

L'atmosphère, une drôle d'affaire...

Comment certains phénomènes atmosphériques modifient-ils le spectre des étoiles reçu depuis la Terre et comment cela nous permet-il d'en savoir plus sur la composition de l'atmosphère traversée ?



Alejandra ALCALDE AZUMA
Laure PETITDIDIER
Isabelle HARRIS
Marion HALAS

Professeure encadrante : Floriane MICHEL

Table des matières

Résumé	2
Introduction	2
I- Absorption atmosphérique	2
1. La diffusion de Rayleigh	2
a. Contexte historique et principe	2
b. L'expérience du lait	3
c. La formule de Rayleigh	4
2. La diffusion moléculaire	4
3. La diffusion des aérosols	5
II-Analyse du spectre du Soleil	5
1. Obtention du spectre du soleil	5
2. Ce que nous apprend le spectre du soleil	6
III. Mise en évidence de la diffusion de Rayleigh et de la présence d'aérosols	7
1. Méthode expérimentale	7
a. Objectifs et hypothèse	7
b. Protocole et traitement des données	8
c. Incertitudes	10
- y et Δy	10
- x et Δx	10
- m et Δm	10
- $\ln i$ et $\Delta \ln i$	11
- λ et $\Delta \lambda$	11
2. Courbes pour chaque longueur d'onde	11
3. Graphique de τ en fonction de λ	13
a. Modélisation sans aérosols	13
b. Modélisation avec aérosols	14
4. Nuages	15
IV-Exoplanètes	16
1. Détection de l'atmosphère d'exoplanètes	16
2. Modélisation de la composition de l'atmosphère d'exoplanètes	17
3. Les limites de notre analyse et les différences d'approche pour l'étude de la composition des exoplanètes	18
Conclusion	18
Remerciements	19
Bibliographie	19

Résumé

Pour ce projet, nous nous sommes intéressées aux effets de l'atmosphère sur le spectre des étoiles que nous pouvons obtenir depuis la Terre. Dans le visible, trois phénomènes sont à prendre en compte : la diffusion de Rayleigh, les aérosols et l'absorption moléculaire. Nous avons donc cherché à observer chacun d'entre eux pour étudier leur influence sur les spectres en question. Dans un premier temps, nous avons réalisé le spectre du Soleil dans le visible depuis la cour de récréation et analysé les pics d'absorption pour en déduire la nature de certaines molécules présentes dans l'atmosphère terrestre. Nous avons ensuite obtenu ce spectre à différents moments de la journée et réalisé des courbes d'intensité en fonction de la masse d'air traversée pour différentes longueurs d'onde. Le coefficient directeur de ces courbes correspond au coefficient d'extinction. Nous avons ainsi pu tracer le coefficient d'extinction en fonction de la longueur d'onde. Grâce à l'analyse du χ_r^2 , nous avons pu discuter de la validité de nos mesures et de leurs modélisations, ainsi que l'effet des nuages sur le spectre. L'effet de l'atmosphère sur le spectre d'une étoile est essentiel pour étudier la présence et la composition de l'atmosphère des exoplanètes et ainsi espérer y trouver de l'eau, par exemple !

Introduction

Lorsque la lumière émise par une étoile traverse une atmosphère, une partie de cette lumière est atténuée. Cette atténuation peut être due à plusieurs facteurs ; dont la diffusion de Rayleigh, l'absorption moléculaire et la présence d'aérosols. Nous nous sommes donc posées la question suivante :

Comment certains phénomènes atmosphériques modifient-ils le spectre des étoiles reçu depuis la Terre et comment cela nous permet-il d'en savoir plus sur la composition de l'atmosphère traversée ?

La diffusion de Rayleigh, les aérosols et l'absorption moléculaire conduisent une atténuation de la lumière provenant des étoiles suivant des principes de physique variés et ont donc un effet différent sur le spectre. En étudiant le spectre d'une étoile ainsi que ses variations en fonction de l'épaisseur d'atmosphère traversée, on peut en déduire la source de l'absorption-diffusion de la lumière et obtenir des informations sur la composition de l'atmosphère.

Pour ce projet, nous avons enregistré le spectre du soleil à différents moments de la journée et étudié ces spectres afin d'analyser les effets de l'absorption atmosphérique.

Dans un premier temps, nous expliquerons comment la diffusion de Rayleigh, les aérosols et les gaz de l'atmosphère peuvent modifier le spectre d'une étoile.

Dans un second temps, nous mettrons en avant les effets de ces phénomènes sur le spectre du Soleil que nous avons obtenu, puis nous expliquerons comment a été mesurée l'influence de la diffusion de Rayleigh et des aérosols sur ce spectre. Nous étudierons également les effets des nuages sur les spectres obtenus. Grâce aux valeurs expérimentales, nous avons pu tester différentes modélisations et étudier le χ_r^2 afin de les valider ou invalider.

Pour finir, nous chercherons à savoir comment ces informations peuvent être exploitées pour découvrir les atmosphères d'exoplanètes.



I-Absorption atmosphérique

1. La diffusion de Rayleigh

a. Contexte historique et principe

Au cours des années, plusieurs théories ont été proposées afin d'expliquer la couleur du ciel. En 1859, John Tyndall (1820-1893), un scientifique irlandais est le premier à émettre une hypothèse correcte sur ce phénomène. Grâce à ses expériences, il remarqua que les longueurs d'ondes plus courtes étaient mieux diffusées que les longueurs d'ondes

plus longues. Par la suite, le physicien anglais, John William Strutt Rayleigh (1842-1919) continua à s'intéresser à ce phénomène et le Prix Nobel de physique lui fut accordé en 1904 pour sa découverte de la Diffusion de Rayleigh. Il détermina la loi générale de ce phénomène en collaboration avec le mathématicien James Jean.

L'atmosphère terrestre est riche en molécules gazeuses (O_2 , N_2 , CO_2 , vapeur d'eau, etc.) et en fines particules de poussière. Le phénomène de la diffusion de Rayleigh se produit lorsque les rayons du Soleil interagissent avec les molécules de l'atmosphère et que les ondes sont diffusées dans toutes les directions (Voir schéma 1). Les rayons de longueur d'onde bleue sont plus diffusés que ceux de longueur d'onde rouge et cela explique la couleur bleue du ciel.



Schéma 1, direction de la diffusion de la lumière pour une particule diffusante de 10 nanomètres, Rayleigh, Mie scattering,

A l'aube ou au coucher du soleil, l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est supérieure à celle du zénith. Ainsi les longueurs d'ondes courtes sont diffusées d'avantage et il ne reste plus que le rouge. Le soleil apparaît donc rouge/orangé à l'observateur comme le montre le schéma 2.

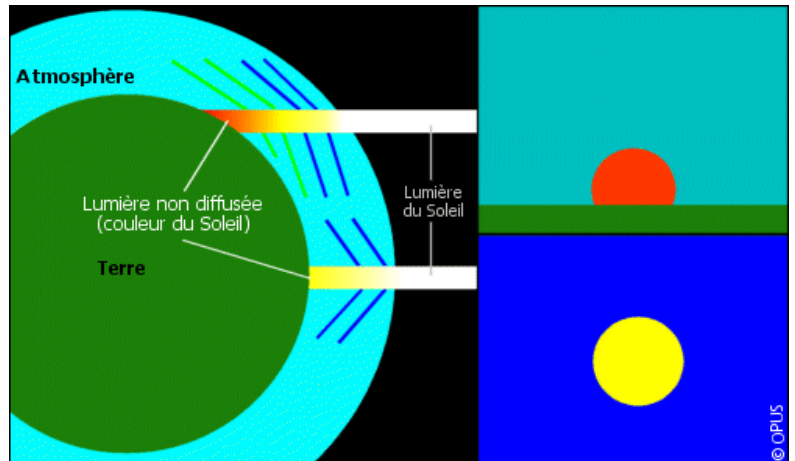


Schéma 2, Couleur du soleil en fonction de l'épaisseur d'atmosphère à traverser

b. L'expérience du lait

→ Objectif

L'objectif de cette première expérience est d'illustrer le principe du phénomène de la diffusion de Rayleigh.

→ Matériel

- Eau + Lait (sert à rendre l'eau plus dense pour qu'elle imite mieux l'atmosphère)
- Aquarium
- LED blanche

→ Protocole

1. Remplir l'aquarium avec de l'eau afin que la moitié du faisceau lumineux émis par la lampe soit submergée et l'autre moitié émergée.
2. Ajouter quelques gouttes de lait et mélanger
3. Placer une lampe devant la largeur de l'aquarium
4. Observer les côtés latéraux de l'aquarium

→ Schéma 1 :

Schéma de l'expérience démontrant la diffusion de Rayleigh lors d'un coucher de soleil.



