

MF208: Acoustique. Devoir Maison n°1

Gauthier Jary

18 avril 2023

Introduction

Le ray-tracing est une technique qui permet de mettre en évidence des phénomènes physiques de réflexion, zones d'ombres, caustiques, de manière numérique. Ce DM est l'occasion d'étudier deux cas d'application, et notamment le cas de l'éolienne. L'étude sonore (pollution sonore, zone d'habitabilité) des éoliennes est fortement d'actualité dans le contexte du développement des énergies renouvelables et des conflits d'aménagement du territoire.

Table des matières

1	Propagation acoustique sous-marine	2
1.1	.....	2
1.2	.....	2
1.3	.....	2
1.4	.....	4
1.5	.....	4
1.6	.....	5
2	Propagation à grande distance du bruit des éoliennes : recherche des rayons propres, avec et sans réflexion sur le sol	5
2.1	.....	6
2.2	.....	6
2.3	.....	9
2.4	.....	11

1 Propagation acoustique sous-marine

Cet exercice utilise les codes `SSP ray moving`, `equations rays moving` et `DM1 exercice 1 raytracing`. Les codes sont disponibles en annexe du rendu.

1.1

On considère le profil de vitesse donné par Munk en 1974, qui dépend de la profondeur z :

$$c(z) = c_m(1 + \epsilon(\eta + e^{-\eta} - 1))$$

Où : $\eta = \frac{z - z_1}{z_1/2}$, $c_m=1500$ m/s, $\epsilon=0.0074$ $z_1=1300$ m et m variant selon les conditions climatiques

On a dès lors le gradient vertical de vitesse suivant :

$$\frac{dc(z)}{dz} = \frac{2c_m\epsilon}{z_1}(1 - e^{-\eta})$$

On implémente ce profil dans le code `SSP rays moving.m`, dans le profil de vitesse numéro 1 (cf Fig1 et Fig2).

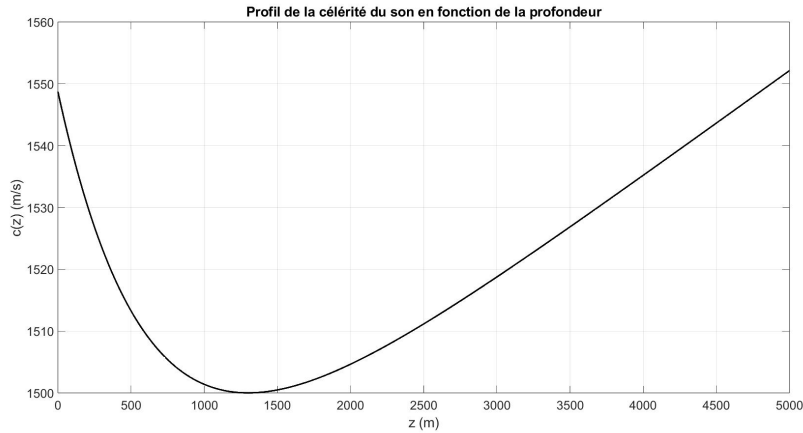


FIGURE 1 – Profil de vitesse d'après le modèle de Munk pour une profondeur de 0 à 5 km

La vitesse du son diminue progressivement au fur de la descente en profondeur, puis réaugmente à partir d'environ 1500 m de profondeur. Ces différences de propagations peuvent s'expliquer par des variations de paramètres physiques dans la colonne d'eau : par exemple, la salinité, la densité, la température (qui varie fortement avec la zone euphotique et la zone non éclairée). Il est donc cohérent d'avoir une variation importante du profil de vitesse, qui peut faire penser à un profil dans une atmosphère stratifiée.

1.2

On considère la source à la profondeur $z_s=1300$ m. On considère pour cela un angle $\theta_{max} = 30$. D'après le critère de convergence temporel, on considèrera que le calcul a convergé si les rayons dont les angles initiaux sont d'angles extrêmes -30 et $+30^\circ$ ont une profondeur maximale et un temps de vol sur l'ensemble du domaine qui varie de moins de 0,5% lorsque le pas de temps est divisé par 2. D'après le tableau en Fig3, on trouve que les résultats convergent à partir d'un pas de temps $dt=1/8$.

1.3

On considère désormais un angle $\theta_{max} = 8$. La source se situe toujours en profondeur à 1.3 km de la surface. On observe la figure du tracé de rayon Fig4.

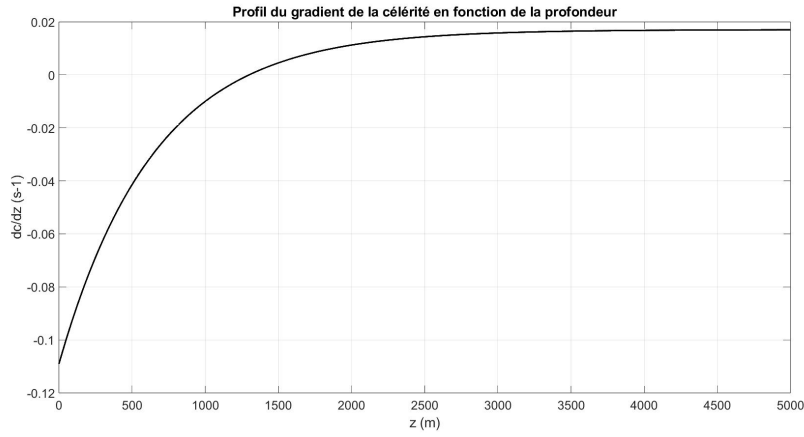


FIGURE 2 – Profil du gradient de vitesse du son d’après le modèle de munk pour une profondeur de 0 à 5 km

