

# Hybridation de méthodes pour l'estimation du champ électrique en milieu urbain prenant en compte les détails surfaciques des bâtiments

Y.B. Ouattara <sup>(1)</sup>, S. Mostarshedi <sup>(1)</sup>, E. Richalot <sup>(1)</sup>, J. Wiart <sup>(2)</sup> et O. Picon <sup>(1)</sup>,

<sup>(1)</sup> Université Paris-Est Marne-la-Vallée

<sup>(2)</sup> Orange Labs



Nécessité de l'évaluation du champ électrique au voisinage des bâtiments

Complexité de l'environnement urbain

**Zone proche**

**Zone lointaine**

Méthode des fonctions de Green

Homogénéisation de la façade  
(Coefficient de réflexion équivalent)

Prise en compte précise  
des détails architecturaux sur la façade

Méthode de la SER  
(réflectivité d'un ensemble de bâtiments)

---

## Prédiction en zone proche :

### Fonctions de Green associées à l'interface entre deux milieux semi-infinis

## Principe d'équivalence inductive :

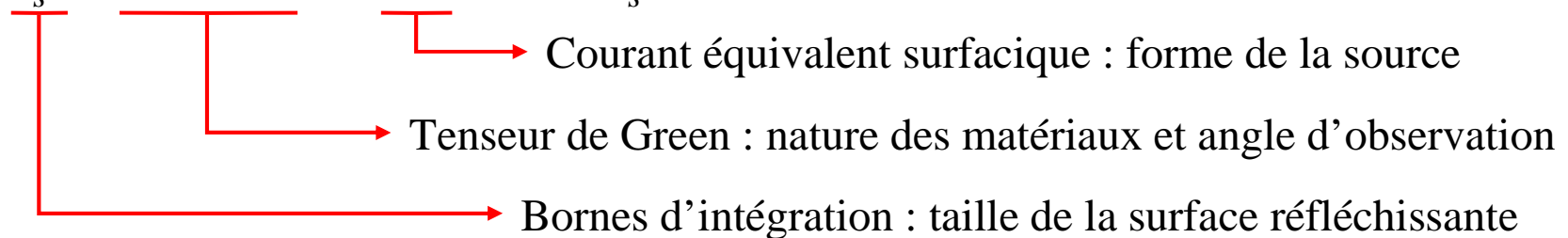
- Onde plane incidente → Courants électrique et magnétique surfaciques
- Rayonnement des courants équivalents → En présence de l'objet diffractant

### Avantage:

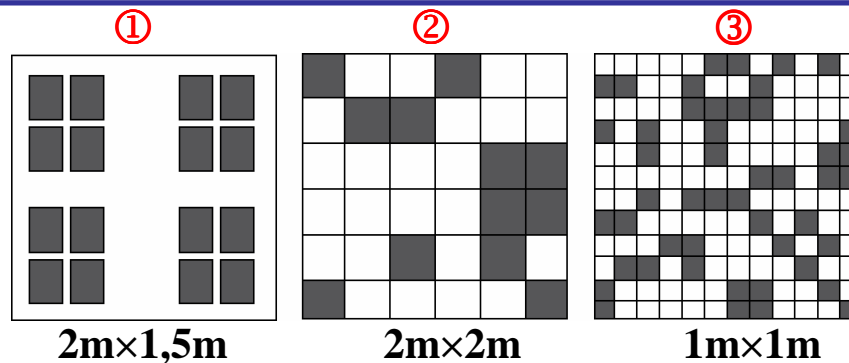
- **Prise en compte du diagramme de rayonnement des dipôles dans tous les angles d'observation (contrairement aux coefficients de Fresnel)**
- **Intéressant pour le champ proche puisque traduisant une réalité physique**

## Fonctions de Green associées à l'interface entre deux milieux semi-infinis :

$$\vec{E} = \iint_{s'} \vec{G}_{EJ}(r, r') \bullet \vec{J}(r') d\vec{s}' + \iint_{s'} \vec{G}_{EM}(r, r') \bullet \vec{M}(r') d\vec{s}'$$