Schéma 3, vue latérale de l'expérience

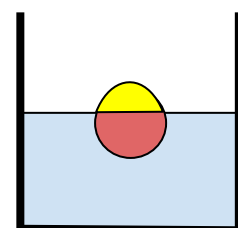


Schéma 4, vue de face

→Explication du schéma/ Résultats

Sur le schéma ci-contre, on peut constater que plus la lumière traverse d'eau, plus elle devient rouge. D'autre part, le lait apparaît bleu. Tout comme dans l'atmosphère, la lumière s'appauvrit plus vite en bleu qu'en rouge et nous apparaît donc rouge. Le bleu est rediffusé dans toutes les directions, c'est pour cela que le lait apparaît bleu.

c. La formule de Rayleigh

Le phénomène de la diffusion de Rayleigh est défini par la formule suivante :

$$I = I_0 \times 8\pi^4 \times N\alpha^2 \times \frac{1 + \cos^2(\theta)}{\lambda^4 \times R^2}$$

Définition des termes de la formule ci dessus:

- I est l'intensité de la diffusion de la lumière diffusée par les particules.
- I_0 est l'intensité lumineuse avant de traverser l'atmosphère.
- N est le nombre de particules sur le trajet de la lumière
- α est la polarisabilité
- λ est la longueur d'onde de la lumière incidente
- θ est l'angle entre l'onde incidente
- R est le diamètre des molécules

Cette formule est utilisée pour calculer l'intensité de la lumière diffusée. Elle prend en compte de nombreux paramètres (tels que le coefficient de polarisation, le nombre de particules sur le trajet de la lumière, diamètre des molécules) mais nous remarquons en particulier que l'intensité diffusée dépend de la longueur d'onde. En effet, nous voyons que λ^4 est au dénominateur, donc l'intensité I est inversement proportionnelle à la longueur d'onde à la puissance 4.

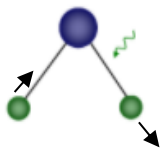
Il est donc possible de calculer le rapport entre l'intensité diffusée aux bornes du visible :

$$\frac{I_{700}}{I_{400}} = \frac{I_0 \times 8\pi^4 \times N\alpha^2 \times \frac{1 + \cos^2(\theta)}{700^4 \times R^2}}{I_0 \times 8\pi^4 \times N\alpha^2 \times \frac{1 + \cos^2(\theta)}{400^4 \times R^2}} = \frac{\frac{1 + \cos^2(\theta)}{700^4 \times R^2}}{\frac{1 + \cos^2(\theta)}{400^4 \times R^2}} = \frac{1 + \cos^2(\theta)}{700^4 \times R^2} \times \frac{400^4 \times R^2}{1 + \cos^2(\theta)} = \frac{400^4}{700^4} = 0,106$$

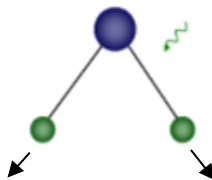
Ce calcul montre alors que l'intensité de la lumière diffusée de la longueur d'onde 400 nm est 10 fois plus grande que celle de la longueur d'onde 700 nm.

2. La diffusion moléculaire

MOUVEMENT DE VIBRATION (ÉTIREMENT ASYMÉTRIQUE)



MOUVEMENT DE VIBRATION (ÉTIREMENT SYMÉTRIQUE)



MOUVEMENT DE VIBRATION (PLIAGE)

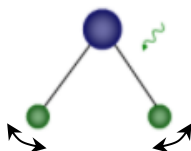


Schéma 5, les différents mouvements moléculaires dans le visible

L'atmosphère est principalement constituée de diazote (N_2), de dioxygène (O_2) d'argon, de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau. D'autres gaz nobles très peu réactifs chimiquement tels que l'argon, le néon, l'hélium, le krypton, le xénon ainsi que le radon sont également présents dans l'atmosphère. On trouve également du dioxyde de carbone, du méthane entre autres.

Lorsque les molécules reçoivent de l'énergie, elles vibrent ce qui leur fait absorber certaines longueurs d'onde. Il y a trois mouvements de vibrations dans le visible : le mouvement de pliage, le mouvement d'étirement symétrique et le mouvement d'étirement asymétrique. Ainsi une molécule peut absorber plusieurs longueurs d'onde différente. Ainsi, une signature pour chaque molécule est obtenue. En étudiant les bandes d'absorption d'un spectre, il est possible de faire des recoupements et retrouver la nature des molécules responsables de cette absorption.

3. La diffusion des aérosols

Les aérosols sont une suspension de particules solides ou liquides dans l'air atmosphérique. Nous y trouvons l'eau liquide ou solide, la poussière et la pollution. L'origine de ces particules peut être liée à l'activité humaine (résidus de la combustion des voitures) ou à des phénomènes naturels (sable, cendres volcaniques). Lorsque la lumière les traverse, les aérosols affectent énormément la transmission du rayonnement solaire direct en la diffusant dans toutes les directions.



Figure 1, photo avec peu d'aérosols.
(Canberra, 3/10/2019)



Figure 2, photo avec beaucoup d'aérosols
(Canberra, 22/11/2019)



Figure 3, photo du 12/11/2019 à Sydney après les incendies

II-Analyse du spectre du Soleil

1. Obtention du spectre du soleil

Dans le but de mesurer un spectre précis du soleil, nous avons utilisé une lunette astronomique nommée le Sunspotter. Il sert normalement à visualiser les taches solaires. Cet outil est composé d'une série de miroirs qui concentrent la lumière du soleil sur une feuille de papier. Ensuite, nous avons perforé la base de l'appareil de façon à stabiliser la tête de la fibre optique dans une même position pour obtenir un spectre plus précis.

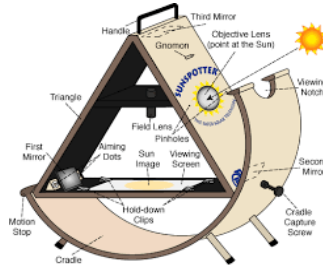
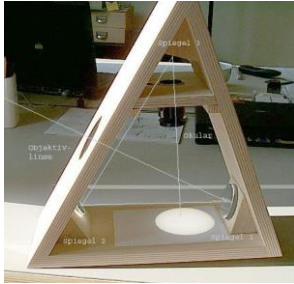
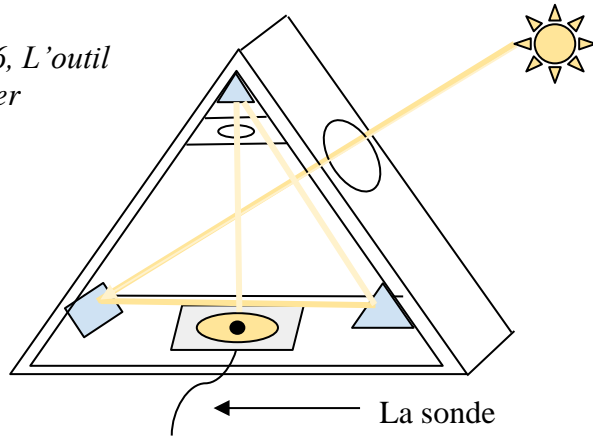
Expérience :

Matériel :

- Un Sunspotter
- Un Ordinateur
- Un Spectromètre pasco
- Logiciel Spectrometry pasco
- Une sonde



Schéma 6, L'outil Sunspotter



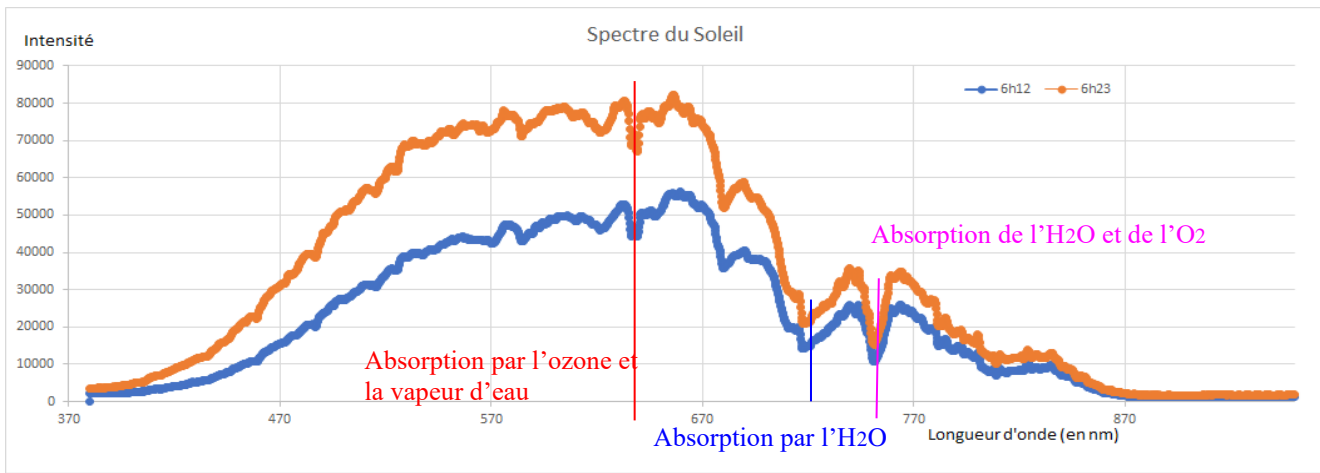
Protocole :

1. Ouvrir le logiciel Spectrometry
2. Allumer et brancher le spectrophotomètre à l'ordinateur
3. Orienter le Sunspotter vers le soleil
4. Insérer la sonde dans le trou à la base du Sunspotter
5. Lancer l'acquisition du spectre sur le logiciel
6. Arrêter l'enregistrement sur le logiciel
7. Exporter et récupérer les données du logiciel



2. Ce que nous apprend le spectre du soleil

Voici le spectre du soleil obtenu à 6h12 et 6h23 du matin une journée de grand soleil sans aucun nuage ni brume. Des bandes d'absorption au niveau de certaines longueurs d'ondes sont observables. Ces bandes d'absorption sont communes à tous les spectres, quel que soit l'heure de la journée.



