



OLYMPIADES
DE PHYSIQUE FRANCE



Mémoire des OLYMPIADES DE PHYSIQUE
FRANCE

ANNÉE 2020 – 2021

LYCÉE HANOI – AMSTERDAM

Démonstration de l'effet tunnel quantique à
travers deux prismes en utilisant les outils dans la
vie quotidienne

Étudiants :

Hoang Vu DO

The Anh KIEU

Quang Minh LUONG

Enseignants encadrés :

Cao Khang NGUYEN

Trung Dung PHAM

15 janvier 2021

Résumé

Dans ce projet, nous étudions l'effet tunnel quantique à travers deux prismes. L'onde de wifi est envoyée vers un prisme de façon telle que l'angle incident avec la face sortante du prisme est supérieur à l'angle limite de réfraction, ainsi, l'onde ne peut qu'être réfléchie et ne peut pas être transmise à l'autre côté selon la loi de Snell Descartes pour l'optique géométrique. Nous plaçons un deuxième prisme opposé au premier. Quand la distance entre deux prismes est inférieure à la longueur d'onde de l'onde wifi, nous observons la réapparition de l'onde de wifi grâce à ses propriétés quantiques.

Dans ce projet, nous expliquons d'abord l'idée principale de l'expérience, ensuite nous décrivons nos montages expérimentaux et enfin nous tirons une conclusion avec les résultats obtenus.



FIGURE 1 – L'équipe du lycée Hanoi-Amsterdam avec le montage expérimental.
De gauche à droite : Hoang Vu DO, Quang Minh LUONG, The Anh KIEU

Table des matières

1	Introduction	3
2	État de l'art	3
3	Caractérisation de l'onde de wifi guidée par une antenne cornet	4
4	Fabrication du prisme	8
4.1	Le cadre du prisme	8
4.1.1	La solution du prisme	8
4.1.2	Première méthode	9
4.1.3	Deuxième méthode	11
4.1.4	Estimation de la différence entre l'indice de réfraction pour l'onde wifi	13
5	L'étude sur l'effet tunnel	13
6	Conclusion	15

1 Introduction

L'effet tunnel, dans la mécanique quantique, est un phénomène où une très petite particule, peut-être un atome ou plus petite, un électron, traverse une barrière d'énergie même si l'énergie de la particule ne dépasse pas l'énergie du mur. Ce phénomène ne peut jamais être réalisé dans la mécanique classique. De plus, on ne rencontre pas cet effet dans la vie quotidienne, à l'échelle macroscopique. Par exemple un grain de sable, une bille, ceux qu'on peut facilement voir avec les yeux, quand ils rencontrent un mur, ils ne vont pas traverser, mais rebondir.

L'effet tunnel a été découvert à partir de l'étude de la radioactivité en 1896. Après quelques dizaines années, cet effet a été remarqué la première fois en 1927 par Friedrich Hund[1] et par Leonid Mandelstam et Mikhail Leontovich [2] de façon indépendante.

Cet effet a permis d'expliquer la désintégration du rayon alpha[3][4] en 1928. Plusieurs applications se suivent. De nos jours, l'effet tunnel quantique se sert dans plusieurs domaines comme la radioactivité α , la réaction nucléaire, le microscope à effet tunnel (STM), l'ordinateur quantique, etc.

2 État de l'art

En physique, nous observons régulièrement l'analogie entre différents domaines physiques. L'analogie entre l'attraction gravitationnelle et l'attraction entre deux charges de signes opposées, l'analogie entre la conduction d'électricité et du transfert thermique, etc. Nous sommes partis de cette idée pour chercher à ramener la physique quantique à la vie quotidienne, à travers des phénomènes physiques que nous connaissons bien dans le cadre du programme lycéen.

Nous nous intéressons à observer l'effet tunnel quantique. Dans le sens le plus fondamental, nous pouvons faire une analogie à l'effet tunnel quantique en prenant un exemple : en courant vers un mur, nous ne serons pas assez puissants pour le traverser. Pourtant, nous ne pouvons pas dire la même chose sur une vague qui s'éclate sur un tas de sable.

La physique quantique étudie la lumière et des matières dans leurs états les plus fondamentaux. Ainsi, les études de la physique quantique sont souvent de taille atomique et de taille sous-atomique ($\sim \text{nm}$), ou de la taille de la longueur d'onde de la lumière visible ($\sim \mu\text{m}$). Nous nous sommes renseignés et nous avons remarqué que les expériences de physique quantique sont souvent réalisées dans les laboratoires équipés de matériels de hautes performances.

L'idée principale de ce projet est de réaliser l'effet quantique en utilisant les matériels qui sont facilement trouvés à notre niveau. Pour étudier ceci, nous cherchons à utiliser les ondes magnétiques de taille macroscopique et l'onde wifi est un bon candidat. Nous observons la propagation de l'onde wifi à travers deux prismes (voir Fig. 2) : l'onde est envoyée perpendiculairement à la face entrante (côté adjacent à l'angle δ) du prisme, cette onde arrive à la face sortantes (hypothénuse) avec un angle δ . Nous avons conçu le prisme de telle

