

Electromagnétisme

## Rapport de Projet

# *Réalisation d'un logiciel de ray-tracing*

ELEC-H-304

Mr Ph. DE DONCKER

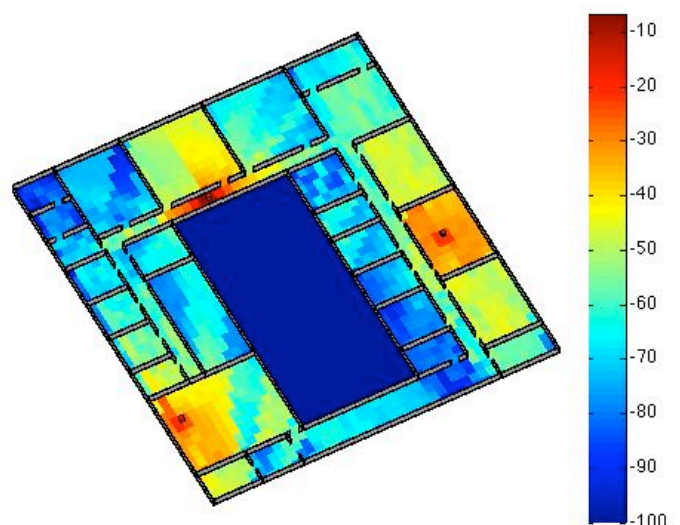
Maxime DELCOURT

Alexandre BALON-PERIN

Quang Vinh PHAM

IRCI 3

2009 - 2010





# Table des matières

Introduction	2
Interactions des ondes	3
Ondes directes	4
Réflexions	4
Diffraction	6
Transmission	7
Interactions totales sur une onde	7
Application et Résultats	8
Programme	9
Onde directe	9
Réflexions	10
Diffraction	10
Ray-tracing	11
Conclusion	12

# Introduction

Dans le cadre de la formation de l'ingénieur aux méthodes numériques, l'objectif du projet est la réalisation d'un logiciel permettant de simuler la propagation des ondes électromagnétiques dans les hypothèses de champs lointains. Ce type de logiciels est couramment appelé *ray-tracing*. L'implémentation de ces méthodes mathématiques est sur base du logiciel ©Matlab. La simulation doit pouvoir prédire la puissance captée par un récepteur autour d'un émetteur selon l'endroit où il se situe, dépendant ainsi des obstacles qui les séparent. En effet, les murs présentent des interactions avec les ondes électromagnétiques telles que les réflexions, les transmissions et les diffractions. Dans un premier temps, ce projet n'est basé que sur des obstacles composés de murs. La simulation pourra ensuite déterminer la *zone de couverture* et le débit binaire à l'intérieur d'un plan de bâtiment, à l'instar de l'étage UA4 de l'ULB.

Pour ce projet, l'émetteur est une station de base du standard 802.11n fonctionnant à la fréquence de 2,45 GHz. L'étude des propagations d'ondes électromagnétiques sur l'étage UA4 ne se limite, pour cette année de BA3, que sur des hypothèses simplifiées de la réalité. En effet, seuls les murs (de 10cm d'épaisseur) sont considérés comme les obstacles, le problème reste bidimensionnel et les antennes sont supposées sans pertes.

Les différentes formules présentées dans le rapport proviennent du cours ELEC-H-304 d'*Electromagnétisme* de Mr. Ph DE DONCKER, service OPERA de l'Université Libre de Bruxelles, 2010.

# Interactions des ondes

Lorsqu'une onde rencontre un obstacle, celle-ci peut subir, ici, trois effets : une réflexion, une transmission ou une diffraction. Une onde peut aussi subir successivement plusieurs interactions au cours de sa propagation.

