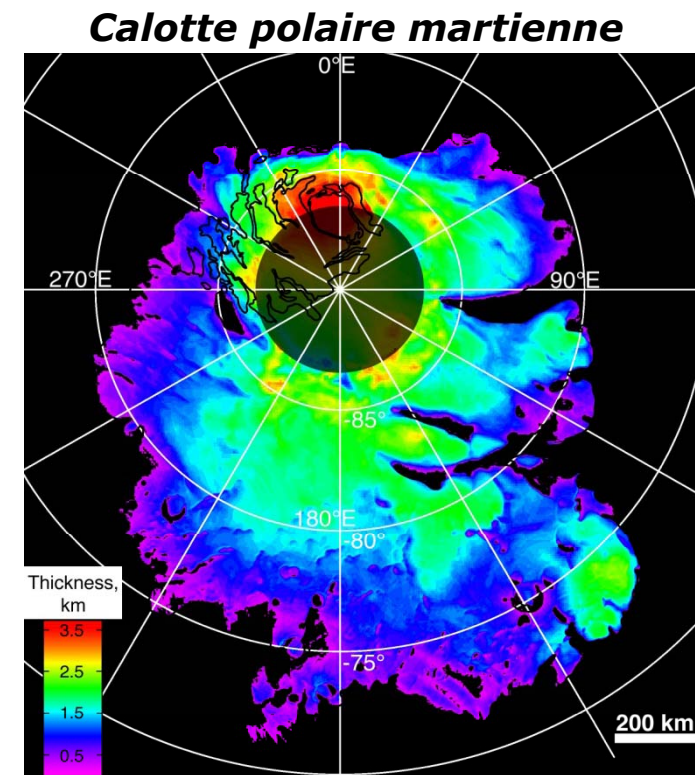
- fort couplage entre le sol et les antennes



- ➔ Radars BF » sondage profond

- ➔ Très peu d'informations sur le sous-sol profond de MARS

Radar EISS – ExoMars 2013 Electromagnetic Investigation of **Sub**Surface



Plaut et al., 2007
MARSIS

➔ Très peu d'informations sur le sous-sol profond de MARS

Radar EISS – ExoMars 2013

Electromagnetic Investigation of SubSurface

Comprendre l'évolution et la formation de MARS
avec l'étude de son sous-sol profond

Présence passée d'eau liquide à la surface de Mars

$T^{\circ}_{\text{moyenne}} = -63^{\circ}\text{C}$
Pression = 6.1mbar
Flux géothermique

eau liquide
impossible à la surface

dans le sous-sol profond (~km) ?

SONDAGE électromagnétique

Fréquences basses de la gamme HF



1 - Le radar EISS

→ un radar GPR atypique

2 - Etude du couplage des antennes et du sous-sol

2.1 - Optimisation des antennes électriques

2.2 - Estimation des propriétés électriques du proche sous-sol

3 - Etude du mode de sondage bistatique

3.1 - Modèle analytique des temps de propagation

3.2 - Imagerie 3D du sous-sol

3.3 - Optimisation de la couverture radar

4 - Bilan et perspectives

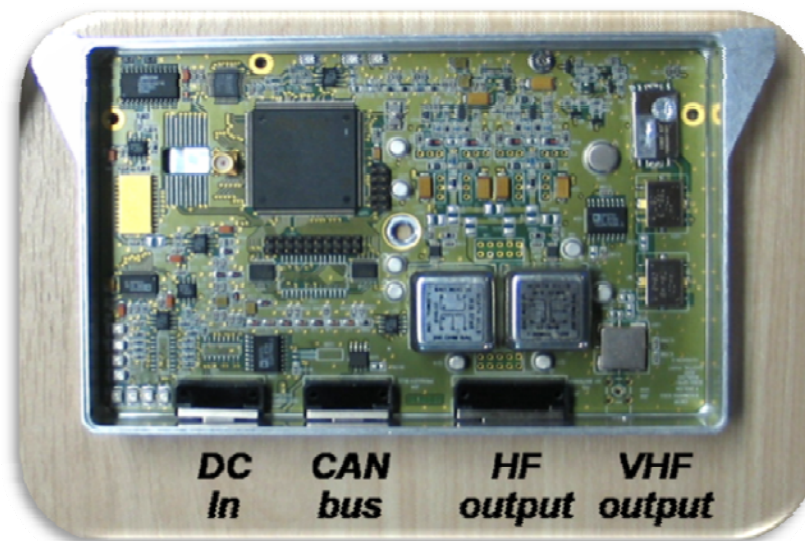
1- Le radar EISS

Principe de l'instrument

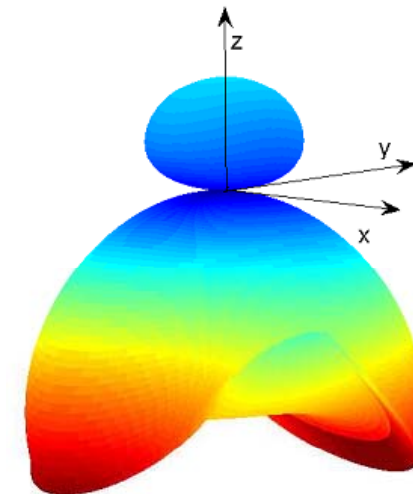


Conçu et développé dans le cadre de la mission ExoMars 2013 (ESA) par le LATMOS

- **Profondeur de pénétration importante (>km)**
 - » Fréquences centrales : 2MHz & 4MHz
- **Résolution spatiale visée < 100m**
 - » Largeur de bande de l'ordre du MHz
 - » Impulsion temporelle relativement courte
- **Sondage dans une zone étendue du sous-sol**
 - + *contraintes* : émetteur fixe & contraintes de masse et d'encombrement
 - » Antennes filaires non directives



165x105x50mm



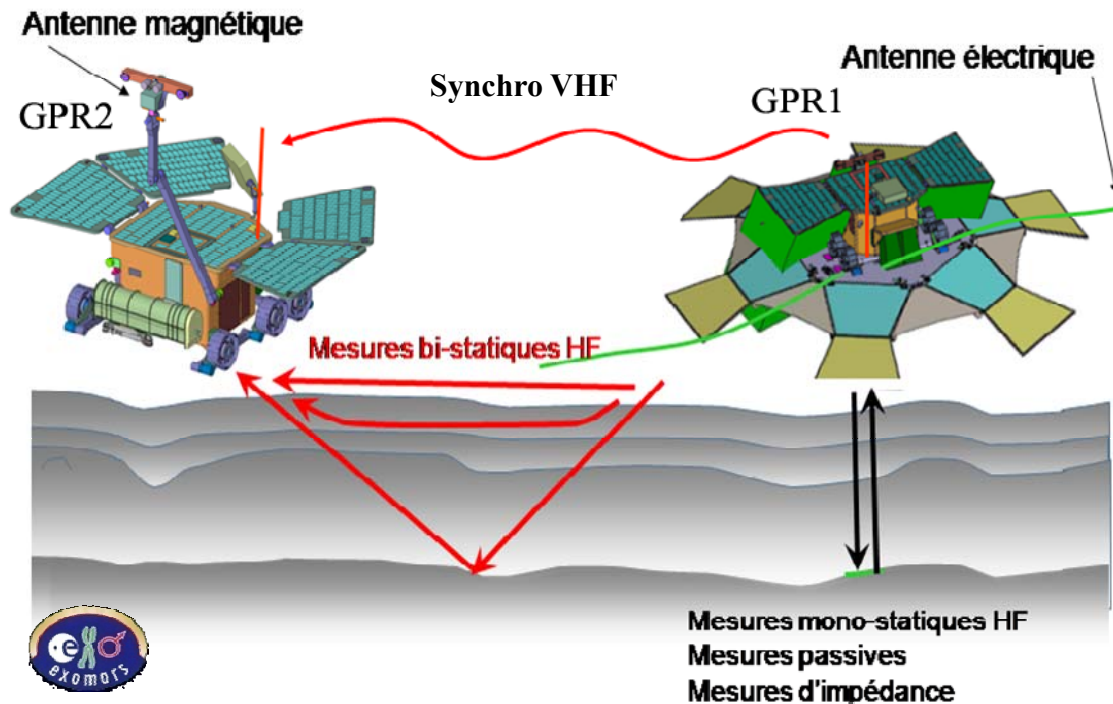
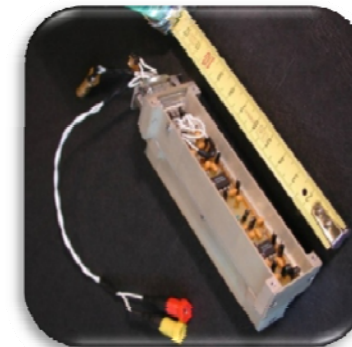
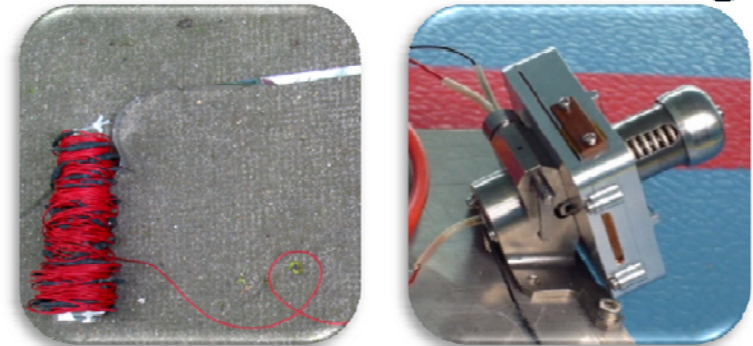
1- Le radar EISS

Principe de l'instrument

EISS est constitué de 2 modules : GPR1 & GPR2

Antennes :

- ❑ 2 monopôles électriques (de 35m : émission BF) » E_x } Emission et/ou Réception
- ❑ 1 petite antenne magnétique orientable » $H_x H_y H_z$ } Réception



avec les mêmes ressources ...

» **4 Modes de fonctionnement :**

- ❑ Mode bistatique (100m à 1km)
- ❑ Mode monostatique
- ❑ Mode "Mesure d'impédance"
- ❑ Mode passif

➔ EISS : un radar atypique

1- Le radar EISS

L'antenne électrique

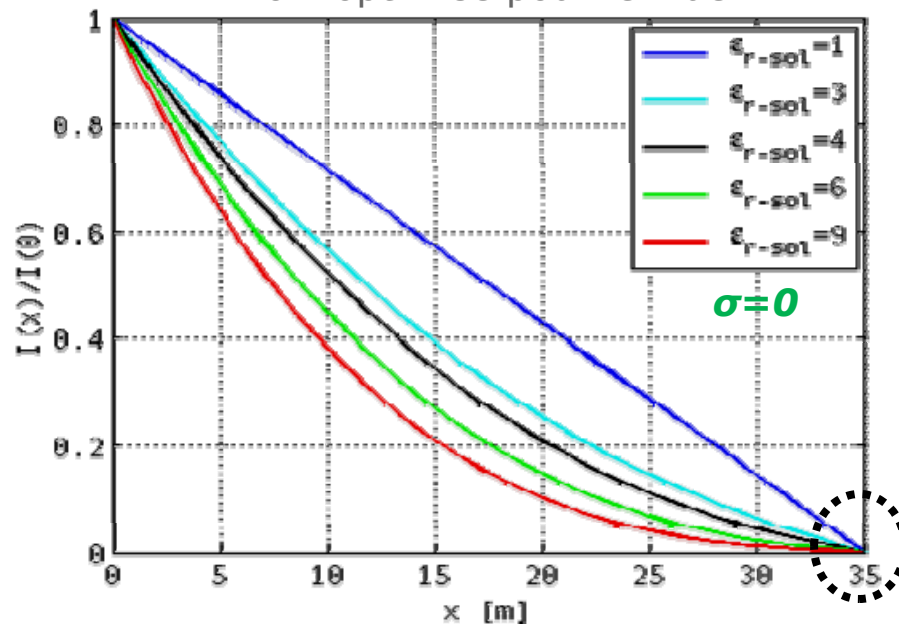
BUT : Avoir une émission large bande (EISS - radar impulsif)

- » Avec un dipôle → EMISSION adaptée pour 1 unique fréquence
- » large-bande
 - » EMETTRE plusieurs fréquences
 - sans distorsion et avec un TOS faible
 - » Eviter les phénomènes de réflexions en bout de ligne (ringing)
 - » avec un courant nul à la fin de l'antenne

Solution proposée par Wu & King : profil résistif

- » assurer un courant nul à la fin de l'antenne
- avec une décroissance du courant le long de l'antenne linéaire lorsque le profil est adapté au milieu

