

Complément - La couleur du ciel

Introduction

Les phénomènes colorés dans le ciel, autrefois à l'origine de mythes et légendes, sont aujourd'hui bien compris mais restent une source d'émerveillement de par leur diversité et le caractère exceptionnel de certains d'entre eux (arc-en-ciel, halos, aurores boréales, rayon vert...). D'origines très variées, ces phénomènes optiques résultent d'un ensemble de phénomènes physiques liés aux rayonnements émis par le soleil et à leur interaction avec l'atmosphère terrestre.

Le principal paramètre qui détermine le mécanisme physique mis en jeu est la taille des particules de l'atmosphère interagissant avec le rayonnement solaire, comme le montre le tableau ci-dessous.

Type de particule	Diamètre des particules	Mécanisme mis en jeu	Phénomènes observés
Molécules d'air	1 Å à 1 nm	Diffusion de Rayleigh	Bleu du ciel, rouge du crépuscule
Aérosols (polluants)	de 10 nm à 1 μm	Diffusion de Mie	Brouillard brun ("smog")
Gouttelettes d'eau ou microcristaux	de 10 μm à 100 μm	Diffusion de Mie et optique géométrique	Nuages blancs et neige blanche
Gouttes d'eau ou cristaux de neige	de 100 μm à 10 mm	Optique géométrique	Arc-en-ciel et halos

FIGURE 1 – Les phénomènes de diffusion atmosphérique dépendent de la taille des particules diffusantes.

Dans toute la suite, nous focaliserons notre étude sur la diffusion de Rayleigh dans l'atmosphère, et nous nous intéresserons en particulier à l'origine du bleu du ciel en pleine journée et du rougeoiement du ciel au soleil couchant.

I Propriétés du rayonnement solaire et de l'atmosphère

Le soleil émet en continu des particules ionisées ainsi qu'un rayonnement dont le spectre s'étend de l'UV à l'infrarouge, comme le montre la figure ci-dessous.

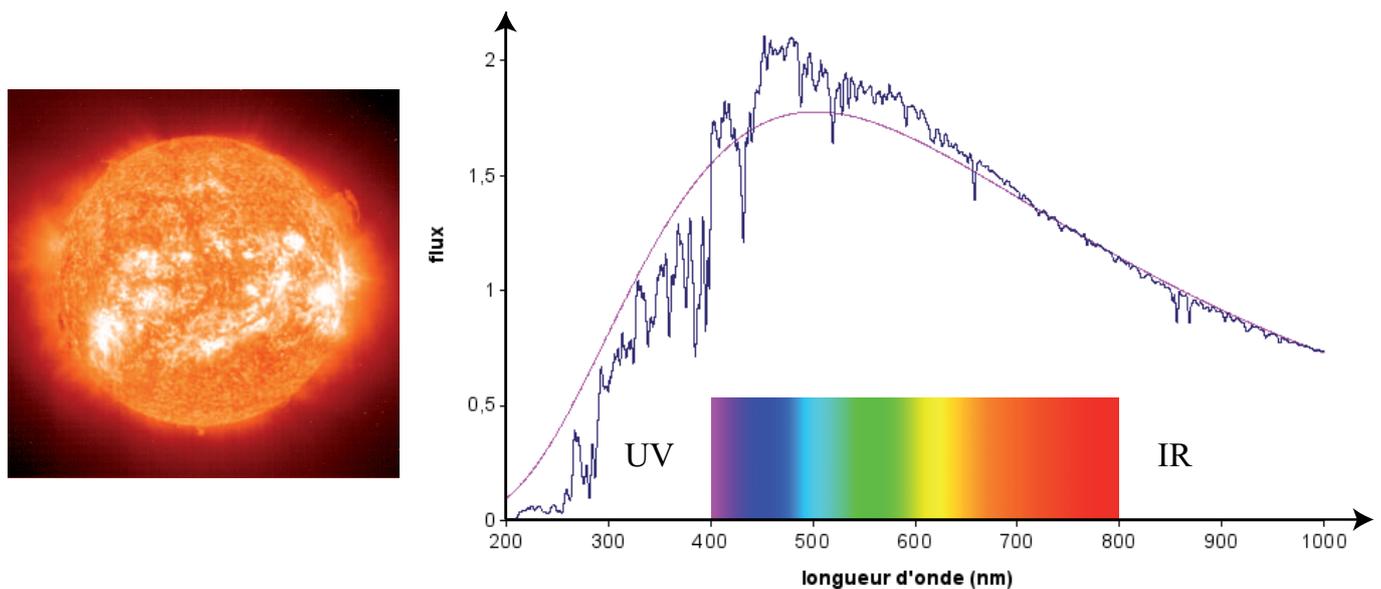


FIGURE 2 – Spectre d'émission du soleil. L'unité de flux est $W.m^{-2}.nm^{-1}$ ce qui correspond à l'éclairement - par unité d'intervalle spectral en nm - reçu en un point proche de la Terre, hors de l'atmosphère.

