



Etude de l'atténuation des ondes électromagnétiques hautes fréquences à travers les parois des bâtiments de type Haute Qualité Environnementale

Candidat 41983: Guillaume EYMERY



Comment assurer la propagation des ondes électromagnétiques à hautes fréquences au sein des nouveaux bâtiments écologiques ?

I) Présentation

a°/ *Un enjeu sociétal*

b°/ Notre **démarche**

II) Construction d'un modèle

a°/ *Hypothèses retenues pour l'étude*

b°/ *Modèle retenu*

c°/ *Phénomènes responsables de l'atténuation*

III) Expérience

a°/ Le **dispositif** expérimental

b°/ **Acquisition** des données et limites du modèle

c°/ **Traitement** des résultats

Conclusion: Réponse problématique, des solutions pour l'avenir?

Un enjeu de premier plan:

- Le rôle toujours plus important de la téléphonie mobile dans nos sociétés
- Des innovations récentes (5G)
- Le conflit entre l'ADEME et les entreprises de téléphonie mobile

ADEME



orangeTM



La démarche retenue:

- Déterminer l'équation de propagation du champ électrique à travers un diélectrique
- Choisir pour l'étude des matériaux privilégiés dans la construction HQE
- Mettre en avant expérimentalement le phénomène d'atténuation des ondes électromagnétiques à travers différents diélectriques aux fréquences de la 5G
- Déterminer expérimentalement la permittivité relative complexe des matériaux utilisés pour l'expérience

Hypothèses retenues pour l'étude :

- milieu linéaire, homogène, isotrope
- Onde plane, unidimensionnelle, progressive
- Influence du champ magnétique terrestre négligée
- Pas d'atténuation de l'onde dans l'air

Hypothèses retenues pour l'étude :

- milieu linéaire, homogène, isotrope
- Onde plane, unidimensionnelle, progressive
- Influence du champ magnétique terrestre négligée
- Pas d'atténuation de l'onde dans l'air

Description de l'onde :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Les équations de Maxwell donnent :

$$\Delta \vec{E} - \frac{\epsilon_r}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}$$

et admettent pour solution:

$$\underline{\underline{\vec{E}}} = \underline{\underline{\vec{E}}}_0 e^{j(\omega t - \underline{\underline{k}} \cdot \underline{\underline{r}})}$$

Avec :

$$\underline{k}^2 = \epsilon_r \frac{\omega^2}{c^2}$$

Et :

$$\bar{\epsilon}_r = \epsilon' - j\epsilon''$$

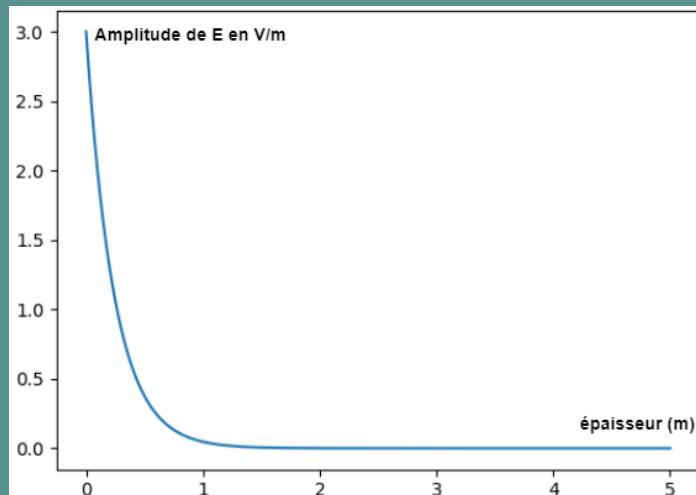
Les phénomènes responsables de l'atténuation :

Effet de peau :