Profil optimisé pour le vide



INCONVENIENT :
mauvais rendement
dû aux charges résistives

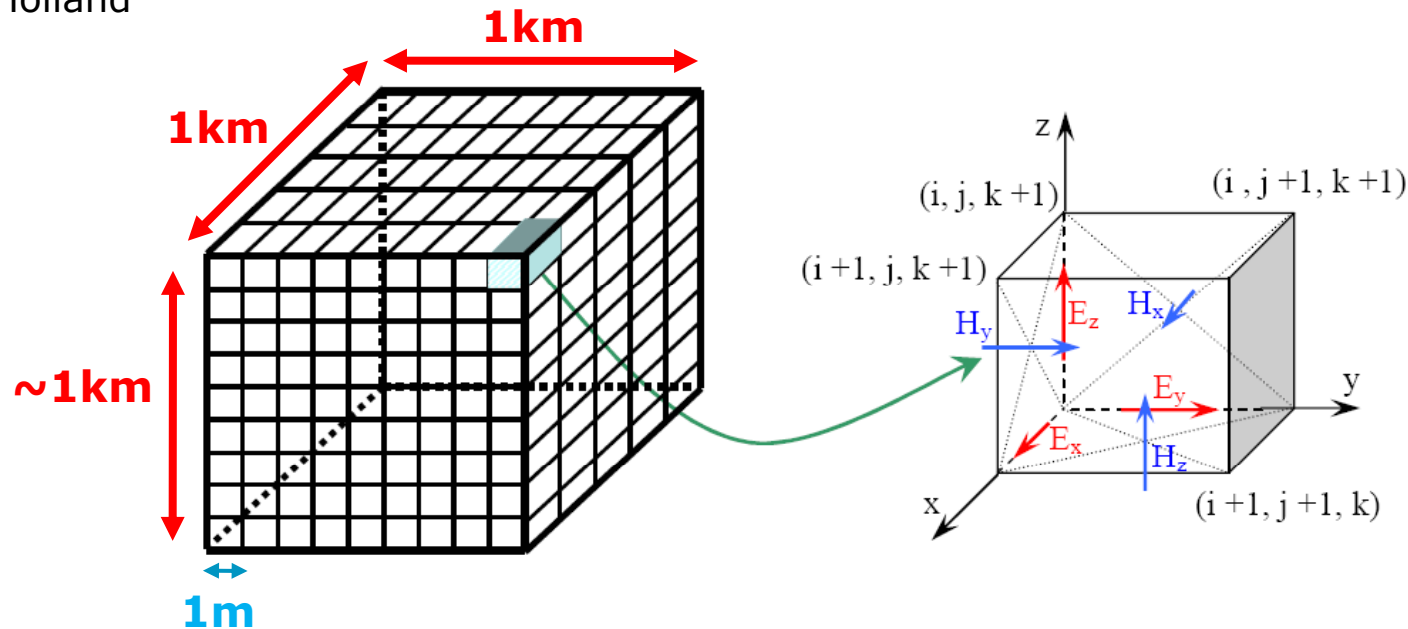
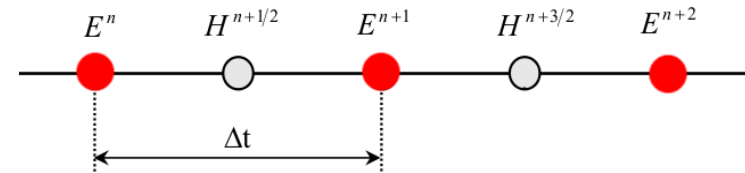


Influence notable du sol

Outils de modélisation :

- ❑ Modèles analytiques
- ❑ Méthode FDTD (Finite Difference in Time Domain)
(implémentée dans le code TEMSI-FD XLIM Limoges)

- » Modélisation du sous-sol (interfaces, ...)
- » Modélisation d'antennes filaires avec l'implémentation du formalisme des fils minces de Holland



- » Validation des modèles analytiques
- » Génération de données simulées réalistes pour la mise au point des traitements d'inversion

2- Couplage antenne/sous-sol

2.1 Optimisation des antennes électriques

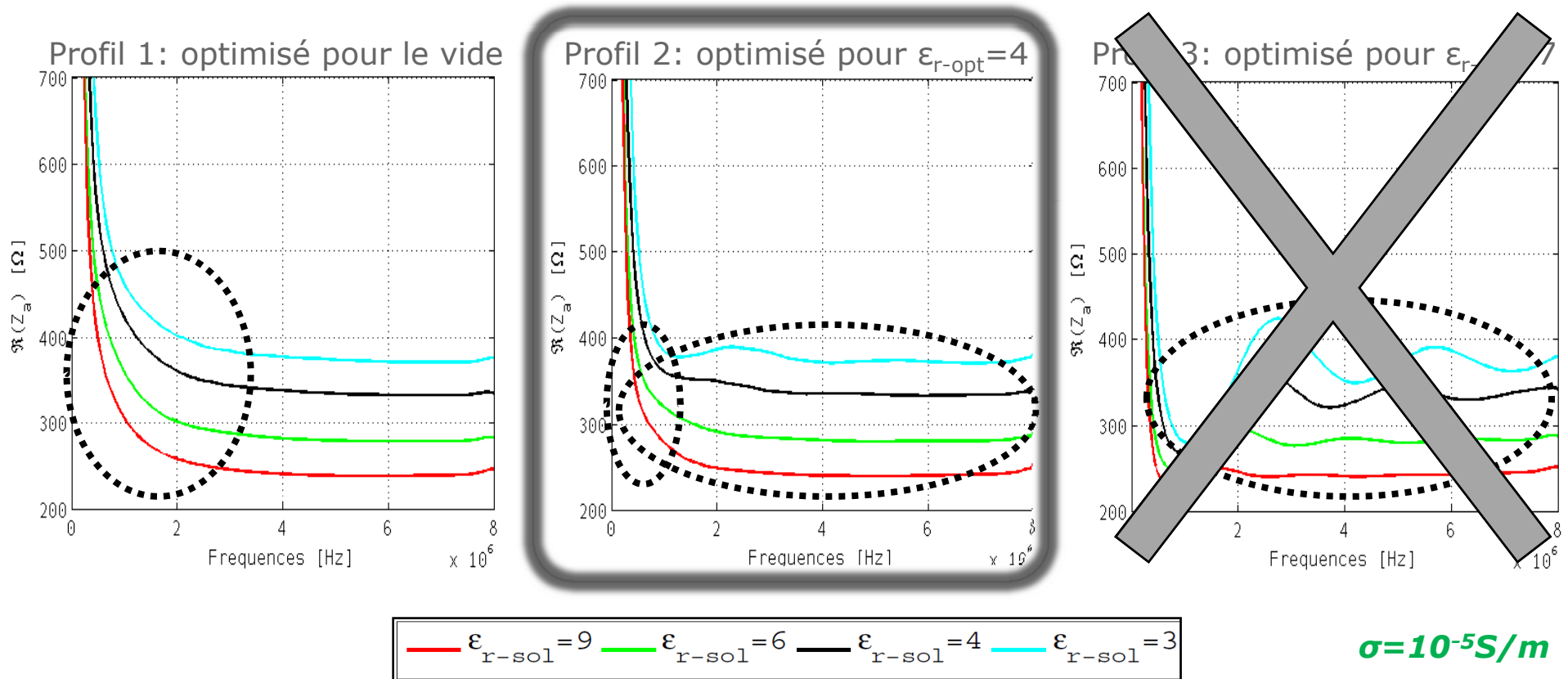


Profil fréquentiel de l'impédance de l'antenne :



Optimiser l'adaptation d'antenne

» Impédance Z_a stable sur la bande passante de EISS quel que soit le sous-sol

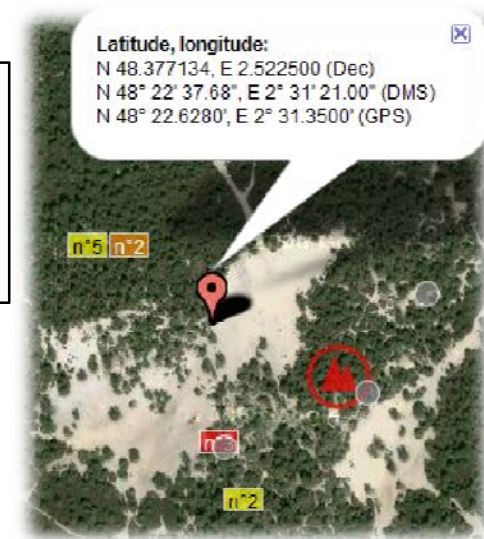
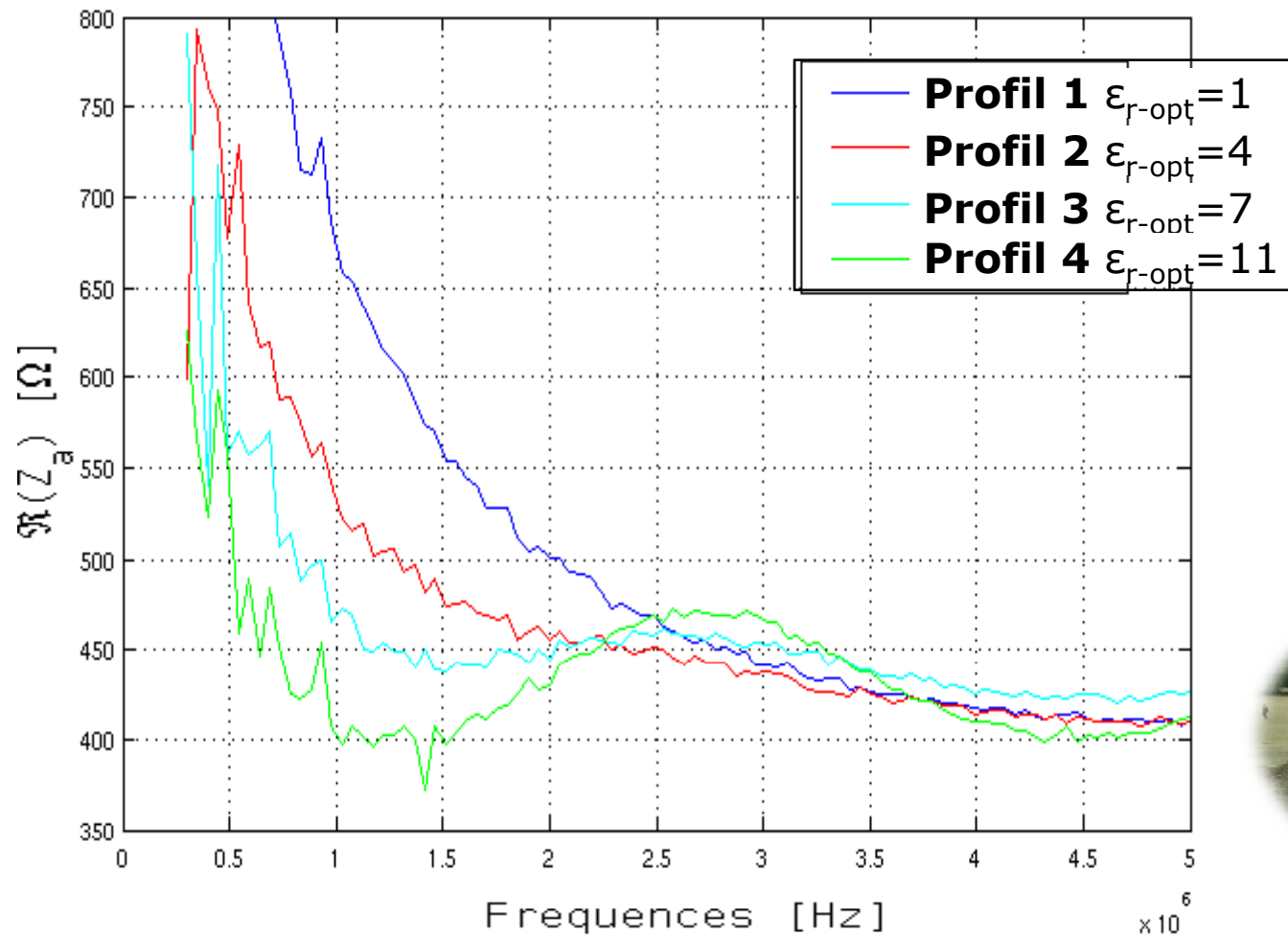


2- Couplage antenne/sous-sol

2.1 Optimisation des antennes électriques

Profil fréquentiel de l'impédance de l'antenne :