Le rayonnement solaire nous parvenant à la surface de la Terre est presque exclusivement réduit au visible. En effet, d'après la figure ci-dessous :

- l'atmosphère absorbe les ultraviolets de courte longueur d'onde (UV-B et UV-C) en particulier grâce à la couche d'ozone.
- l'atmosphère absorbe les infrarouges en particulier grâce à l'humidité de l'air.

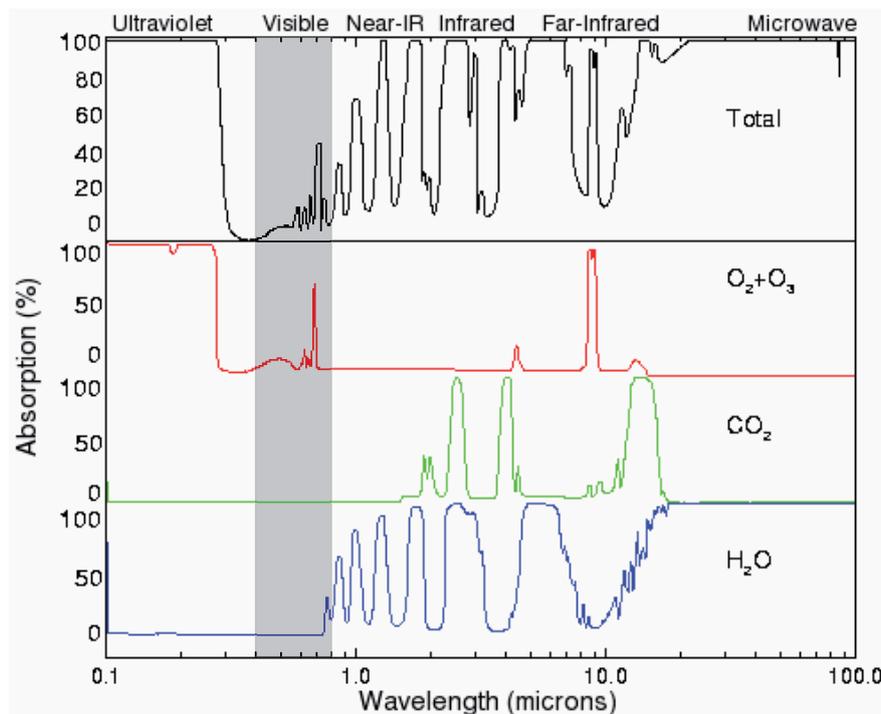


FIGURE 3 – Spectre d'absorption de l'atmosphère et de ses principaux constituants.

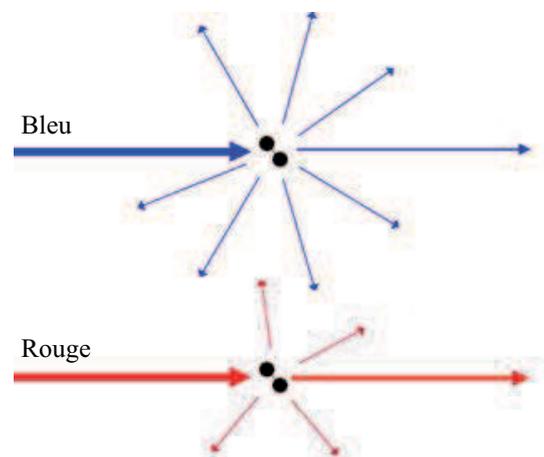
II Le bleu du ciel

Les théories de la couleur bleue du ciel ont foisonné au cours des âges. Les anciens Perses croyaient par exemple que la Terre reposait sur un saphir dont l'éclat bleuté se reflétait dans la couleur du ciel. On a prétendu plus récemment que la lumière était diffusée par les particules en suspension, comme les poussières, les aérosols, les cristaux de glace ou les gouttes de d'eau, de sorte qu'un air très pur ne diffuserait plus la lumière. On a également supposé que les couleurs du ciel résultaient de l'absorption des rayonnements rouges par l'eau et l'ozone atmosphérique.

C'est Rayleigh, vers 1900, qui, suite aux observations de Tyndall faites un demi siècle plus tôt, a étudié les lois de la diffusion de la lumière et a proposé de modéliser les molécules de l'atmosphère comme des dipôles électriques oscillants. Il a ainsi prédit une évolution de la puissance diffusée en $1/\lambda^4$, indiquant que le violet est donc environ seize fois plus diffusé que le rouge.