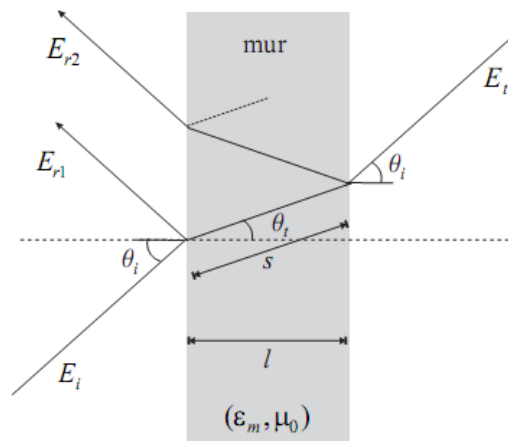


figure 1 : Interactions par réflexion et transmission d'une onde par un mur

La figure 1<sup>1</sup> présente l'interaction d'une onde  $E_i$  sur un mur, avec un angle d'incidence  $\theta_i$ . Celle-ci peut être décomposée en une onde réfléchie  $E_{r1}$  et une onde transmise  $E_t$ . Une diffraction d'onde aura plutôt lieu sur un coin de mur ou une arête.

A savoir, l'épaisseur des murs de 10cm n'est pas prise en compte pour la définition du plan mais bien pour le calcul des coefficients de réflexion et de transmission.

Après avoir reçu le plan de l'étage du bâtiment dans lequel le réseau est déployé, le cheminement de l'étude a été déterminé par les différents chemins de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Dans un premier temps, le chemin le plus rapide, c'est-à-dire par ondes directes entre la station de base et le récepteur, ensuite ayant subi une seule ou deux réflexions sur sa route et pour finir, l'étude d'ondes ayant rencontré une seule diffraction. Pour chaque étape, la vérification de la présence de transmissions est obligatoire.

<sup>1</sup> Source DE DONCKER, Ph., ULB, ELEC-H-304 : "Electromagnétisme", page 134. Dernière visite le 12 mai 2010

## Ondes directes

Une onde directe décrit une droite entre l'émetteur et le récepteur. Elle est la plus simple à représenter géométriquement, néanmoins, son chemin peut être truffé d'obstacles, lui faisant endurer des transmissions.

Si une onde directe ne rencontre aucun obstacle, son champ électrique au récepteur sera donné par :

$$\underline{E} = \sqrt{60 G_{TX}(\theta_{TX}, \phi_{TX}) P_{TX}} \frac{e^{-j\beta d}}{d} \quad (8.77)$$

où  $G_{TX}(\theta_{TX}, \phi_{TX})$  est le gain de l'antenne émettrice dans la direction d'émission

$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi)$  (5.24) où  $\eta$  est le rendement de l'antenne qui est supposée sans pertes, c'est-à-dire valant 1, et où

$D(\theta = 90^\circ) = \frac{16}{3\pi} \simeq 1,7$  (5.49) car la simulation est traitée sur un plan horizontal xy pour une antenne dipôle  $\lambda/2$ .

$G_{TX}(\theta_{TX}, \phi_{TX})$  vaut donc 1,7.

$P_{TX}$  est la puissance de l'émetteur et  $d$  la distance parcourue par cette onde.

## Réflexions

Une onde réfléchie est une onde ayant subi un rebond sur un mur. Lors de son cheminement, une onde peut avoir plusieurs réflexions. Pour la simulation de ce projet, la réflexion simple et double seront prises en compte.

La détermination des chemins de propagations pour les réflexions se fait de façon purement géométrique par la méthode des images. Celle-ci utilise les symétries orthogonales et leurs intersections avec les murs (figure 2<sup>2</sup>).

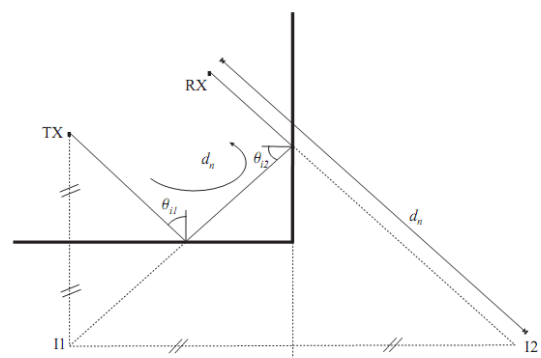
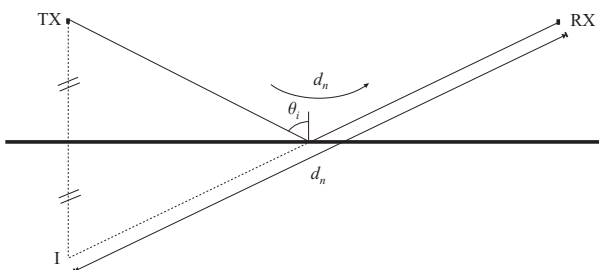