Campagne de mesures à la forêt de Fontainebleau



2- Couplage antenne/sous-sol

2.2 Estimation des propriétés électriques du proche sous-sol

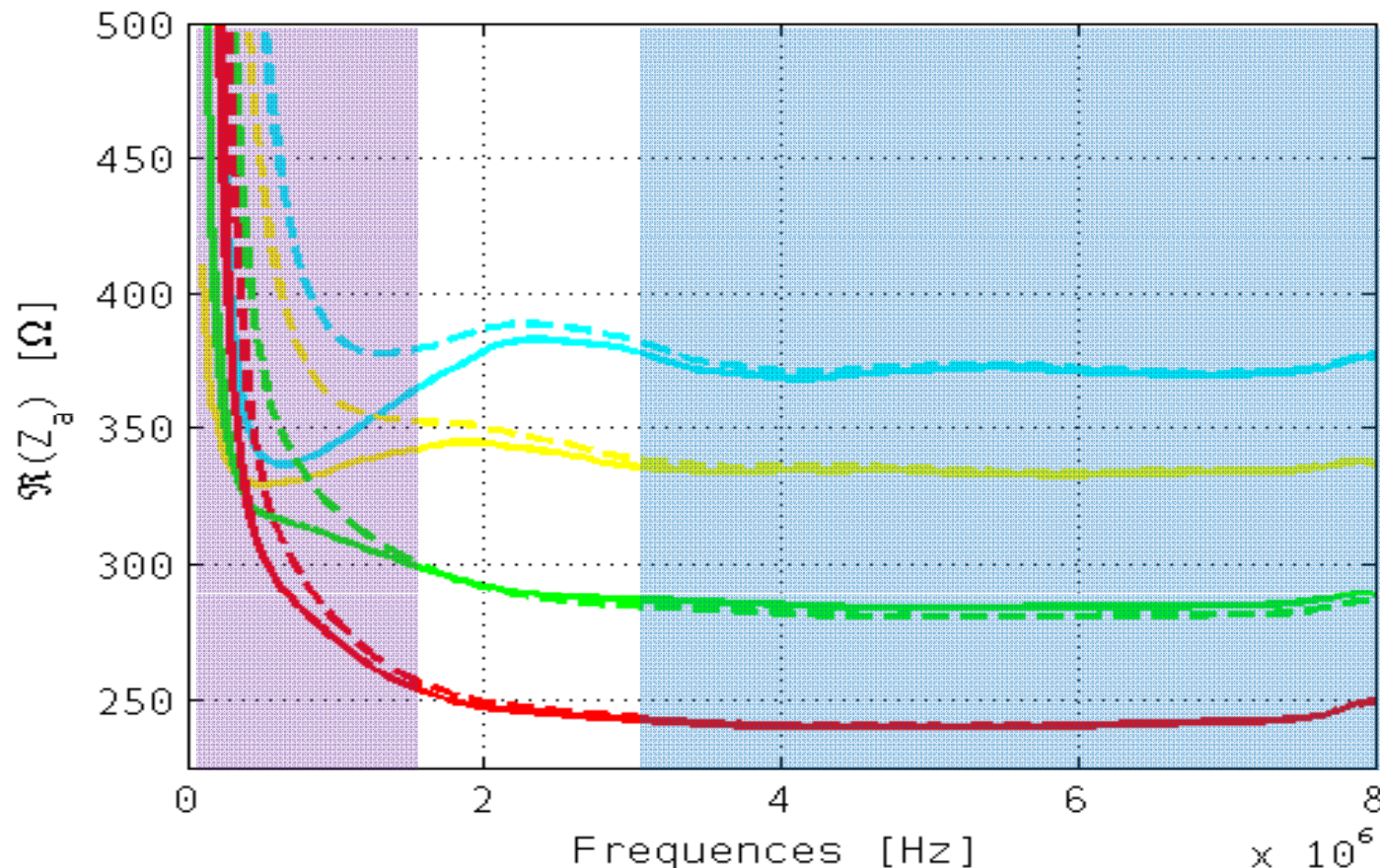


Estimation de la permittivité & conductivité du sous-sol via l'impédance Z_a

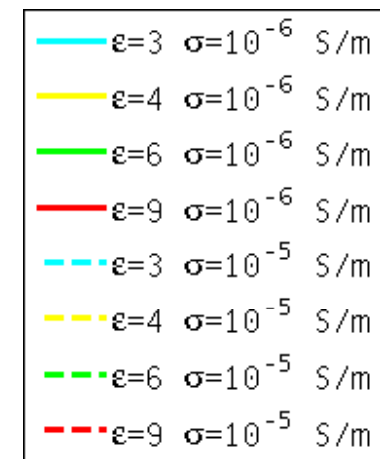


COMMENT ?

□ Etudier LE PROFIL RESISTIF SELECTIONNE pour divers sous-sols » 'Abaques'



Profil #2



Précision de l'estimation :

$$|\Delta \epsilon_{r-sol}| = 0,21$$

$$|\Delta \sigma| = 2 \cdot 10^{-5} \text{ S.m}^{-1}$$

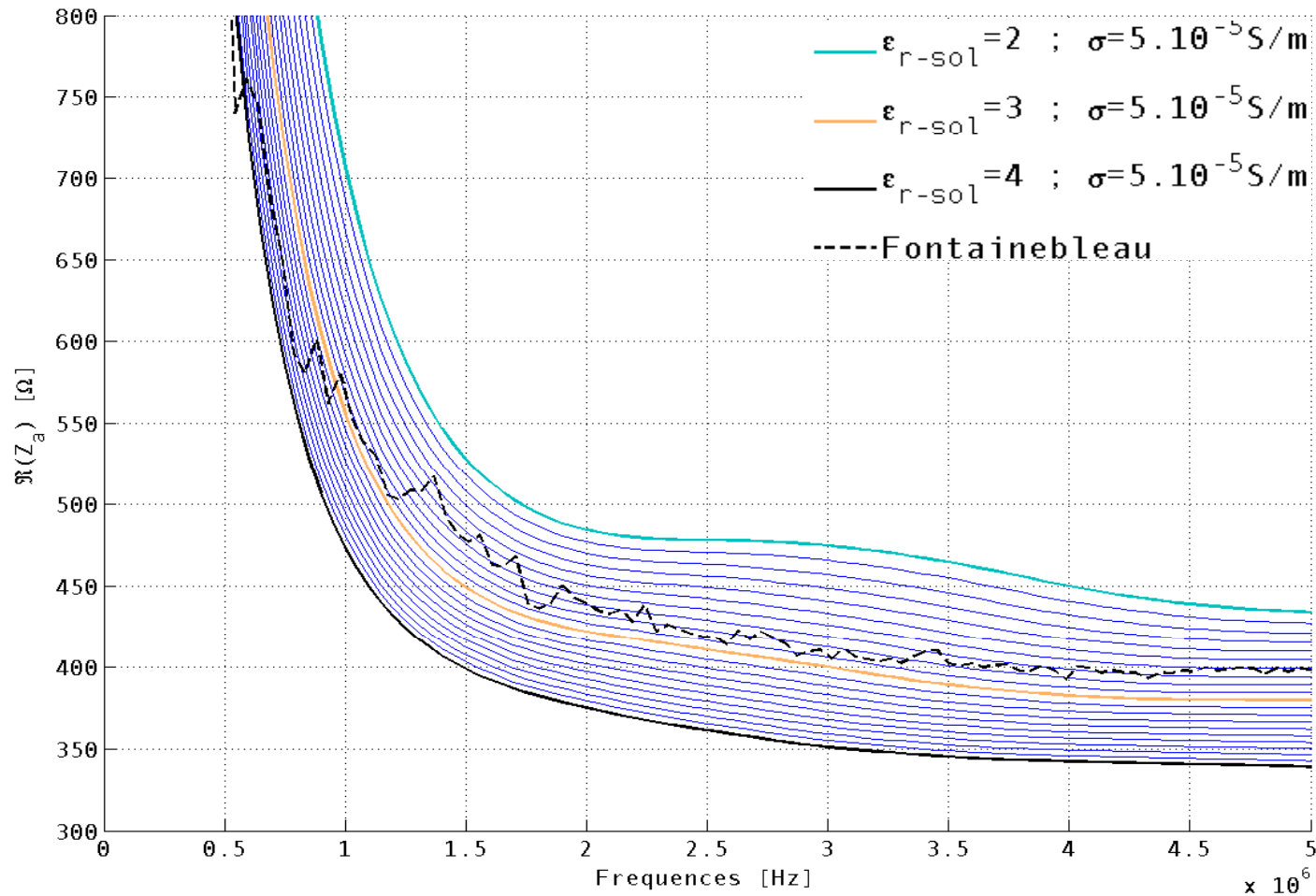
2- Couplage antenne/sous-sol

2.2 Estimation des propriétés électriques du proche sous-sol



Validation de la méthode d'estimation :

Campagne de mesures à la forêt de Fontainebleau



Profil #2

$$\epsilon_{r-sol}=2,8$$
$$\sigma=5.10^{-5} S.m^{-1}$$

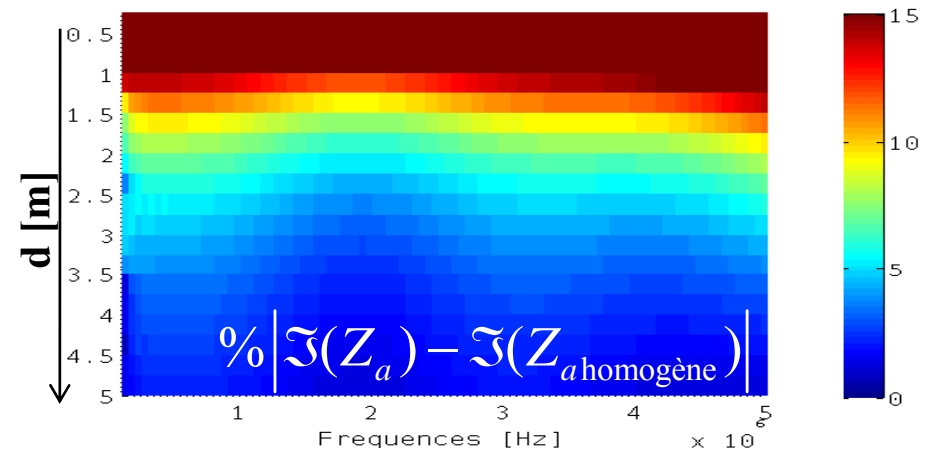
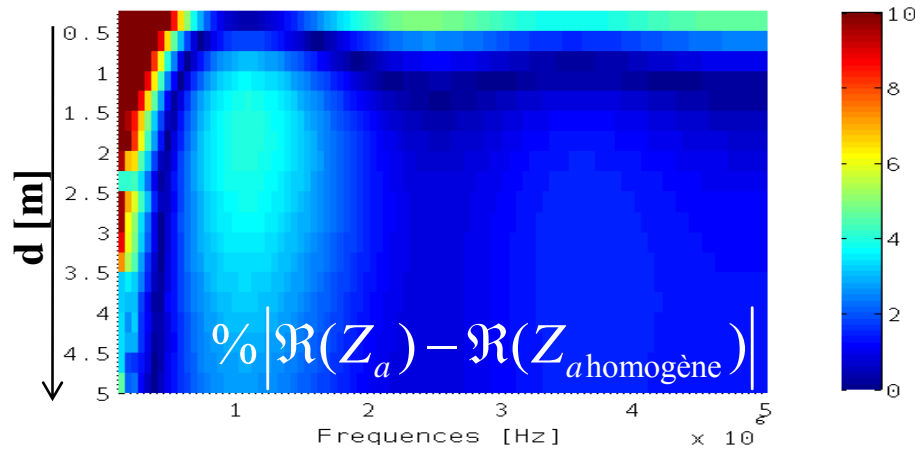
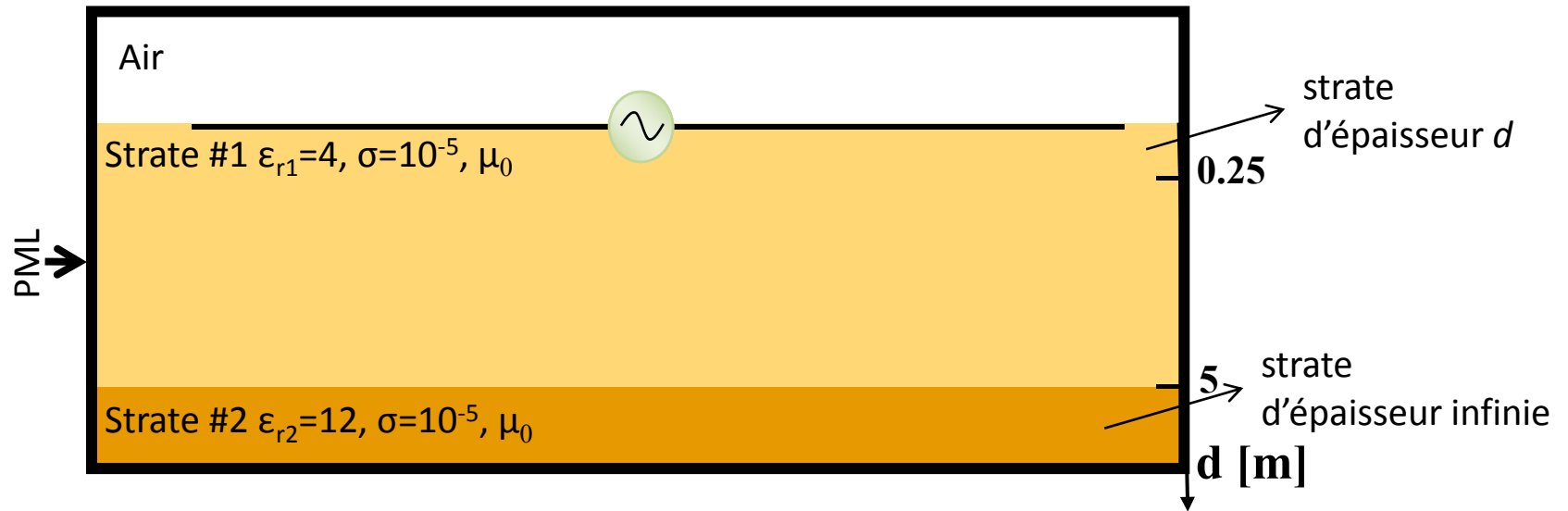