Les mesures obtenues au cours de nos expériences sont contenues entre 400 et 700 nanomètres. D'après le graphique de Robert A Rohde pour "The Global Warming Art", l'eau absorbe au-delà de 700 nm et l'oxygène absorbe de manière intense vers 760 nm. Une autre absorption faible provient de l'ozone entre 550 et 650 nanomètres. Nous pouvons donc constater ici la présence d'eau et de dioxygène dans notre atmosphère.

III. Mise en évidence de la diffusion Rayleigh et de la présence d'aérosols

1. Méthode expérimentale

a. Objectifs et hypothèse

Pour observer la diffusion Rayleigh, il faut voir comment évolue le spectre lorsque les rayons traversent différentes longueurs d'atmosphère.

Le Soleil varie dans le ciel au cours de la journée, les rayons lumineux ne parcourent donc pas la même distance dans l'atmosphère avant de parvenir jusqu'à nous.

La hauteur d'atmosphère parcourue étant difficile à déterminer (en raison des variations de densité), il existe une grandeur appelée masse d'air traversée. Par définition, la masse d'air traversée par les rayons lumineux lorsque le Soleil est au zénith vaut 1. En connaissant l'angle que font les rayons lumineux avec le sol, nous pouvons en déduire la masse d'air traversée.

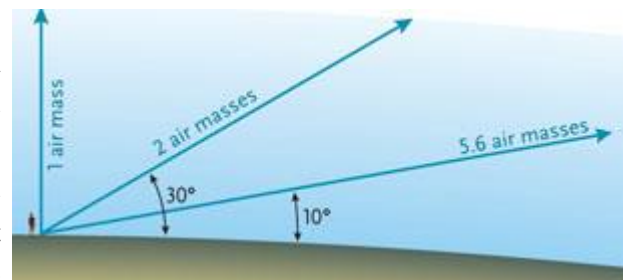


Figure 4, Masse d'air Source : Casey Reed

La loi de Bouguer-Beer-Lambert définit l'atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère et les composés qu'elle contient. La formule est la suivante :

$$I(\lambda) = I_0 e^{-\tau(\lambda)m}$$

Avec : - I , l'intensité lumineuse

- I_0 , Intensité lumineuse en unité arbitraire. Elle correspond à l'intensité du Soleil en dehors de l'atmosphère.
- τ , Coefficient d'extinction en m^{-1}
- m , la masse d'air traversée

Plus le coefficient d'extinction $\tau(\lambda)$ est grand, plus l'intensité lumineuse à cette longueur d'onde est absorbée. Nous appliquons la fonction inverse à l'exponentielle ; \ln , pour trouver une équation affine permettant d'être tracée dans nos graphiques :

$$\ln(I(\lambda)) = \ln(I_0) - \tau m$$

Nous avons ensuite tracé les courbes de $\ln(I)$ en fonction de m pour différentes longueurs d'onde, pour en déduire le coefficient directeur et ainsi, le coefficient d'extinction.

Cela a permis d'exploiter ces coefficients d'extinction en fonction de la longueur d'onde pour voir si leur évolution correspondait à la diffusion de Rayleigh.

Hypothèse :

Nous avons fait les expériences en une seule journée afin d'avoir les conditions météo les plus stables possible. Le temps était clair et il n'y avait ni nuage ni brume. Nous avons fait l'hypothèse que nous ne verrions pas l'influence des aérosols mais seulement de la diffusion de Rayleigh.

b. Protocole et traitement des données

En plus du matériel de l'expérience précédente, nous avons utilisé une règle de 1m, une potence et un niveau à bulle.

Protocole:

1. Ouvrir le logiciel Spectrometry
2. Allumer et brancher le spectromètre à l'ordinateur
3. Orienter le Sunspotter vers le soleil et placer son image au centre de la base du sunspotter.
4. Insérer la sonde dans le trou du Sunspotter
5. Commencer l'enregistrement sur le logiciel
6. Attacher la règle à la potence
7. Utiliser le niveau pour vérifier que la règle soit perpendiculaire à la terre
8. Mesurer la longueur de l'ombre avec le mètre et arrêter l'enregistrement sur le logiciel
9. Exporter et récupérer les données du logiciel

Calcul de la masse d'air traversée

Pour réaliser la courbe, il a été nécessaire de calculer la masse d'air m . Nous avons donc utilisé plusieurs variables : y = la longueur de la règle, x = longueur de l'ombre et m = masse d'air traversée par les rayons lumineux.

Nous appliquons donc le théorème de Pythagore, avec

$$m = \sqrt{x^2 + y^2}$$

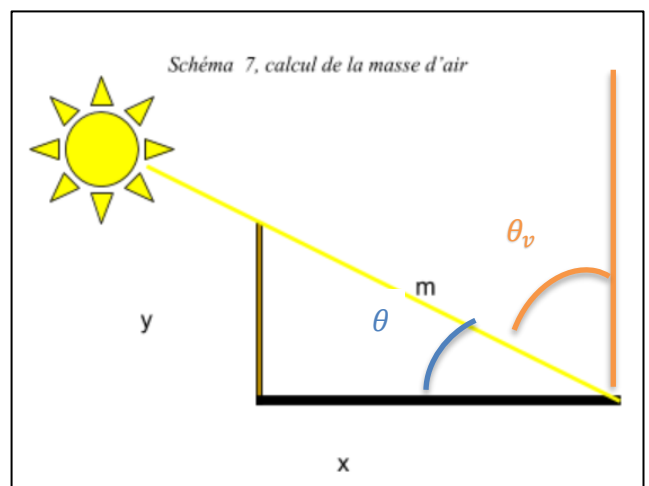
Ce modèle ignore l'effet de la courbure de la Terre.

Cependant, d'après la thèse de Mohamed Chaoui Roquai,

'Caractérisation de l'aérosol à partir des mesures de

l'épaisseur optique', la courbure de la Terre peut être négligé pour des valeurs de θ_v (voir schéma 7) en dessous

de 70° . Pour les valeurs de θ_v supérieures à 70° , on utilise la formule suivante pour faire les corrections :



$$m = \frac{1}{\cos(\theta_v)} - 1.867 \times 10^{-3} \times \left(\frac{1}{\cos(\theta_v)} - 1 \right)^2 - 0.8083 \times 10^{-3} \times \left(\frac{1}{\cos(\theta_v)} - 1 \right)^3$$

Date	Heure	meteo	y (cm)	x (cm)	Angle	m
3/10	06:12	clear	100	1069	84.7	9.70
	06:17	clear	100	790	82.8	7.54
	06:23	clear	100	704	82.0	6.81
	06:28	clear	100	588	80.4	5.79
	06:43	clear	100	445	77.4	4.48
	06:52	clear	100	388	75.6	3.95
	08:08	clear	100	175	60.3	2.02
	08:17	clear	100	163	58.5	1.91
	08:25	clear	100	155	57.2	1.84

Nous avons ensuite créé un tableau avec les variables x et y, et les dates, les heures, la météo des mesures prises.

Tableau 2, Calcul de la masse d'air

Après l'exportation d'un enregistrement du spectre solaire sur le logiciel, nous obtenons les données brutes de notre expérience comme nous pouvons le voir ci-dessous, c'est-à-dire l'intensité et sa longueur d'onde correspondante.