En posant : $k = k_1 - jk_2$

On obtient :

$$E = E_0 \cdot \exp(-k_2) \cdot \cos(\omega t - k_1 x)$$



*Ici : béton de permittivité
6,20 + 0,99 j*

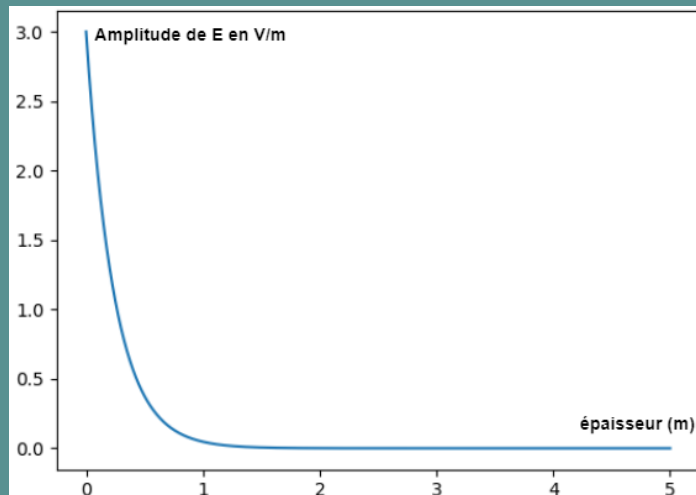
Les phénomènes responsables de l'atténuation :

Effet de peau :

En posant : $k = k_1 - jk_2$

On obtient :

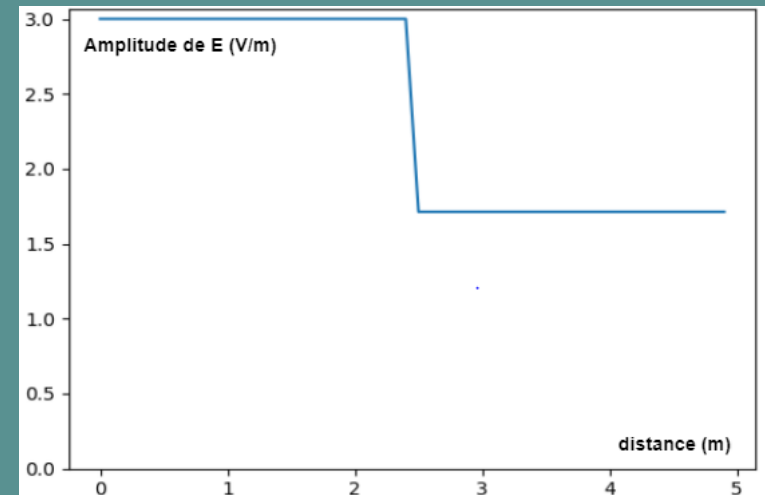
$$E = E_0 \cdot \exp(-k_2) \cdot \cos(\omega t - k_1 x)$$



*Ici : béton de permittivité
 $6,20 + 0,99j$*

Réflexion :

$$E_t = \frac{2 \cdot n_1}{n_1 + n_2} \cdot E_i$$



*Passage d'une onde d'un milieu n_1
dans un milieu n_2*

indice du milieu: $n_0 = 1$

n

$n_0 = 1$

Paroi

Onde incidente

Onde à travers la paroi

Onde reçue par l'analyseur



épaisseur matériau = e



indice du milieu: $n_0 = 1$

n

$n_0 = 1$

Paroi

Onde incidente

Onde à travers la paroi

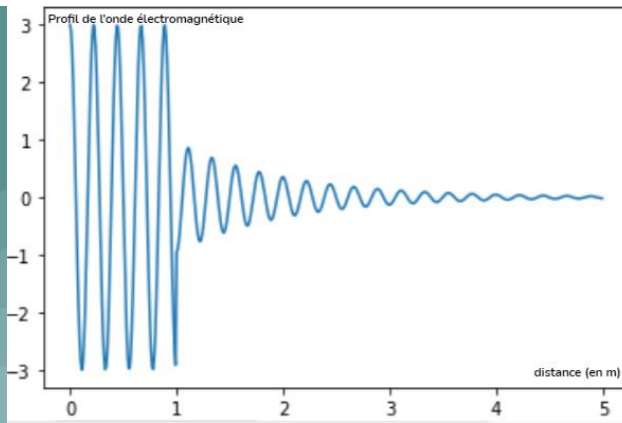
Onde reçue par l'analyseur



Equation du champ E :