**Validation
de la méthode
(instrument EPSIMU)**

2- Couplage antenne/sous-sol

2.2 Estimation des propriétés électriques du proche sous-sol

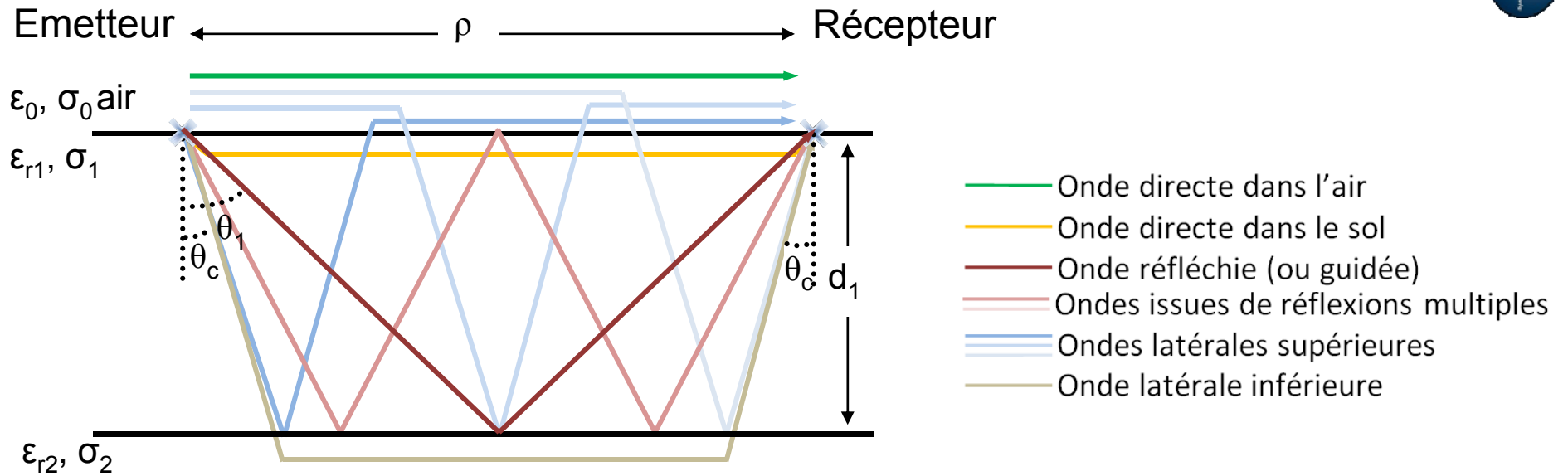
Représentativité (en profondeur) des paramètres inversés :



Caractéristiques des ~2 premiers mètres du sous-sol

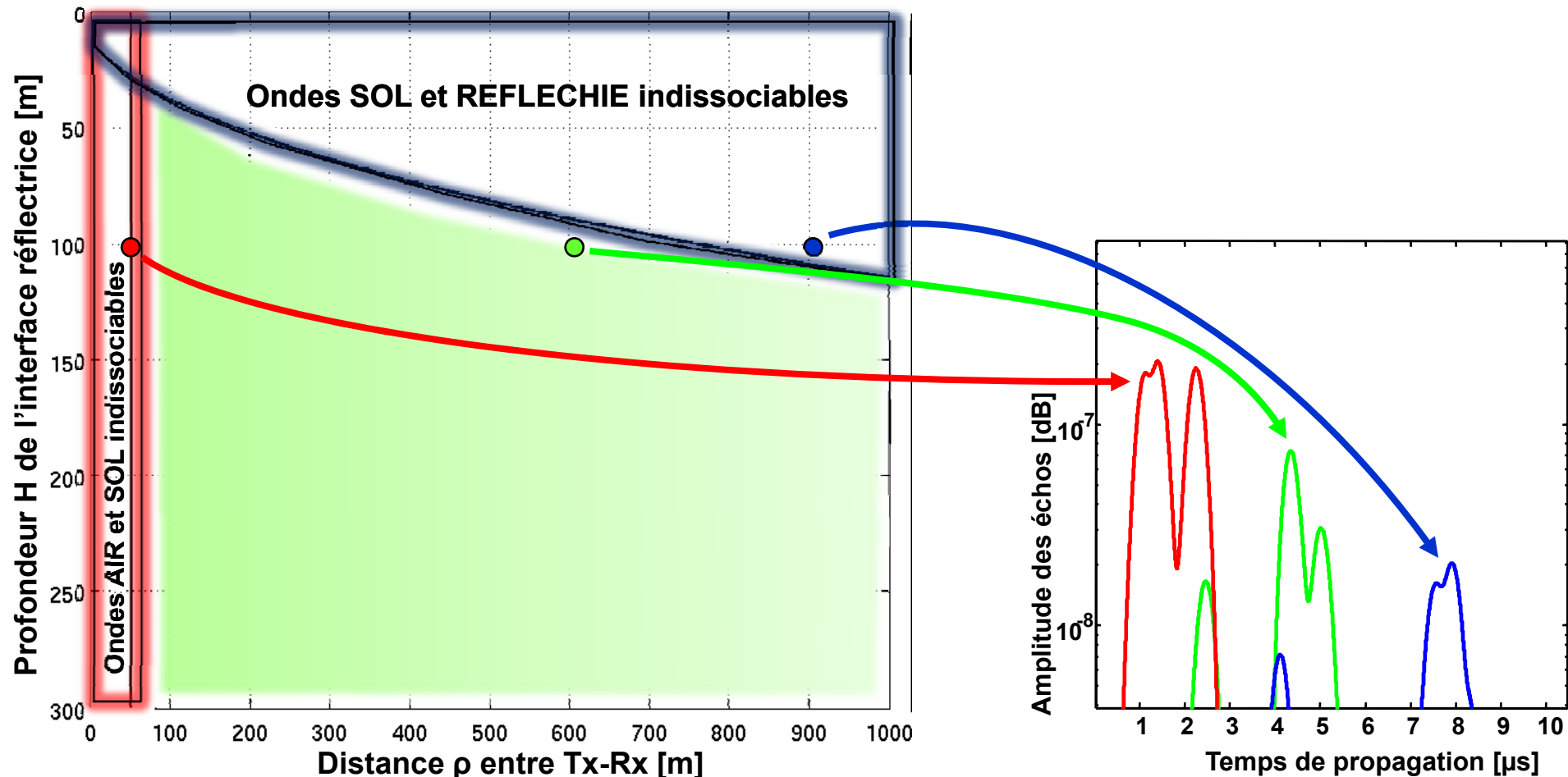
3- Etude du mode bistatique

3.1 Modèle analytique des temps de propagation



3- Etude du mode bistatique

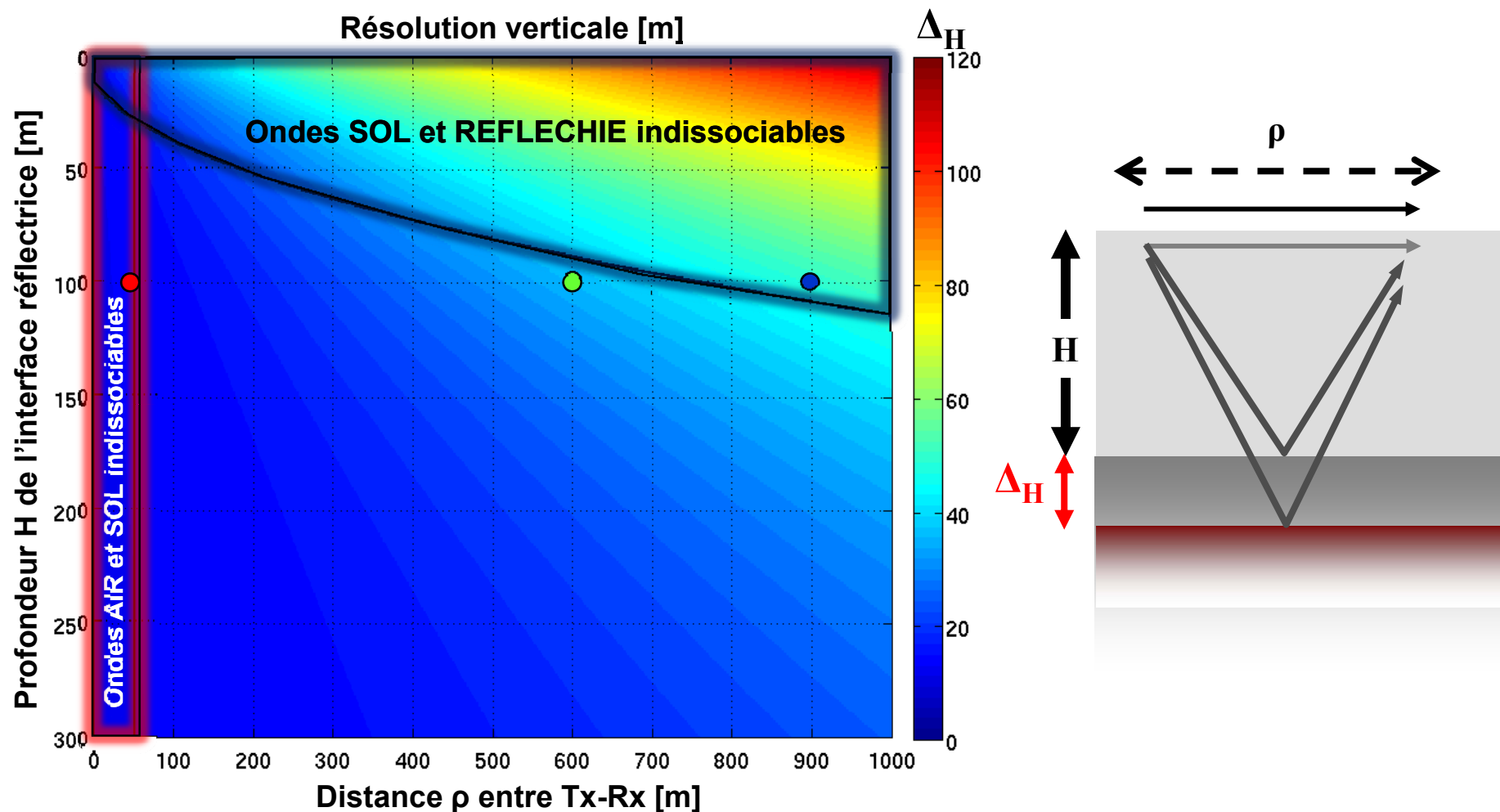
Avant-propos : résolution verticale



avec une résolution temporelle $\Delta_t = 0.15 \mu s$
(obtenue pour des impulsions courtes de EISS)

