

ELEC-H304 Physique des télécommunications

Réalisation d'un logiciel de ray-tracing

1. Objectif

L'objectif de ce projet est le développement d'un code de calcul de propagation des ondes électromagnétiques de type *ray-tracing* permettant de calculer la puissance reçue par un dispositif connecté à une station de base (BS) Wi-Fi. Ce simulateur permettra également de déterminer la *zone de couverture* de la BS Wi-Fi, ainsi que le débit binaire maximal en fonction de la position du récepteur.

2. Le ray-tracing

Les logiciels de ray-tracing permettent de modéliser la propagation des ondes électromagnétiques dans les hypothèses de champ lointain. Les ondes sont supposées localement planes, et chacune de leurs interactions avec l'environnement peut être calculée grâce aux modèles vus au cours (réflexion, transmission, diffraction). Afin d'accélérer les calculs, seule une géométrie simplifiée de l'environnement est prise en compte.

La première étape de votre projet consiste à définir le plan de l'environnement et y positionner le(s) BS et le récepteur. L'épaisseur des murs n'est pas prise en compte pour la définition du plan ni pour le tracé des rayons (mais bien pour le calcul des coefficients de réflexion et transmission).

La deuxième étape est la détermination des chemins de propagation entre la BS et le récepteur. La détermination des chemins de propagation se fait de façon purement géométrique par la méthode des images. Il convient de travailler en vectoriel comme proposé dans le guide de programmation.

Le long de son trajet, chaque onde peut subir successivement plusieurs interactions. Nous ne prendrons en considération que les ondes suivantes:

- ☐ L'onde directe
- ☐ Les ondes ayant subi une ou deux réflexions sur les murs (pas sur le sol ni le plafond)

Chaque onde peut en outre avoir subi des transmissions au travers des obstacles.

Enfin, la puissance reçue est calculée au centre de zones locales de 0,5mx0,5m (la puissance moyenne (8.80) du cours sera considérée pour chaque zone).

Il est demandé de NE PAS tenir compte de la diffraction (qui sera prise en compte dans le cours de MA1).

3. Hypothèses

Nous considérons le réseau Wi-Fi basé sur la norme IEEE¹ 802.11ay, introduite en mars 2021, et opérant à une fréquence de 60 GHz. Notre approche considère le problème dans un cadre purement bidimensionnel, où la BS et le récepteur sont situés à la même hauteur du sol. Seules les ondes se propageant dans le plan horizontal sont prises en considération.

¹ Institute of Electrical and Electronics Engineers, la plus importante association professionnelle mondiale, www.ieee.org

Les antennes émettrices et réceptrices adoptent la forme de dipôles verticaux $\lambda/2$, sans pertes, la puissance d'émission est de 20 dBm.

Les matériaux des murs et des parois peuvent être constitués des éléments suivants² :

	Permittivité relative ε_r	Conductivité σ
Brique	3,95	0,073
Béton	6,4954	1,43
Cloison	2,7	0,05346
Vitre	6,3919	0,00107
Paroi métallique	1	10^7

4. Couverture de la station de base

Pour pouvoir établir une communication, la puissance reçue doit dépasser un certain seuil appelé la *sensibilité* du récepteur. Ce seuil dépend du débit binaire recherché : plus ce débit est important, plus la puissance reçue doit être forte. Il dépend également de la qualité de l'électronique de réception. La zone dans laquelle la puissance du signal provenant de la BS dépasse la sensibilité du récepteur est appelée la *zone de couverture* de cette BS.

Conventionnellement, les puissances en télécom sont exprimées dans une échelle logarithmique appelée dBm:

$$P[\text{dBm}] = 10 \log_{10} \frac{P[\text{W}]}{1\text{mW}}$$

NB : Dans la plupart des langages de programmation, le logarithme en base 10 se note \log_{10} tandis que \log représente le logarithme népérien.

Nous supposons dans ce projet que la sensibilité du récepteur (en dBm) varie linéairement avec le débit binaire maximal atteignable, lorsque ces deux grandeurs sont exprimées en échelle logarithmique. Les valeurs extrêmes de variation sont :

Sensibilité	Débit binaire
-90 dBm	50 Mb/s
-40 dBm	40 Gb/s

Notez l'ordre de grandeur des sensibilités ! En-dessous de -90 dBm la communication est impossible. Au-dessus de -40 dBm, le débit maximal est plafonné. Lorsque plusieurs émetteurs sont présents, nous supposons toujours que le terminal utilisateur se connecte à l'émetteur offrant le plus de puissance. Ne sumez donc pas les puissances des émetteurs !