figure 2 & 3 : Méthode des images

<sup>2</sup> Source DE DONCKER, Ph., ULB, ELEC-H-304 : "Electromagnétisme", page 150. Dernière visite le 12 mai 2010

Les calculs des intersections avec les murs ( les points de réflexion ) ont permis de calculer l'angle d'incidence de l'onde, et de calculer le coefficient de réflexion :

$$\Gamma_m(\theta_i) = \Gamma_{\perp}(\theta_i) + (1 - \Gamma_{\perp}^2(\theta_i)) \frac{\Gamma_{\perp}(\theta_i) e^{-2j\beta_m s} e^{j\beta 2s \sin \theta_t \sin \theta_i}}{1 - \Gamma_{\perp}^2(\theta_i) e^{-2j\beta_m s} e^{j\beta 2s \sin \theta_t \sin \theta_i}} \quad (8.43)$$

grâce aux calculs intermédiaires:

$$\Gamma_{\perp} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad (8.39)$$

$$\sqrt{\varepsilon_1} \sin \theta_i = \sqrt{\varepsilon_2} \sin \theta_t \quad (8.5) \text{ Loi de Snell permettant de connaître } \theta_t$$

$$Z_2 = \sqrt{\mu_0 / \tilde{\varepsilon}_2} \quad (8.18) \text{ Impédance d'un matériau (air et vide)}$$

$$s = l / \cos \theta_t \quad \text{Distance de propagation dans le mur}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad \text{Permittivité relative du matériau}$$

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (7.25) \text{ Permittivité complexe équivalente du matériau}$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (7.35) \text{ et } (7.32)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} + 1 \right]^{1/2} \quad \text{Calculs pour la constante de propagation } \gamma$$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

Si il n'y a pas de réflexions sur aucun obstacle, ce coefficient  $\Gamma_m$  vaut 1.

## Diffraction

Une diffraction a lieu généralement sur un obstacle diffractant tel qu'une arête d'un mur pour ce projet. Elle peut être visualisée comme un contournement de l'obstacle après son intersection avec une arête. En effet, pour la simulation de ray-tracing, l'approximation géométrique de la diffraction d'une onde est le chemin parcouru entre l'émetteur TX et le sommet d'un mur (une arête), et ce dernier jusqu'au récepteur, comme le montre la figure 4<sup>3</sup>. Une onde incidente subit une perte par diffraction. Ainsi, mathématiquement, son coefficient de diffraction peut être approché par la formule :

$$D = -\frac{e^{-j\pi/4}}{2\sqrt{2\pi\beta L}} \frac{F_T(2\beta L \sin^2(\delta/2))}{\sin \delta/2} \quad (8.79)$$

où les calculs intermédiaire sont effectués par les formules supplémentaires suivantes :

$$L = \frac{s s'}{s + s'}$$

$$\delta = \pi - (\phi - \phi')$$

(8.80) Longueur et angle dues à la diffraction

$$F_T(x) = 2j \sqrt{x} e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-ju^2} du \quad (8.81) \text{ Paramètre de Fresnel calculé numériquement}$$

(fonction de calcul donnée avec l'énoncé)