3- Etude du mode bistatique

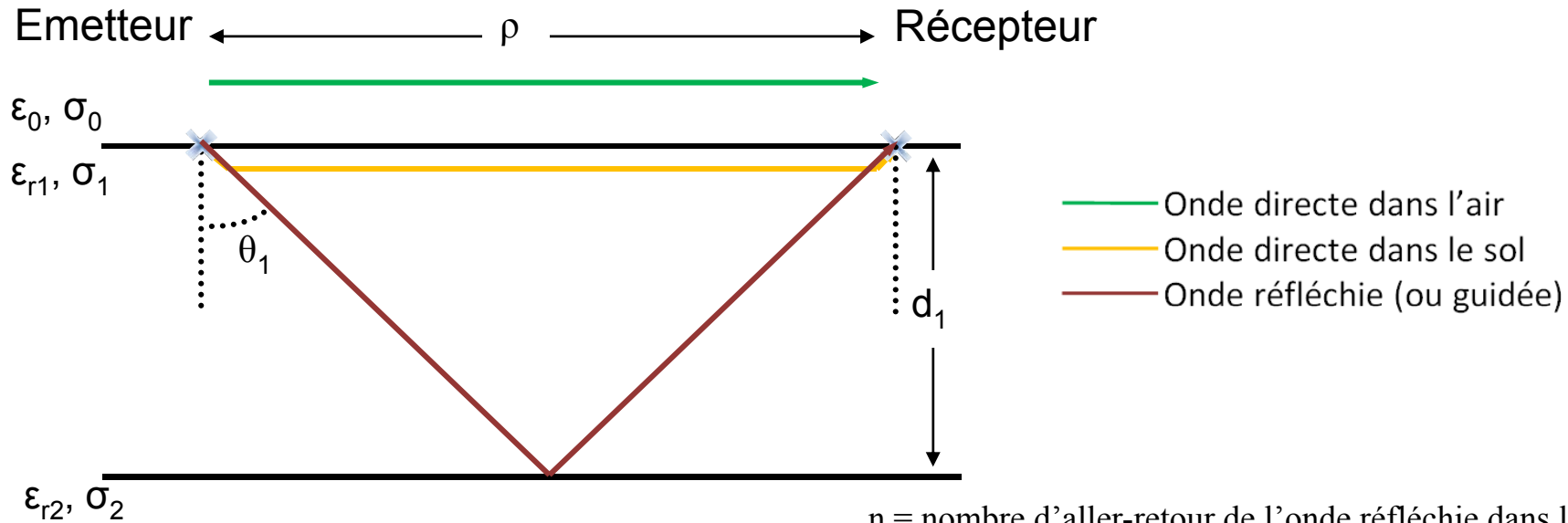
Avant-propos : résolution verticale



avec une résolution temporelle $\Delta_t = 0.15 \mu s$
(obtenue pour des impulsions courtes de EISS)

3- Etude du mode bistatique

3.1 Modèle analytique des temps de propagation



- Onde directe dans l'air
- Onde directe dans le sol
- Onde réfléchi (ou guidée)

Onde directe dans l'air

Temps d'arrivée $t = \frac{\rho}{c}$ Amplitude $\frac{1}{\rho^2}$

Onde directe dans le sol

Temps d'arrivée $t = \frac{\rho \sqrt{\epsilon_{r1}}}{c}$ Amplitude $\frac{1}{\rho^2}$

$n =$ nombre d'aller-retour de l'onde réfléchi dans le milieu

Ondes réfléchies (ou guidées)

Modèle à 1 couche :

Temps d'arrivée $t_n = \frac{r_n \sqrt{\epsilon_{r1}}}{c}$ $r_n = \sqrt{\rho^2 + (2nd_1)^2}$

Amplitude $1 / r_n$ $\theta_n = \sin^{-1} \left(\frac{\rho}{r_n} \right)$

Modèle à N couches :

» approximation de Malovichko

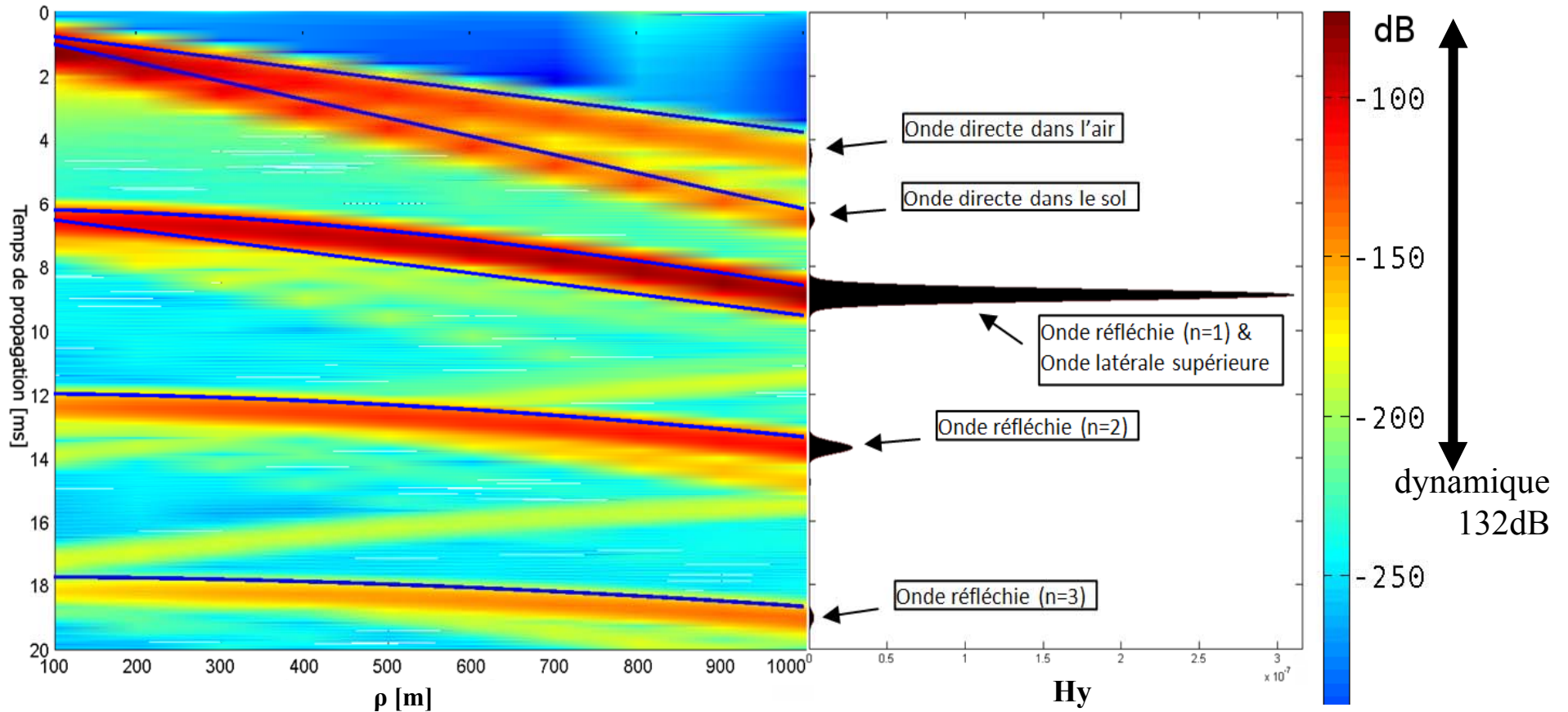
Temps d'arrivée $t_n = f(\rho, \epsilon_{r-soli}, d_i)$

3- Etude du mode bistatique

3.1 Modèle analytique des temps de propagation



Cas d'une stratification horizontale :



$$\epsilon_r=4 ; \sigma=0 \text{ S.m}^{-1}$$

Réflecteur parfait à 500m de profondeur

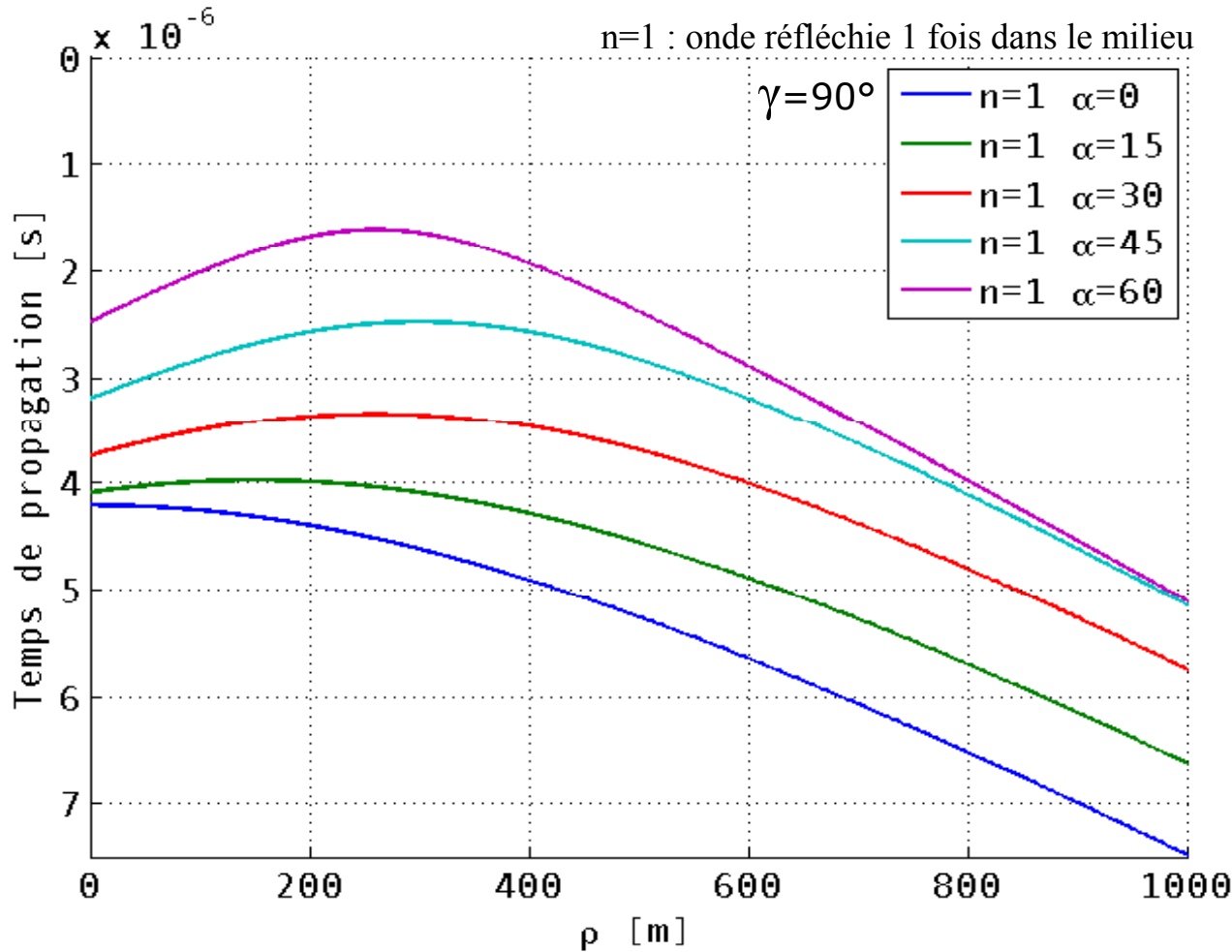
$\phi_{pt}=45^\circ$ direction du rover en ligne droite

3- Etude du mode bistatique

3.1 Modèle analytique des temps de propagation



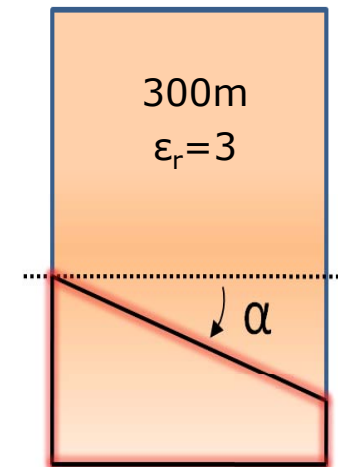
Cas d'une stratification inclinée :



3D

α dans le plan yOz

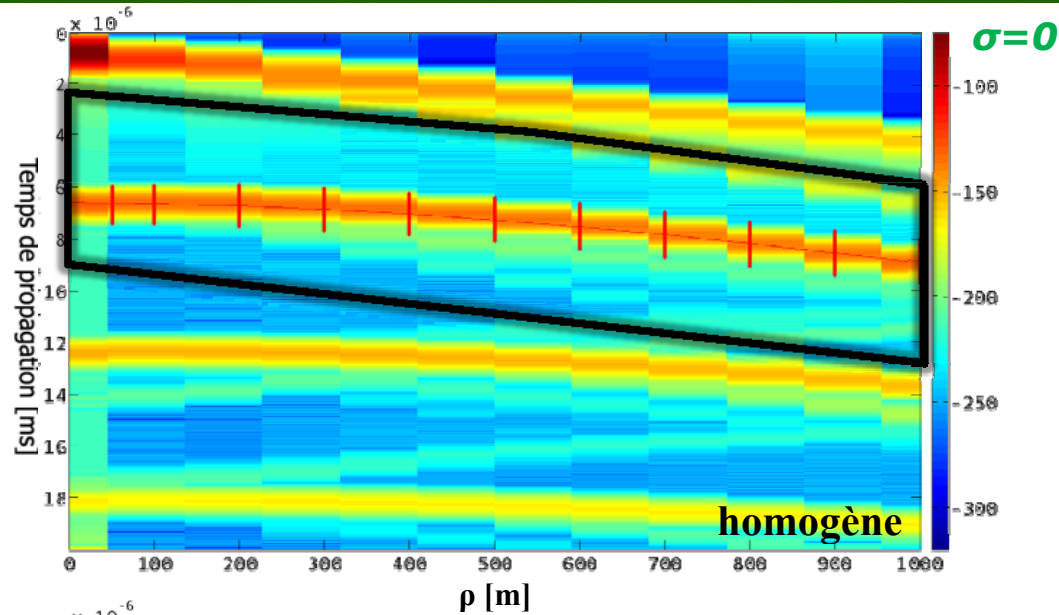
γ dans le plan xOz



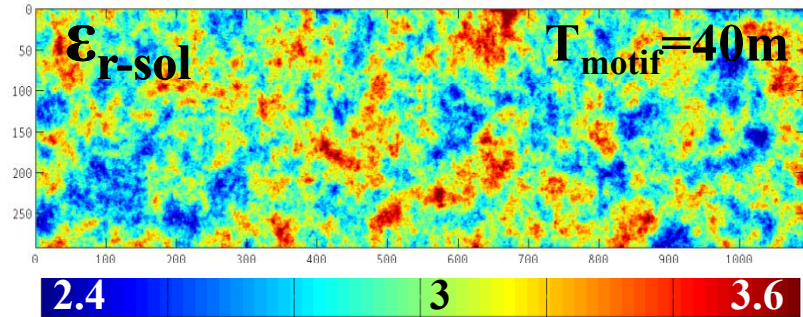
$$t_1(\rho) = \sqrt{(-2d_1 \sin \alpha \cos \alpha \sin \gamma - \rho \sin \varphi_{pt})^2 + (-2d_1 \sin \alpha \cos \alpha \cos \gamma - \rho \cos \varphi_{pt})^2 + (2d_1 \cos^2 \alpha)^2} \frac{\sqrt{\epsilon_{r_{sol1}}}}{c}$$