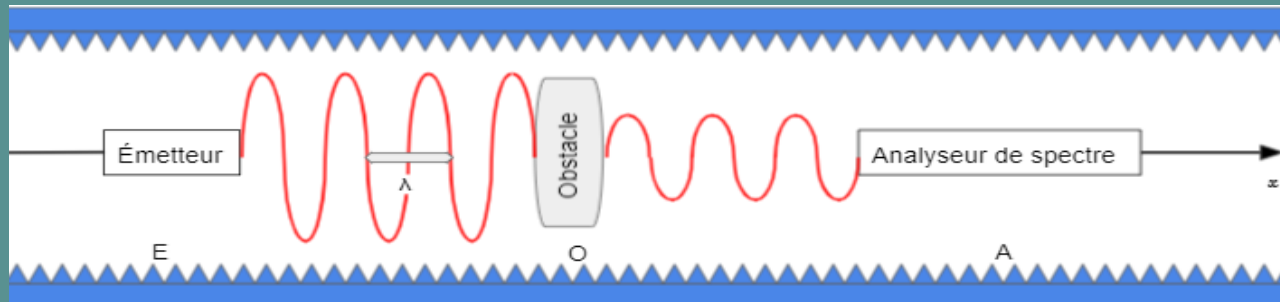
épaisseur matériau = e

$$E = E_0 \cdot \exp(j(\omega t - kx)) \quad \underline{E}_1 = E_0 \left| \frac{2}{n+1} \right| \exp(-k''_1 x) \exp(j(\omega t - k'_1 x)) \quad \underline{E}_2 = E_0 \left| \frac{2}{n+1} \right| \cdot \left| \frac{2n}{n+1} \right| \exp(-k''_1 e) \exp(j(\omega t - k'_2 x))$$



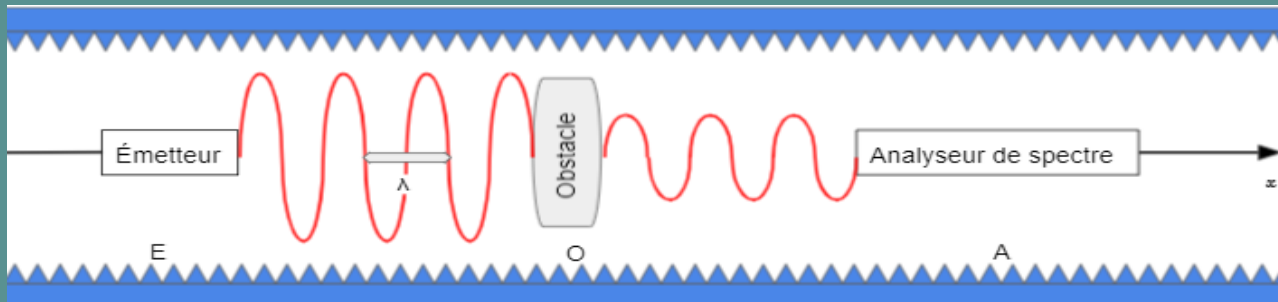
L'expérience :

Schéma de l'expérience :



L'expérience :

Schéma de l'expérience :



Montage :



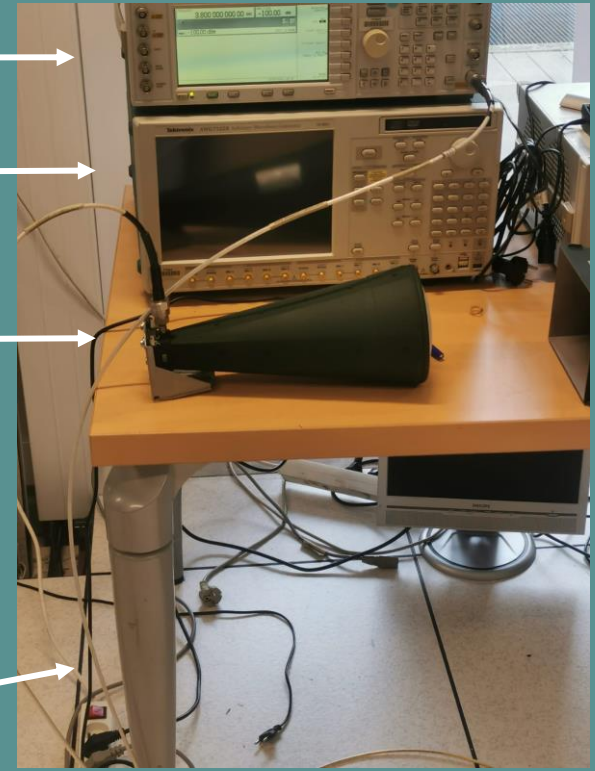
GHF

Analyseur de spectre

Emetteur
Conique

Récepteur

Pertes câbles (4 dBm)