Wavelength (nm)	Intensity	Source #4	Untitled.sp		Source #4
379987	2092		2019-10-03 06:14	Integration Time	1000 ms
380207	2100		Analyze Light	Number of Scans	1
380429	2108			Smoothing	1
380651	2125				

Tableau 1, Tableau des données brutes

Binning,

Wavelength (nm)	
A	B
398433	2409
398693	2442
398952	2458
399212	2466
399472	2491
399732	2507
399993	2540
400254	2564
400515	2556
400777	2523
401038	2491
401300	2532
401562	2589
401825	2629
402088	2637
402350	2637
402614	2629

Binning et Normalisation des intensités mesurées

Dans le but de réduire la probabilité d'erreur causée par une imprécision du spectromètre, nous avons appliqué une méthode connue sous le nom de Binning. Cette dernière consiste à additionner les 5 intensités au-dessus et en dessous de la valeur centrale (somme des 11 valeurs). L'exemple ci-dessous, correspond à des longueurs d'onde entre 398,952 et 401,562 nm

Le temps d'acquisition n'est pas le même en fonction du moment de la journée où a été pris obtenu le spectre.

Nous avons donc normalisé l'intensité, en la ramenant à un temps d'intégration d'une seconde, grâce à un produit

en croix, $\frac{\text{intensité mesuré} \times 1000}{\text{temps int}}$.

Tableau 3, Méthode du binning

Nous avons ensuite reproduit cette démarche pour différentes longueurs d'onde (400, 450, 500, 550, 600, 650 et 700) et à différents moments de la journée. Nous avons ainsi réalisé un tableau avec la valeur de la masse et de l'intensité pour plusieurs longueurs d'onde.

Tableau 4 : Normalisation de l'intensité

temps int (ms)	Int mesuré (bin400 +/-5)	Int normalisé (bin400 +/-5)	racine (bin400)	Int mesuré (bin500+/-5)	Int normalisé (bin500+/-5)	racine (bin500)
1000	27.717	27.717	13.8585	301.652	301.652	150.826
1000	39.549	39.549	19.7745	413.236	413.236	206.618
853	45.593	53.45017585	26.72508792	480.26	563.024619	281.5123095
853	57.201	67.05861665	33.52930832	566.895	664.5896835	332.2948417
682	72.788	106.7272727	53.36363636	672.228	985.6715543	492.8357771
516	63.361	122.7926357	61.39631783	587.643	1138.843023	569.4215116
479	76.084	158.8392484	79.41962422	510.795	1066.377871	533.1889353
455	121.546	267.1340659	133.567033	768.734	1689.525275	844.7626374
452	132.365	292.8429204	146.4214602	768.058	1699.243363	849.6216814
452	137.152	303.4336283	151.7168142	713.977	1579.595133	789.7975664
452	148.627	328.8207965	164.4103982	755.214	1670.827434	835.4137168
439	137.581	313.3963554	156.6981777	722.686	1646.209567	823.1047836
439	135.367	308.3530752	154.1765376	726.423	1654.722096	827.3610478

c. Incertitudes

- y et Δy

Grandeur : longueur de la règle

Source de l'incertitude : Précision des graduations

Valeur de l'incertitude : 1 cm

- x et Δx

Grandeur : taille de l'ombre

Source de l'incertitude : Mouvement parfois rapide de l'ombre, Uniformité du terrain, Estimation visuelle de la taille de l'ombre parfois pas très nette

Valeur de l'incertitude : 5%

- m et Δm

Pour l'incertitude de m, nous avons calculé la dérivée de m par rapport à x et y.

Rappel la formule de m: $m = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Nous définissons les fonctions f et g telles que: $g(f(x)) = \sqrt{x^2 + y^2}$

$f(x) = x^2 + y^2$	$f(y) = y^2 + x^2$
$f'(x) = 2x$	$f'(y) = 2y$
$g(x) = \sqrt{x}$	$g(y) = \sqrt{y}$
$g'(x) = \frac{1}{2\sqrt{x}}$	$g'(y) = \frac{1}{2\sqrt{y}}$

Nous calculons la dérivée de m en fonction de x et y.

$g(f(x))' = g'(f(x)) \times f'(x)$ $\frac{\partial m}{\partial x} = \frac{1}{2\sqrt{x^2+y^2}} \times 2x$ $= \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}} \times x$	$g(f(y))' = g'(f(y)) \times f'(y)$ $\frac{\partial m}{\partial y} = \frac{1}{2\sqrt{y^2+x^2}} \times 2y$ $= \frac{1}{\sqrt{y^2+x^2}} \times y$
--	--

$$\text{Or } \Delta m = \frac{\partial m}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial m}{\partial y} \Delta y$$

Nous en déduisons alors que l'incertitude sur m est : $\Delta m = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \times (y \Delta y + x \Delta x)$

- **lnI et $\Delta \ln I$**

Nous savons que la dérivée de $\ln(I)$ est : $\frac{d(\ln I)}{dI} = \frac{1}{I}$. Donc l'incertitude sur $\ln(I)$ vaut : $\Delta \ln I = \frac{\Delta I}{I}$

L'incertitude sur I prend en compte l'erreur de comptage des photons par la caméra du spectrophotomètre (\sqrt{I}). A cette incertitude, nous avons ajouté 5% afin de prendre en compte la variation de l'intensité du soleil, qui sont généralement le résultat de la turbulence présente dans l'atmosphère, d'autre part le fait que l'intensité lumineuse du Soleil ne soit pas homogène sur toute la surface du disque. Il existe une différence entre les bords qui sont plus sombres et le centre du disque qui est plus lumineux, connue sous le nom d'assombrissement solaire. Sur certaines mesures, le soleil changeait rapidement de place. Nous pouvons donc supposer que la sonde n'était pas toujours au centre du disque et que l'intensité lumineuse a donc pu varier.

L'incertitude sur I s'écrit donc : $\Delta I = \sqrt{I} + 0.05I$

- **λ et $\Delta \lambda$**

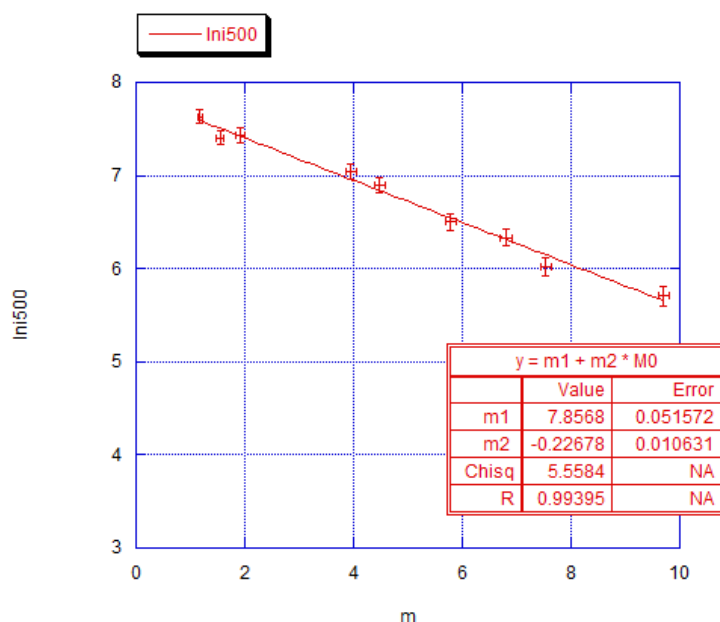
L'incertitude sur la longueur d'onde est très petite et donc négligée dans cette expérience.

2. Courbes pour chaque longueur d'onde

Pour chaque longueur d'onde de 400 nm à 700 nm, avec 50 nm d'intervalle, nous avons regroupé les différentes variables et leurs incertitudes respectives dans un tableau sur le logiciel kaleidagraph, puis tracé le graphique de $\ln(I)$ en fonction de la masse d'air.

	0	y	1	dy	2	x	3	dx	4	m	5	dm	6	i400	7	lni400	8	di400	9	dlni400
0		1.0000		0.0100000		10.690		0.53450		10.737		0.099306		27.717		3.3220		5.8190		0.20994
1		1.0000		0.0100000		7.9000		0.39500		7.9630		0.098738		39.549		3.6775		7.0798		0.17901
2		1.0000		0.0100000		7.0400		0.35200		7.1107		0.098418		53.450		3.9787		8.3800		0.15678
3		1.0000		0.0100000		5.8800		0.29400		5.9644		0.097751		67.059		4.2056		9.5301		0.14212
4		1.0000		0.0100000		4.4500		0.22250		4.5610		0.096154		106.73		4.6703		12.465		0.11680

Tableau 5 : Tableau des données utilisées pour tracer les courbes de $\ln(I)$ en fonction de m



Nous observons que plus la masse d'air est grande, plus l'intensité diminue. Ceci est dû au fait que la lumière doit traverser une épaisseur d'atmosphère plus épaisse, donc elle perd de l'intensité lumineuse.

Nous avons modélisé la droite par une fonction affine.

Dans l'encadré, $M0$ est la variable, ici la masse d'air. $m2$ correspond au coefficient directeur et donne le coefficient d'extinction pour une certaine longueur d'onde. Le procédé est répété pour toutes les longueurs d'ondes étudiées (voir annexes).