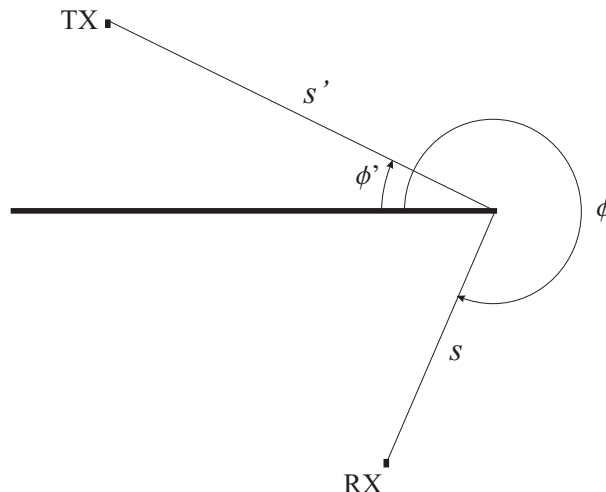


figure 4 : diffraction par une arête (TX = émetteur, RX = récepteur)

<sup>3</sup> Source DE DONCKER, Ph., ULB, ELEC-H-304 : "Electromagnétisme", page 151. Dernière visite le 14 mai 2010

## Transmission

A la rencontre d'un obstacle, une partie de l'onde est réfléchi et le reste est transmis. Il est possible, comme à la réflexion de calculer, grâce au point d'intersection entre l'onde et le mur, l'angle d'incidence et ensuite le coefficient de transmission :

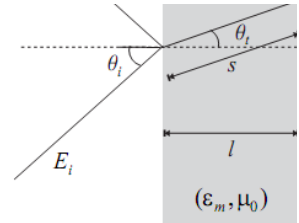


figure 5<sup>4</sup> : Réflexion et transmission d'onde

$$T_m(\theta_i) = \frac{(1 - \Gamma_{\perp}^2(\theta_i)) e^{-j\beta_m s}}{1 - \Gamma_{\perp}^2(\theta_i) e^{-2j\beta_m s} e^{j\beta 2s \sin \theta_t \sin \theta_i}} \quad (8.44)$$

où les calculs intermédiaires utilisent les mêmes formules que pour le coefficient de réflexion. Si aucun obstacle, c'est-à-dire aucun mur, n'est rencontré, ce coefficient vaut 1.

## Interactions totales sur une onde

Les coefficients préalablement calculés ont évidemment une utilité pour le calcul du champ en un point de la pièce, à l'instar du champ électrique réfléchi :  $E_r = \Gamma_m E_i$ .

Une onde se propage généralement et peut subir successivement des réflexions, des transmissions et des diffractions. Lors de son parcours, d'une distance totale  $d_n$ , elle contracte alors différents coefficients qui permet de calculer le champ électrique au récepteur :

$$\underline{E}_n = \underbrace{\Gamma_1 \Gamma_2 \dots}_{\text{Réflexions}} \underbrace{T_1 T_2 \dots}_{\text{Transmissions}} \underbrace{D_1 D_2 \dots}_{\text{Diffractions}} \sqrt{60 G_{TX}(\theta_{TXn}, \phi_{TXn}) P_{TX}} \frac{e^{-j\beta d_n}}{d_n} \quad (8.78)$$

où les interactions sont prises en compte avec leurs coefficients. Chaque interaction a son propre coefficient dépendant principalement de son angle d'incidence, ainsi, le champ électrique total peut avoir un ou plusieurs coefficients de réflexions, de transmissions et de diffractions.

<sup>4</sup> Source DE DONCKER, Ph., ULB, ELEC-H-304 : "Electromagnétisme", page 134. Dernière visite le 12 mai 2010



# Application et Résultats

La simulation a faite à partir des données suivantes :

Station de base 802.11n	Murs
Antennes = dipôles $\lambda/2$ verticaux sans pertes	$\sigma = 0,1 \text{ S/m}$
fréquence = 2,45 GHz	$l = 0,1 \text{ m}$
$G_{TX}(\theta_{TX}, \phi_{TX}) = 1,7$	$\epsilon_r = 5$
$P_{injectée} = 10 \text{ dBm}$	
Impédance câbles = $50 \Omega$	
Résistance de rayonnement = $73 \Omega$	
Longueur des câbles = 1 m	
Atténuation des câbles = 1 dB/m	

et des constantes suivantes :

Constantes
Permittivité du vide : $\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$
Perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