Par ailleurs, la diffusion de Rayleigh est un phénomène linéaire et élastique, de sorte que la longueur d'onde diffusée est la même que la longueur d'onde incidente, et que toute la puissance absorbée est réémise.

Enfin, si la diffusion n'est pas tout à fait isotrope comme nous le reverrons par la suite, nous pouvons considérer pour l'instant que la lumière diffusée est réémise dans toutes les directions de l'espace.



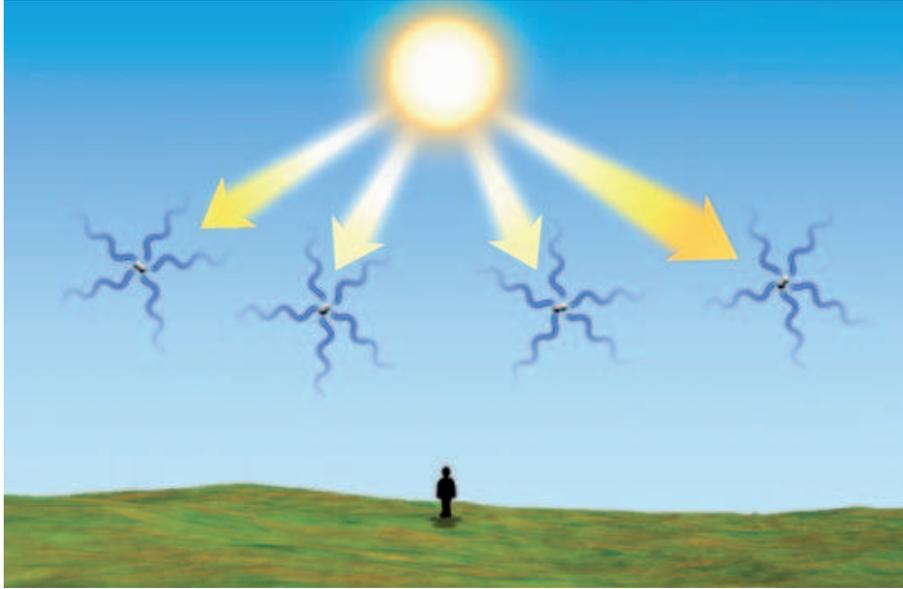


FIGURE 4 – Le ciel nous apparaît bleu car les innombrables molécules d'air diffusent davantage les courtes longueurs d'onde de la lumière visible. Nous percevons par conséquent une lumière bleutée nous parvenant de toutes les directions du ciel.

Plusieurs facteurs permettent d'expliquer notre perception d'une couleur bleue et non violette du ciel par beau temps. Le spectre du rayonnement solaire (cf fig.1) présente tout d'abord un maximum dans le vert vers 500nm . D'autre part, l'œil humain en vision photopique présente un pic de sensibilité aux environs de 550 nm , tandis que sa sensibilité au violet est 100 fois plus faible.

III Le rouge du crépuscule

D'après ce que nous venons de voir, ce sont surtout les rayonnements bleus qui sont diffusés, et la lumière réémise dans le prolongement de la direction incidente s'appauvrit en bleu. Elle s'enrichit donc en rouge (on rappelle que la diffusion Rayleigh est linéaire et qu'un rayonnement incident ne comportant plus de bleu ne peut en générer à nouveau).

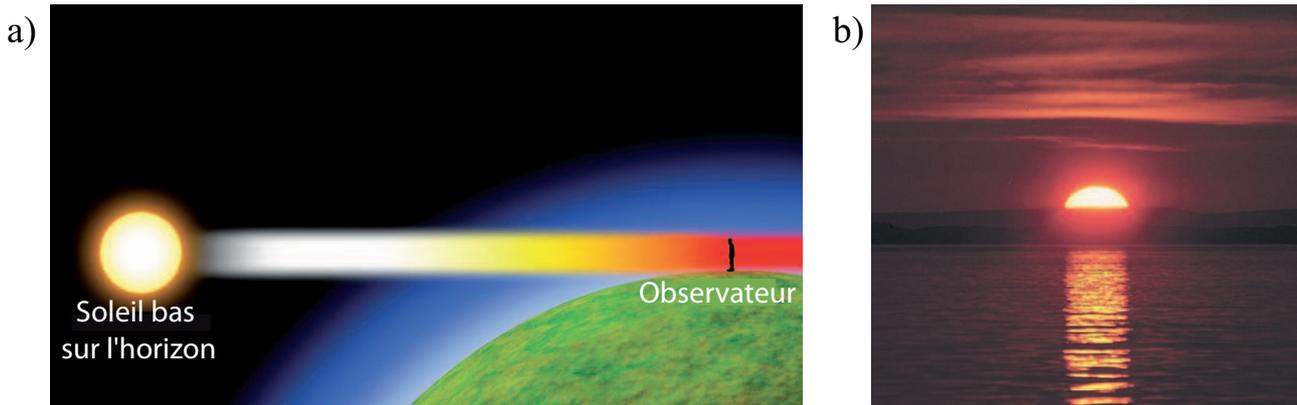


FIGURE 5 – Le ciel nous apparaît rouge au crépuscule ou à l'aube car la couche d'air traversée étant plus importante que lorsque le soleil est au zénith, la lumière diffusée dans l'axe s'appauvrit en bleu, puis en vert et en jaune, et est donc perçue rouge.