Nous avons calculé le χ_r^2 des courbes pour valider nos modélisations :

Exploitation du χ_r^2

Afin de calculer χ_r^2 , il faut effectuer le calcul suivant : $\chi_r^2 = \frac{\chi^2}{n-p}$

Avec χ^2 est automatiquement calculé par le logiciel : $\chi^2 = \sum_n \left(\frac{y-x}{\sigma} \right)^2$

(y-x) sont les écarts à la modélisation

σ est la valeur de l'incertitude.

n = le nombre de points sur le graphique

p = le nombre de paramètres dans la modélisation

La modélisation si χ_r^2 est validée est environ égale à 1.

Si $\chi_r^2 > 1$, les écarts à la courbe sont plus grands que les incertitudes. La modélisation n'est pas validée.

A l'inverse, si $\chi_r^2 < 1$, on peut valider la modélisation, cependant les incertitudes ont été surestimées et plusieurs modélisations peuvent décrire les points expérimentaux.

Commençons par calculer le χ_r^2 pour la courbe de i550 :

Notre modélisation nous donne les valeurs suivantes :

$$\chi^2 = 5,558$$

$$n = 9 ; p = 2$$

$$\text{Calculons donc } \chi_r^2 : \chi_r^2 = \frac{\chi^2}{n-p} = \frac{5,558}{9-2} = 0,794$$

Nous répétons les mêmes calculs pour les six autres courbes (accessibles dans nos annexes):

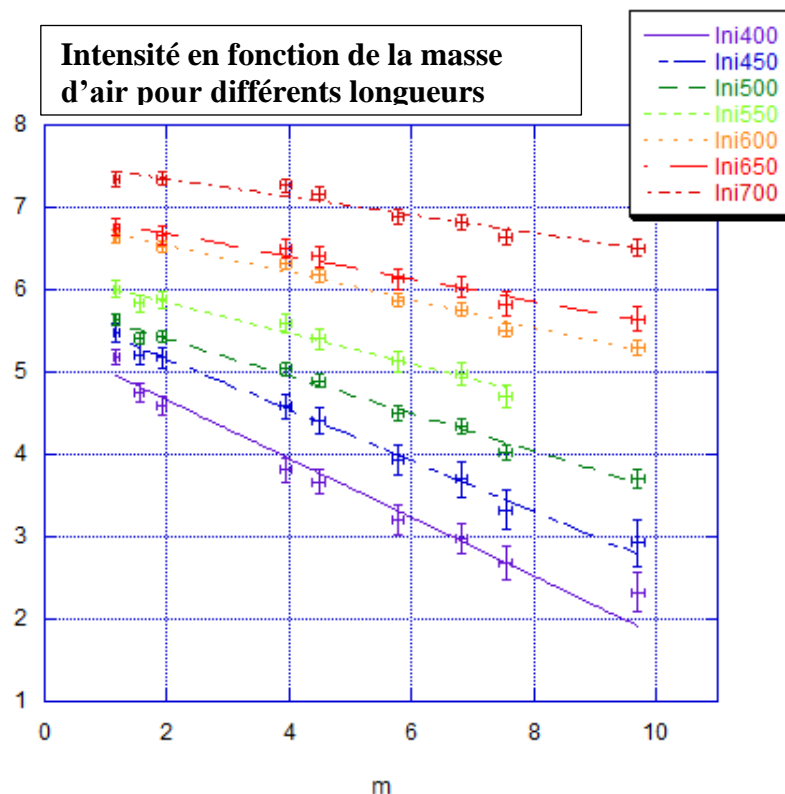
Lambda (en nm)	coefd	Incrtitude sur coefd	ChisqR
400	0,357	0,019	1,686
450	0,308	0,022	0,208
500	0,227	0,011	0,794
550	0,187	0,018	0,337
600	0,160	0,010	1,053
650	0,131	0,015	0,363
700	0,102	0,011	1,336

Tableau 6 : Valeur des coefficients d'extinction

Nous constatons que les valeurs du χ_r^2 ne sont pas homogènes entre les différentes longueurs d'ondes. Cela signifie que l'écart des points à la modélisation varie de manière aléatoire. Cela est peut-être dû aux fluctuations de l'atmosphère (température, pression, mouvements de particules) qui affectent les longueurs d'onde de différentes manières.

Le graphique ci-contre rassemble toutes les courbes précédentes sur un seul repère pour comparer leurs coefficients d'extinction. À des fins de lisibilité, nous avons ajouté ou soustrait une valeur constante à toutes les intensités d'une même longueur d'onde, les valeurs des coefficients d'extinction n'ont pas été altérées.

Le coefficient d'extinction est le coefficient directeur de la fonction. Plus le coefficient d'extinction est élevé, plus la fonction décroît rapidement. Nous pouvons observer ici que plus la longueur d'onde est grande, plus le coefficient directeur de la courbe est petit. Nous pouvons donc en déduire que la lumière est plus absorbée dans les petites longueurs d'ondes que dans les grandes, ce qui est en cohérence avec la théorie de la diffusion de Rayleigh.



3. Graphique de τ en fonction de λ

a. Modélisation sans aérosols

Après avoir construit les sept graphiques de l'intensité en fonction de la masse d'air pour obtenir les coefficients d'extinctions correspondant à chaque longueur d'onde, nous avons tracer le coefficient d'extinction en fonction de la longueur d'onde. Nous avons modélisé nos valeurs expérimentales en utilisant la formule théorique de la diffusion de Rayleigh.

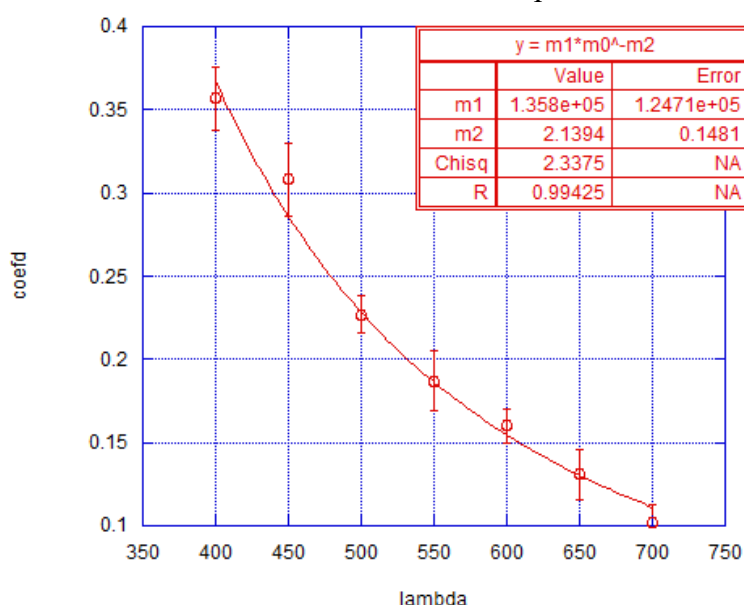
Voici le graphique obtenu qui montre le coefficient d'extinction en fonction de la longueur d'onde.

Sur ce graphique nous avons modélisé nos valeurs expérimentales par la formule théorique de Rayleigh : $\tau(\lambda) = A \times \lambda^{-B}$ où les coefficients sont A et B.

Au moment de définir la modélisation dans le logiciel kaleidagraph, nous avons rentré les estimations suivantes, prises à partir des valeurs théoriques proposées dans l'article "WMO Global Ozone Research and Monitoring Project":

$$A = 1,787 \times 10^{10}$$

$$B = 4,25$$



En faisant ce graphique, nous remarquons que la modélisation la plus proche de nos points expérimentaux n'est pas en accord avec la formule théorique. Nous voyons cela au fait que les valeurs m1 et m2 (correspondant aux coefficients A et B) qui apparaissent dans l'encadré du graphique sont très éloignées des valeurs théoriques. Il y a quatre ordres de grandeur d'écart entre la valeur théorique et expérimentale pour m1.

Nous avons analysé le χ_r^2 de la courbe. Notre modélisation nous donne les valeurs suivantes :

$$\chi^2 = 2,338 ; n = 7 ; p = 2 - \text{Nous calculons donc } \chi_r^2 : \chi_r^2 = \frac{\chi^2}{n-p} = \frac{2,338}{7-2} = 0,468$$

Le χ_r^2 étant inférieur à 1, la modélisation que nous avons faite est validée.

Cependant l'écart entre les valeurs théoriques et celles trouvées avec notre modélisation est trop grand pour être ignoré. Deux hypothèses permettent d'expliquer cet écart : soit nos incertitudes ont été surestimées, soit la diffusion de Rayleigh n'est pas le seul phénomène atmosphérique en jeu influençant les mesures obtenues. Nous avons donc décidé de refaire la modélisation en prenant cette fois en compte la présence d'aérosols.