dt	1st ray max height (m)	1t ray temps vol (ms)	last ray max height	last ray temps vol
dt=1	15054,28	98307,54	15538,86	98782,67
dt=1/2	15336,38	98927,86	15538,56	99317,14
variation de dt=1 à dt=1/2	1,839%	0,627%	0,002%	0,538%
dt=1/4	15523,51	99336,86	15538,54	99582,17
variation de dt=1/2 à dt=1/4	1,205%	0,412%	0,000%	0,266%
dt=1/8	15531,92	99737,35	15538,54	99839,86
variation de dt=1/4 à dt=1/8	0,054%	0,402%	0,000%	0,258%
dt=1/16	15535,88	99874,91	15538,55	99906,72
variation de dt=1/8 à dt=1/16	0,025%	0,138%	0,000%	0,067%

FIGURE 3 – Variations et convergence des résultats de la simulation. En vert, les variations sont bien inférieure au critère de 5%

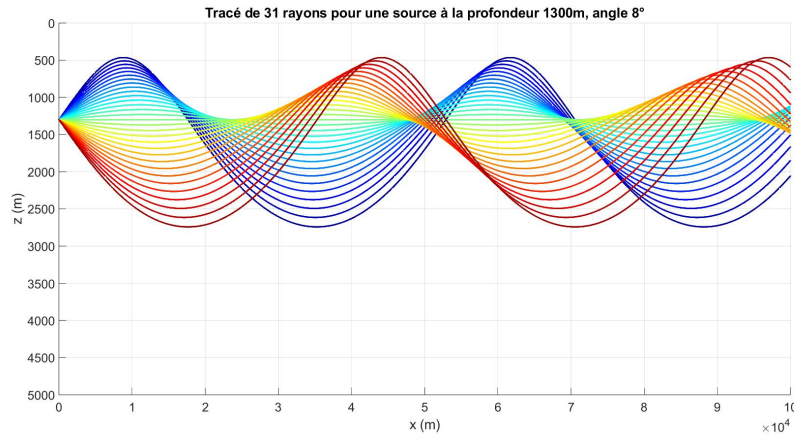


FIGURE 4 – Figure du ray-tracing de 31 rayons pour un angle 8°, source à 1300m de profondeur

On tente ensuite progressivement d’augmenter l’angle du cône de lancé de rayons. Pour un cône d’ouverture angulaire de 15°, on observe en figure 5 une réflexion à la surface de l’océan des rayons acoustiques.

On observe une nette reflexion et changement de direction à la surface $z=0$. Plusieurs reflexions ont lieu pour un même rayon acoustique.

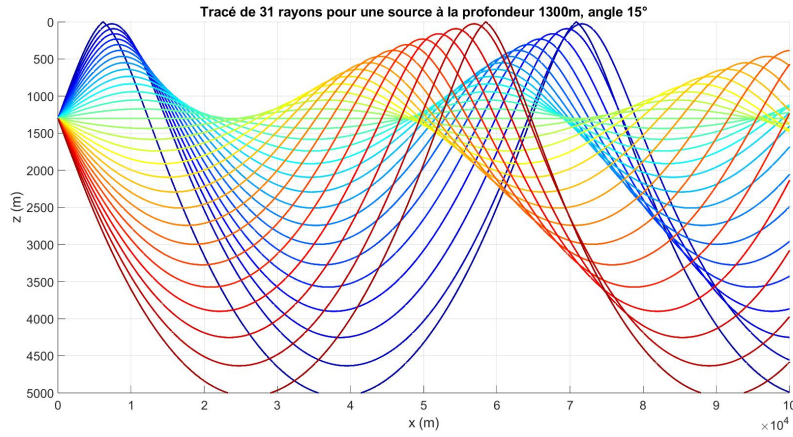


FIGURE 5 – Figure du ray-tracing de 31 rayons pour un angle 15° , source à 1300m de profondeur

1.4

On reprend un angle de 30° pour l'ouverture du lancé de rayons. Une caustique est une enveloppe formée par une famille de rayons s'intersectant (page 51 du cours). On peut en observer sur la figure 6. En cas de manipulation des caustiques, on ne peut plus se contenter des rayons géométriques mais il faut faire appel à la théorie ondulatoire.

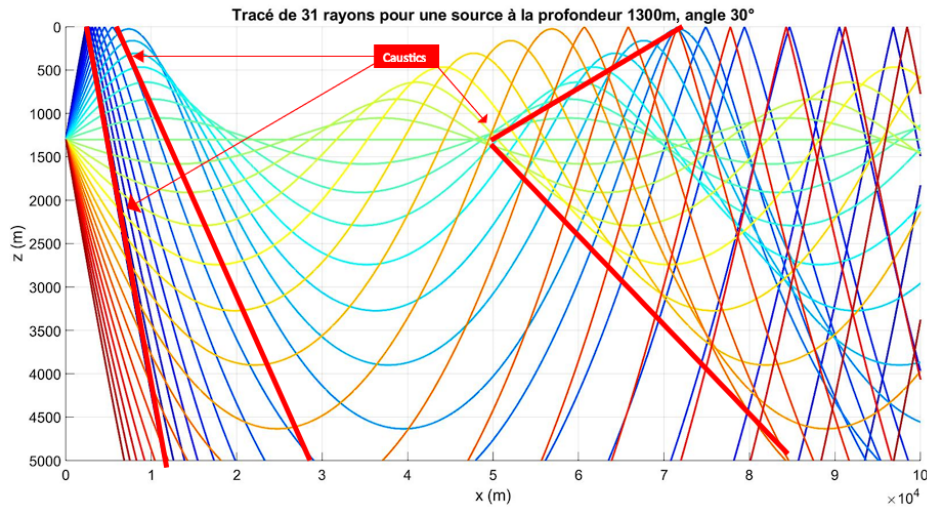


FIGURE 6 – Observation de différentes caustiques sur la propagation des rayons acoustiques

Une zone d'ombre à la surface est observée en figure 7 et 8. En effet, il existe une zone où aucun rayon acoustique ne vient couper l'axe $z=0$, et ce quelque soit le nombre de rayon et l'angle du cône initial. Cette zone se situe en $[4,7 \text{ km} ; 66 \text{ km}]$ pour une source située à une profondeur de 1300m.