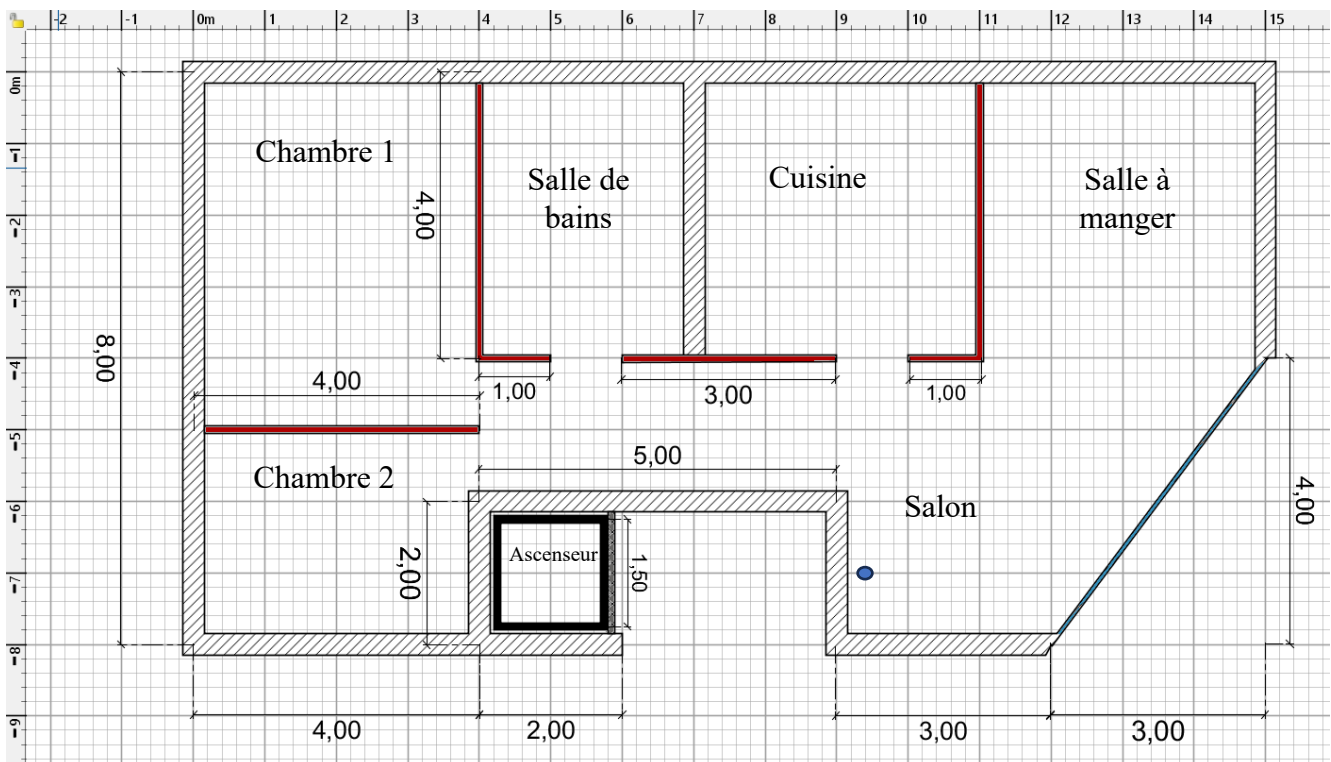
² Pinhasi, Yosef & Yahalom, Asher & Petnev, Sergey. (2008). Propagation of ultra wide-band signals in lossy dispersive media. 2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, COMCAS 2008. 1 - 10. 10.1109/COMCAS.2008.4562803.

5. Scénario

L'entreprise de construction OPERATION Wonders in Concrete & Glass (OPERA-WCG) envisage la construction de nouveaux appartements et ambitionne d'intégrer des infrastructures technologiques de pointe. Pour cela, OPERA-WCG a pris la décision de mettre en place un réseau Wi-Fi conforme à la norme IEEE 802.11 ay, garantissant des débits très élevés.