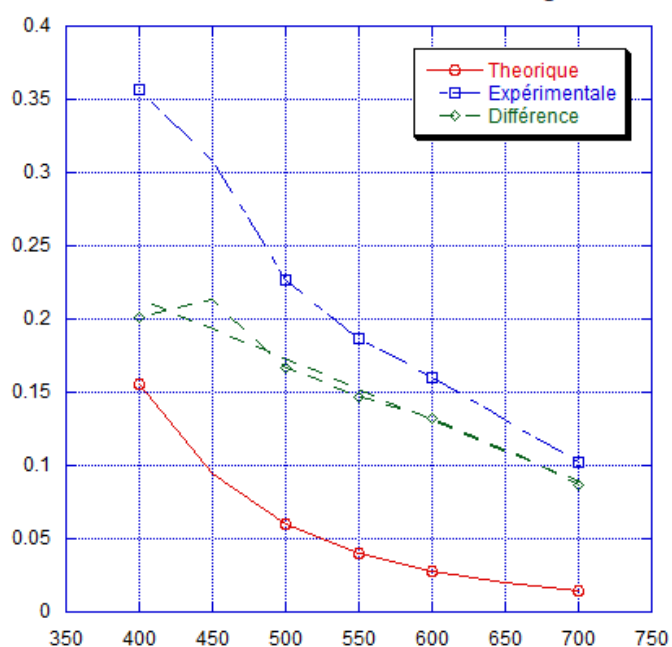
b. Modélisation avec aérosols

Pour cela nous avons comparé les coefficients d'extinction théoriques pour la diffusion de Rayleigh (calculés grâce à la formule $\tau(\lambda) = 1,787 \times 10^{10} \times \lambda^{-4,25}$) à ceux obtenus grâce aux valeurs expérimentales en soustrayant les valeurs théoriques aux valeurs expérimentales de façon à obtenir un reste qui correspondrait à l'influence des aérosols.

λ	Valeurs théoriques	Valeurs expérimentales	Contribution des aérosols
400	0.156	0.357	0.201
450	0.095	0.308	0.213
500	0.060	0.227	0.167
550	0.040	0.187	0.147
600	0.028	0.160	0.132
650	0.020	0.131	0.111
700	0.015	0.102	0.087

Tableau 7 : Calcul de la valeur des aérosols

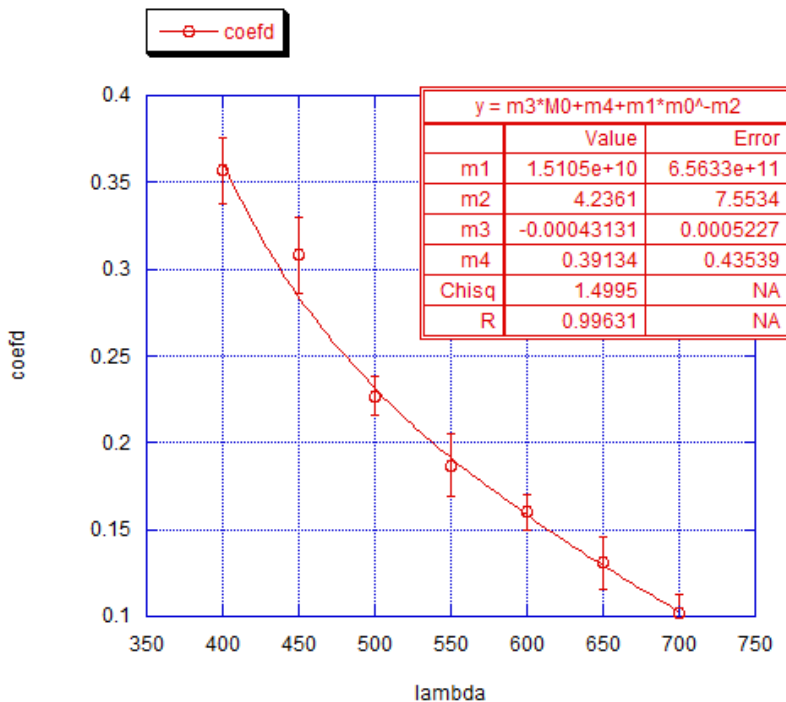
Coefficients d'extinction en fonction de la longueur d'onde



Grâce à cette courbe, nous avons fait l'hypothèse que l'influence des aérosols pouvait être définie par une droite. Ceci est justifié par le coefficient de corrélation R de la courbe verte qui est de 0.97 si on la modélise par une fonction affine.

Nous avons donc ajouté cette composante de type fonction affine dans la modélisation de nos valeurs.

Coefficient d'extinction en fonction de la longueur d'onde un jour sans nuage



Validation de la modélisation :

Pour χ^2 , le logiciel donne la valeur 1,4995
n=7

p= 4 puisqu'il y a m1, m2, m3 et m4

$$\chi_r^2 = \frac{\chi^2}{n - p} = \frac{1,4995}{7 - 4} = 0,499$$

Nous trouvons $\chi_r^2 < 1$ donc, nous pouvons en déduire que la modélisation est validée. Cependant, le χ_r^2 reste petit, ce qui indique que les incertitudes ont été surestimées, et ce qui explique également les incertitudes très grandes que donne le logiciel pour chaque paramètre. En effet, cela se justifie par le fait que différentes courbes peuvent passer par les barres d'erreurs que nous proposons.

Les χ_r^2 des courbes de l'intensité en fonction de la masse d'air étant assez changeant et parfois trop petit, nous pouvons supposer que les incertitudes ont été surestimées pour certaines longueurs d'onde. Nous pouvons cependant noter que la dernière courbe qui prend en compte à la fois les aérosols et la diffusion de Rayleigh modélise bien nos valeurs car elle a une valeur R de 0,99. De plus les valeurs des paramètres m1 et m2 trouvées pour la modélisation se rapprochent des valeurs théoriques.

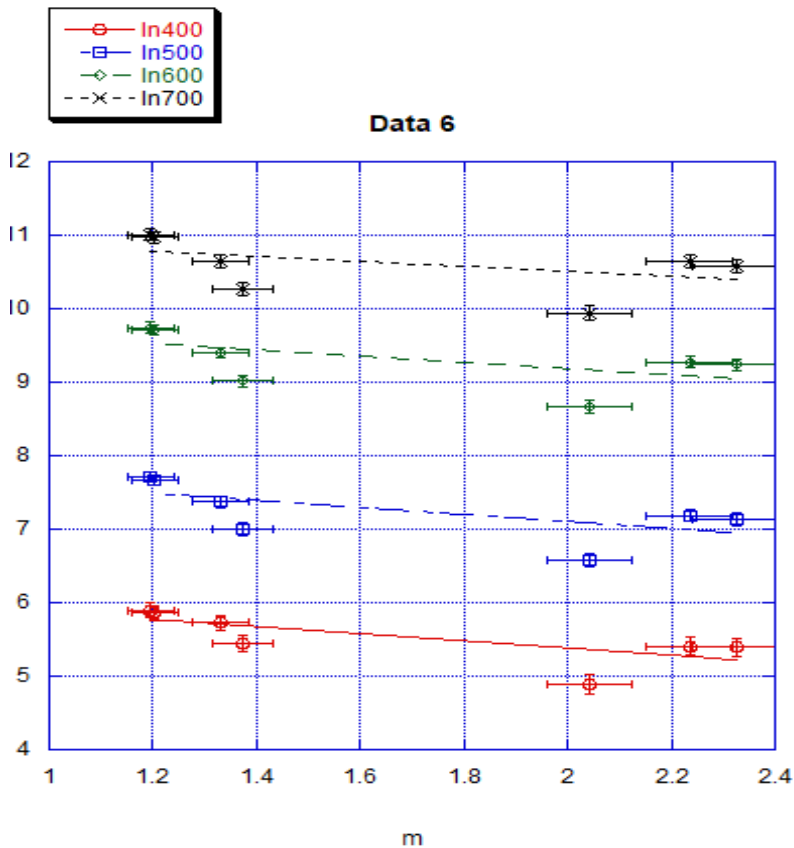
4. Nuages

Tout d'abord, lors de journées nuageuses, il est impossible d'obtenir un spectre car les gouttes d'eau des nuages diffusent la lumière du soleil dans toutes les directions.

Pour voir l'influence des nuages sur les spectres, il a fallu prendre certaines mesures lors d'une journée brumeuse, mais où il était tout de même possible d'obtenir un spectre. En suivant les mêmes étapes que précédemment, nous avons obtenu les résultats résumés sur la courbe page suivant.

De manière générale, les coefficients d'extinction sont beaucoup plus élevés que sur les mesures par temps clair. (0.49 ici pour 400 nm alors qu'il valait 0,25 par temps clair). Cela est dû aux cristaux de glaces et aux molécules de vapeur d'eau présent. Pour toutes ces modélisations, les chi2 sont très grands. Cela est dû à la grande variabilité des mesures en raison de la variation de densité des nuages.