1.5

On considère désormais une source acoustique plus proche de la surface, à 200m de profondeur. De la même manière que précédemment, on peut observer comme sur la figure 9 l'existence du zone d'ombre, qui se situe désormais à $[600 \text{ m} ; 79 \text{ km}]$.

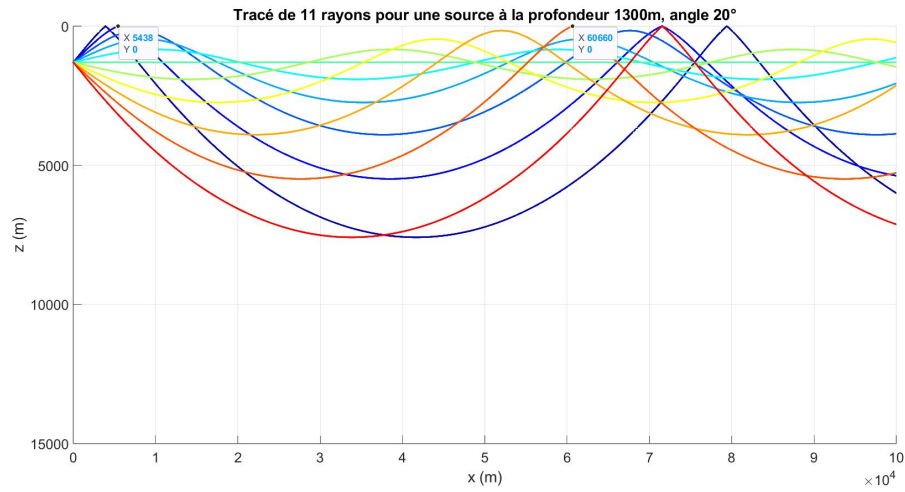


FIGURE 7 – Zone d’ombre pour 11 rayons et 20 degré d’angle, source à $z_s=1300\text{m}$ de profondeur

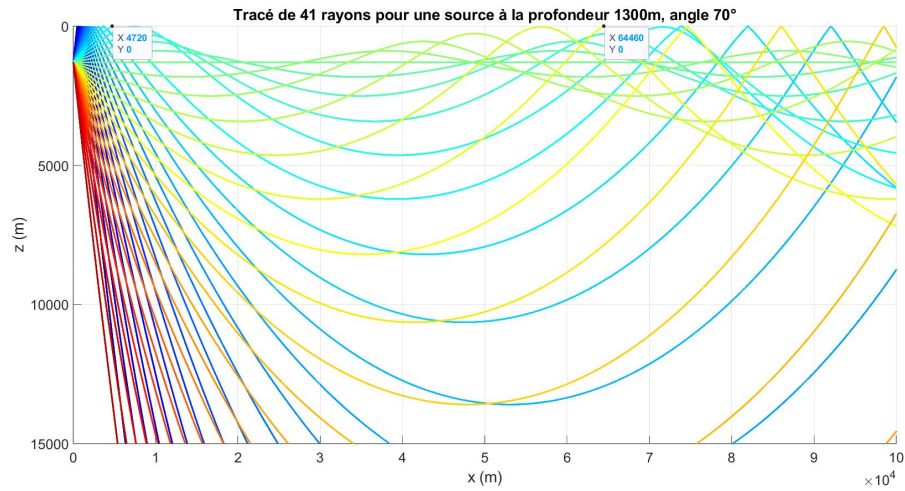


FIGURE 8 – Zone d’ombre pour 41 rayons et 70 degré d’angle

1.6

On cherche à travailler dans de l’eau de mer, de salinité 35/100. On veut une absorption de 6 dB sur 100 km, dans une eau à 20°C. Par lecture graphique sur la figure 10 de l’article de François et Garrison, on lit la bande de travail de 100 Hz à 1,1 kHz. On se situe donc en zone de basses fréquences.

2 Propagation à grande distance du bruit des éoliennes : recherche des rayons propres, avec et sans réflexion sur le sol

Cet exercice utilise les codes `SSP ray moving`, `equations rays moving`, `DM1 exercice 2 ray tracing eolienne recherche manuelle`, `DM1 exercice 2 eigenray sans rebond` et `DM1 exercice 2 eigenray 1 2 rebonds`. Les codes sont disponibles en annexe du rendu.