sorte que l'angle limite de réfraction θ_{lim} est inférieur à cet angle δ . Suivant la loi de Snell Descartes établie pour l'optique géométrique, l'onde wifi sera totalement réfléchi sur cette face sortante. Nous ajoutons le deuxième prisme. Quand les deux prismes sont collés, l'onde se propage facilement à travers un pavé droit de substance homogène avec un angle incident nul. Mais quand les deux prismes sont distancés et sont devenus deux prismes indépendants, les résultats mesurés ne sont pas si prévisibles. Selon la loi de Snell-Descartes pour l'optique géométrique expliquée ci-dessus, nous ne devons pas avoir de l'onde transmise après le premier prisme. Mais dans notre expérience, la distance entre ces deux prismes est inférieure ou de même ordre de la longueur d'onde de l'onde WiFi, nous observons une onde transmise beaucoup plus puissante que la cas où il n'y a qu'un seul prisme. Ce dernier ne peut pas être expliqué avec la physique classique, c'est un effet tunnel quantique. Non seulement cette conception d'expérience de l'effet tunnel quantique réduit le prix des matériels à un niveau accessible, ces matériels sont aussi facile à trouver : un modem wifi, une antenne cornet faite maison, notre téléphone portable personnelle pour la réception d'onde, des prismes d'aquariums contenant de l'eau sucrée.

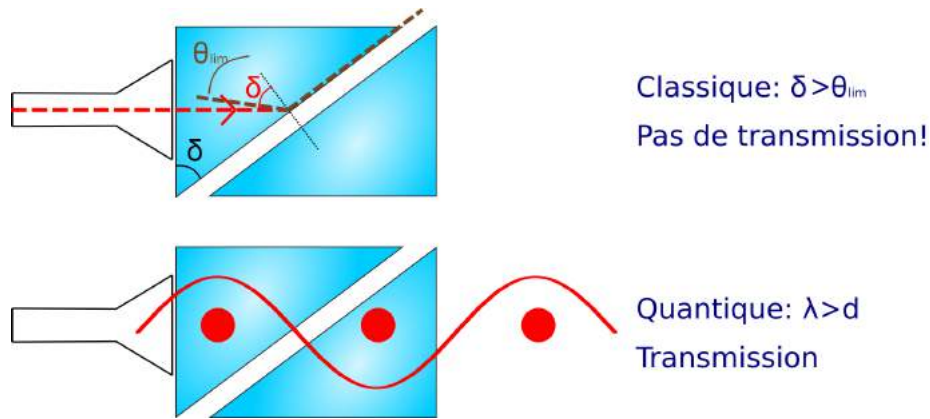


FIGURE 2 – Schéma de notre expérience pour observer l'effet tunnel quantique

3 Caractérisation de l'onde de wifi guidée par une antenne cornet

L'onde sortant du modem Wifi est construite pour se propager dans toutes les directions. Mais dans nos expériences, nous voulons faire une expérience avec une onde électromagnétique directionnelle. C'est la raison que nous avons créé une antenne cornet pour orienter la propagation de l'onde sur un axe droit. Notre antenne cornet à une profondeur de 22 cm, une ouverture de longueur 23.3 cm, de largeur 12.2 cm (Voir Fig. 5)



FIGURE 3 – Mesure de l’onde de wifi avec l’application *WiFi Analyzer*

Nous utilisons notre téléphone portable *Samsung A9 2018* comme un récepteur d’onde wifi. Nous pouvons caractériser l’onde en utilisant l’application *Wifi analyzer*. Nous avons lu une fréquence de $f = 2462$ MHz avec une bande de largeur 40 MHz pour notre onde Wifi (Voir Fig.3), ce qui nous donne une longueur d’onde λ de taille macroscopique :

$$\lambda = \frac{c}{f} = 12.2 \pm 0.1 \text{ cm} \quad (1)$$

Pour savoir si l’onde sortante de l’antenne cornet se propage dans une seule direction, nous avons utilisé la même application *Wifi Analyzer* pour mesurer l’intensité de l’onde pour différents angles par rapport à l’axe de l’antenne (mesuré avec un rapporteur) et pour plusieurs distances téléphone - antenne (mesuré avec un mètre ruban de 5m). Fig. 4 reporte les positions où nous avons pris des mesures d’intensité. Les données précises sont notées dans le Tableau 5.

Nous avons fixé la source wifi et nous avons positionné une ligne droite comme l’axe principal de cette source : $\alpha = 0^\circ$, voir Fig. 4)

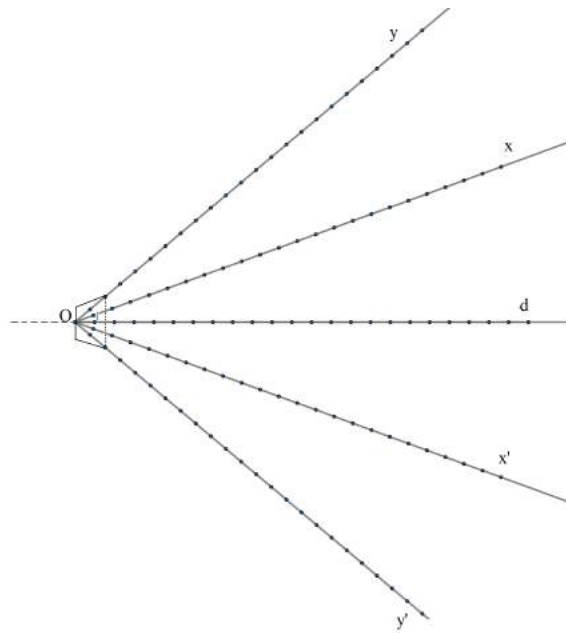


FIGURE 4 – Représentation des points de mesures par rapport à la source antenne



FIGURE 5 – Montage expérimental de la caractérisation de la puissance de l'onde sortie de l'antenne cornet en fonction de l'angle de propagation et de la distance par rapport à la source