Acquisition des mesures :

- *Montage final:*



- *Les valeurs sont lues sur l'analyseur de spectre (retransmis sur ordinateur)*



- *L'atténuation est mesurée en dBm, reliée à la Puissance en Watts:*

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{Watts}}{1mW} \right)$$

Acquisition des mesures :

- *Montage final:*



- Les valeurs sont lues sur l'analyseur de spectre (retransmis sur ordinateur)



- L'atténuation est mesurée en dBm, liée à la Puissance en Watts:

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{Watts}}{1mW} \right)$$

- On peut retrouver la valeur du champ E (dépend de l'instrument de mesure)

```

E = 10**((10*log10(10**(((P_lue-pertCable)-13+FactAntenne)/10)*Span/400/0.1)-0.53)/20)
P_lue: déterminée sur l'analyseur de spectre
FactAntenne = 29
perteCable = -4 dB
Span = 1 GHz
    
```

Analyse des résultats :

1° Montrer l'atténuation

Puissance reçue en fonction de la fréquence: béton et vide et courbes de tendances

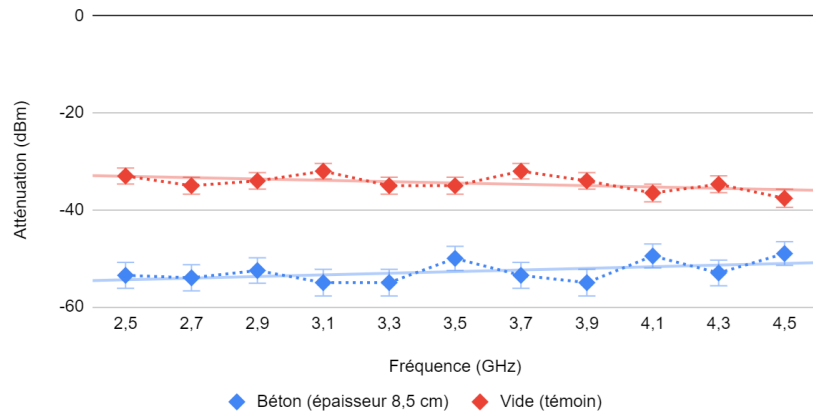


fig1.: béton de 8,5 cm

Puissance lue pour du vitrage et du PLACO en fonction de la fréquence (en GHz)

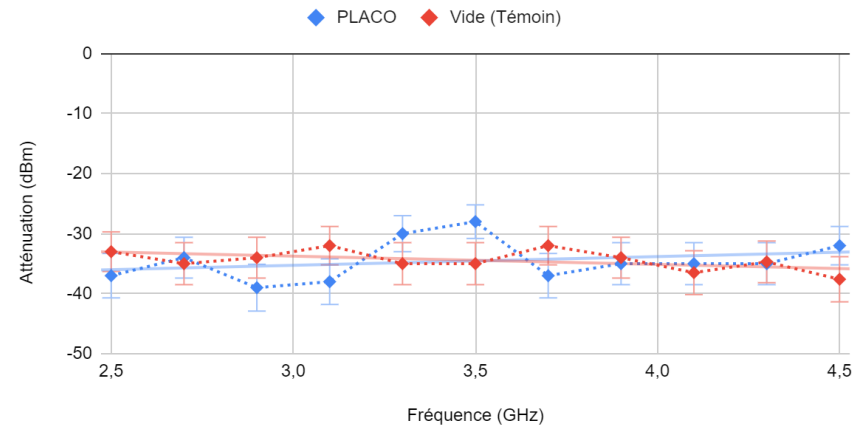


fig2.: PLACO

Puissance lue pour du vitrage et du vide en fonction de la fréquence (en GHz)