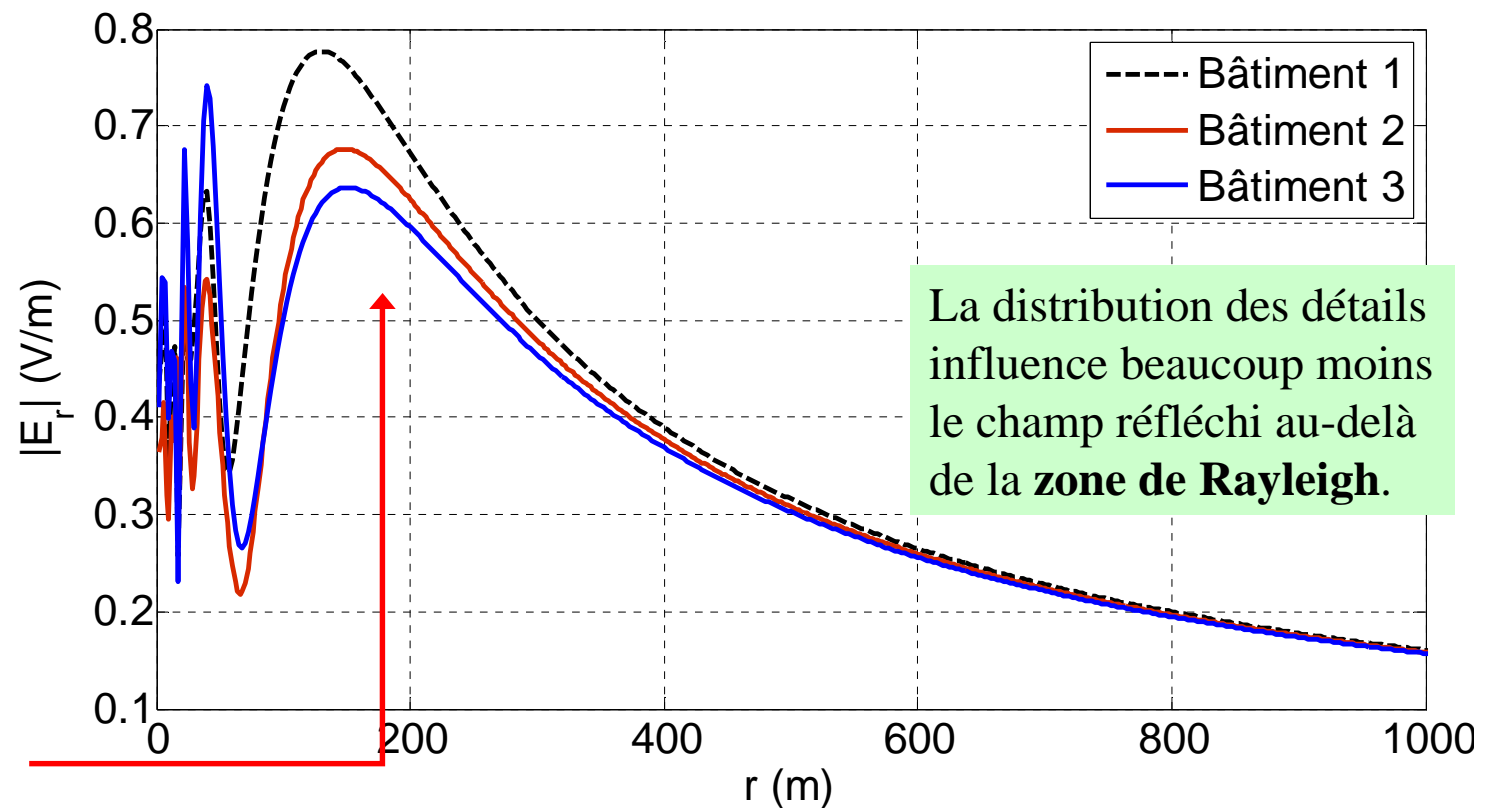


**Possibilité d'étudier séparément l'influence de chaque paramètre**



- incidence normale ( $\theta_i = 0^\circ$ )
- fréquence = 900 MHz
- surface = 12m × 12m
- $\epsilon_{r\text{-béton}} = 6,13 - j0,13$
- $\epsilon_{r\text{-verre}} = 5,5$  (simple vitrage d=10mm)
- $\epsilon_{r\text{-équivalent}} = 6,22 + j2,053$
- 67% de béton et 33% de verre

L'influence de la distribution des fenêtres sur le champ réfléchi en **zone proche** est non négligeable.



Limite de la zone de Rayleigh = 216 m

---

**Prédiction en zone lointaine :**

**APPROCHE SER : MÉTHODE ET VALIDITÉ**

Onde plane



Calcul de SER bi-  
statique des facades

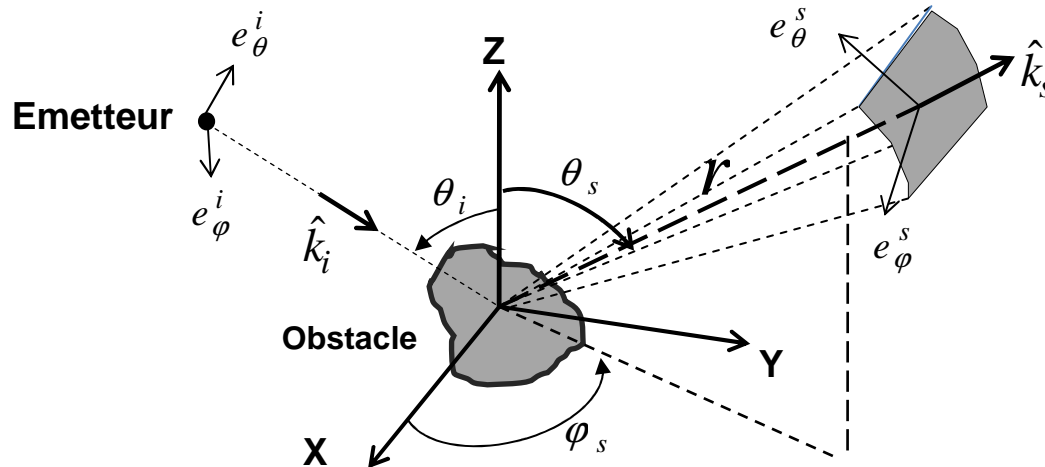
Reconstruction  
du champ  
électrique



**Antenne d'émission: Polarisation,  
Incidence, Fréquence,  $E_0$**



**Antenne de réception: prédiction du  
champ électrique  $E$  (V/m)**



Surface équivalente radar (RCS):

$$\sigma_{bi} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}$$

Choix de la méthode ??

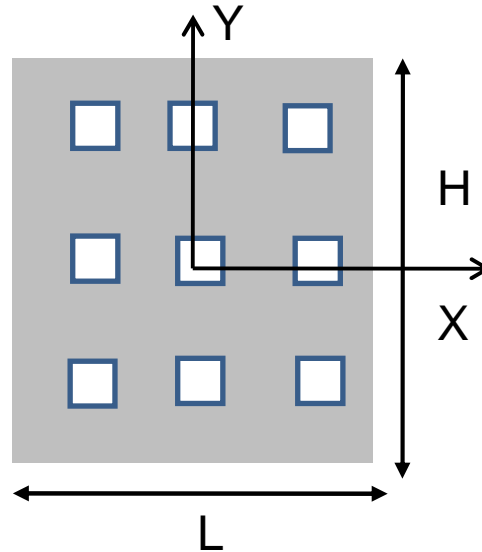
Choix de la méthode qui tient compte:

- Les polarisations de l'onde incidente et diffractée
- La forme de l'objet diffractant (3D ou 2D)
- Des propriétés électriques de l'objets ( diélectriques)



**MÉTHODE DE KIRCHHOFF-HUYGEN'S**

Façade  
inhomogène de  
dimensions  
finies



Surface de la zone illuminée:

$$A = L \times H$$

Surface hétérogène:  
Béton+ Verre

Forme de la façade:  
Rectangulaire

**Formulation:**

$$\bar{E}_s(\bar{r}) = \iint_A \left\{ i\omega\mu_0 \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \left[ \hat{n} \times \bar{H}(\bar{r}, \bar{r}') \right] + \nabla \times \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \left[ n \times \bar{E}(\bar{r}') \right] \right\} dA'$$