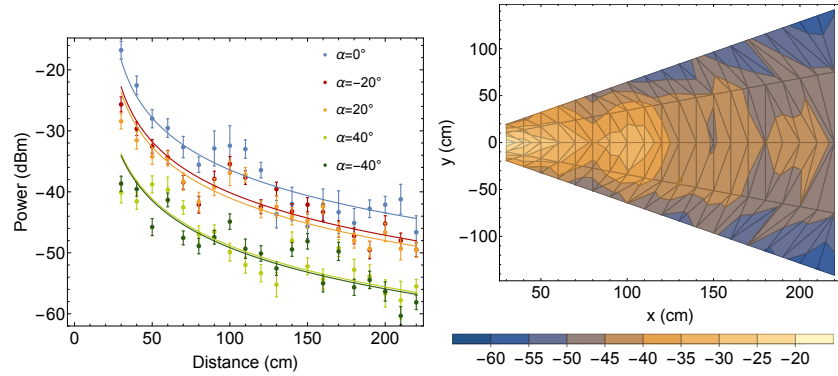


FIGURE 6 – La puissance de l’onde de wifi se décroît avec la distance et avec l’angle par rapport l’axe principale.

Nous observons que la puissance de l’onde de wifi sortant de l’antenne cornet se décroît avec la distance et avec l’angle par rapport à l’axe principal. Près de la sortie de cette antenne, l’angle de l’onde $\alpha = 0^\circ$ en face de l’antenne qui a l’intensité $P = -17 \pm 1 \text{ dBm} = 0.02 \pm 0.005 \text{ mW}$, au moins trois fois plus fort que la puissance mesurée dans les autres angles. Nous avons constaté que la distance par rapport à l’antenne est inférieure à 80 cm, la puissance de l’onde qui se propage dans l’axe principal de l’antenne cornet est au moins 5 dB supérieure que celle des autres angles, c’est-à-dire, sur l’axe principale, la puissance de l’onde est 3 fois plus fort que des autres angles. (See Fig 6).

Vérifier par les calculs théoriques

La puissance de l’onde de wifi reçue est inversement proportionnel au carré de la distance entre le récepteur et le source[6]

$$P_r = P_e \cdot \frac{K}{d^2} \quad (2)$$

où :

P_r est la puissance reçue par le récepteur (en mW)

P_e est la puissance émise par la source (en mW)

K est le constant d’émission

d est la distance entre la source et le récepteur (en m)

Nous en concluons la formule théorique pour la propagation d’onde en puissance dBm aura la forme :

$$P_{r,\text{dBm}} = A - 2 \times 10 \times \log_{10}(d) \quad (3)$$

avec $A = P_{e,\text{dBm}} + 10 \log_{10}(K)$

Nous traçons les courbes d’étalonnage en utilisant la formule ci-dessus avec le paramètre A et B (l’origine de la source d’émission que nous ne connaissons

pas la position exacte). Nous représentons les résultats en ligne continue dans le figure 6.

α°	0	20	-20	40	-40
A	1.65487	-1.96371	-2.84704	-10.2557	-10.2703

TABLE 1 – Le paramètre A par rapport à l’angle d’émission

Nous pouvons en conclure que notre antenne cornet permet de diriger la propagation de l’onde de wifi sur un axe pour une distance de travail de 80 cm, ce que nous allons respecter en conduisant notre expérience principale.

4 Fabrication du prisme

4.1 Le cadre du prisme



FIGURE 7 – Récipient du prisme

Nous avons commandé deux récipients de profondeur 30 cm de surface une triangle rectangulaire de côtés 30 cm \times 40 cm \times 50 cm en verre chez un vendeur d’aquariums.

Nous ne pouvons pas faire fabriquer deux blocs de prismes en verre car c’est coûteux ainsi que c’est très difficile d’avoir un bloc de prisme aussi grand complètement homogène sans bulle d’air. C’est aussi pour éviter les bulles d’air que nous avons l’intention de garder le paroi de ces récipients le plus fin possible à 4 mm, juste assez pour supporter le poids du contenu (3.6 L de solution qui peut être visqueuse).

4.1.1 La solution du prisme

L’étape suivante, nous cherchons une solution adaptée à notre expérience. Nous réalisons les mesures suivantes pour atteindre un objectif : recherche de l’indice de la solution à l’aide de la loi de Snell-Descartes.

Nous nous permettons de négliger l'épaisseur du paroi du prisme ($4 \text{ mm} \ll \lambda = 12.1 \text{ cm}$) fabriqué avec du verre crown ayant l'indice $n = 1.517$. Ayant un angle incident nul à l'entrée de la surface du prisme, une paroi de matériau différent ne modifie pas la direction de propagation de l'onde pénétrant dans le prisme. Malgré ceci, nous pensons quand même à nous rapprocher l'indice de réfraction du verre si possible.