Il est donc difficile d'obtenir des résultats cohérents et les mesures ne sont pas reproductibles sans prendre en compte d'autres paramètres pour décrire l'état de l'atmosphère. Cette variabilité est donc un indicateur de la présence de nuages



y = m1 + m2 * M0		
	Value	Error
m1	11.184	0.11882
m2	-0.33696	0.069575
Chisq	78.151	NA
R	0.48047	NA

y = m1 + m2 * M0		
	Value	Error
m1	10.034	0.10426
m2	-0.42435	0.061073
Chisq	94.163	NA
R	0.58218	NA

y = m1 + m2 * M0		
	Value	Error
m1	8.0703	0.10531
m2	-0.48281	0.061877
Chisq	86.342	NA
R	0.64307	NA

y = m1 + m2 * M0		
	Value	Error
m1	6.3634	0.15407
m2	-0.49023	0.091838
Chisq	22.023	NA
R	0.75103	NA

Coefficient d'extinction en fonction de la longueur d'onde un jour brumeux

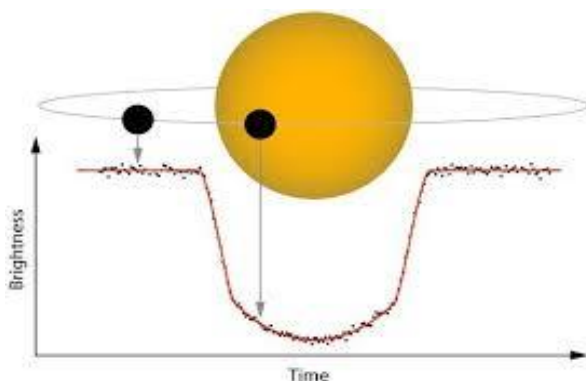
IV-Exoplanètes

1. Détection de l'atmosphère d'exoplanètes

Les exoplanètes sont des planètes situées à l'extérieur de notre système solaire et qui orbitent autour d'une étoile autre que le soleil. L'étude de l'atmosphère terrestre et son impact sur l'acquisition du spectre d'une étoile servent de modèle pour l'étude de l'atmosphère des exoplanètes. Cette étude nous permet en particulier d'obtenir des outils pour détecter la présence d'une atmosphère autour d'une exoplanète et d'en définir ensuite sa composition.

Actuellement, les astronomes utilisent une variété de techniques pour obtenir leur spectre, mais celle qui nous intéresse est appelée spectroscopie par transmission. Cette dernière consiste à capter la lumière qui provient d'une étoile lors du passage d'une exoplanète devant elle. Son intensité lumineuse diminue : c'est ce que nous appelons un transit.

Le schéma ci-contre montre la différence de l'intensité lumineuse de l'étoile, avant et pendant le passage de l'exoplanète.

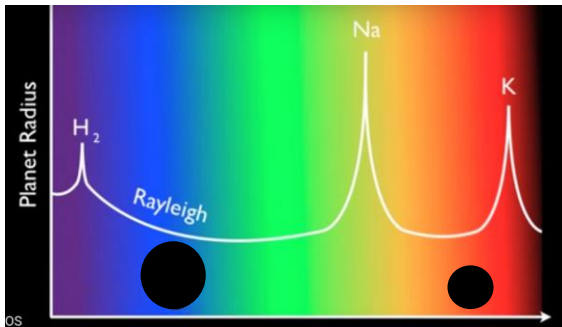


Dans le cas où l'exoplanète possède une atmosphère, nous pouvons observer que l'intensité lumineuse connaît des diminutions qui peuvent varier d'une longueur d'onde à l'autre (voir figure 8). Cela implique le fait que le rayon apparent de la planète varie (voir figure 7).

Figure 6, La méthode transit source : <http://eos-nexus.org/eos-blog/>

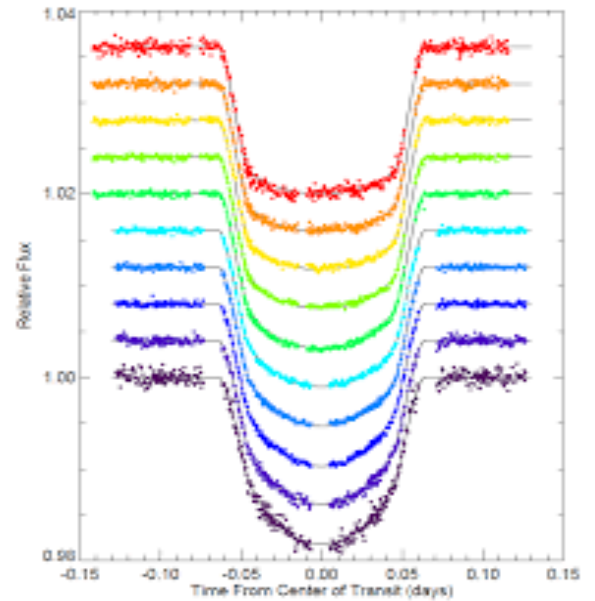
En d'autres mots, le rayon de l'exoplanète paraît plus grand ou plus petit selon la longueur d'onde dans laquelle il est observé. Plus la longueur d'onde est absorbée par l'atmosphère, plus le rayon de l'étoile va paraître grand, et inversement.

Figure 7, Le spectre de transmission de l'étoile GJ 3470b
<http://eos-nexus.org/eos-blog/>



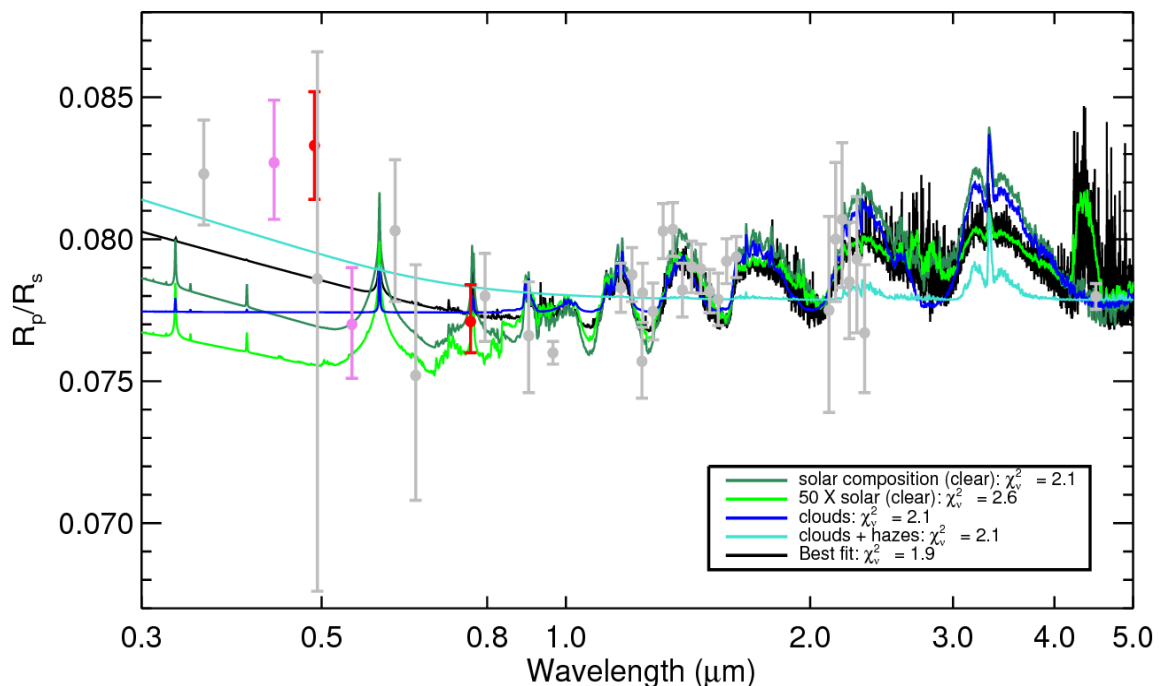
→ Le rayon de la planète paraît plus grand dans le bleu car les longueurs d'ondes bleues sont plus absorbées par l'atmosphère (Diffusion de Rayleigh)
 → Dans le rouge, le rayon de la planète paraît plus petit puisque l'atmosphère absorbe moins ces longueurs d'ondes, ce qui laisse passer plus de lumière.

Figure 8, Le transit de la planète autour de l'étoile HD 209458
<http://spiff.rit.edu>



2. Modélisation de la composition de l'atmosphère de l'exoplanètes

Figure 9, Spectre de GJ 3470b montrant certaines modélisations atmosphériques



Le document de la page précédente montre les modélisations du spectre de l'exoplanète GJ 3470b, d'après des mesures prises sur Terre. R_p est le rayon de l'exoplanète étudié et R_s est le rayon de son étoile, donc,

$\frac{R_p}{R_s}$ représente le rapport entre les deux rayons. Cette proportion permet d'étudier les changements de taille du rayon apparent de la planète observé durant un transit. Il permet de comparer les modélisations avec les valeurs obtenues grâce à l'étude de l'atmosphère de l'exoplanète. Les scientifiques analysent alors le χ_r^2 pour voir quelle modélisation représente le mieux l'atmosphère de l'exoplanète et ainsi faire des hypothèses sur sa composition.