Courant électrique

Courant électrique (coefficient de Fresnel)

Forme tensorielle de la Fonction de Green de l'espace libre

## Expression générale: diélectrique + métal

$$\sigma_{rcs} = \frac{k^2 A^2}{4\pi} (B_1^2 + B_2^2) \left[ (\hat{e}_i \cdot \hat{q}_i)^2 |I_{TE}|^2 B_1^2 + (\hat{e}_i \cdot \hat{p}_i)^2 |I_{TM}|^2 B_2^2 \right]$$

$$I_{m \in \{TE, TM\}} = \frac{1}{A} \iint_A \Gamma_m(x', y') e^{jkz(\cos\theta_i + \cos\theta_s)} e^{j(k_{xi} - k_{xs})x'} e^{j(k_{yi} - k_{ys})y'} dx' dy'$$

## Homogénéisation de la façade: Appliquer un coefficient de réflexion équivalent

$$\Gamma_v^{eq} = \begin{cases} \sum_i^n p_i R_{TE}^i & \text{for TE polarisation} \\ -\sum_i^n p_i R_{TM}^i & \text{for TM polarisation} \end{cases} \quad \dots p_i \text{ représentant la proportion des matériaux sur la façade.}$$

## SER Totale et reconstruction du champ électrique:

$$\sigma_{tot}(\theta, \varphi) = \left| \sum_{i=1}^n (\sigma_i)^{1/2} e^{j\psi_i} \right|^2 \quad \bar{E}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{\sigma_i}}{(4\pi)^{1/2} r_i} e^{jkr_i} e^{j\psi_i}$$

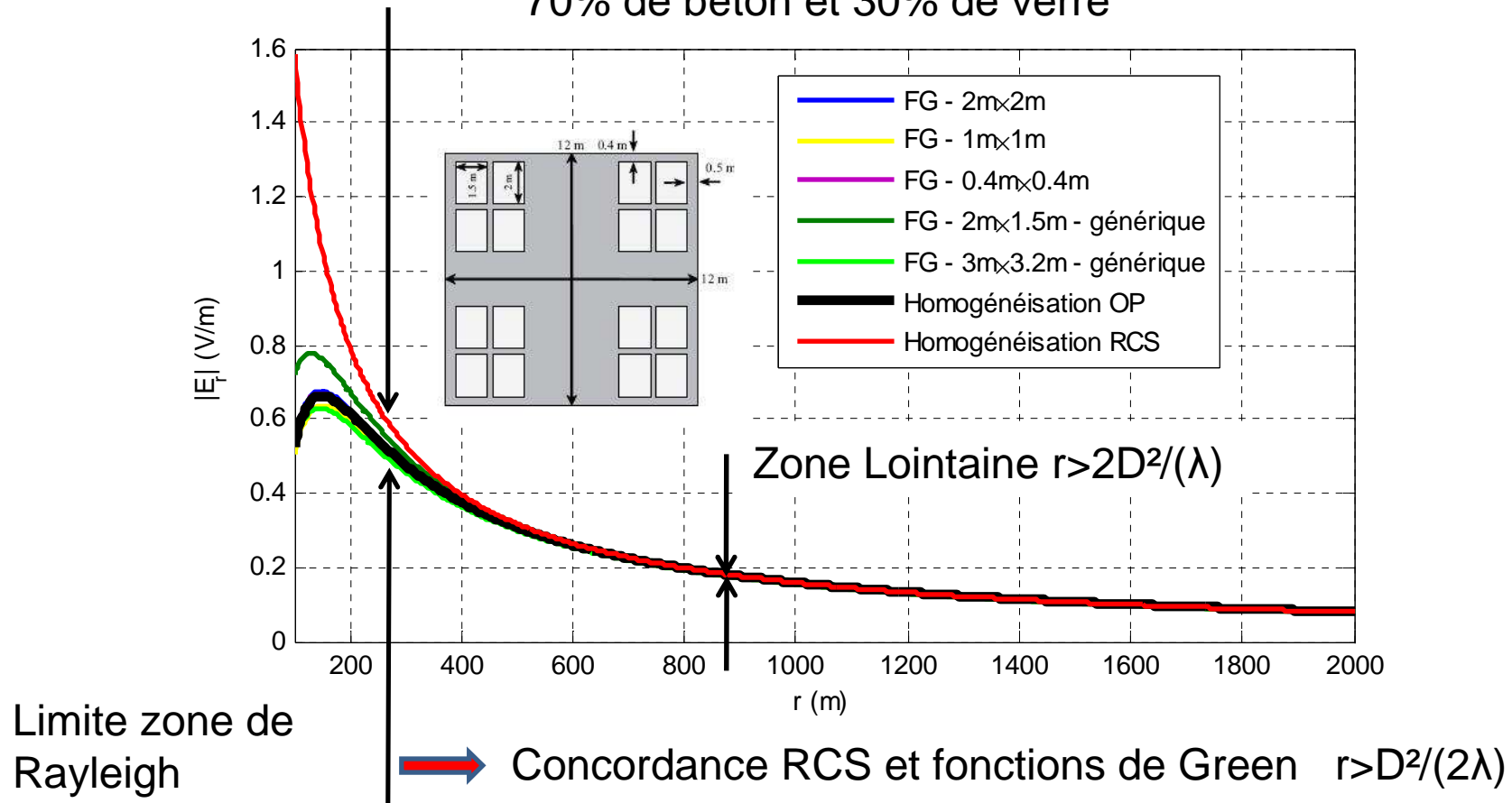
Taille du bâtiment: LxH=12mX12m

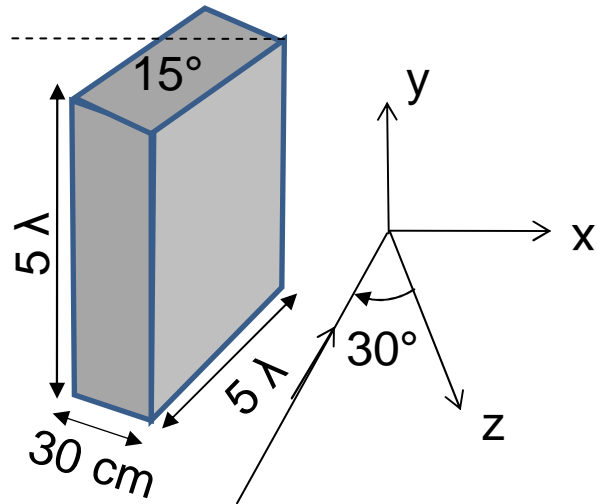
Béton  $\epsilon_r=6.13$   $\sigma=0.01$  s/m épais=30cm