Nous voulons surtout chercher une solution qui possède un indice de réfraction assez grande pour que la condition de réflexion totale l'onde sur la face sortante du prisme $\theta_{lim} < \delta$ soit assurée. Plus la valeur de l'indice de réfraction de la solution n_i soit grande, plus l'angle limite de réfraction soit petit, selon la loi de Snell-Descartes :

$$\theta_{lim} = \sin^{-1} \left(\frac{n_{air}}{n_i} \right) \quad (4)$$

Idéalement, plusieurs solutions de haute indice de réfraction qui nous permettront d'avoir un petit angle limite et en plus qui se rapproche celle du verre crown (ce qui feront que les prismes seront homogène). L'internet nous fournit le tableau de l'indice de plusieurs solutions [5]. Nous trouvons quelques substances chimiques qui sont satisfaites à nos critères, comme : l'aniline (1.586), le benzyl benzoate (1.568), l'ethyl cinnamate (1.559).

Pour des raisons écologiques et financières, nous n'avons pas pu commander $30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} = 36 \text{ L}$ d'une de ces solutions chimiques. Nous avons décidé de diluer du sel ou du sucre dans l'eau pour augmenter son indice de réfraction qui est originalement à $n = 1.333$. Nous proposons ensuite deux différentes méthodes pour mesurer l'indice de réfraction de notre solution, une plus précise que l'autre.

Nous effectuons les mesures des indices de réfractons en utilisant un pointeur laser de lumière rouge (la longueur d'onde est d'environ $\sim 650 \text{ nm}$) que nous avons acheté dans un librairie. Sachant que la valeur de l'indice de réfraction varie légèrement à partir de la longueur d'onde de lumière rouge, nous avons pensé que la différence entre la valeur d'indices de réfractons de laser rouge et celle de l'onde wifi est négligeable. Nous évaluons cette différence ensuite pour la solution choisie pour l'expérience.

4.1.2 Première méthode

Un laser à la hauteur x_0 envoie une lumière de l'angle θ_0 par rapport à la droite verticale, réfractée à la surface de la solution d'indice inconnu n_i , réfléchi sur un miroir posé horizontalement au fond et est réfractée dans l'air. Nous déterminons la position de la lumière sortante de la solution, qui arrive à notre règle à une hauteur y_i (Voir Fig. 8)

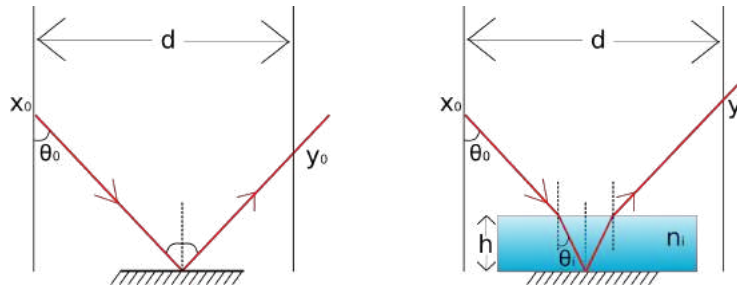


FIGURE 8 – Schéma de la mesure de l'indice de réfraction d'une solution

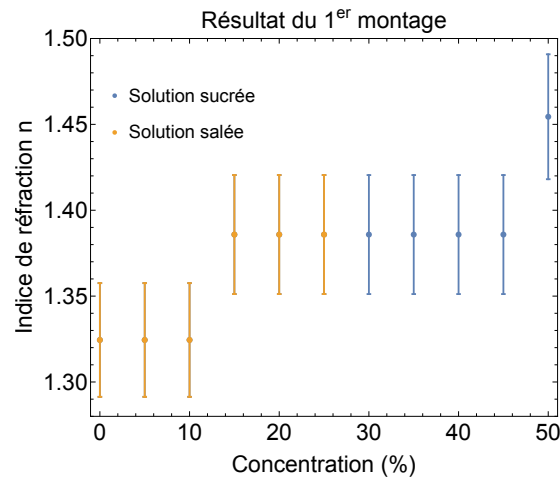


FIGURE 9 – Dépendance de l'indice à la concentration de la solution aqueuse

Cependant, l'indice de réfraction d'une solution dépend de la longueur d'onde. Les longueurs d'onde courtes comme la lumière verte ont un indice de réfraction plus élevé que ceux de la lumière rouge. Pour les ondes de grande longueur d'onde, plus long que la lumière visible, la différence n'est pas très importante.

Au premier lieu, nous fabriquons les solutions salées de concentration entre 0% et 10% et nous avons vite remarqué que la valeur de l'indice de réfraction reliée n'est pas si grande : Nous estimons que l'indice de réfraction de cette solution est juste environ 1.36. Nous devons augmenter la concentration à au moins 50% pour obtenir une angle limite de réfraction $\theta_{lim} \sim 45^\circ$ qui est relativement acceptable pour notre condition de réflexion totale.

Pourtant, la concentration maximale de la solution salée est seulement 26.4% (25° C), on ne peut pas dépasser une concentration de 35% même à une haute température. Nous essayons ensuite avec les solutions sucrées qui ont une saturation plus élevée (nous pouvons même obtenir une concentration de 83% à 100° C).

Nous observons également des mesures assez positives : la différence entre les mesures de l'hauteur du rayon de réflexion y_i des solutions de différentes concentrations sont en dessous la division 1 mm de notre règle. Les incertitudes sur l'indice de réfraction sont de l'ordre $\Delta n \in [0.03, 0.04]$. Les résultats sont dessinés sur le graphe 9, les donnés sont précisés dans les Tableaux 2 et 3, et le calcul analytique est précisé dans 6. Nous ne pouvons pas éloigner beaucoup plus l'écran auquel le rayon réfléchi est mesuré, faute de l'espace ainsi que nous ne voulons pas dépasser la distance au-delà de laquelle le laser diffracté. Nous avons alors conçu une autre méthode plus précise pour mesurer l'indice de réfraction.