Nous remarquons que ce graphique montre l'effet des nuages. Nous en déduisons que les nuages affectent le rayon observé de la planète en effaçant complètement l'effet de la diffusion de Rayleigh. Nous pouvons le visualiser sur le graphique par une droite horizontale dans le domaine du visible (voir courbe bleu foncé (clouds) sur la figure 9). Ceci est aussi un phénomène terrestre que nous avons observé lors de journées nuageuses.

3. Les limites de notre analyse et les différences d'approche pour l'étude de la composition des exoplanètes

Notre projet diffère de la méthode professionnelle d'analyse de l'atmosphère d'une l'exoplanète sur plusieurs points.

- Nos mesures sont surtout focalisées dans le visible ce qui limite le champ d'analyse. Une étude dans l'infrarouge permettrait d'obtenir une composition de l'atmosphère plus détaillée car elle permettrait d'observer plus de bandes d'absorption.
- Le trajet de la lumière diffère : dans le cas des exoplanètes, les rayons traversent l'atmosphère dans sa "longueur" alors que pour notre expérience, ils traversent l'atmosphère dans sa hauteur. (voir schémas ci-dessous)
- Les variations des paramètres d'altitude, de température et de pression influencent la trajectoire des rayons lumineux. Nous n'avons pas pris en compte ces variations lors de l'acquisition de nos résultats.

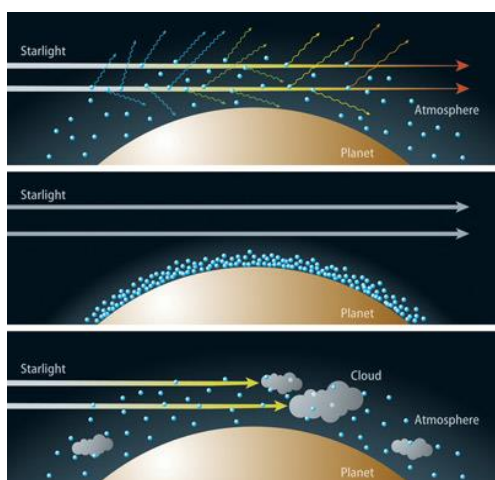


Figure 10, La Diffusion Rayleigh dans l'atmosphère d'une exoplanète

<https://exoplanets.nasa.gov/resources/168/rayleigh-scattering-in-exoplanet-atmospheres/>

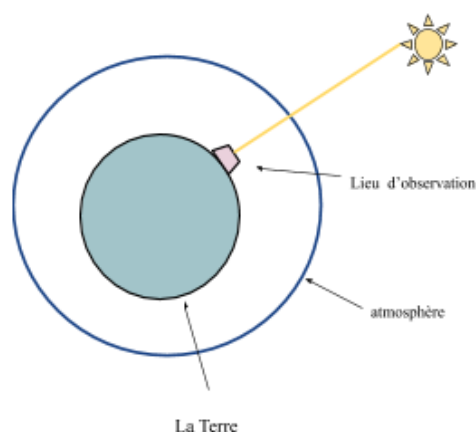


Schéma 8, rayons solaires traversant la hauteur de l'atmosphère

Conclusion

Grâce à ce projet, nous avons pu entrer dans le monde passionnant de l'astrophysique et comprendre les techniques d'analyses qui servent ensuite à étudier l'atmosphère des exoplanètes.

Pour aller plus loin, nous pourrions compléter nos expériences en obtenant un spectre du Soleil dans l'infrarouge et ainsi observer d'autres raies d'absorption. Cela permettrait d'être plus précis dans l'analyse des composants de l'atmosphère.

Nous attendons avec impatience le lancement de ARIEL, le télescope qu'enverra l'ESA pour étudier les atmosphères des exoplanètes !

Remerciements :

Tout d'abord, nous tenons à remercier Mme MICHEL, notre professeure de Physique, qui nous a encouragées et soutenues tout au long du projet (restant tard après l'école et assurant l'approvisionnement en gâteaux ☺). De plus, nous remercions Eloise BIRCHALL et Brad TUCKER de l'ANU (Australian National University) pour leur soutien et regards professionnels sur notre projet. Un grand merci à M. et Mme HALAS qui nous ont permis de passer des journées entières chez eux pour travailler sur le mémoire. Merci beaucoup au Mount Stromlo Observatory et à son personnel qui nous a accueillis et nous a fait faire une visite de l'observatoire. Nous tenons aussi à remercier notre ami et collègue Matthias GUILLIN, qui est rentré en France peu après le début de notre projet mais qui a toujours continué à nous soutenir et à corriger nos nombreuses fautes d'orthographe.

Finalement, nous voulons également remercier Professeur Tim SENDEN, Directeur de l'école de Physique de l'ANU, qui a généreusement proposé de payer nos billets pour nous permettre de participer à la finale en France, une expérience incroyable.

Bibliographie

- Rackham, B., Wagner, K., Mace, M. and Krijt, S. *EOS Blog*. Earths in Other Solar Systems. <http://eos-nexus.org/eos-blog/>
- Mohamed CHAOUI ROQUAI, Caractérisation de l'aérosol à partir des mesures de l'épaisseur optique, <https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/b089bdd0-f490-48bb-a60d-b13df45747f7>
- F. Levrier, Incertitudes expérimentales, <http://ressources.agreg.phys.ens.fr/static/TP/Incertitudes.pdf>
- Calcul de la transmission spectrale atmosphérique : application à la surveillance de l'activité de étoiles faibles <http://www.astrosurf.com/buil/extinction/calcul.htm>
- Diana Dragomir (July 2018), Rayleigh scattering in the atmosphere of the warm exo-neptune GJ 3470B - <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/3-rayonnement-atmosphere/3-1-absorption-transmission-atmospherique.html>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_d%27air_\(astronomie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_d%27air_(astronomie))
- Michael Richmond, Spectroscopy of exoplanets, <http://spiff.rit.edu/classes/resceu/lectures/spectra/spectra.html>
- Michael Richmond, What can we learn from transits http://spiff.rit.edu/classes/extrasol/lectures/transit_ii/transit_ii.html
- Tony Flanders and Phillip J. Creed, Transparency and Atmospheric Extinction <https://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/transparency-and-atmospheric-extinction/>
- Nicolas Martin, La méthode Scientifique, K2-18b : eau en vue ? <https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/k2-18b-eau-en-vue>
- Nasa, Aliens Atmospheres <https://svs.gsfc.nasa.gov/11428>
- Université Paris 1, Éléments de physique du rayonnement <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/3-rayonnement-atmosphere/3-1-absorption-transmission-atmospherique.html>
- GUEZOUL MOUNIR, DETERMINATION DES PARAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA TURBIDITÉ DE L'ATMOSPHERE α ET β D'ÅNGSTRÖM EN UTILISANT LES MODÈLES DE TRANSFERT RADIATIFS <https://bu.umc.edu.dz/theses/physique/GUE6028.pdf>
- Loïc EVAIN, Steeve DUCAMP, Pauline PACAUD - Nuages d'eau Nuages de glace Amas de poussières Vus d'en haut Vus d'en bas Vus de l'intérieur https://www.google.com/url?client=internal-uds-cse&cx=016292247615970621037:h4qej-brs5i&q=https://odpf.org/images/archives_docs/14eme/memoires/gr-16/memoire.pdf&spha=U&ved=2ahUKEwiczOePgffjAhUr7nMBHV87BWEQFjACegQIABAB&usg=AOvVaw1F0Qz0zmK6TU59c5WjLv8H
- Météo France - Couleur du ciel ; <http://education.meteofrance.fr/college/activites-experimentales/la-couleur/couleur-du-ciel>
- Diogo Soga, Daniel Moser Faes, Looking to the blue sky with colored patterns http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000100605&lng=pt&nrm=iso&tlng=en
- R Nave, Blue Sky <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>
- Physique à main levée, Uniciel, <http://phymain.unisciel.fr/bleu-du-ciel-et-soleil-couchant/>
- Futura Science, Ariel, une mission pour étudier l'atmosphère des exoplanètes <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/exoplanete-ariel-mission-etudier-atmosphere-exoplanetes-70628/>
- Comsol, Bridget P., Photo Rayleigh <https://www.comsol.com/blogs/happy-birthday-lord-rayleigh/>
- NASA, NAOJ, Rayleigh scattering in exoplanet atmospheres <https://exoplanets.nasa.gov/resources/168/rayleigh-scattering-in-exoplanet-atmospheres/>
- Transparency and Atmospheric Extinction, Tony Flanders and Phillip J. Creed <https://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/transparency-and-atmospheric-extinction/>