Verre  $\epsilon_r=5.5$  épais=1cm

Source: onde plane TE:  $\theta_i=0^\circ$ ,  $\phi_i=90^\circ$

70% de béton et 30% de verre

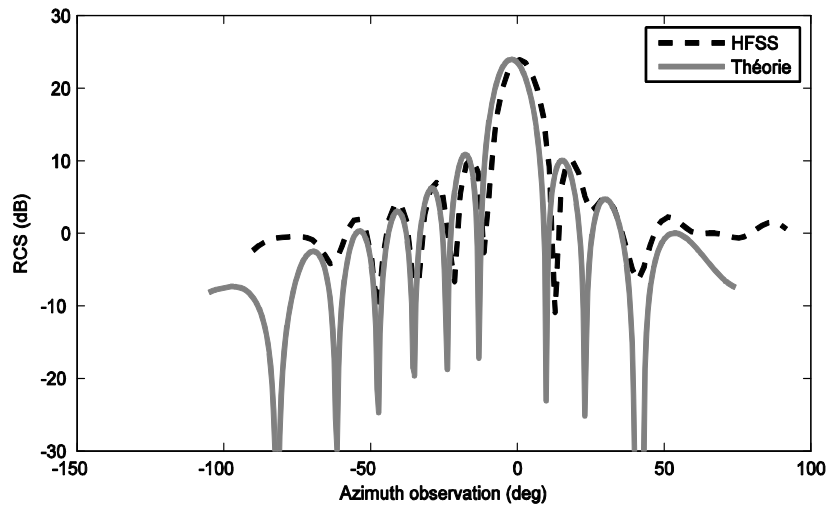




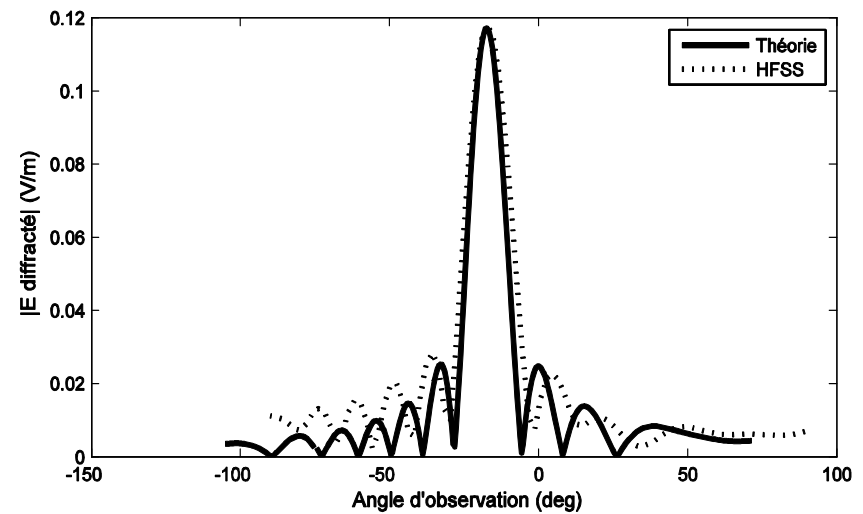
Polarisation TE:  $\theta_i=30^\circ$ ,  $\phi_i=90^\circ$ ,  $L=H=5\lambda$   
 Matériau: Béton  $\epsilon_r=9$   $\sigma=0.01\text{ s/m}$  épais= $30\text{ cm}$   
 $r=100\lambda$

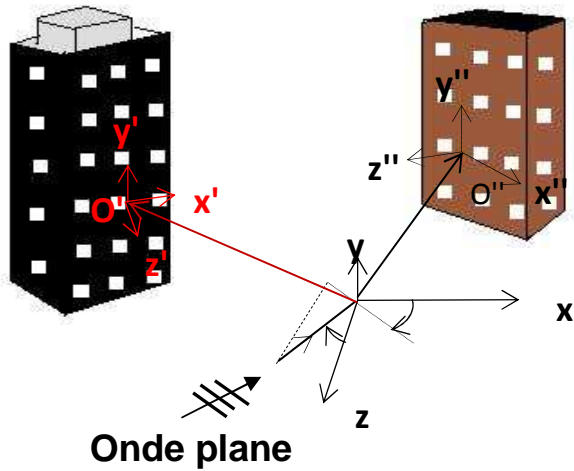
**➔ Bonne concordance des deux méthodes**