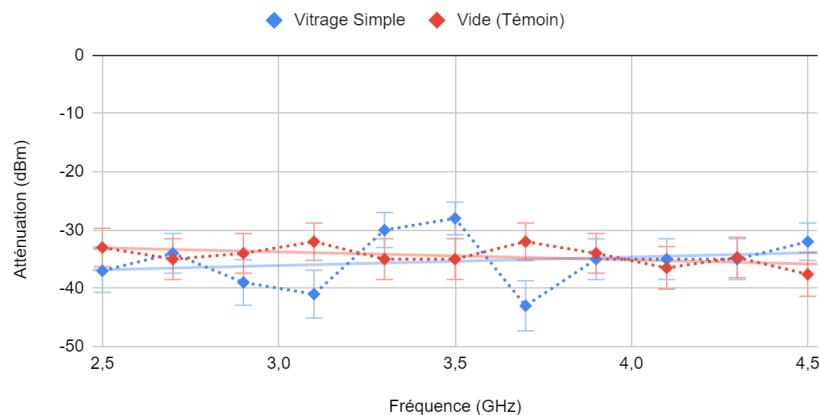


fig3: Simple vitrage

Puissance reçue en fonction de la fréquence pour une plaque métallique et du vide

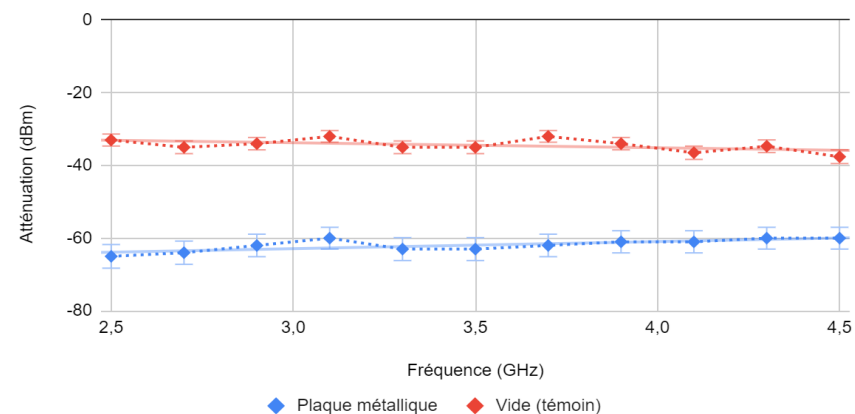


fig4.: plaque métallique

Analyse des résultats :

2°/ Déterminer la permittivité complexe

Le verre et le PLACO n'atténuent pas l'onde, on peut déjà en déduire :

De même: $\Im(k_{verre}) \simeq 0$ d'où: $\epsilon''_{verre} \simeq 0$
 $\Im(k_{placo}) \simeq 0$ d'où: $\epsilon''_{placo} \simeq 0$

En déterminant la valeur du champ E dans le matériau et en faisant varier l'épaisseur d'un matériau on peut déterminer k' et k'' et ainsi ϵ' et ϵ'' pour le béton.

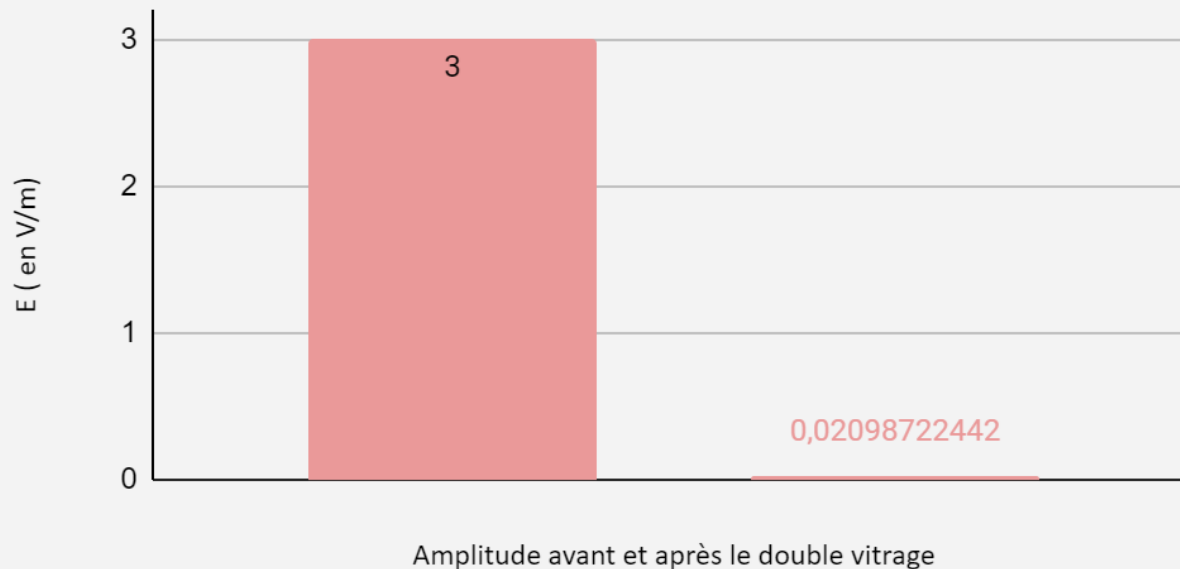
| matériau/permittivité | ϵ' | ϵ'' |
|-----------------------|-------------|--------------|
| béton | 1,01 | 0,38 |
| vitre | 2,72 | 0,053 |
| placo | 11 | 0 |