Ce phénomène n'est pas perceptible lorsqu'on regarde en direction du soleil vers midi car la lumière solaire n'a pas traversé l'atmosphère sur une assez longue distance ; la diffusion Rayleigh est relativement faible et le soleil apparaît blanc.

En revanche, lorsque le soleil est bas sur l'horizon, le trajet de la lumière solaire à travers l'atmosphère est plus important ; lorsque qu'il est par exemple situé à 4° au dessus de l'horizon, la lumière solaire doit traverser une couche 12 fois plus épaisse que lorsque le soleil est au zénith. Les radiations lumineuses rencontrent donc davantage de molécules pendant le trajet, et il y a davantage de diffusion. La lumière qui arrive dans l'axe du soleil s'appauvrit en bleu, puis en vert ; le soleil apparaît donc rouge et moins lumineux.

Supposons par exemple que le faisceau initial soit composé de 1000 photons rouges et de 1000 photons bleus ; lorsqu'il traverse une zone de molécules d'air, les photons bleus diffusés dans toutes les directions sont environ huit fois plus nombreux que les photons rouges. D'autre part, cette zone étant essentiellement constituée de vide, tous les photons incidents ne sont pas diffusés. Admettons que parmi 80 photons bleus et les 10 photons rouges diffusés dans toutes les directions de l'espace, huit photons bleus et un photon rouge le soient dans la direction d'incidence ; le faisceau se propageant dans cette direction serait composé de 928 photons bleus et de 991 photons rouges. Il apparaît bien "rougi".

IV Le ciel blanc à l'horizon

Par beau temps, de jour, le bleu du ciel s'éclaircit vers l'horizon et celui-ci est généralement bordé d'une bande blanche sur environ cinq degrés d'angle.

Comme les molécules d'air situées au voisinage de l'horizon diffusent aussi la lumière selon le mécanisme de Rayleigh, pourquoi le ciel n'est-il pas bleu ?

Ce phénomène résulte de la longueur supérieure du trajet des rayons lumineux dans l'atmosphère lorsqu'on regarde vers l'horizon : la lumière est diffusée d'innombrables fois avant d'atteindre l'observateur. Une partie de la lumière qui nous parvient est diffusée par des molécules d'air proches de nous (voir figure ci-dessous), et nous communique une sensation de bleu. Des molécules plus éloignées diffusent également de la lumière bleue vers nous, mais celle-ci est ensuite rediffusée par les molécules plus proches de nous. Or, à chaque nouvelle diffusion, la partie du faisceau diffusée vers l'avant - c'est à dire vers nous - s'appauvrit en bleu ; après de nombreuses diffusions, cette lumière est donc rougie. L'ensemble des diffusions engendre donc une sensation de lumière blanche que l'on observe juste au dessus de l'horizon puisqu'on retrouve pratiquement la totalité du spectre par superposition.