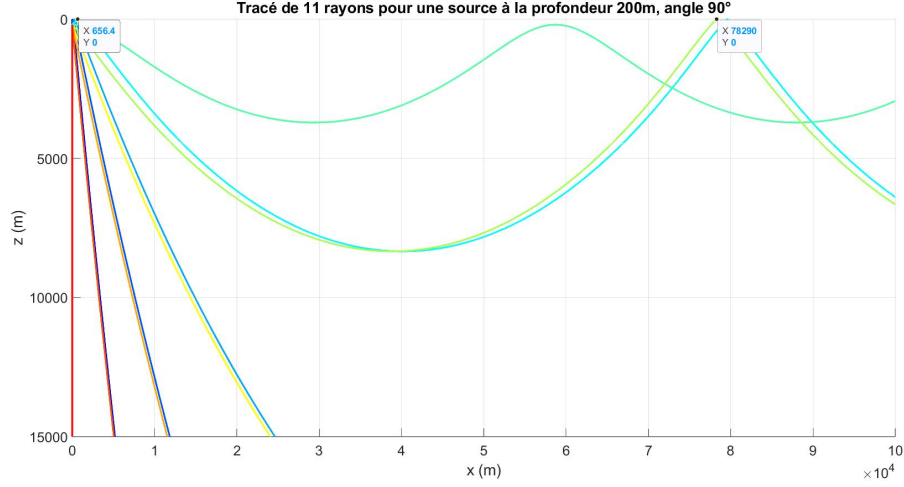


FIGURE 9 – Zone d'ombre pour 11 rayons et 90 degré d'angle pour une source acoustique à 200m de profondeur

2.1

On s'intéresse au bruit d'une éolienne. La vitesse du son est constante et le profil de vitesse du son est donné. Il suit une loi de puissance modifiée.

Par continuité de la vitesse en h_v , on a

$$v_{0x}(h_v) = V_{ref} \left(\frac{h_v}{z_{ref}} \right)^m = b_v \ln \left(1 + \frac{h_v}{h_v} \right)$$

d'où

$$b_v = \frac{V_{ref}}{\ln 2} \left(\frac{h_v}{z_{ref}} \right)^m$$

D'autre part, on calcule le gradient de vitesse vertical de la vitesse du milieu. On a alors :

$$\frac{dv_{0x}(z)}{dz} = \begin{cases} m \frac{V_{ref}}{z_{ref}} \left(\frac{h_v}{z_{ref}} \right)^{m-1} & \text{si } z > h_v \\ \frac{b_v}{h_v} \frac{1}{1 + z/h_v} & \text{sinon.} \end{cases}$$

On considère le cas $z > h_v$. On a $m - 1 < 1$, ainsi quand $z = 0$, le gradient de vitesse tends vers l'infini, ce qui n'a pas de sens physique. Il fallait donc modifier l'expression du profil de vitesse pour garder une cohérence avec la loi puissance et un sens physique. La continuité de la vitesse et la valeur de b_v nous assure un bon modèle.

On implémente ce profil dans le code `SSP rays moving.m`, dans le profil de vitesse numéro 3.

Les profils observés en Fig11 et Fig12 semblent cohérents. Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour analyser ces profils. On retrouve en effet les "vents d'altitude", qui sont quasi inexistant au niveau du sol. Les effets de couches limites et des obstacles et la végétation empêche le milieu de se déplacer à la même vitesse qu'à une altitude supérieure. De même, dans une atmosphère instable, c'est à dire en journée, des effets de convections liés à des différences de températures à cause du soleil peuvent s'ajouter aux mouvements des masses d'air. Il en résulte des vitesses de vents plus importantes proches du sol, qui est chauffé par la lumière incidente. La nuit, l'atmosphère est plus stable car l'absence de lumière (et donc de chaleur) stabilise la masse d'air.

2.2

On considère le cas d'une atmosphère stable. On pose donc $m=0.55$. On cherche les rayons propres avec une certaine précision, ce qu'on implémente dans le code. On peut alors obtenir les rayons propres pour les différentes hauteurs de l'éolienne en Tab1.