4.1.3 Deuxième méthode

Nous modifions le premier montage en inclinant le miroir d'un angle $\alpha \sim 37^\circ$ par rapport à l'axe horizontal et nous observons le rayon réfléchi du même côté (Voir Fig. 10), ceci nous permet d'obtenir un angle incident à la surface sortante de la solution à l'air de $2\alpha + \theta_i = 2\alpha + \frac{n_{air}\theta_0}{n_i}$. L'endroit où la lumière sort de la solution varie en fonction de la tangente de cet angle, qui est plus sensible quand l'angle est plus grand (nous devons également faire attention de ne pas dépasser l'angle limite de réfraction). Ceci introduit une variation beaucoup plus nette de la position de la lumière sortante pour différentes solutions.

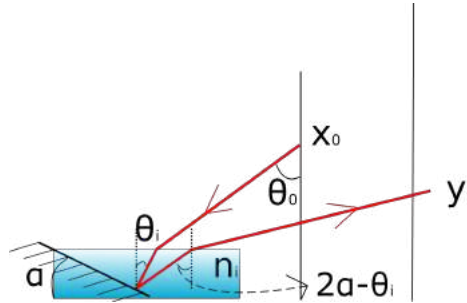


FIGURE 10 – Schéma expérimental avec la deuxième méthode

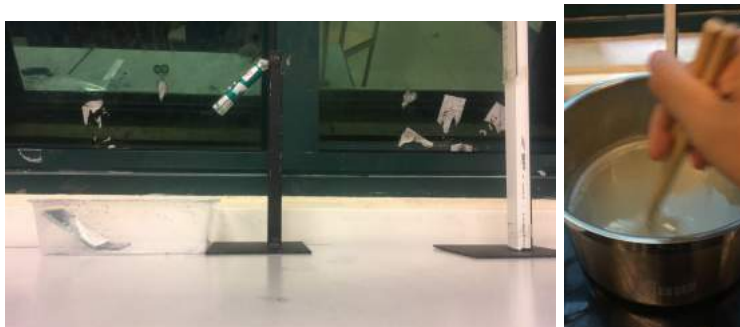


FIGURE 11 – Montage expérimentale de la deuxième méthode

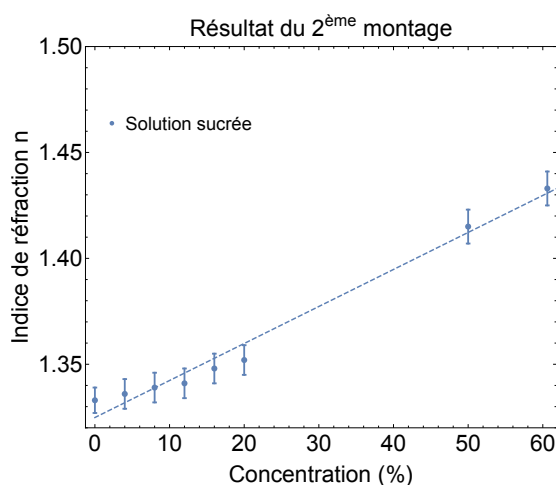


FIGURE 12 – Dépendance de l'indice à la concentration de la solution sucrée

Nous n'effectuons que des mesures avec la solution sucrée cette fois ci. Nous utilisons une plaque induction portable pour augmenter la température de la solution pour diluer plus de sucre (Voir Fig. 11). Malheureusement, nous ne connaissons pas la température exacte à laquelle nous préparons notre solution.

Nous utilisons une solution aqueuse à 60% avec un indice de réfraction de 1,45 comme nous l'avons calculé ci-dessus. Selon la loi de Snell-Descartes, l'angle limite de réfraction est $\sim 43^\circ$. Ensuite, nous calculons l'angle d'incidence de l'onde transmise dirigée vers le prisme dont l'angle d'incidence est :

$$\arcsin\left(\frac{4}{5}\right) \sim 53.13^\circ \quad (5)$$

L'onde forme avec la droite normale de du côté d'hypoténuse un angle qui est beaucoup plus grand que celle de réfraction limite. Donc, cela apparaît la réflexion totale.

Les résultats sont dessinés sur le graphe 12, les données sont précisées dans le Tableau 4, et le calcul analytique est précisé dans 6.

Nous obtenons cette fois-ci des incertitudes d'une autre de grandeur quatre fois moins importante $\Delta n \in [0.006 - 0.008]$.

4.1.4 Estimation de la différence entre l'indice de réfraction pour l'onde wifi

Pour notre expérience, nous décidons d'utiliser la solution sucrée avec la concentration de 60%, ce qui nous donne un indice de réfraction $n(\lambda_{laser}) = 1.433$. Nous remarquons que la loi de Cauchy n'est plus valable pour estimer la dispersion de grande longueur d'onde. Nous basons sur des mesures de l'indice de réfraction dans la zone infrarouge microonde pour l'air [7], pour le verre [8] et pour l'eau [9] pour déduire que l'indice de réfraction de l'air augmente de façon négligeable $n_{air}(12\text{ cm}) \sim 1$ tant dis que l'indice de notre solution (très près de l'indice du fused silica dans le zone visible) a une valeur dans le range $n(12\text{ cm}) \in [2.0 - 2.5]$.