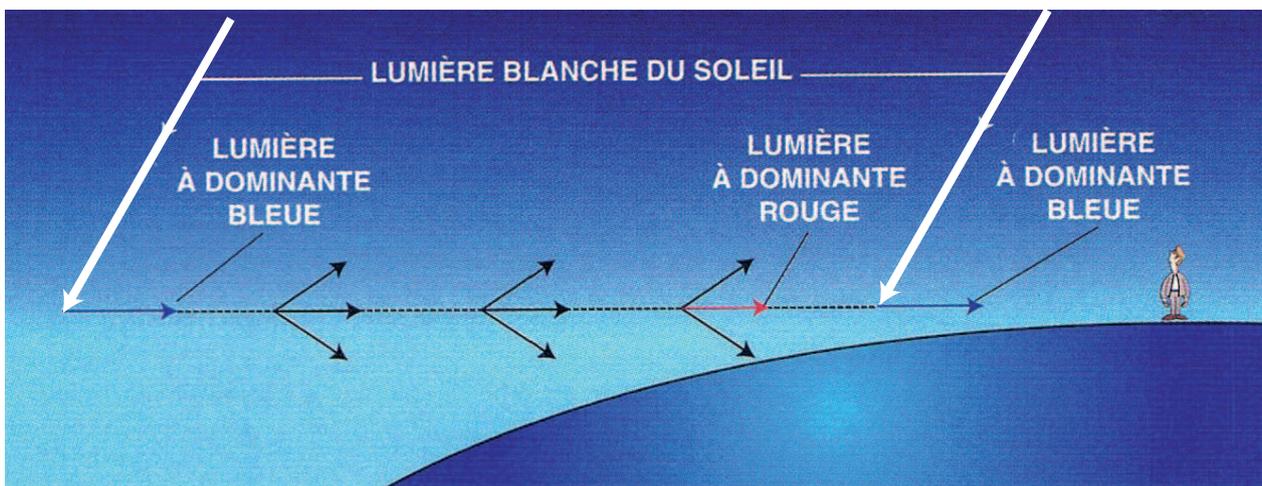


FIGURE 6 – Le ciel nous apparaît blanc à l'horizon par beau temps à cause de la superposition de la lumière bleue diffusée proche de nous et de la lumière rouge diffusée sur une grande épaisseur d'atmosphère.

V Le rayon vert

Parfois, quand les conditions atmosphériques sont favorables, on peut avoir la chance d'observer un rayon vert au coucher du Soleil juste avant que celui-ci ne disparaisse sous l'horizon.

En plus du phénomène de diffusion dont nous venons de parler, il faut maintenant considérer la réfraction des faisceaux lumineux par l'atmosphère.

Lorsque nous observons le Soleil au coucher, celui-ci a déjà disparu sous l'horizon, mais sa lumière nous parvient car elle est réfractée (déviée) par l'atmosphère (principe du mirage).

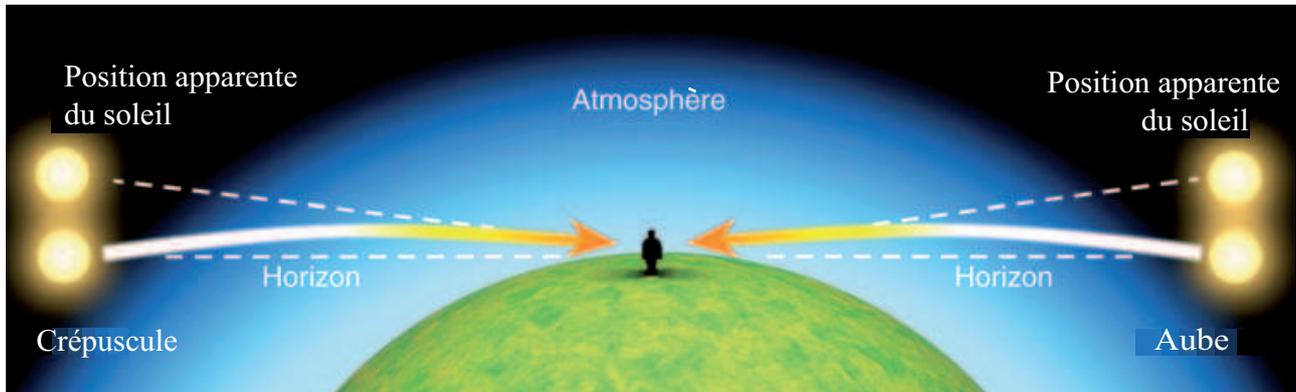


FIGURE 7 – L'atmosphère présentant un gradient d'indice à cause du gradient de densité de l'air, la position apparente du soleil s'écarte assez nettement de sa position réelle lorsqu'il est proche de l'horizon.

Du fait de la dispersion de l'atmosphère, les différentes couleurs qui composent la lumière blanche ne sont pas déviées avec le même angle. Le rouge est moins dévié que le vert ou le bleu, il disparaît donc le premier derrière l'horizon, suivi de l'orangé puis du jaune. Il ne reste alors plus que le vert, le bleu et le violet. On voit parfois, lorsque l'atmosphère est très pure, le fameux rayon vert. On ne visualise pas de rayon bleu ou de rayon violet car ces couleurs sont les plus diffusées et n'atteignent donc pratiquement pas l'œil de l'observateur.