(pour $f = 3,5$ GHz)

Analyse des résultats :

3°/ Le cas particulier des vitres de bâtiment HQE

Amplitude du champ électrique dans un double vitrage à une fréquence d'étude de 3.5 GHz



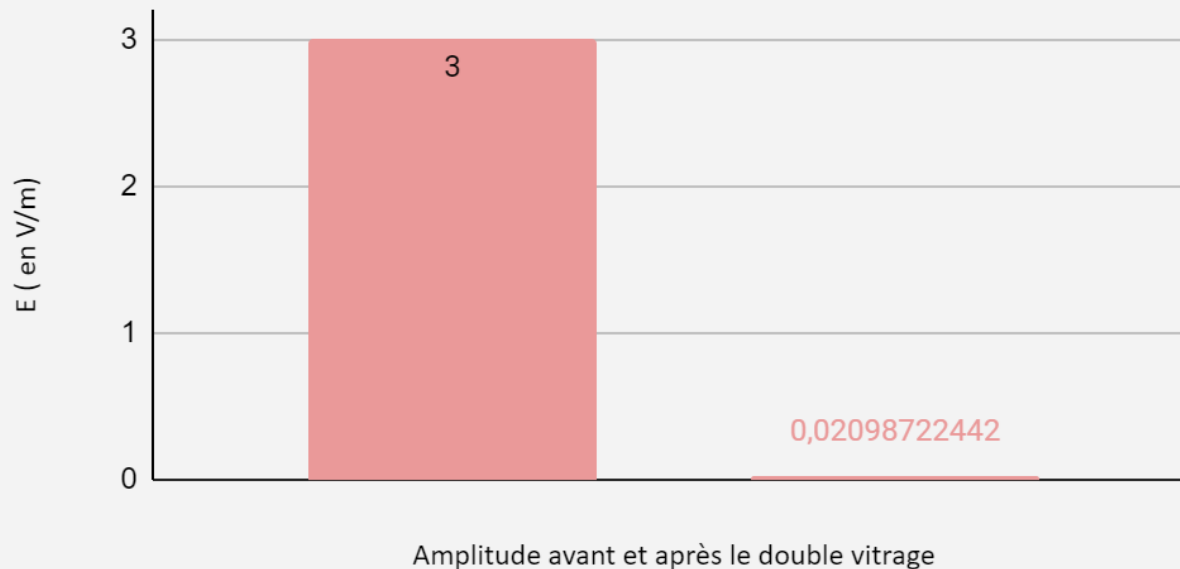
Un double vitrage réel (présent dans les bâtiments HQE) atténue nettement plus l'onde que d'un verre simple.

La fine pellicule de métal imprimée sur ces vitres est responsable de cette forte atténuation.

Analyse des résultats :

3°/ Le cas particulier des vitres de bâtiment HQE

Amplitude du champ électrique dans un double vitrage à une fréquence d'étude de 3.5 GHz



Un double vitrage réel (présent dans les bâtiments HQE) atténue nettement plus l'onde que d'un verre simple.