Ceci ne fait que diminuer l'angle limite de réfraction et la condition de réflexion totale avec cette configuration de l'expérience est respectée.

5 L'étude sur l'effet tunnel



FIGURE 13 – Montage expérimental de la démonstration de l'effet tunnel quantique

Maintenant nous avons caractérisé l'antenne cornet et les deux prisme, nous sommes à la dernière étape de rassemblement pour le montage principal d'observer

l'effet tunnel quantique. (Voir Fig. 2)

Nous réalisons notre expérience en trois étapes :

1. Nous plaçons notre téléphone portable *Samsung A9 2018* sur l'axe principal $\alpha = 0^\circ$ distancée de l'antenne cornet d'une distance de 60 cm. Nous avons pris 5 mesures de puissance avec l'application *Wifi Analyzer* et nous obtenons une puissance $P = -20.4 \text{ dBm} \pm 1.5 \text{ dB}$. Nous représentons cette valeur et son erreur sur le graphe 14.
2. Nous plaçons le premier prisme à la sortie de l'antenne cornet de telle sorte que sa côté la plus courte 30 cm est la face entrante, perpendiculaire à l'axe principale de l'antenne, ce qui nous donne un angle incident de $\delta = 60^\circ$ à la face sortante. Nous mesurons 5 fois, toujours à une distance de 60 cm sur l'axe principale, une puissance $P = -60.6 \text{ dBm} \pm 1.5 \text{ dB}$. Nous représentons cette valeur et son erreur sur le graphe 14.
3. Nous plaçons ensuite le deuxième de façon de combiner deux prismes opposés pour former un pavé droit transparent. Nous séparons progressivement les deux prismes d'une distance de 0 cm à 18 cm. Restons toujours à une distance de 60 cm sur l'axe principal, nous prenons 5 mesures pour chaque distance. Les résultats sont représentés sur le graphe 14, les données sont précisées dans le tableaux 6

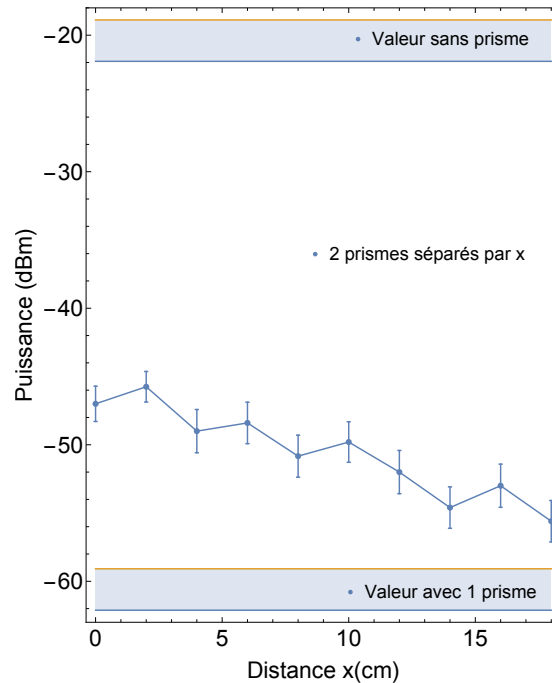


FIGURE 14 – Résultat de puissance de l'onde mesurée sur l'axe principal de l'antenne à une distance de 60 cm en fonction de la distance x séparante des deux prisme

Nous remarquons que comme nous l'avons prévu avec la loi Snell-Descartes pour l'optique géométrique classique, l'emplacement d'un prisme sous la condition de réflexion totale a bloqué ~ -40 dB de la puissance de l'onde réfléchi.

De façon classique, posant le deuxième prisme indépendant et distancé du premier prisme ne fait que bloquer encore plus la transmission de cette onde. Pourtant, nous avons réussi à faire réapparaître une portion importante de l'onde transmise. À une distance de $x = 2$ cm, nous pouvons même récupérer ~ 15 dB de l'onde transmise, ce qui nous ramène une onde de $P = -46$ dBm ± 2 dB, au delà des signaux considérées excellents pour jouer des jeux de vidéos ou pour regarder des vidéos de très haute définition $8K$ sur les sites en ligne. Ceci est la magie de l'effet tunnel quantique.