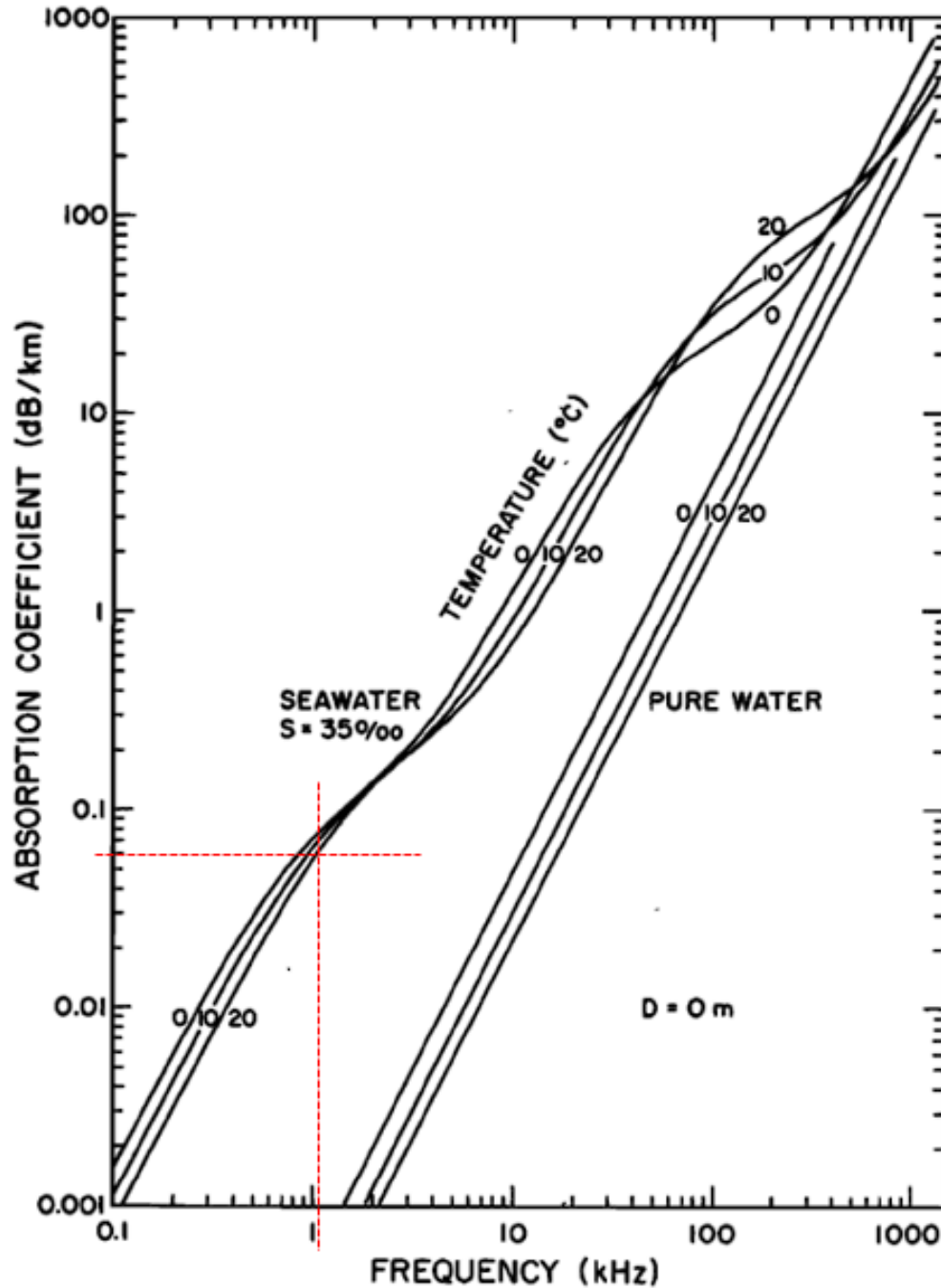


FIGURE 10 – Coefficient d'absorption de l'eau pure et de l'eau de mer en dB/km pour une salinite de 35‰, un pH de 8 et une temperature de 0,10 ou 20°C. Figure de l'article de François et Garrison 1982

On remarque que le temps de vol diminue avec la hauteur de la source. D'après les profils de vitesse, on observe que $V(z)$ est plus importante quand l'altitude augmente. Ainsi, le rayon qui part d'une altitude plus haute profite d'un milieu qui se mouvoit plus rapidement : il profite d'un vent porteur.