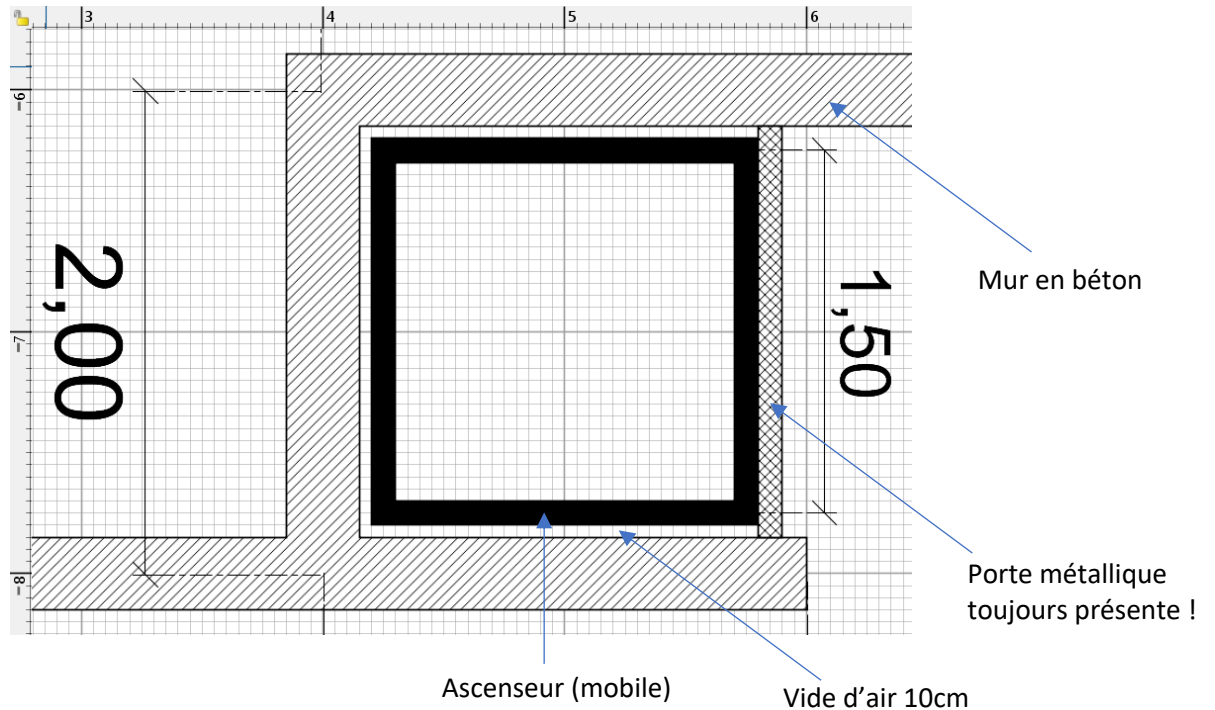
Cependant, des préoccupations ont émergé en raison du fonctionnement de ce réseau à une fréquence de 60 GHz. L'entreprise craint notamment les atténuations potentielles causées par les murs, et en particulier par la présence d'un ascenseur doté de parois métalliques. Dans le souci d'assurer une couverture optimale dans l'ensemble des appartements, OPERA-WCG a sollicité vos compétences pour déterminer le nombre nécessaire de stations de base ainsi que leur positionnement stratégique.

Il est essentiel que ce choix soit judicieux. Par conséquent, il est impératif d'éviter l'installation des stations de base à des emplacements tels que les portes, la cuisine ou la salle de bains. De plus, OPERA-WCG souhaite obtenir une évaluation de l'impact sur la couverture lorsque l'ascenseur s'immobilise à l'étage de l'appartement.



Les murs hachurés en blanc, d'une épaisseur de 30 cm, sont constitués de béton. En revanche, les murs rouges, représentant des cloisons, ont une épaisseur de 10 cm. Le salon est agrémenté d'une imposante baie vitrée de 5 mètres de large et d'une épaisseur de 5 cm, offrant une vue magnifique.

L'ascenseur est symbolisé par des parois métalliques noires de 5 cm d'épaisseur. Pour des raisons de sécurité, même lorsque l'ascenseur n'est pas à l'étage, une porte métallique supplémentaire de 5 cm d'épaisseur est présente (on la supposera toujours fermée dans les simulations). Un zoom sur la représentation de l'ascenseur est disponible ci-dessous. Notez que comme l'épaisseur des murs n'est pas prise en compte pour le tracé des rayons, on suppose que la porte métallique mesure 2m de long plutôt qu'1,7m comme le voudrait la logique.



Dans les premiers plans, une seule station de base était placée en (9,4m ; -7m).