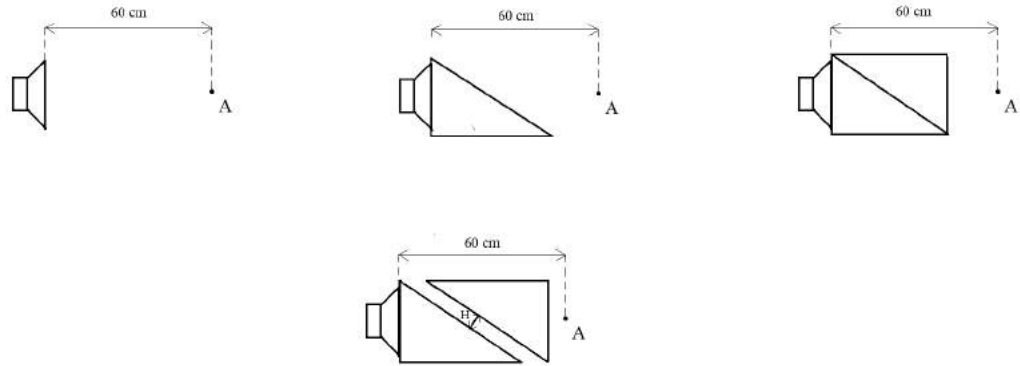


FIGURE 15 – Somme des étapes de mesures et des résultats de l'expérience

6 Conclusion

Nous avons réussi à concevoir un expérience qui permet d'observer l'effet tunnel quantique par la propagation d'onde à travers des distances de taille d'une longueur d'onde, contrairement aux phénomènes de réflexion et de réfraction de l'optique géométrique classique appliquée à l'échelle macroscopique. Les résultats obtenus avec les deux prismes de profondeur 30 cm de surface une triangle rectangulaire de côtés 30 cm \times 40 cm \times 50 cm contenant une solution sucrée de concentration 60% permettent de visualiser l'effet tunnel quantique de l'onde wifi 2.4 GHz. L'emplacement du deuxième prisme a augmenté la puissance de l'onde transmise de façon remarquable avec une augmentation maximale de ~ -45 dB quand la distance entre deux prismes est de 2 cm.

Remerciements

Tout d'abord, nous voudrions remercier Prof. Cao Khang NGUYEN (Université de l'éducation national de Hanoï) pour nous avoir supervisé et nous avoir offert un environnement au Centre de nanotechnologie et de science où nous pouvons réaliser cette expérience. Là, nous remercions aussi les tuteurs et les étudiants qui nous ont donné des conseils, des équipements.

Ensuite, nous remercions Prof. Trung Dung PHAM (Lycée Hanoï-Amsterdam) pour nous avoir accompagné dans chaque étape exigeante de ce projet et pour nous avoir introduit à ce concours.

Enfin, nous remercions Dr. Hoang Van DO (Université de Oklahoma) pour ses remarques perspicaces au cours de l'expérience et pour sa révision du projet.

Références

- [1] Friedrich Hund, *Zur Deutung der Molekelspektren*, *Zeitschrift für Physik*. **40** 742-764 (1927).
- [2] Mandelstam, L. ; Leontowitsch, M, *Zur Theorie der Schrödingerschen Gleichung*, *Zeitschrift für Physik*. **47** (1-2): 131-136 (1928).
- [3] G. Gamow *Zur Quantentheorie des Atomkernes*, *Zeitschrift für Physik*. **51** 204-212 (1928).
- [4] R. W. Gurney ; E. U. Condon, *Quantum Mechanics and Radioactive Disintegration*, *Nature* **122** 439 (1928).
- [5] The engineering tool box, [Index of refraction](#)
- [6] Joël Redoutey, *Spectre radioélectrique et propagation des ondes*, *Radiocommunications*, page.21-22
- [7] A. B. Bryan ; I. C. Sanders, *The Dielectric Constant of Air at Radio Frequencies*, *Phys. Rev.* **32**, **302** (Août 1928)
- [8] Rei Kitamura ; Laurent Pilon ; Mirosław Jonasz, *Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature*, *Applied optics*, **Vol. 46, No. 33** (Août 2007)
- [9] Mark Lee Mesenbrink, *Complex Indices of Refraction For Water And Ice From Visible To Long Wavelengths*, *Florida State University RDP* **96-037** (Printemps 1996)

Annexe

Calcul de l'indice de réfraction

Pour toutes les deux méthodes de mesures, nous avons une incertitude systématique sur la mesure de chaque distance de 1 mm (une division de la règle). Certains points se trouvent entre deux divisions sur la règle, ce qui donne un résultat plus fluctuant sur deux mesures.

Premier montage Nous pouvons déterminer l'angle incident en mesurant l'hauteur du rayon réfléchi sans solution y_0 :

$$\tan \theta_0 = \frac{d}{x_0 + y_0} \quad (6)$$

Nous avons ensuite la distance :

$$d = (x_0 - h) \tan \theta_0 + 2h \tan \theta_i + (y_i - h) \tan \theta_0 \quad (7)$$

ce qui nous donne :

$$\begin{aligned} \tan \theta_i &= \frac{d - (x_0 + y_i - 2h) \tan \theta_0}{2h} \\ &= \frac{d}{2h} \left(1 - \frac{x_0 + y_i - 2h}{x_0 + y_0} \right) \\ &= \frac{d(y_0 - y_i + 2h)}{2h(x_0 + y_0)} \end{aligned} \quad (8)$$

La loi de Snell-Descartes nous dit :

$$n_i \sin \theta_i = n_{air} \sin \theta_0 \quad (9)$$

Et au final, nous obtenons la formule de l'indice de réfraction en fonction de la hauteur y_i

$$n_i = \frac{2h \sqrt{1 + \frac{d^2(2h + y_0 - y_i)^2}{4h^2(x_0 + y_0)^2}}}{\sqrt{1 + \frac{d^2}{(x_0 + y_0)^2}(2h + y_0 - y_i)}} \quad (10)$$

Deuxième montage La formule analytique de l'indice de réfraction du deuxième montage est bien plus encombrante du premier. Avec une mesure sans solution, nous avons pu d'abord déterminer :

$$\theta_0 = 0.811 \pm 0.005 \text{ rad} \quad (11)$$

Appelons la distance de l'écran par rapport au pied du miroir, l'écran est à 39 cm, la solution est remplie d'une hauteur h_{eau} , nous avons ensuite la loi de Snell-Descartes qui s'écrit :

$$n_i \sin \left(2\alpha - \sin^{-1} \left(\frac{\theta_0}{n_i} \right) \right) = \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{\left(-h \tan \left(2\alpha - \frac{\theta_0}{n_i} \right) + d' + (h_{eau} - h) \cot \alpha \right)}{y_i - h_{eau}} \right) \right) \quad (12)$$