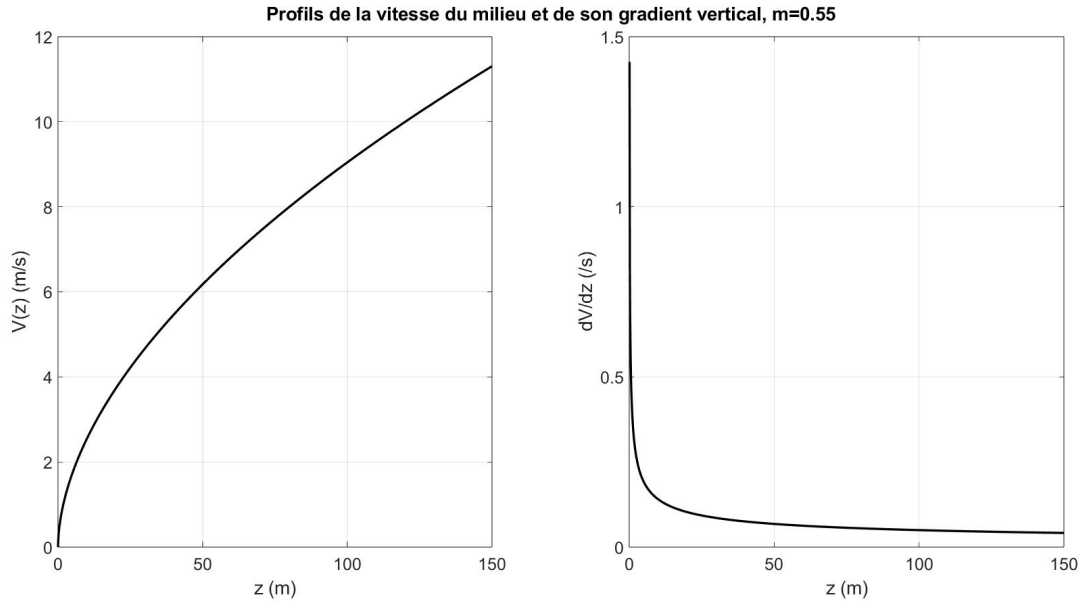


FIGURE 11 – Profils de vitesse et gradient vertical, atmosphère stable

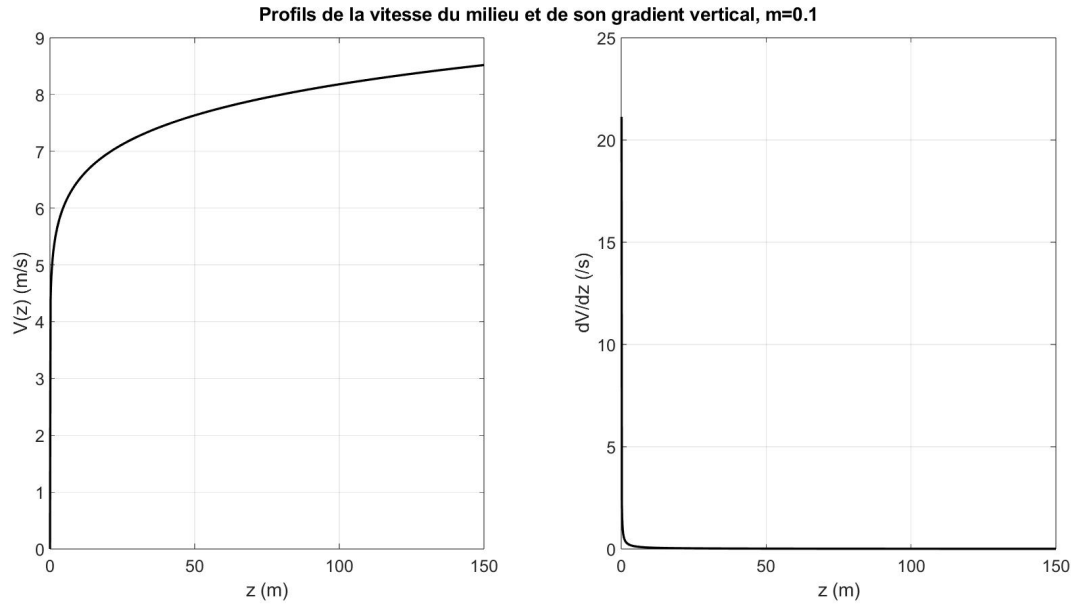


FIGURE 12 – Profils de vitesse et gradient vertical, atmosphère instable

hauteur source z_s (m)	θ_0 (degré)	longueur rayon (m)	temps de vol (ms)
40	8,1317	2008,5007	5732,5
80	5,885	2008,52	5718,1
120	3.9844	2009,6987	5708,5

TABLE 1 – Caractéristiques des rayons propres direct sans reflexion pour différentes hauteurs de la source, correspondant aux trois positions de la pale au cours de son mouvement, pour un récepteur au sol, à 2km de la source.

2.3

On considère désormais 1 rebond, une réflexion sur le sol avant d'atteindre le récepteur. On implémente ces conditions dans le code et on modifie les conditions pour l'algorithme de dichotomie afin de le faire converger vers le résultat souhaité. On trouve les caractéristiques suivantes, récapitulées dans le Tableau n°2.

hauteur source z_s (m)	θ_0 (degré)	longueur rayon (m)	temps de vol (ms)
40	8,0878	2008,6546	5733,7
80	5,8374	2008,8502	5720,2
120	3.9294	2009,8796	5710,3

TABLE 2 – Caractéristiques des rayons propres avec 1 réflexion sur le sol pour différentes hauteurs de la source, correspondant aux trois positions de la pale au cours de son mouvement, pour un récepteur au sol, à 2km de la source.

On peut remarquer en Fig13 que les rebonds qui sont trouvés grâce au programme sont ceux qui ont un point d'impact très proche des coordonnées du récepteur. Nous avons en effet implémenté la dichotomie en ce sens car elle était la plus naturelle.

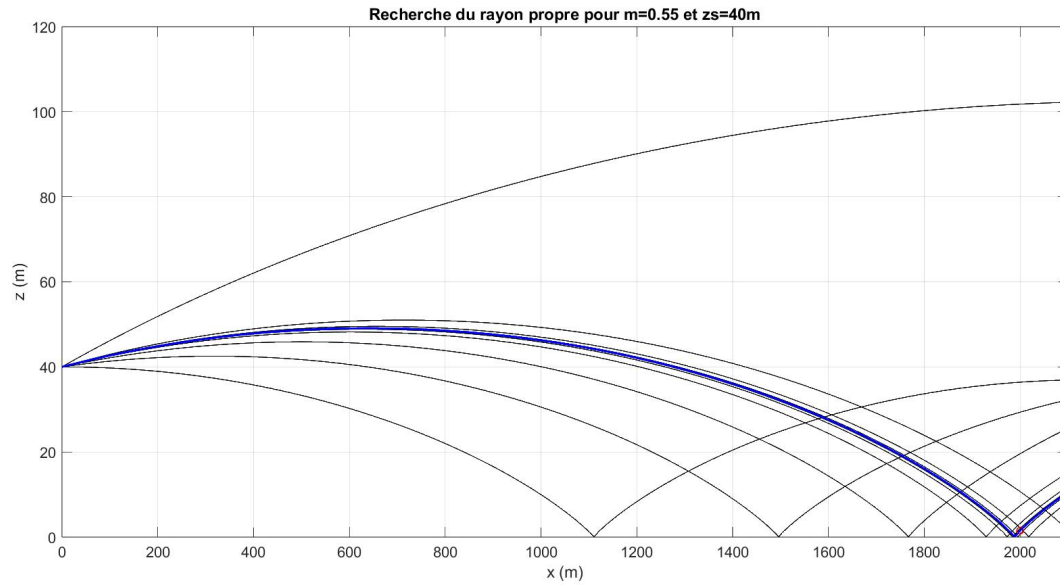


FIGURE 13 – Recherche par dichotomie de rayon propre avec 1 rebond pour $z_s=40\text{m}$ et $m=0,55$ (atmosphère stable)