6. Résultats

Procédez par étapes :

- **Commencez par créer l'interface graphique et un code de calcul simplifié.** Ecrivez de préférence beaucoup de fonctions courtes plutôt qu'une fonction très longue.
- **Calculez à la main** le champ électrique et la puissance reçue pour l'une des composantes multi-trajets à deux réflexions, au choix, dans **l'exercice 4.1** du syllabus d'exercices (un exemple vous est donné pour une réflexion dans les corrigés).
- **Validez votre simulateur à l'aide de cas simples**, et en comparant vos résultats à chaque étape de la correction de l'exercice 4.1. Procédez progressivement, d'abord pour le chemin direct puis pour une et deux réflexions. **Tracez le trajet des rayons** grâce à votre simulateur et vérifiez que tous les tracés ont une origine physique. N'hésitez pas à tester sur des scénarios pour complexes pour vous convaincre de la validité des tracés de rayons.
- **Créez ensuite le plan de l'appartement** et obtenez la couverture lorsqu'une seule station de base est placée, en (9,4m ; -7m) sur le plan, lorsque l'ascenseur est à l'étage et lorsqu'il n'y est pas. Les temps de calcul par ray-tracing peuvent être longs, ne soyez pas surpris.
- Ensuite, pour **optimiser la couverture**, vous pouvez choisir de garder ou de déplacer l'émetteur, vous pouvez placer des émetteurs supplémentaires à l'intérieur de l'appartement. Utilisez votre imagination et tous les outils à votre disposition pour améliorer la couverture du réseau (algorithmes de recherche d'emplacement idéal, beamforming...)

Vous présenterez vos résultats sous forme d'un rapport soigné de maximum 20 pages hors annexes. Votre rapport **doit** contenir :

- Une courte introduction résumant votre démarche et vos résultats.
- Les **hypothèses physiques** introduites dans votre simulateur. **Ne recopiez pas** les démonstrations et les équations du syllabus mais sachez identifier les hypothèses importantes menant aux équations utilisées par le simulateur et vérifiez au besoin qu'elles sont satisfaites.
- Une description des **fonctionnalités de votre code** de calcul. Une explication de l'implémentation de l'algorithme de ray-tracing et de la structure de votre code. Le calcul des composantes multi-trajets doit se faire à l'aide de la méthode vectorielle vue au TP (partie 3 du syllabus d'exercices).
- Une validation de votre simulateur pour l'exemple simple considéré dans l'exercice 1 du TP 4. En particulier, donnez sous forme de **tableau comparatif à double entrée** les valeurs de champ électrique et de puissance pour chaque composante multi-trajet séparément, calculée à la main et par votre simulateur. Attention, la fréquence très élevée implique une phase tournant très vite, ne vous étonnez pas d'observer de petites différences dans la phase du champ électrique. Donnez le **détail du calcul à la main l'une des composantes à deux réflexions, au choix** (un exemple vous est donné pour une réflexion dans les corrigés). **Montrez le tracé des rayons obtenu par votre simulateur**. Attention, suivez bien les consignes de l'exercice, la fréquence considérée n'est pas la même et l'exercice ne nécessite pas de calculer de puissance moyenne sur une zone locale !
- Le **résultat du calcul de la puissance reçue et du débit binaire** dans l'appartement. Détaillez l'analyse et concluez sur la présence d'un ascenseur. Veillez à présenter le plan du site dans des axes orthonormés. Limitez l'échelle de puissance et l'échelle de débit binaire aux valeurs extrêmes de variation indiquées. Utilisez une palette de couleurs continue pour représenter les niveaux de puissance. N'oubliez pas d'indiquer les unités de vos axes.
- Des suggestions à destination d'OPERA-WCG sur l'emplacement et le nombre de BSs à placer pour satisfaire le cahier des charges et justifiez votre réflexion. Soyez réalistes.
- Toutes les optimisations présentes dans votre code (récursivité, parallélisme, optimisations pour réduire le temps de calcul, limitation du nombre de fonctions trigonométriques utilisées, algorithme pour une recherche automatique d'emplacement idéal pour les antennes...). Attention, ne travaillez sur les optimisations que lorsque le simulateur est entièrement fonctionnel !
- En annexe, votre code de calcul **propre et documenté**. Nommez vos fonctions et vos variables intelligemment. Utilisez une bibliothèque LaTeX adéquate pour présenter votre code (par exemple minted). Vérifiez que le code ne dépasse pas dans les marges.
- Une courte conclusion

Dépasser les objectifs minimaux énoncés ci-dessus est incontestablement un plus. Soyez créatifs !

Le rapport doit être remis en PDF via l'UV exclusivement. Nommez le pdf de la façon suivante : Rapport RT Sess1 - [Nom étudiant 1] [Nom étudiant 2].pdf
Gardez précieusement votre code, il sera utilisé en MA1...