Les données expérimentales

Concentration (%)	y_i (mm)
0	166.8
5	166.8
10	166.8
15	166.9
20	166.9
25	166.9

TABLE 2 – Résultat du 1^{er} méthode de mesure d'une solution salée, avec $x_0 = 35$ cm, $d = 105$ cm, $h = 1.4$ cm, $y_0 = 166$ cm

Concentration (%)	y_i (mm)
0	166.8
5	166.8
10	166.8
15	166.9
20	166.9
25	166.9
30	166.9
35	166.9
40	166.9
45	166.9
50	167.0

TABLE 3 – Résultat du 1^{er} méthode de mesure d'une solution sucrée, avec $x_0 = 35$ cm, $d = 105$ cm, $h = 1.4$ cm, $y_0 = 166$ cm

Concentration (%)	y_i (mm)
0	33.6
4	33.2
8	32.8
12	32.6
16	31.7
20	14.6
50	23.6
60.6	21.2

TABLE 4 – Résultat du 2^{ème} méthode de mesure d'une solution sucrée, avec $\theta_0 = 0.811$ rad, $\alpha = \sin^{-1}(0.6)$, le laser à une distance de 17.1 cm par rapport au pied du miroir, l'écran est à 39 cm, la solution est remplie d'une hauteur h_{eau} de 3.5 cm

Distance(cm)	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = -20^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = -40^\circ$
30	-16.78 ± 0.67	-28.44 ± 0.73	-25.67 ± 0.71	-40.11 ± 1.36	-38.67 ± 0.71
40	-22.56 ± 0.73	-31.56 ± 1.01	-29.67 ± 0.5	-41.55 ± 0.88	-39.56 ± 0.53
50	-28 ± 0.71	-34.22 ± 0.83	-32.56 ± 0.53	-38.77 ± 0.97	-45.78 ± 0.97
60	-29.56 ± 0.73	-34.56 ± 0.73	-34.33 ± 0.5	-39.67 ± 1.8	-41.33 ± 0.5
70	-32.67 ± 0.87	-38.33 ± 1	-38.44 ± 0.53	-42.56 ± 0.53	-47.56 ± 0.53
80	-35.56 ± 0.53	-41.67 ± 1.22	-42.11 ± 0.93	-47 ± 1	-44.89 ± 0.78
90	-32.89 ± 1.36	-39.22 ± 0.97	-37.89 ± 0.78	-46.56 ± 0.53	-47.44 ± 0.53
100	-32.44 ± 1.51	-36.89 ± 1.83	-35.44 ± 0.73	-49.89 ± 1.05	-44.89 ± 0.78
110	-33 ± 0.71	-37.22 ± 0.67	-37.67 ± 0.5	-52 ± 0.87	-49.33 ± 1.22
120	-36.44 ± 0.53	-42.89 ± 0.93	-42.44 ± 0.53	-53.33 ± 1	-50.11 ± 0.78
130	-43.67 ± 1.12	-42.44 ± 1.42	-39.56 ± 0.53	-55.22 ± 1.71	-52.56 ± 0.53
140	-42 ± 1.32	-44 ± 1	-43.22 ± 0.83	-48 ± 1	-49.44 ± 0.53
150	-45.67 ± 1	-44.78 ± 0.67	-42.11 ± 0.6	-52.22 ± 0.97	-48.11 ± 0.78
160	-42.22 ± 1.3	-42.44 ± 0.53	-43.33 ± 1	-54.33 ± 1.32	-55 ± 1
170	-43.33 ± 1.58	-46.22 ± 0.67	-46.11 ± 0.93	-49.22 ± 0.97	-49.78 ± 1.09
180	-45.11 ± 1.17	-48 ± 0.71	-47.22 ± 0.83	-52.78 ± 1.39	-55.67 ± 0.87
190	-42.78 ± 0.67	-49.33 ± 0.71	-49.56 ± 1.01	-53.89 ± 1.61	-54.44 ± 1.01
200	-42.11 ± 0.6	-46.67 ± 1.12	-45.22 ± 0.83	-56.67 ± 2	-56.33 ± 1.22
210	-41.22 ± 1.2	-49.33 ± 1.5	-48 ± 0.71	-57.78 ± 2.95	-60.33 ± 1.12
220	-46.625 ± 1.3	-49.5 ± 0.76	-49.5 ± 0.53	-55.5 ± 0.53	-58.125 ± 0.64

TABLE 5 – Le tableau des intensités de l’onde de wifi par rapport la distance et l’angle de l’antenna

d(cm)	L’intensité(dBm)
0	-47, -48, -47, -46, -47
2	-46, -45, -46, -46, -45
4	-47, -50, -49, -50, -49
6	-48, -49, -47, -50, -48
8	-52, -51, -50, -51, -49
10	-50, -50, -48, -50, -51
12	-53, -52, -53, -52, -50
14	-55, -53, -56, -55, -54
16	-53, -52, -53, -52, -55
18	-55, -56, -54, -57, -56

TABLE 6 – Le tableau des intensités du wifi par rapport la distance entre deux prismes