Grace aux données de la station de base, la puissance émise par l'antenne peut être calculée. En effet : connaissant,  $R_{ar}$  (5.48) et l'impédance des câbles coaxiaux de  $50\Omega$ ,

$$R_a = R_{ar} + R_{al} \quad (5.11) \text{ permet de calculer la résistance de l'antenne } R_a;$$

$$P_{reçu} = P_{injectée} - P_{pertes} = 10 - 1 = 9 \text{ dBm} = 7,94 \text{ Watt};$$

$$\underline{E}_n = \underbrace{\Gamma_1 \Gamma_2 \dots}_{\text{Réflexions}} \underbrace{T_1 T_2 \dots}_{\text{Transmissions}} \underbrace{D_1 D_2 \dots}_{\text{Diffractions}} \sqrt{60 G_{TX}(\theta_{TXn}, \phi_{TXn}) P_{TX}} \frac{e^{-j\beta d_n}}{d_n} \quad (8.78)$$

$$\begin{aligned} \vec{h}_e(\theta, \phi) &= - \int_{-\lambda/4}^{\lambda/4} \cos \beta z e^{j\beta z \cos \theta} dz \vec{1}_z \\ &= - \frac{\lambda}{\pi} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin^2 \theta} \vec{1}_z \\ &= - \frac{\lambda}{\pi} \end{aligned} \quad (5.42) \text{ sachant que } \theta=90^\circ, \text{ ce qui simplifie les termes trigonométriques à l'unité;}$$

$$\underline{V}_{oc}(\vec{r}) = \vec{h}_e(\theta, \phi) \cdot \vec{E}(\vec{r}) \quad (5.7)$$

$$P_{Lmax} = \frac{1}{8} \frac{|\underline{V}_{oc}|^2}{R_a} \quad (5.17) \text{ donnant la puissance émise par l'antenne.}$$

## Programme

Le programme se découpe comme ceci : une fichier main commence par charger le plan fourni dans le cadre du projet. Le plan est une suite de murs horizontaux et verticaux dont les coordonnées ont été placées dans un vecteur. Après cela, le programme fait se balader un récepteur sur tous les points du plan afin de déterminer les ondes (directes, après réflexion simple, double, diffraction et transmission) qui lui parviennent ainsi que la puissance associée. Cela est réalisé en appelant les différents fichiers fonctions ayant pour rôle de déterminer, dessiner et calculer ces différents types de transmissions de puissance. Une fois que le récepteur a parcouru toute la surface du plan il est possible de déterminer la zone de couverture et le débit binaire, préalablement calculé, graphiquement grâce à la fonction fournie.

Un autre but du projet était de déterminer où placer trois émetteurs de manière optimale afin de couvrir un maximum de surface. Pour ce faire, les trois émetteurs n'ont pas été déplacés sur la surface du plan, contrairement à ce que l'intuition nous dicterait. Dans un souci d'optimisation de notre code, un seul émetteur a été baladé sur la surface du plan afin de récupérer à chacune de ses positions les matrices représentant les puissances distribuées par cet émetteur ainsi que les débits binaires. Ensuite, une fois qu'il a balayé la surface du plan, il ne restait plus qu'à comparer ces matrices trois par trois. Des matrices ont été créées représentant la puissance émise par des combinaisons de trois émetteurs en prenant en chaque point le maximum des puissances émises par chacun des émetteurs. Possédant alors la distribution de puissance fournie par chacune des combinaisons, il suffisait de calculer celle qui avait la meilleure moyenne accompagnée du meilleur écart-type pour déterminer la combinaison gagnante.