SER d'une façade homogène



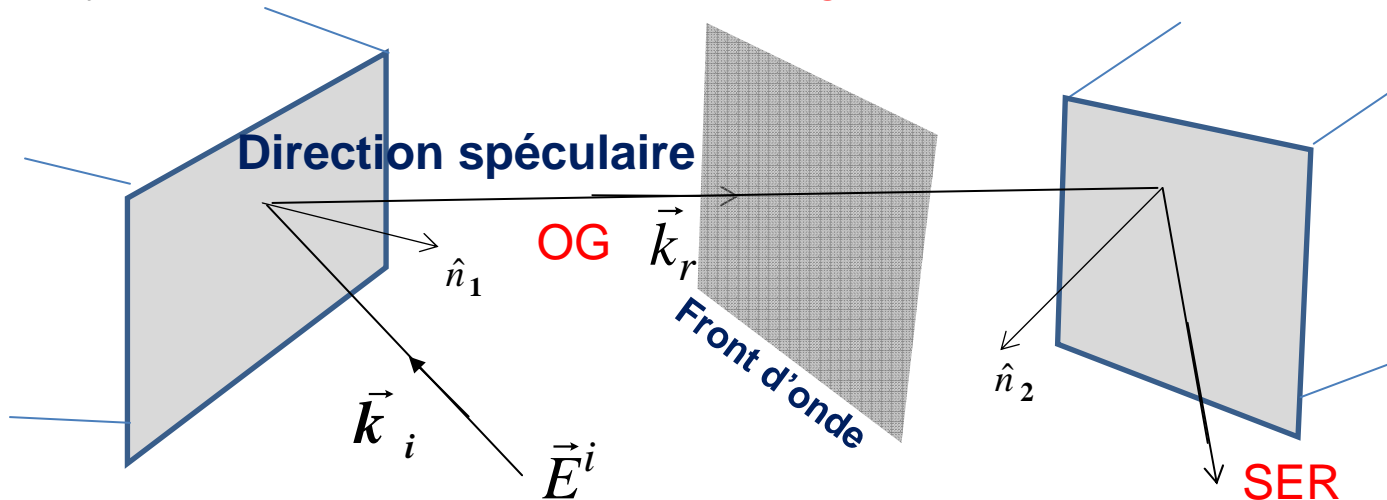
Champ électrique reconstruit

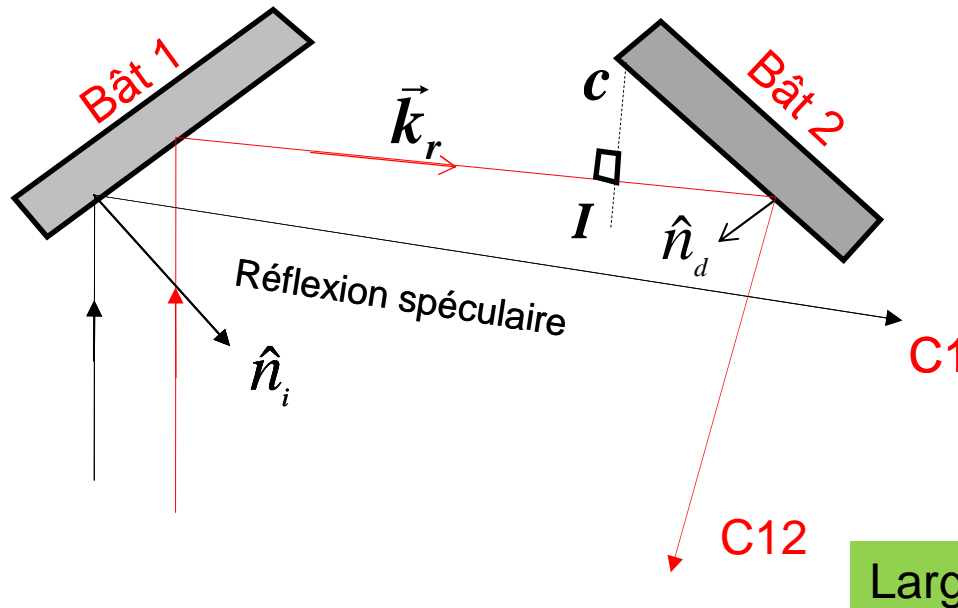




-Test d'interception+  
Identification de la zone illuminée

➤ Hybridation des méthodes: **Optique géométrique (OG) + Méthode SER**





Réflexion spéculaire:

$$\vec{k}_r = \vec{k}_i - 2\hat{n}_i(\hat{k}_i \times \hat{n}_i)$$

Test d'interception 2<sup>nd</sup> ordre réflexion:

$$\vec{k}_r \cdot \hat{n}_d \leq 0$$

Définition de la zone interceptée:

$$\forall c \in \text{Bât } i \quad \overline{IC} \leq lf$$

Largeur du front d'onde

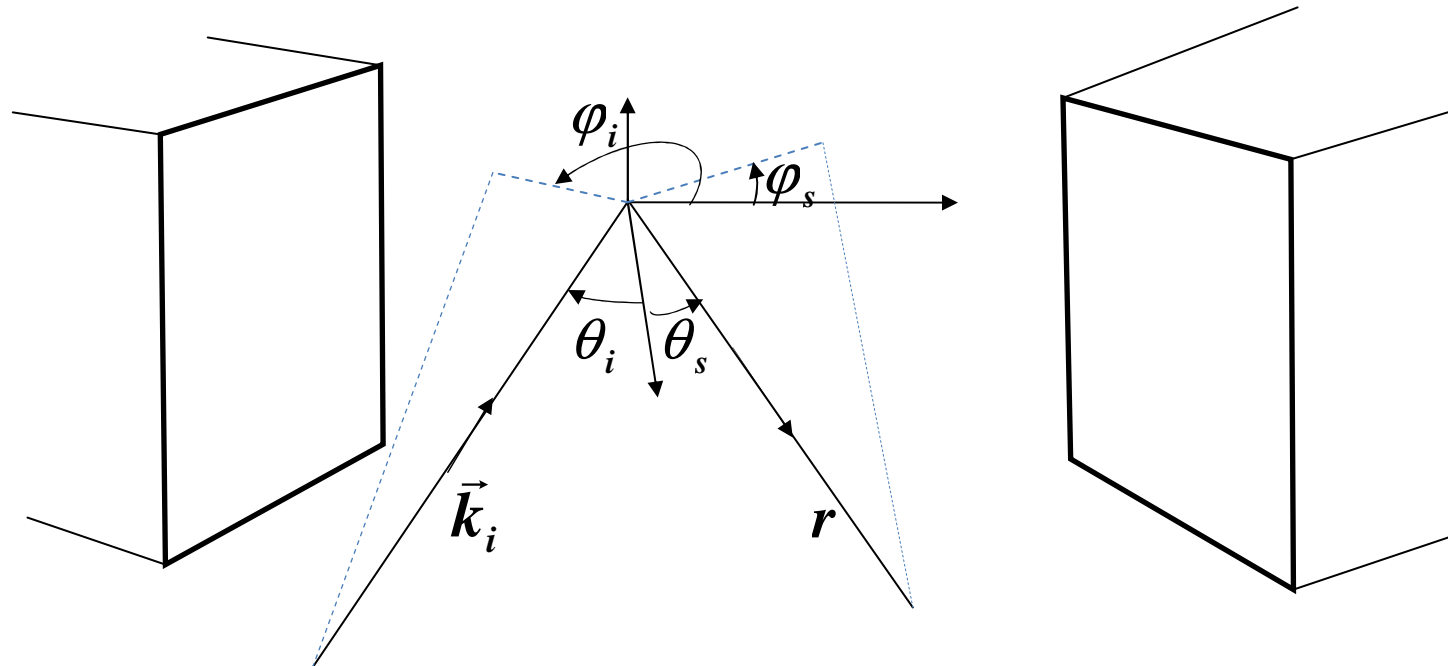
Réflexion 1<sup>er</sup> ordre:

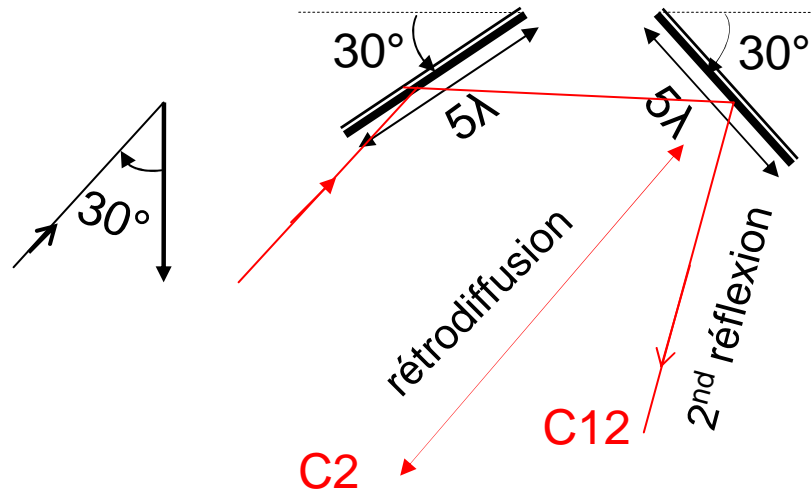
*Application directe de la SER*

Réflexion 2<sup>er</sup> ordre:

*GO : Trajets multiples + surface interceptée*  
*Méthode SER : reconstruction du champ  $\vec{E}$*

## Approche SER et Validation par FEM (HFSS)

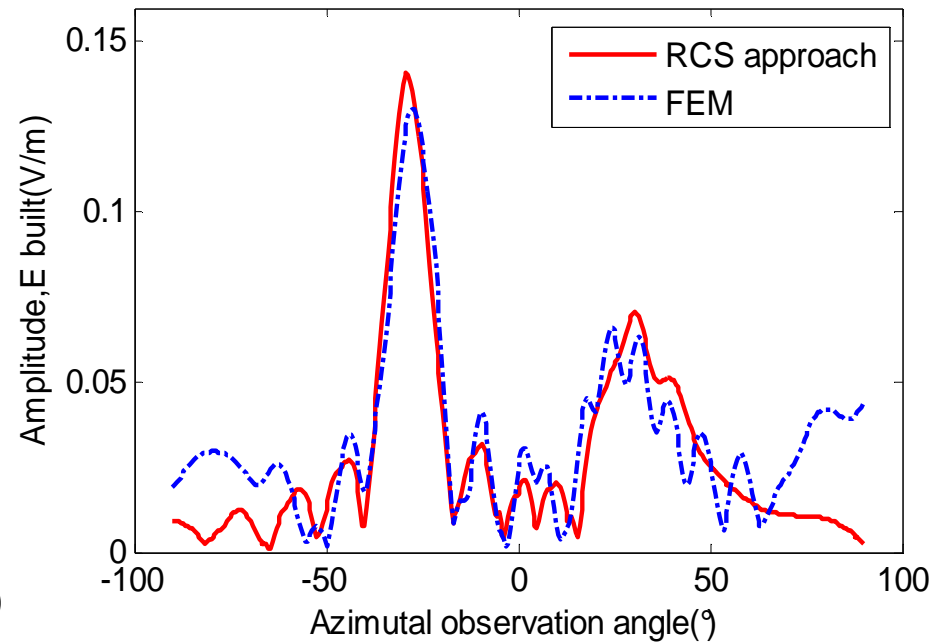
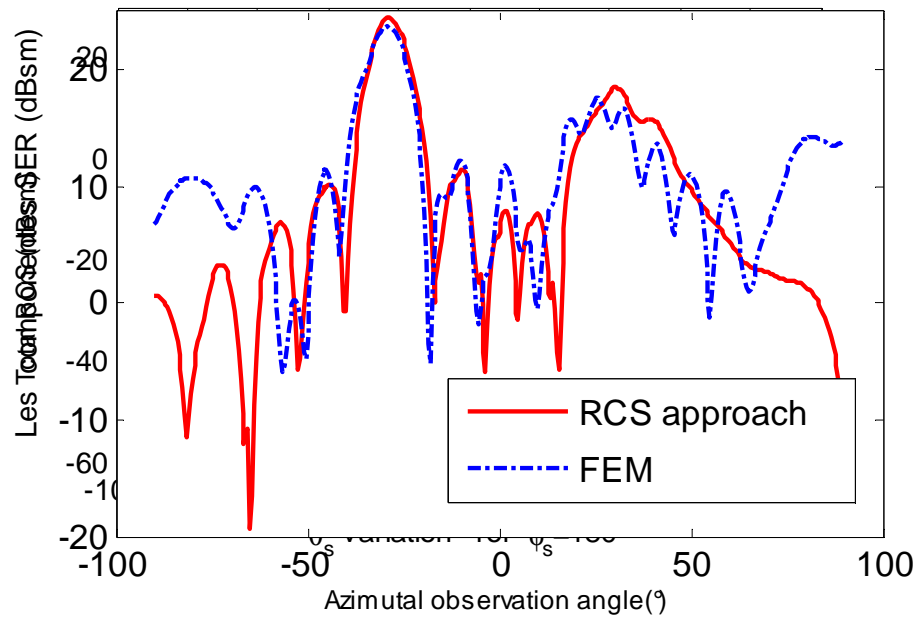