Or, il existe d'autres rayons acoustiques qui ont un rebond, bien en amont. Pour essayer de le trouver, j'ai récupéré le programme ray-tracing de l'exercice 1, auquel j'ai apporté des modifications. Il s'agit du code **DM1 exercice 2 ray tracing eolienne recherche manuelle**. En effet, il permet de voir rapidement les comportements pour un grand nombre de rayons et d'angles initiaux. J'ai implémenté une boucle de détection des rayons-propres qui satisfont les critères de précisions $\Delta x=1\text{m}$ et $\Delta z=0.1\text{m}$. Ensuite, j'ai commencé avec un cône très large, comme visible en Fig14, puis j'ai affiné le cône de dispersion des rayons de départ pour essayer de remplir la condition,. On trouve ainsi le deuxième type de rayon propre avec un rebonds, plus en amont, comme observable sur la Fig15. Je n'ai réussi à obtenir ce type de rayon uniquement pour la source à $z_s=40\text{m}$ de hauteur. On trouve alors les caractéristiques suivantes pour le rayon propre, dans le tableau n°3

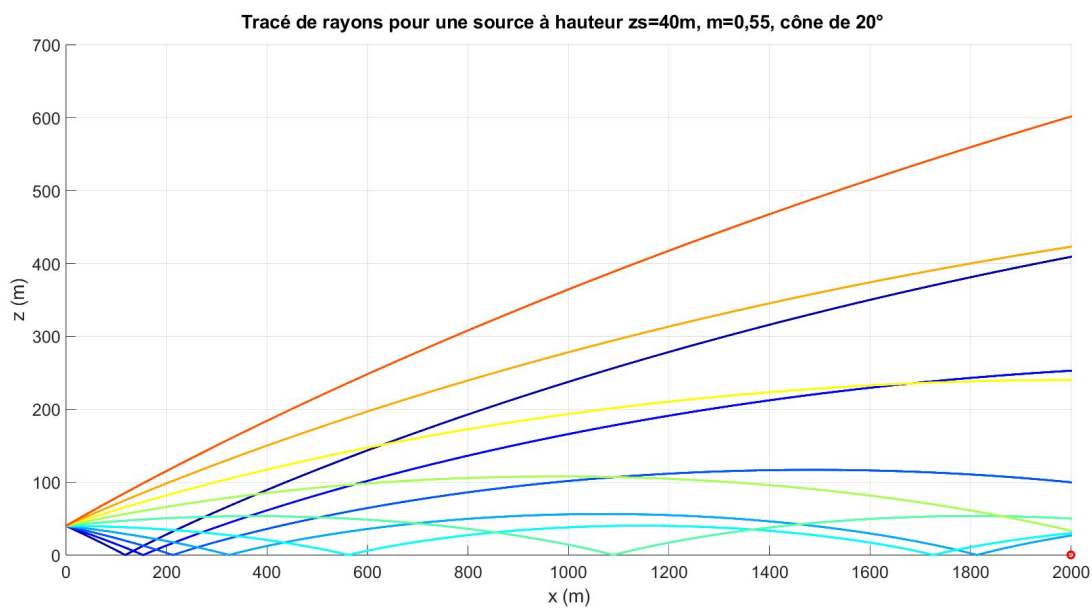


FIGURE 14 – Recherche de rayon propre avec cône large, pour une réflexion largement en amont

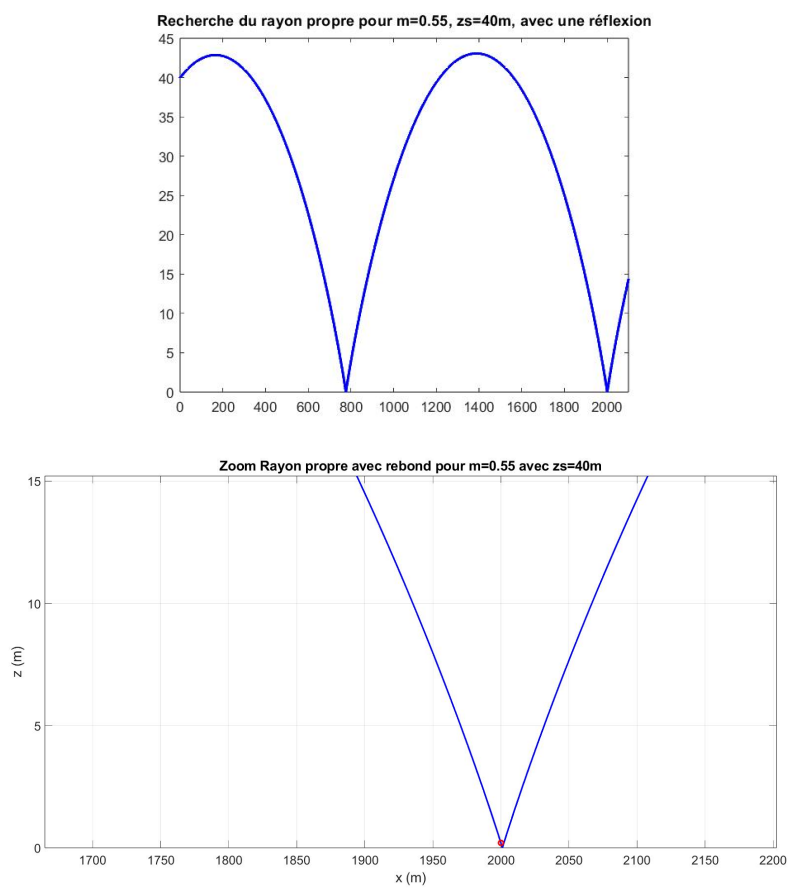


FIGURE 15 – Rayon propre avec 1 rebond pour une réflexion largement en amont pour une source à la hauteur 40m

hauteur source z_s (m)	θ_0 (degré)	longueur rayon (m)	temps de vol (ms)
40	2,0385	3040,0091	8745,4

TABLE 3 – Caractéristiques des rayons propres avec une réflexion largement en amont sur le sol pour un récepteur au sol, à 2km de la source.