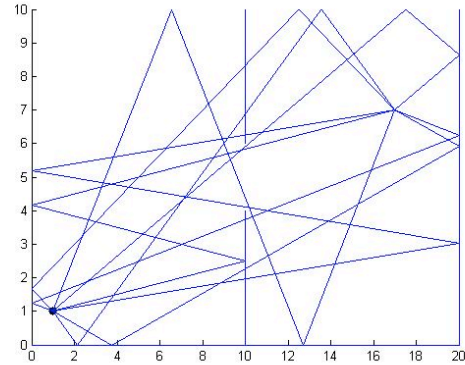
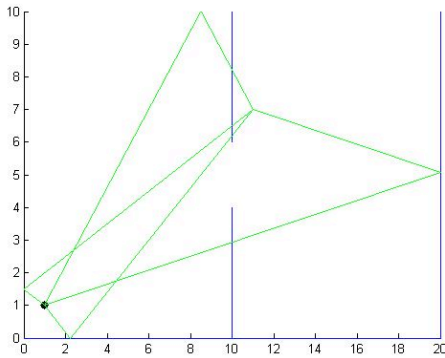
La démarche utilisée méritait d'être mise en avant, car elle fait gagner un temps certain dans le cadre de tout projet de ray-tracing. C'est un avantage non négligeable devant la masse de calculs que nous impose les méthodes de ray-tracing. Ce gain de temps peut être par exemple exploité pour effectuer des calculs supplémentaires qui affineront la simulation des phénomènes.

## Onde directe

L'onde directe est représentée dans le plan comme un segment de droite entre l'émetteur TX et le récepteur RX. Elle est unique.

## Réflexions

Les ondes réfléchies peuvent être de réflexion simple ou double. La réflexion triple, et plus, n'a pas été prise en compte dans le logiciel, car déjà la réflexion triple demande beaucoup de temps de calculs à ©Matlab avant de donner un résultat. Cependant, l'implémentation de la réflexion triple est fort similaire à la double, en utilisant la méthode des images.



figures 6 & 7 : Réflexion simple (gauche) et réflexions double (droite) sur plan simple

Les figures représentent, sur un plan simple, une réflexion simple (à gauche) et une réflexion double (à droite) pour un émetteur placé en  $[1,1]$  et le récepteur en  $[17,7]$ .

## Diffraction

Les diffractions sur les arêtes ont été implémentées dans le programme. Pour ce faire, il a fallu trouver toutes les arêtes du plan et à partir de là, tracer des rayons de l'émetteur jusqu'à l'arête et de celle-ci au récepteur.

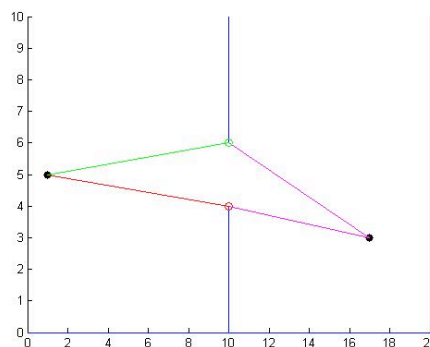


figure 8 : diffraction sur plan simple

## Ray-tracing

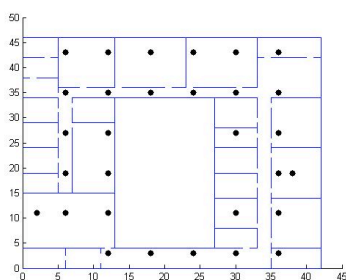
Après avoir détaillé séparément les interactions des ondes, il a fallu les rassembler et les faire interagir entre elles pour arriver au résultat final.

La transmission est une interaction non visible géométriquement sur les plans, néanmoins, il faut la prendre en compte pour les calculs. Voici les résultats obtenus après implémentation et calculs numériques :



figures 9 & 10 :

Puissances de l'onde directe (gauche) et de l'onde directe avec réflexion simple et double (droite), avec transmission



Pour déterminer les endroits pour une meilleure répartition de la puissance et débit globaux, les émetteurs ont été placés à différentes places stratégiques. Au final, le logiciel trouve les trois positions optimales des émetteurs pour couvrir l'étage. On peut raffiner ce résultat en re-testant cette combinaison avec d'autres positions stratégiques des émetteurs. En effet, le calcul de toutes les positions d'émetteurs prendrait trop de temps.