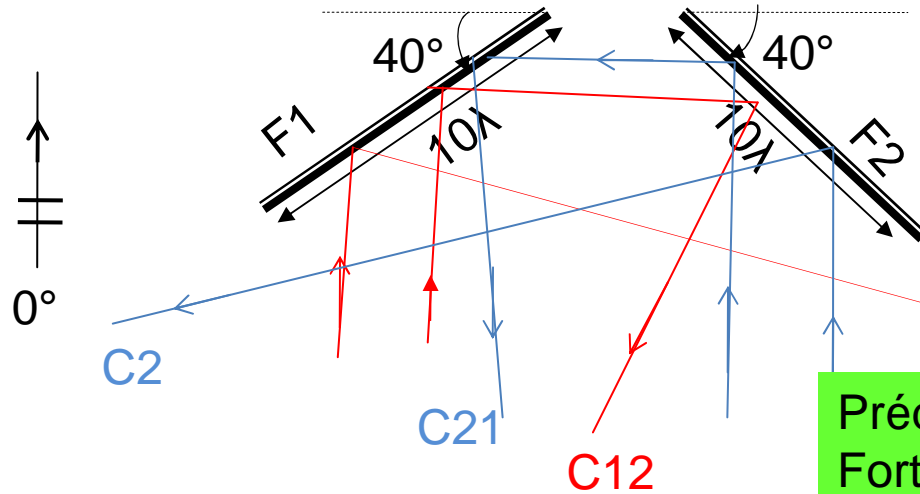


$\theta_i=30^\circ$ ,  $\phi_i=180^\circ$ ,  $L \times H=5 \lambda$   
 $E_o=1 \text{ v/m}$ ; TE ;  $r=33 \text{ m}$ ,  $F=900 \text{ MHz}$

Tds: SER(4s) , FEM(3h)

Prédominance du premier ordre  
 Pas de prise en compte des effets de bords

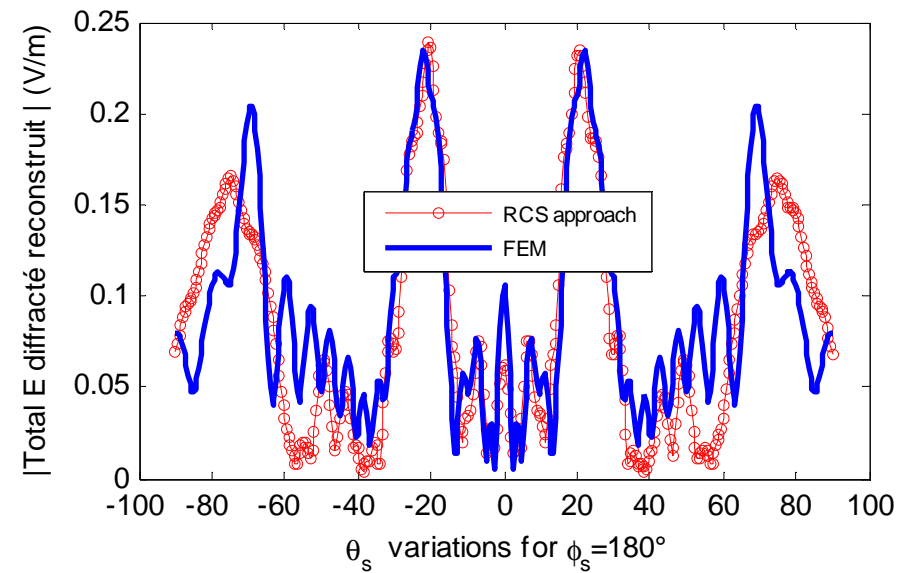
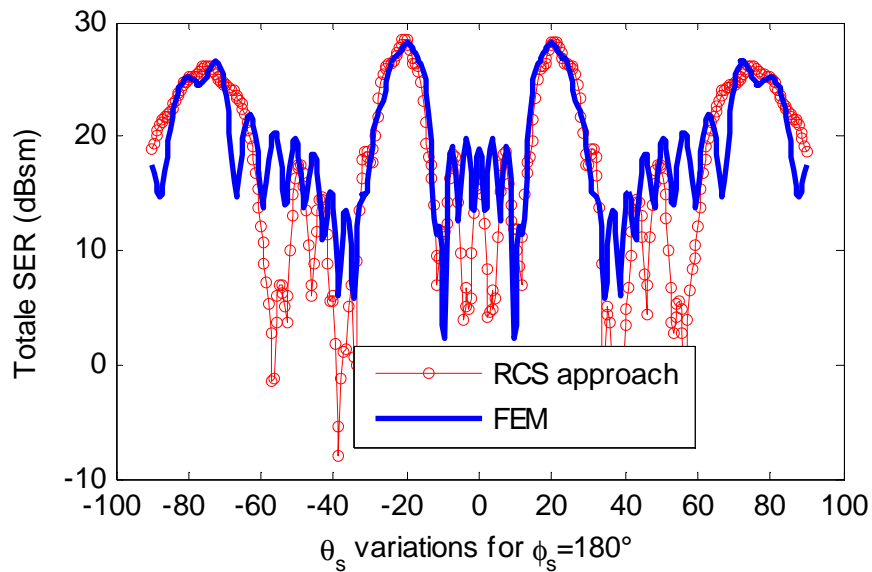