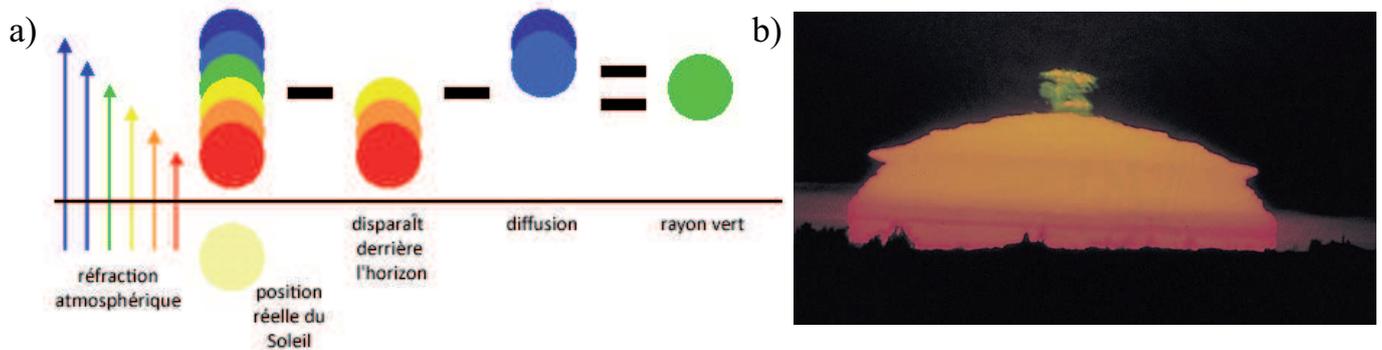


FIGURE 8 – a) L'interprétation de l'existence du fameux rayon vert fait appel aux phénomènes de réfraction et de diffusion. b) Le rayon vert se situe dans la partie haute du soleil; on notera comme le disque solaire est aplati à cause de la réfraction atmosphérique.

VI Polarisation du rayonnement par diffusion

Lorsqu'on regarde un ciel dégagé à travers un polariseur, celui-ci apparaît plus ou moins sombre en fonction de l'angle que fait la direction d'observation par rapport au soleil. On peut même quasiment éteindre la lumière incidente lorsqu'on regarde à 90 degrés par rapport au soleil. La diffusion de la lumière est donc un phénomène polarisant puisque la lumière émise par le soleil n'est pas naturellement polarisée.

Ceci est dû à l'anisotropie du processus de diffusion des molécules d'air de l'atmosphère. Ces dernières se comportent comme de petits dipôles électriques oscillants excités à la même fréquence et suivant la même

direction que le champ électrique de l'onde solaire incidente.

Les ondes électromagnétiques issues du soleil se propagent dans l'atmosphère de façon transverse de sorte que le champ électrique incident est contenu dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Cette onde étant non polarisée, la direction du champ électrique incident dans ce plan est quelconque et varie aléatoirement au cours du temps.

Prenons l'exemple de l'orientation de la figure b) ci-dessous : une onde lumineuse se propageant suivant (Oy) induit des dipôles qui oscillent de façon aléatoire dans toutes les directions du plan transverse (xOz) . La distribution du rayonnement diffusé est alors en moyenne invariante par rotation autour de l'axe (Oy) .