La fine pellicule de métal imprimée sur ces vitres est responsable de cette forte atténuation.

4°/ Conclusion sur les expériences

Le béton et le métal atténuent fortement les ondes mais sont indispensables pour garantir la cohésion des structures. Le verre seul atténue peu mais le double-vitrage traité d'une fine pellicule métallique (censée protéger des UV), atténue fortement les signaux. Il faut donc trouver de nouvelles solutions.

obtient

Des solutions pour l'avenir ?

1°/ Des répéteurs GSM, une solution pour le court terme



- Chers
- Énergivores
- Doivent être régulièrement remplacés

obtient

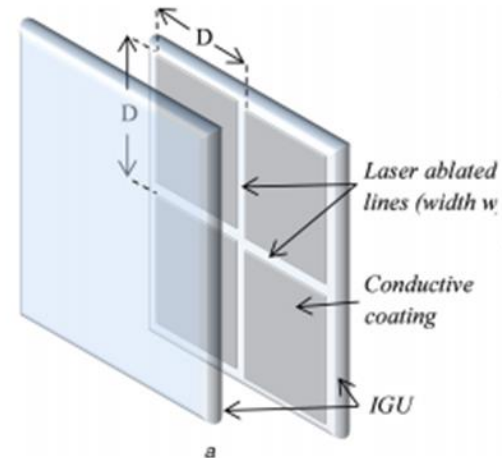
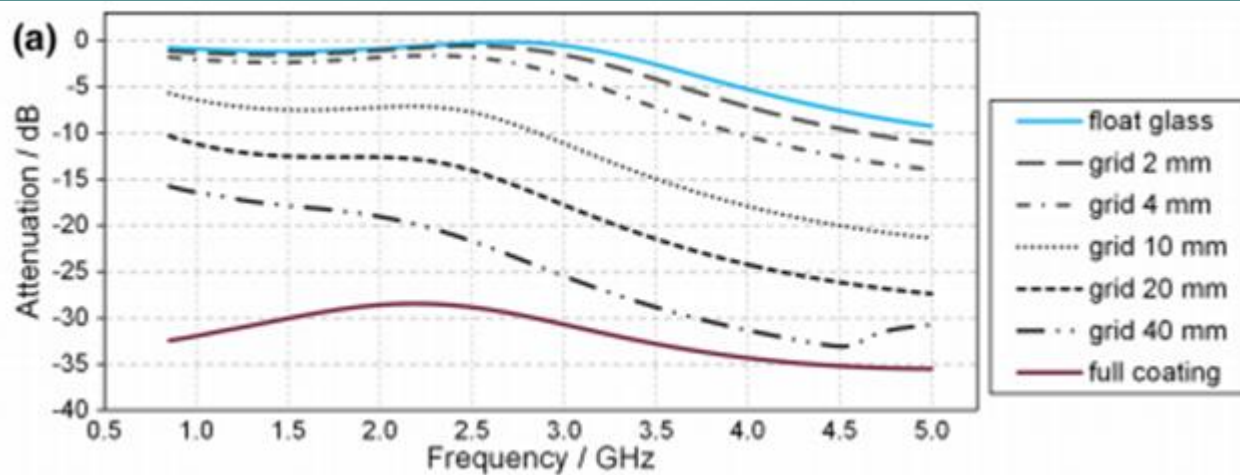
Des solutions pour l'avenir ?

1° Des répéteurs GSM, une solution pour le court terme



- Chers
- Énergivores
- Doivent être régulièrement remplacés

2° Vitrages au revêtement métallique découpé par ablation laser



Annexe: détermination de la permittivité

ve

Amplitude de E à la sortie d'un matériau :