3.2- Imagerie 3D du sous-sol (mode bistatique)

Modèle à 1 couche horizontale

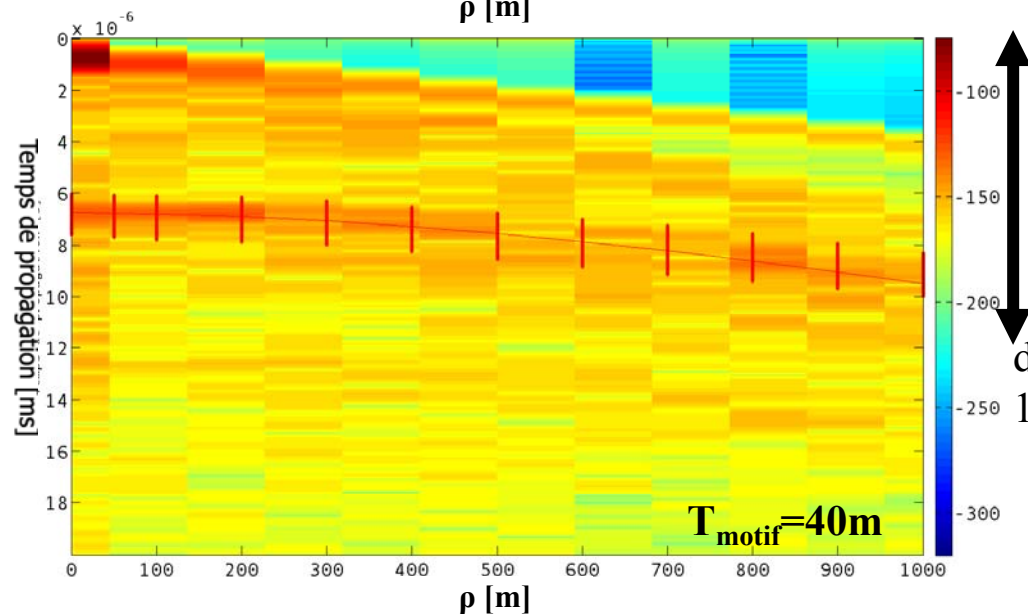


Permittivité non-homogène
» vue en coupe



Paramètres à retrouver:

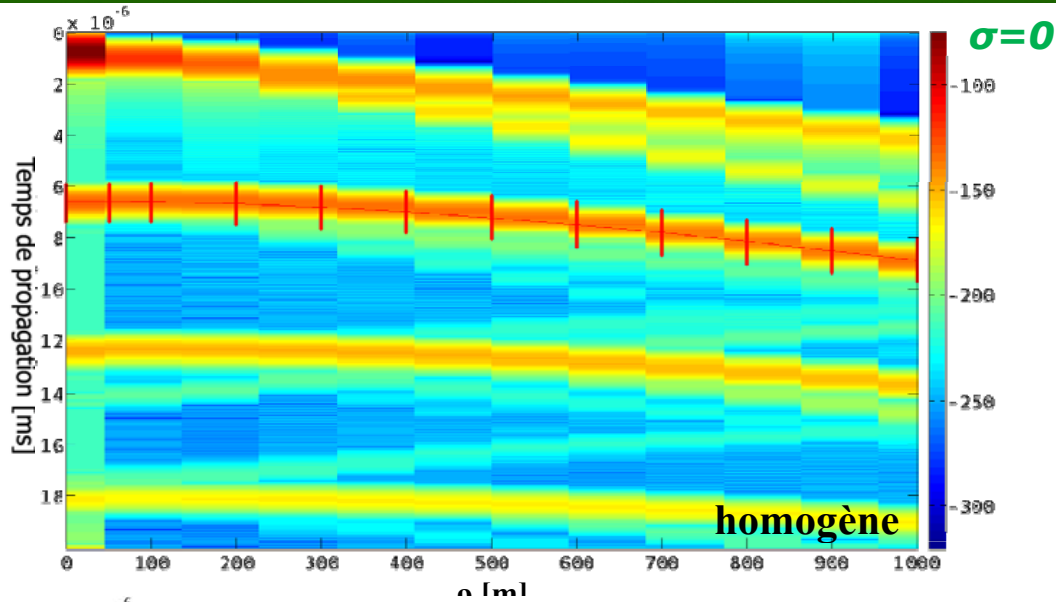
$$d_1 = 500\text{m} ; \epsilon_{r\text{-sol}1} = 3$$



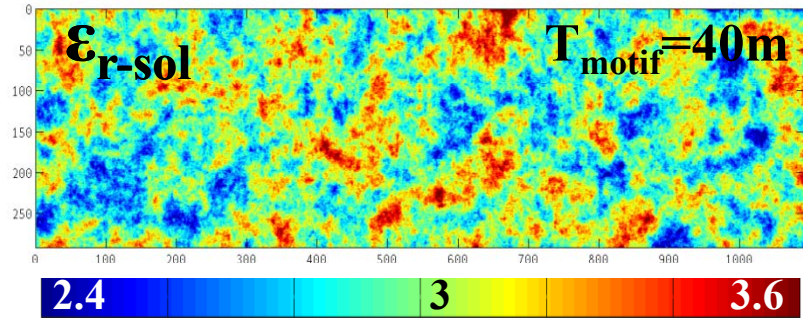
dynamique
132dB

3.2- Imagerie 3D du sous-sol (mode bistatique)

Modèle à 1 couche horizontale

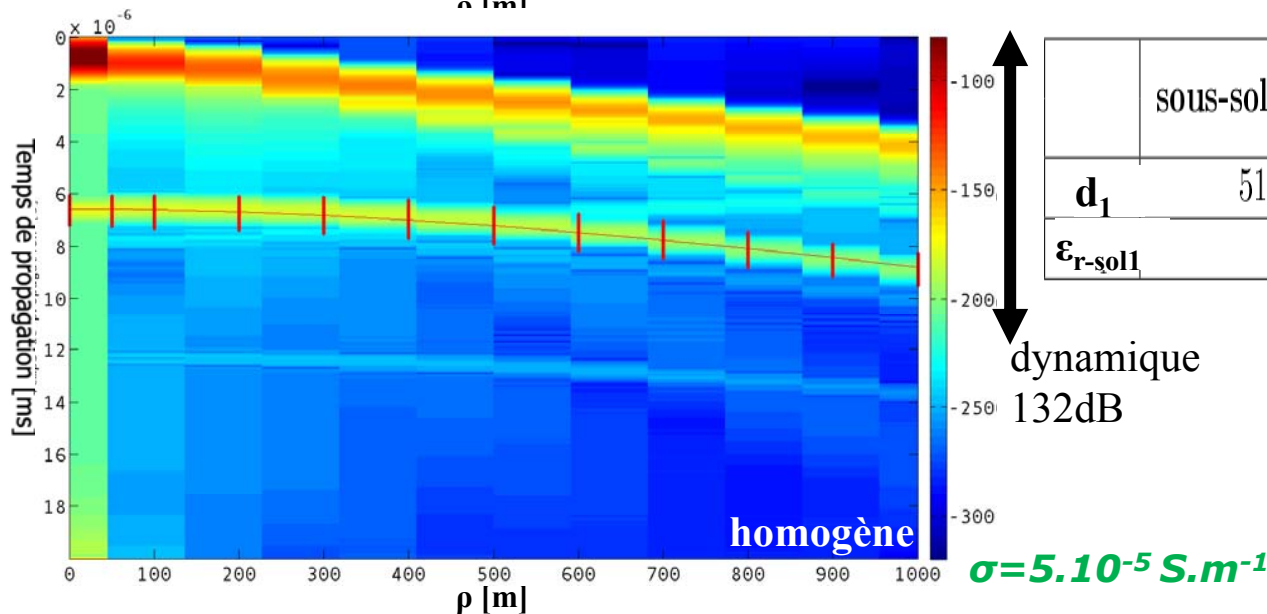


Permittivité non-homogène
» vue en coupe



Paramètres à retrouver:

$$d_1 = 500\text{m} ; \epsilon_{r\text{-sol}1} = 3$$



	sous-sol homogène	sous-sol non-homogène		
		T=62m	T=54m	T=40m
d_1	514,81m	499,72m	506,57m	504,69m
$\epsilon_{r\text{-sol}1}$	2,8	3,21	3,17	3,24

dynamique
132dB

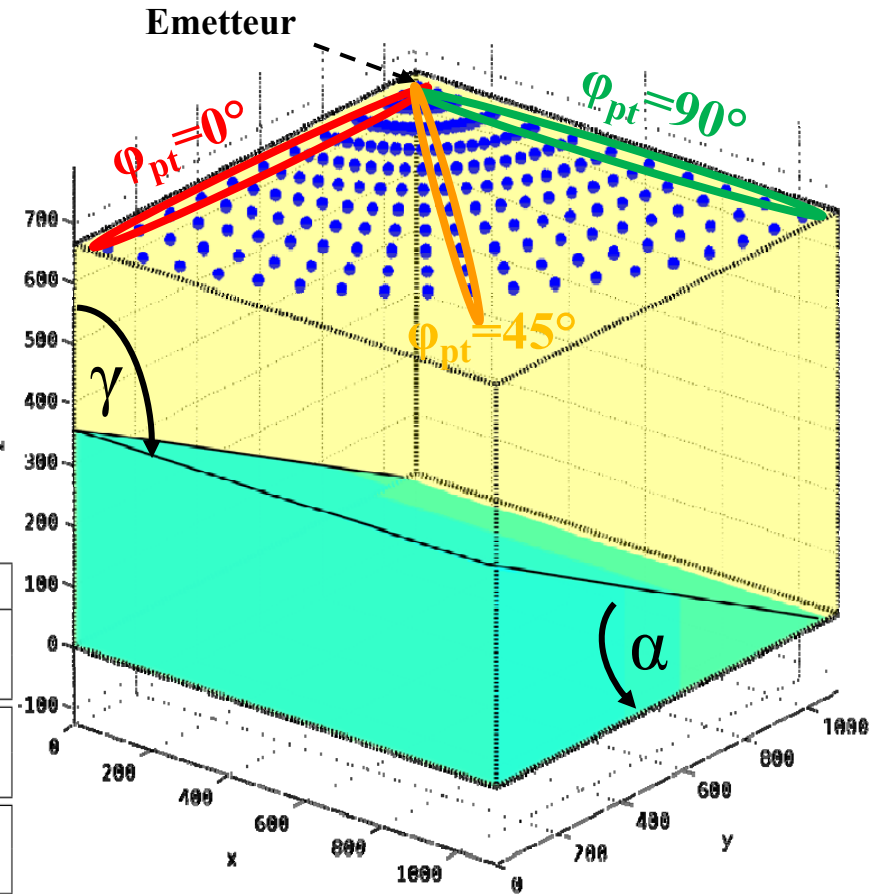
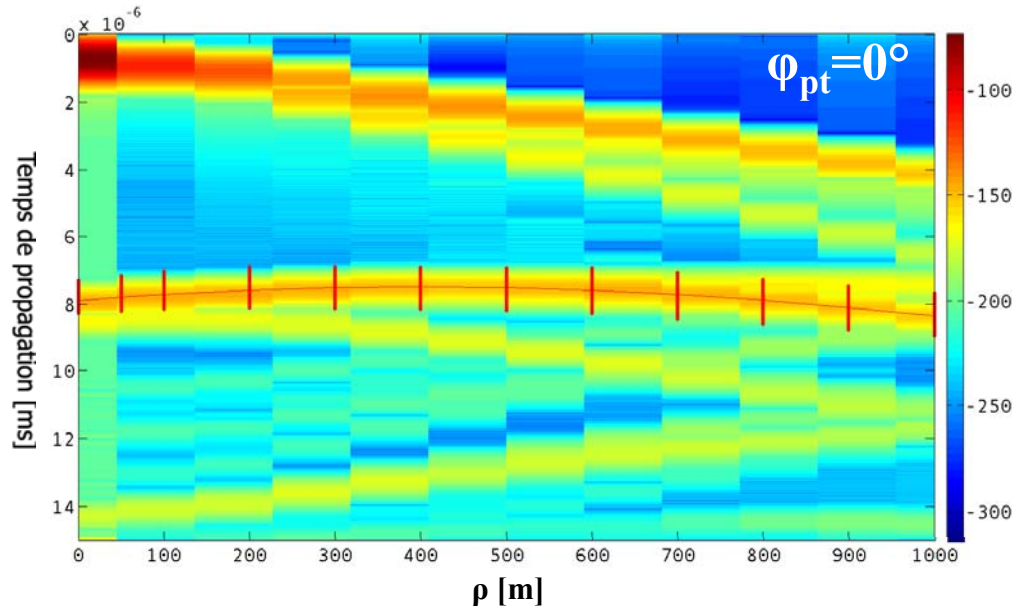
Erreur obtenue :