2.4

Il n'est pas possible d'obtenir une solution avec 2 réflexions pour des hauteurs autres que $z_s=40\text{m}$. Pour une source à la hauteur $z_s=40\text{m}$, on trouve les caractéristiques du tableau n°4 et l'allure de la Fig17. Cette dernière ressemble beaucoup à la configuration 1 rebond très en amont du récepteur. De manière analogue à la configuration de départ, la 2ème réflexion a ici lieu très proche du récepteur. L'angle varie donc très peu entre la configuration "1 rebond-très-amont" et "2 rebonds".

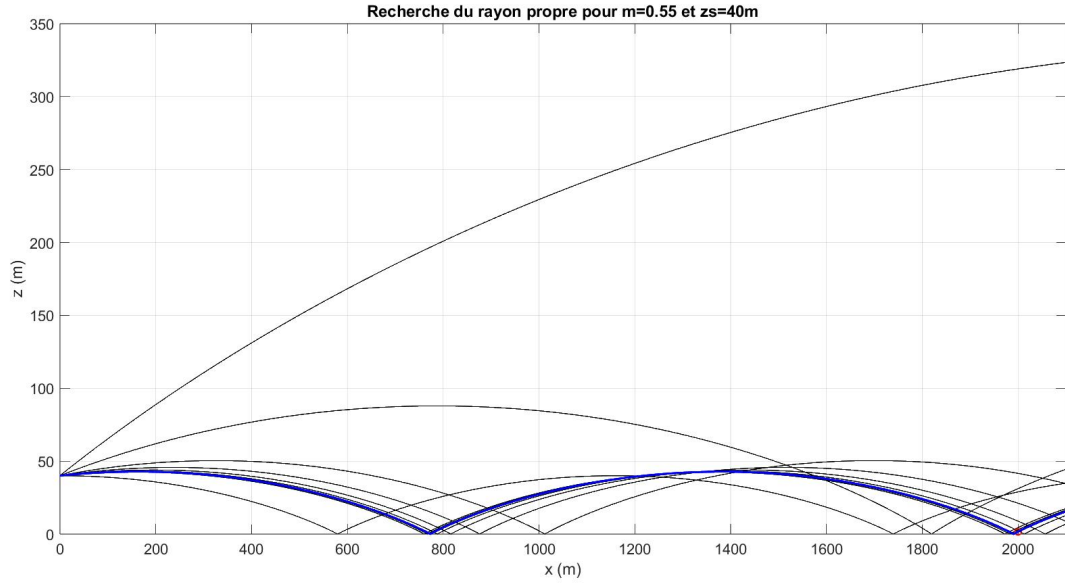


FIGURE 16 – Rayon propre avec 2 rebonds pour une source à la hauteur 40m

hauteur source z_s (m)	θ_0 (degré)	longueur rayon (m)	temps de vol (ms)
40	1,9849	2006,4546	5773,8

TABLE 4 – Caractéristiques des rayons propres avec 2 réflexions pour un récepteur au sol à 2km de la source.

Je n'ai malheureusement pas réussi à aboutir dans le temps imparti du devoir à finir le projet. Il fallait en effet trouver les positions du récepteur nous permettant d'avoir des réflexions à d'autres altitudes que celle de $z_s=40\text{m}$.

On a quand même les trois types de rayons pour cette source.

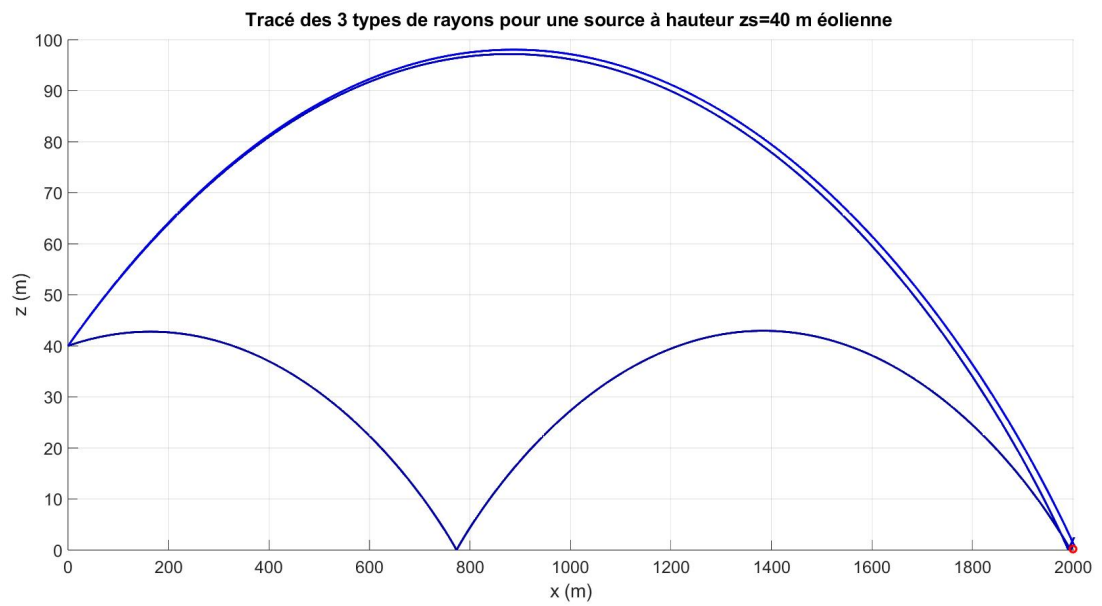


FIGURE 17 – 3 types de rayons pour une source à la hauteur 40m