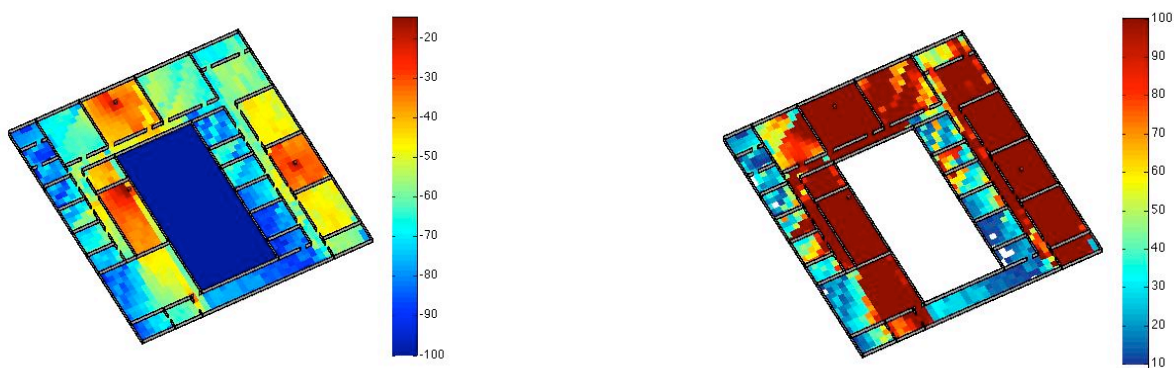


figure 11 & 12 : Puissance (gauche) et débit (droite) sur plan du UA4-UB4

Les résultats obtenus donnent une puissance moyenne de -68.4013 dBm, un débit moyen de 57.5769 Mb/s avec un débit minimum de 4.6416 Mb/s.

# Conclusion

Le logiciel de ray-tracing permet de prédire, pour tout plan de bâtiment à murs verticaux et horizontaux uniquement, la puissance disponible pour un récepteur connecté à une station de base correspondant au standard 802.11n. De plus, ce simulateur permet de déterminer les zones de couvertures optimales. Une autre spécificité du logiciel est de trouver les positions optimales de trois émetteurs afin de couvrir la totalité du plan.

Le projet se base sur certaines simplifications, telles que les murs du bâtiment ayant tous les mêmes caractéristiques. Ainsi, les meubles, personnes, ascenseurs, murs plus épais, ou autres, ne sont pas pris en compte.

Les simulations intermédiaires sont faites sur des plans simples et plus complexes, avec certaines interactions seules ou ensemble. L'optimisation du logiciel permet l'insertion de n'importe quel plan, ainsi que le changement des paramètres caractéristiques de la base et des murs dans le fichier main.m. Avec les paramètres caractéristiques de l'antenne, le programme permet le calcul pour des antennes non adaptées en impédances.

Les résultats finaux permettent de visualiser les puissances et débit par le gradient de couleurs. Les puissances et débit sont bien évidemment meilleurs près des émetteurs, à côté de ceux-ci, dans la même pièce ou dans une pièce à proximité.

Les résultats de la simulation donnent une approximation de la réalité, car les paramètres des interactions des ondes ont été simplifiées. Néanmoins, avec les paramètres donnés, le programme permet bien de prédire la puissance et le débit disponibles, ainsi que la détermination de la zone de couverture sur le plan du UA4-UB4.

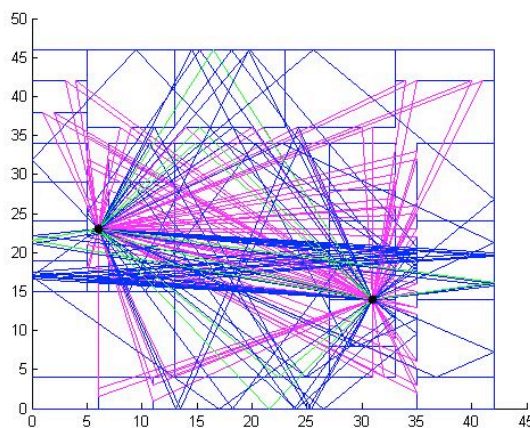


figure 13 : Visualisation géométrique des ondes directes, avec réflexions simple et double et diffractions