0.25% sur d_1

6% sur $\epsilon_{r\text{-sol}1}$

3.2- Imagerie 3D du sous-sol (mode bistatique)

Modèle à 1 couche inclinée



	$\varphi_{pt} = 0^\circ + \varphi_{pt} = 90^\circ$	$\varphi_{pt} = 45^\circ + \varphi_{pt} = 90^\circ$	$\varphi_{pt} = 15^\circ + \varphi_{pt} = 75^\circ$
d_{1reel}	650m	650m	650m
d_1	646,34m	652,13m	664,35m
$\epsilon_{r_{sol-reel}}$	3	3	3
$\epsilon_{r_{sol1}}$	3,09	3,02	2,92
α_{reel}	-20°	-20°	-20°
α	-19,33°	-18,99°	-18,62°
γ_{reel}	90°	90°	90°
γ	91,81°	90,80°	88,47°

$\alpha = -20$ (plan yOz) ; $\gamma = 90^\circ$ (plan xOz)
 $\epsilon_{r-sol1} = 3$; $\epsilon_{r2} = 11$; $\sigma = 0$



Erreur : 0.7% sur d_1 ; 0.33% sur ϵ_{r-sol1} ;

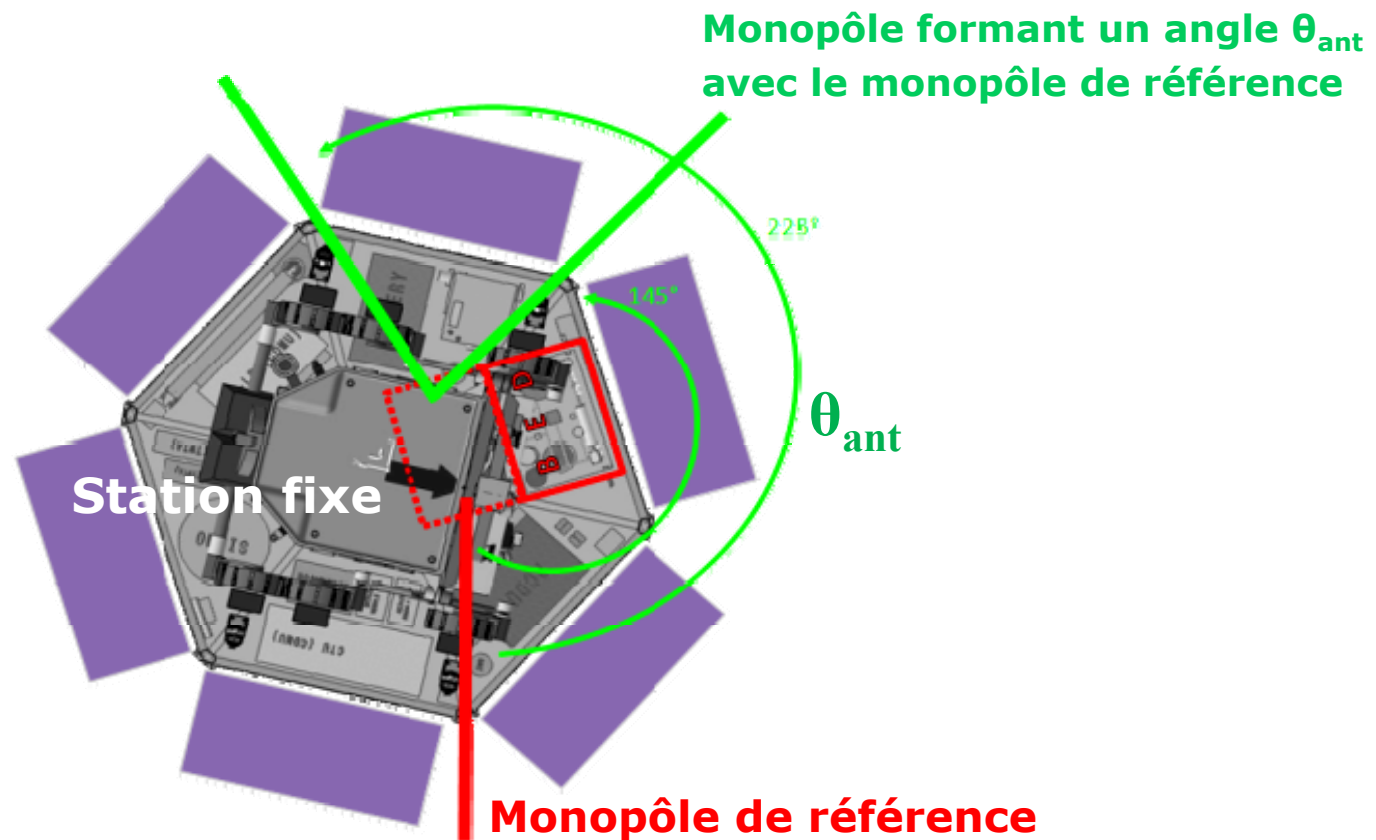
5% sur α ; 4% sur γ

3.3- Optimisation de la couverture radar bistatique Influence de l'angle entre antennes



POURQUOI ?

- ❑ Minimiser les contacts avec les panneaux solaires
- ❑ Champ rayonné le plus omnidirectionnel possible



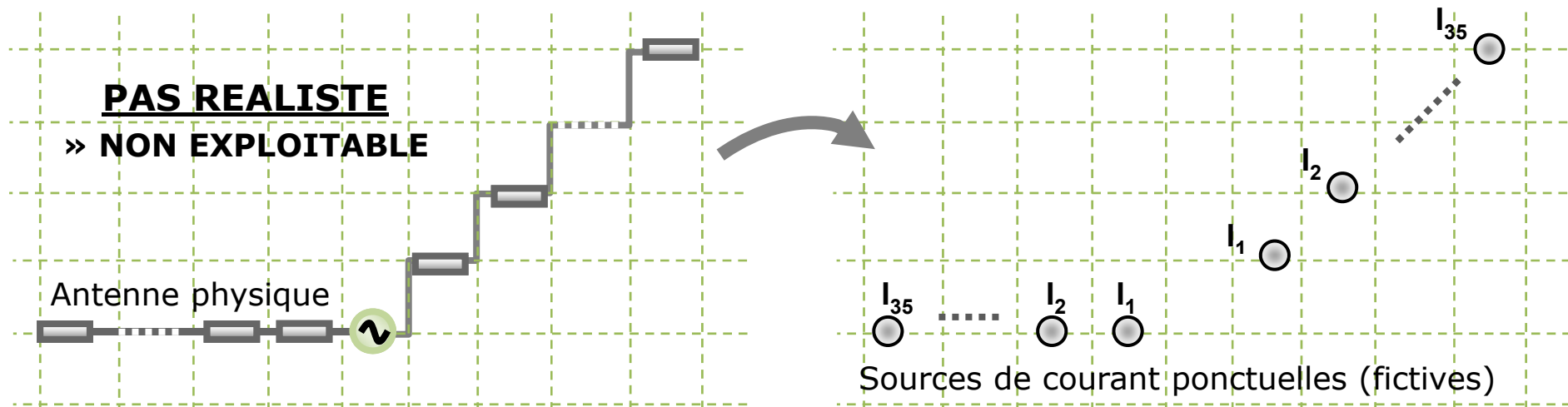
3.3- Optimisation de la couverture radar bistatique

Influence de l'angle entre antennes

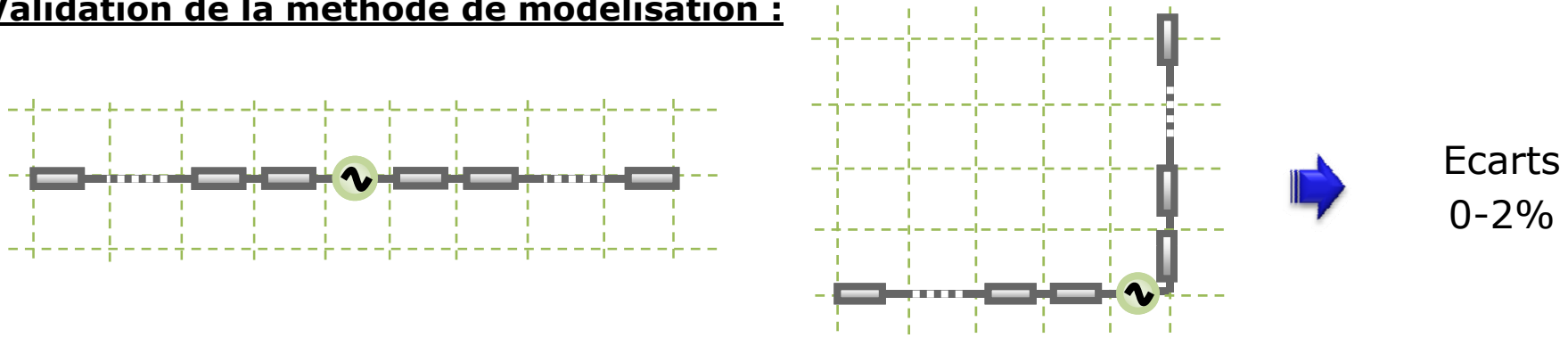


Principe du calcul du champ rayonné par un dipôle non aligné :

- ❑ Calcul FDTD avec un maillage orthogonal » antenne physique oblique impossible
- ❑ Utilisation de sources ponctuelles fictives de courant & un pas spatial adapté à l'angle désiré
- ❑ A chaque source est associée une fonction temporelle décrivant la forme de l'excitation.



Validation de la méthode de modélisation :



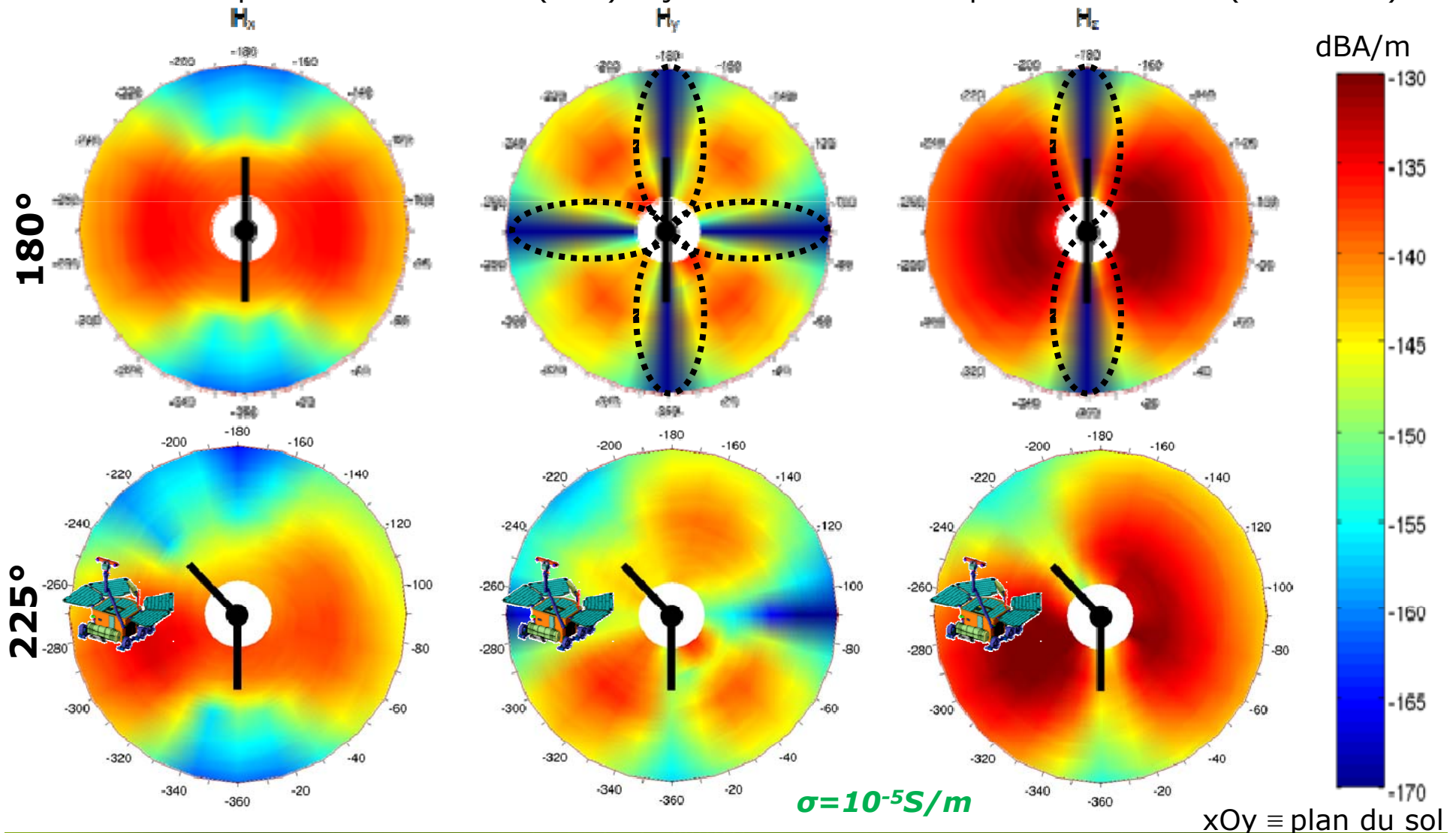
3.3- Optimisation de la couverture radar bistatique