E_2 : amplitude du champ électrique en sortie

E_0 : amplitude du champ électrique de l'onde émise

n : coefficient de réflexion du matériau

k''_1 : partie imaginaire du vecteur d'onde

e : épaisseur du matériau

$$E_2 = E_0 \left| \frac{4n}{(n+1)^2} \right| \exp(-k''_1 e)$$

En considérant deux épaisseurs d'un même matériau :

$$\frac{E_{2,e1}}{E_{2,e2}} = \exp(k''_1(e_2 - e_1))$$

D'où :

$$\ln\left(\frac{E_{2,e1}}{E_{2,e2}}\right) \frac{1}{e_2 - e_1} = k''_1$$

Et en posant:

$$A = E_2 \frac{1}{E_0 \exp(-k''_1 e)} \quad \text{comme:}$$

$$A = \left| \frac{4n}{(1+n)^2} \right|$$

et :

$$n = n' - jn'' = \frac{c^2}{\omega^2} k_1' - j \frac{c^2}{\omega^2} k_1''$$

On obtient :

$$A = \frac{4 \frac{c^2}{\omega^2} \sqrt{k_1'^2 + k_1''^2}}{1 + 2 \frac{c^2}{\omega^2} k_1' + \frac{c^4}{\omega^4} k_1'^2 + \frac{c^4}{\omega^4} k_1''^2}$$

Enfin déterminer k'_1 , revient à résoudre le polynôme suivant:

$$A^2 \frac{c^8}{\omega^8} k_1'^4 + 4A^2 \frac{c^6}{\omega^6} k_1'^3 + \left(A^2 \left(6 \frac{c^4}{\omega^4} + 2 \frac{c^8}{\omega^8} k_1''^2 \right) - 16 \frac{c^4}{\omega^4} \right) k_1'^2 + 4A^2 \frac{c^2}{\omega^2} \left(1 + \frac{c^4}{\omega^4} k_1''^2 \right) k_1' + A^2 \left(1 + \frac{c^8}{\omega^8} k_1''^4 + 2 \frac{c^4}{\omega^4} k_1''^2 \right) - 16 \frac{c^4}{\omega^4} k_1''^2 A^2 \left(1 + \frac{c^8}{\omega^8} k_1''^4 + 2 \frac{c^4}{\omega^4} k_1''^2 \right) = 0$$

Annexe:

Logiciel utilisé pour l'acquisition des mesures : Xplora2020

| | | | | | | | |
|---|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Matériau testé | Aucun matériau | Béton | | | | | |
| fréquence (Hz) | 3,5 GHz | 3,5 | 3,5 | 4,5 | 4,5 | 2,5 | 2,5 |
| Puissance emise au GHF (dB.m) | 0 | 0 | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 |
| Puissance emise (Watts) | 0,001 | | | | | | |
| Puissance reçue à m'analyseur de spectre (dB.m) | -26,35 | -48 | -31,1 | -46 | -36 | -50 | -40 |
| épaisseur du matériau (cm) | 0 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| valeur efficace de E émis | 1,309307341 | | | | | | |
| valeur efficace de E reçu | 2,2644879 | 0,18727077 | 1,31059951 | 0,23575993 | 0,74553837 | 0,14875446 | 0,47040291 |
| gain de l'antenne utilisée | 20 | | | | | | |
| dist | | | | | | | |
| distance entrée emeteur recepteur = 50 cm | | | | | | | |
| | 0,35 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| | | | | | | | |
| Béton (en cm) | 5x8,6x50 | | | | | | |
| Verre (en cm) | 60x15x0,5 | | | | | | |
| Double vitrage (en cm) | 3,3 | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Pertes câbles (dB) | -4 | | | | | | |
| Facteur d'Antenne | 29 | | | | | | |
| Span (MHz) | 1000 | | | | | | |
| RBW | 0,1 | | | | | | |
| | | -2,8 | -1,11 | -2,6 | -1,6 | -3 | -2 |
| A | -0,635 | 0,00158489 | 0,07762471 | 0,00251188 | 0,02511886 | 0,001 | 0,01 |

Extrait tableau de mesures

Annexe: Extrait de code (effet de peau et atténuation à travers un béton)

```
k1 = 0.25
k2 = 0.01
n1 = 1
n2 = 1.2
E_0 = 3
def effet_peau(x):
    return E_0*np.exp(-k2*x)*np.cos(k1*x)

def profil_onda(i):
    while i<100:
        return E_0*m .cos(k1*i)
    else:
        return (2*n1)/(n1+n2)*effet_peau(i)

def onde_air(i):
    return E_0*m.cos(k1*i)

Y = [profil_onda(i) for i in range (0,500)]
X = [i/100 for i in range (0,500)]
plt.plot(X,Y)
plt.show
```