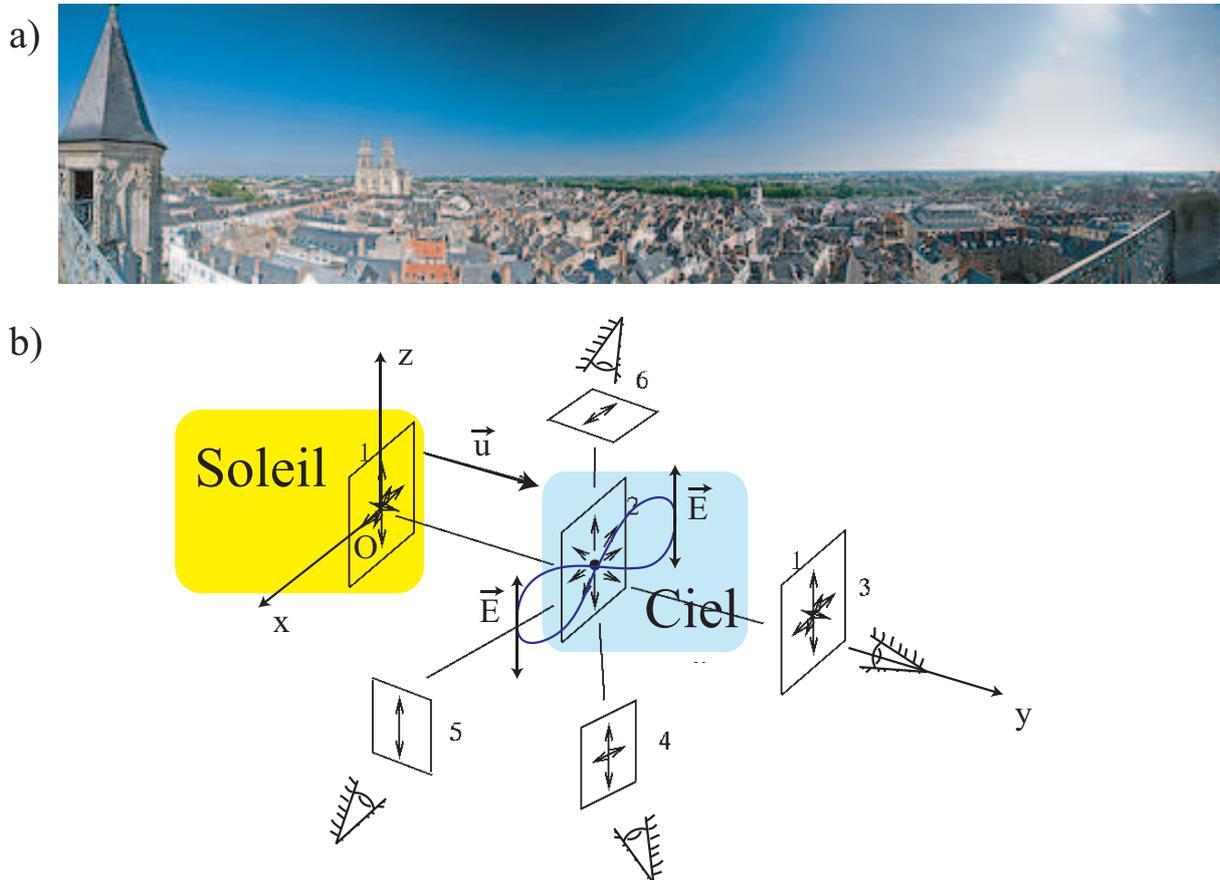


FIGURE 9 – Illustration du phénomène de polarisation par diffusion. a) Suivant la direction observée, le ciel apparaît plus ou moins sombre au travers de lunettes polarisantes, alors qu'il apparaît uniforme sans lunettes. La lumière du soleil diffusée par le ciel est donc partiellement polarisée. b) la lumière du soleil, non polarisée, fait vibrer les molécules de l'atmosphère dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière. Le degré de polarisation de l'onde diffusée varie donc en fonction de la direction d'orientation.

Les ondes diffusées¹ se comportant localement comme des ondes planes transverses, le rayonnement réémis dans la direction (Oy) n'est pas polarisé alors que le rayonnement diffusé perpendiculairement à (Oy) est polarisé rectilignement. Pour d'autres directions d'observation, la lumière est partiellement polarisée.

Conclusion

La liste des phénomènes colorés dans l'atmosphère développée ici est loin d'être exhaustive puisque nous n'avons évoqué que les manifestations liées à la diffusion de Rayleigh et que bien d'autres aspects chromatiques

1. Par ailleurs, bien que cet argument ne soit pas nécessaire pour comprendre la polarisation de la lumière diffusée par le ciel, on notera que le rayonnement réémis par diffusion se fait préférentiellement dans le plan équatorial du dipôle excité et qu'aucun rayonnement n'est diffusé dans la direction du dipôle; ceci est symbolisé sur la figure précédente par la courbe bleue, appelée "indicatrice de rayonnement", dans l'exemple d'un dipôle excité verticalement.

sont observables. Pour ne citer qu'un autre exemple bien connu, les propriétés géométriques et les couleurs des arc-en-ciel et des halos atmosphériques trouvent leur origine dans la présence de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace de taille grande devant la longueur d'onde et peuvent être décrits précisément à l'aide de l'optique géométrique.

Questions

- (a) Par beau temps, pourquoi le bleu du ciel au zénith est-il plus profond en montagne qu'au bord de la mer ?
 (b) Pourquoi le ciel est-il noir la nuit ?
 (c) Pourquoi le ciel est-il noir sur la Lune ?



- (a) Pourquoi le ciel apparaît-il souvent bleuté au-dessus des grandes forêts de résineux ou d'eucalyptus ?
 (b) Pourquoi certaines villes sont-elles parfois plongées dans un brouillard brun ("brown smog" en anglais) lors de pics de pollution atmosphérique ?