Influence de l'angle entre antennes



Carte de l'amplitude maximale du champ magnétique

Résultats pour l'onde réfléchie (n=1) reçue au niveau du récepteur à la surface (100-500m)



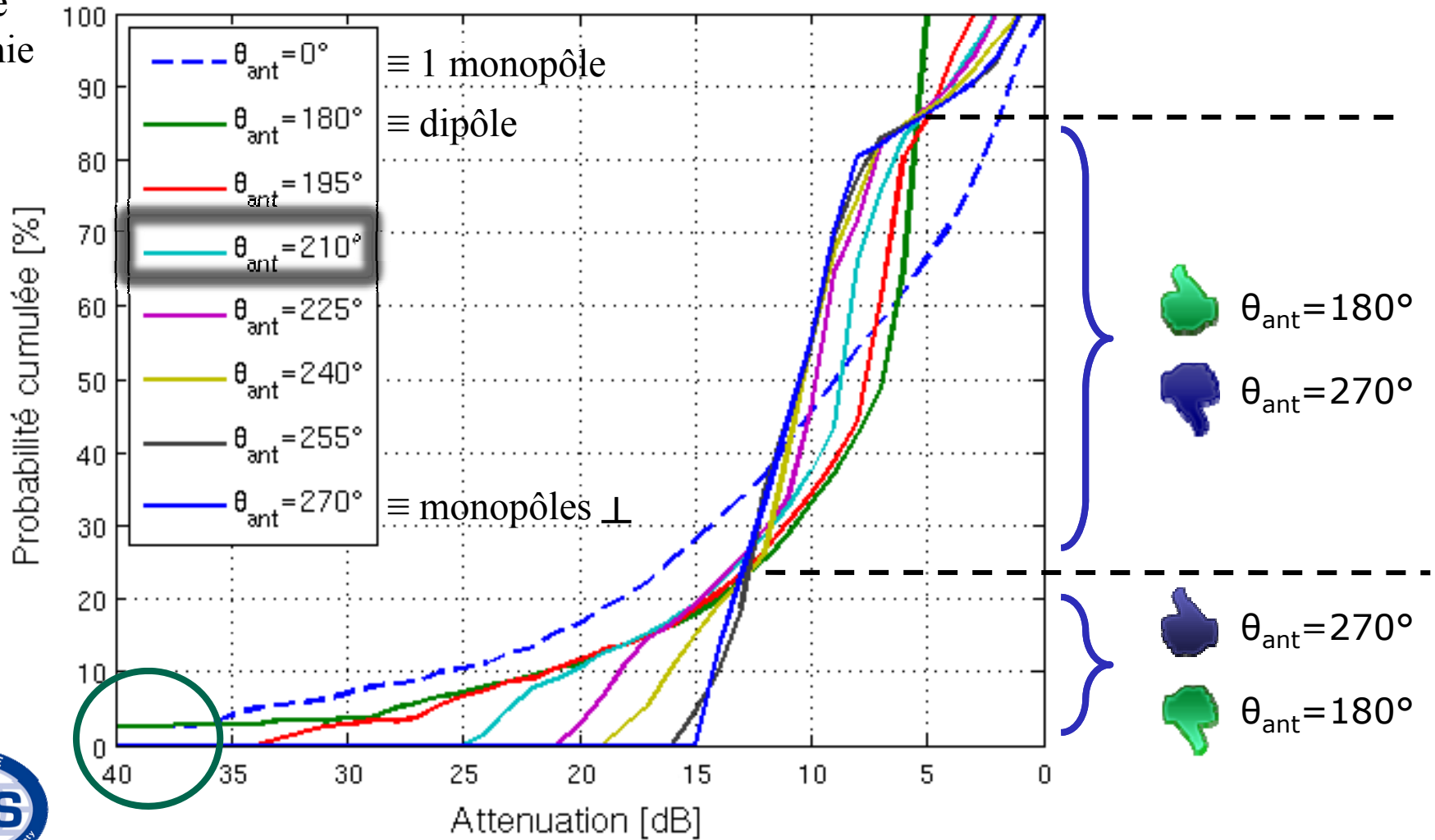
3.3- Optimisation de la couverture radar bistatique

Influence de l'angle entre antennes



Bilan sur le module du champ magnétique reçu à 500m de l'émetteur :

Onde réfléchie
n=1



4- Bilan et perspectives



Etudier et optimiser les performances du radar EISS
+
Développer des méthodes de traitement des données

**Max d'informations
relatives au sous-sol**

ETUDES EFFECTUEES :

- » Estimation des propriétés géoélectriques du proche sous-sol
(via la mesure de l'impédance)
- » Optimisation du comportement fréquentiel des antennes électriques
(via l'étude du profil résistif) → augmentation du champ rayonné
- » Impossibilité d'estimer la position 3D d'un réflecteur
à partir du champ magnétique mesuré en **un** point de la surface
- » Méthode d'imagerie 3D du sous-sol
à partir de sondages **s** non alignés à la surface
- » Optimisation de la couverture radar bistatique
avec l'étude de l'angle entre les monopôles (sources de courant)

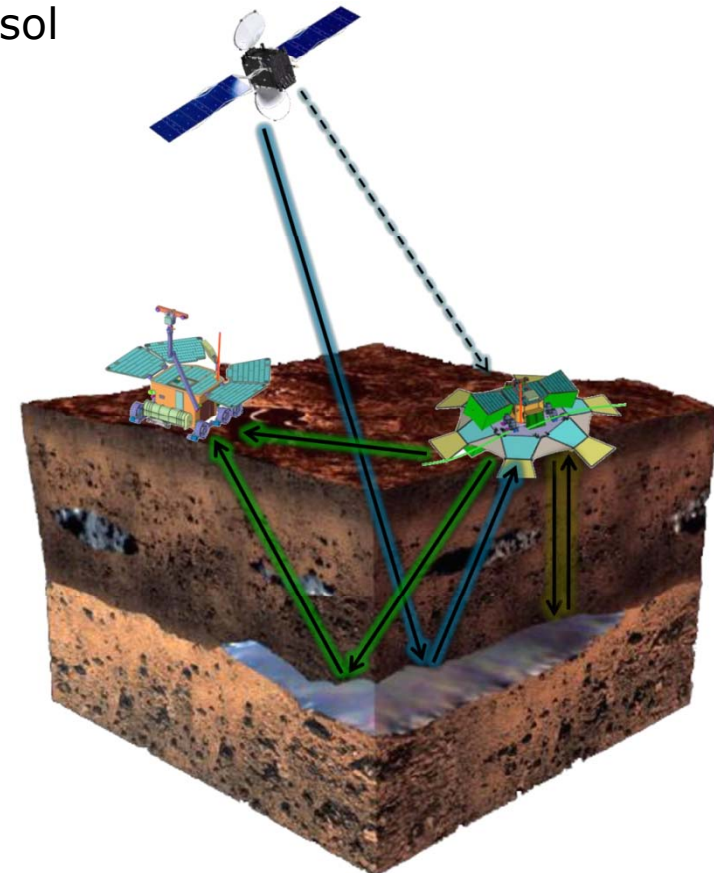
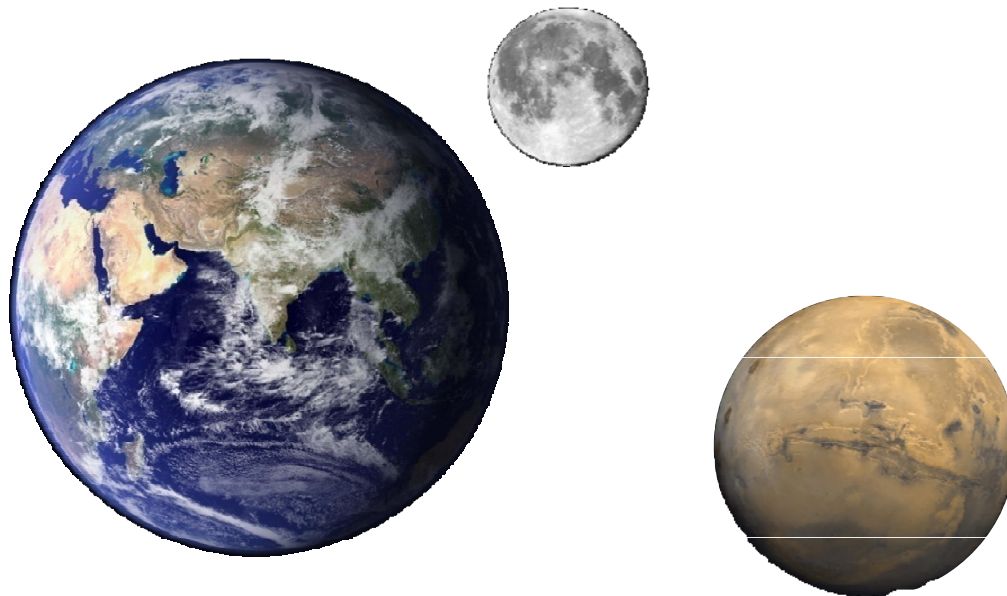


Etudes complémentaires :

- » Impact de la longueur d'un câble coaxial en amont de l'antenne,
- » Influence d'un mauvais déploiement de l'antenne électrique,
- » Influence de la station fixe et des airbags présents sous l'antenne,

□ TRAVAUX à poursuivre :

- » Extension du modèle du sous-sol à n strates horizontales/inclinées
- » Développement d'un modèle analytique polarimétrique du mode bistatique
- » Déterminer un intervalle de confiance des paramètres obtenus par la méthode de cartographie 3D de sous-sol
- » Validation lors de campagnes de mesures sur sites naturels bien documentés





Merci de votre attention

**Etude et modélisation des performances
du radar bistatique EISS conçu et développé
pour le sondage profond des sous-sols planétaires**

QUESTIONS ?

<http://mba.research.free.fr>



Modeling the configuration of HF antennas for deep bistatic subsurface sounding

M. Biancheri-Astier, V. Ciarletti, A. Reineix, C. Corbel

IEEE Transactions on "Geoscience and Remote Sensing" - 2010

EISS : An HF mono and bistatic GPR for terrestrial and planetary deep soundings

M. Biancheri-Astier, R. Hassen-Khodja, V. Ciarletti, A. Reineix, C. Corbel, Y. Simon, C. Caudoux, J. Faroux, F. Dolon, V. Leray, S.M. Clifford

XIII International Conference on Ground Penetrating Radar - organisation IEEE - 2010

Optimisation des antennes électrique du radar GPR EISS

M. Biancheri-Astier, V. Ciarletti, A. Reineix, C. Corbel, Y. Simon

REE Revue de l'Electricité et de l'Electronique - Février 2010

Optimization of resistive profile for loaded electrical monopole dedicated to deep Martian subsurface sounding

M. Biancheri-Astier, V. Ciarletti, A. Reineix

IEEE Transactions on "Antennas and Propagation" (en cours de soumission)

A bistatic HF GPR dedicated to the Martian deep sub-surface characterization - Experimental Validation in arid environment

V. Ciarletti, A. Le Gall, M. Biancheri-Astier, C. Corbel, F. Dolon, R.Ney, J.J. Berthelie

GJR "Journal of Geophysical Research" (en cours de soumission)