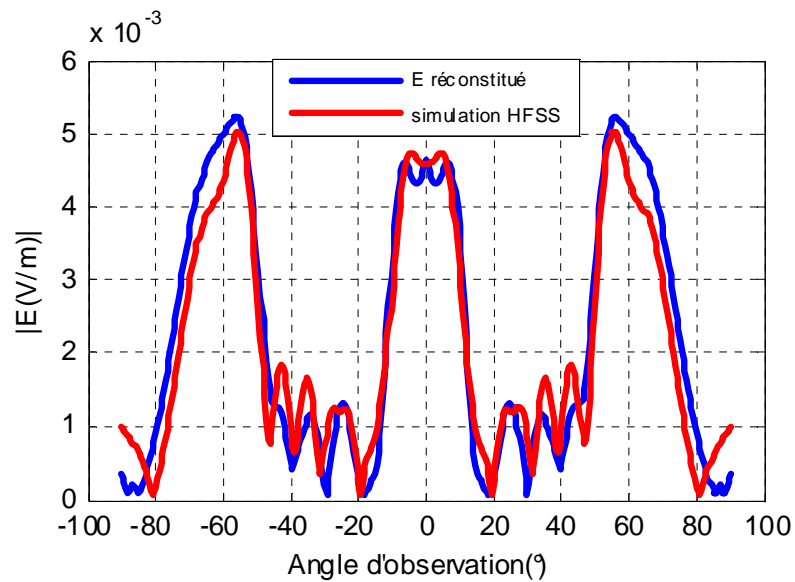
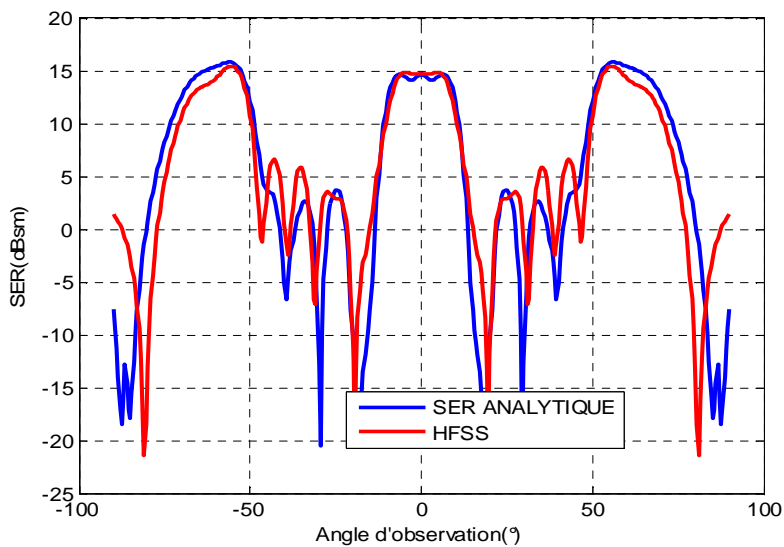
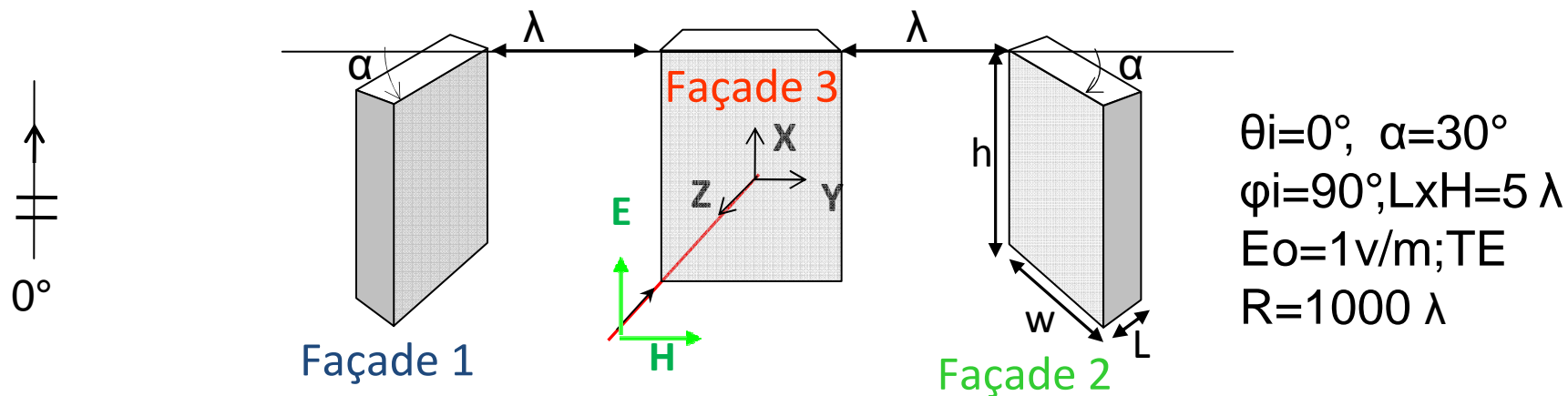


$\theta_i=30^\circ$ ,  $\phi_i=90^\circ$ ,  $L \times H=10 \lambda$   
 $E_o=1 \text{ v/m}$ ; TE ;  $r=33 \text{ m}$ ,  $F=900 \text{ MHz}$

Tds: SER(0.30s) , FEM(2h20)

Prédominance des réflexion de 2<sup>er</sup> ordre et Forte apparition des effets de bords





- Onde incidente plane
- Distance de Rayleigh ( $r > D^2/2\lambda$ )
- Effet de bords sont négligés
- Les façades sont considérées planes

- **En zone proche :**

- La distribution, les dimensions et la nature des détails sont prises en compte.
- Les fonctions de Green sont calculées pour des milieux semi-infinis. (sans pôle)
- Les milieux multicouches doivent être remplacés par une permittivité  $\epsilon_{eff}$
- La précision de la méthode permet de l'utiliser comme référence pour les méthodes approchées.

- **En zone lointaine :**

- Les détails architecturaux sont homogénéisés
- La SER sert à définir la réflectivité des façades diffractantes
- Le champ électrique est obtenu par reconstruction
- La rapidité de la méthode permet de simuler des façades de grande taille
- La méthode est compatible avec les méthodes SBR (basée sur les rayons)

---

MERCI POUR VOTRE ATTENTION