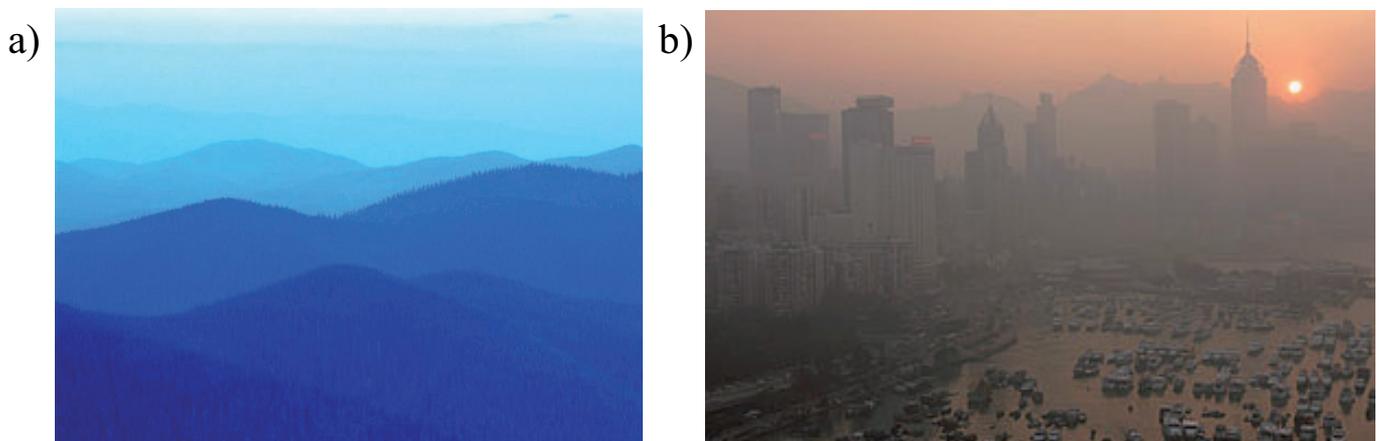


FIGURE 10 – Photos (a) des Blue Mountains en Australie, et (b) du port de Hong-Kong en Chine.

- La partie gauche de la photo de la page suivante a été prise au lever du soleil alors que la partie droite a été prise au coucher du soleil. Pourquoi le ciel est-il plus rouge le soir que le matin ?
- Expliquer la présence d'une colonne lumineuse sous le soleil dans la figure 4b).
- Lorsqu'on souhaite être vu dans le brouillard, est-il préférable de se munir d'une lanterne rouge ou bleue ?
- Lorsqu'on pointe une étoile du ciel avec un télescope, la direction de l'instrument correspond-elle réellement à la direction de l'astre ?
- On propose de réaliser l'expérience suivante (cf fig (a) ci-dessous) : on mélange dans une cuve quelques gouttes d'acide chlorhydrique concentré (6 mol.L^{-1}) et du thiosulfate de sodium (20 g.L^{-1}). Ce dernier se dismute en milieu acide pour former de fins cristaux de soufre qui vont diffuser la lumière et jouer ainsi un rôle analogue aux molécules du ciel. On éclaire enfin la cuve à l'aide d'un faisceau de lumière blanche non polarisée.



FIGURE 11 – Un même endroit à deux moments de la journée : à l'aube à gauche et au crépuscule à droite.

- (a) Écrire l'équation bilan de cette dismutation. On donne : $E^0 \left(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}(\text{aq})/\text{S}(\text{s}) \right) > E^0 \left(\text{SO}_4^{2-}(\text{aq})/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}(\text{aq}) \right) = 1.5 \text{ V}$.
- (b) Caractériser la lumière - c'est à dire sa couleur et son état de polarisation - transmise dans l'axe du faisceau incident et suivant une direction orthogonale à ce dernier.

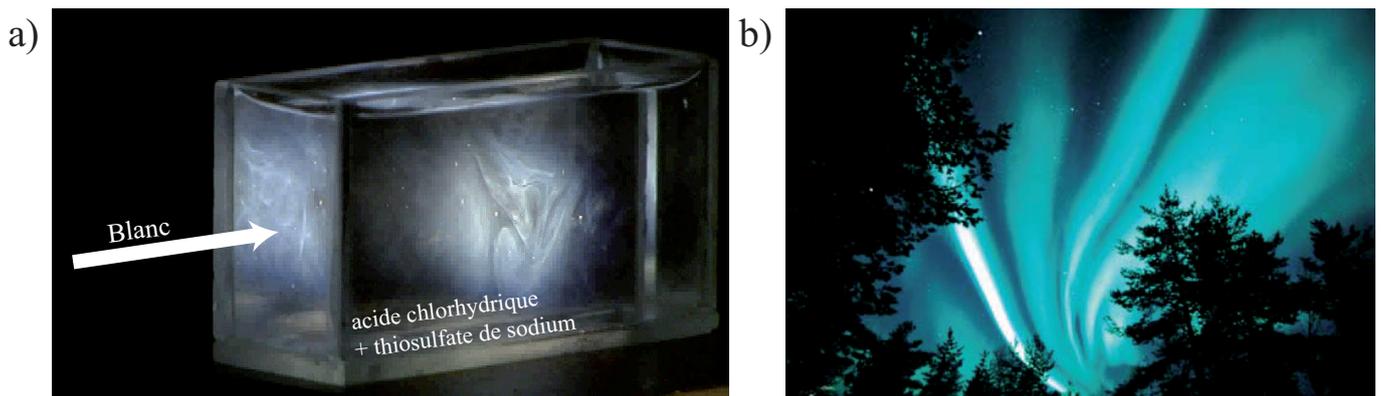
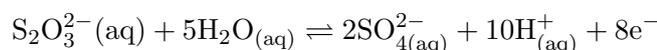
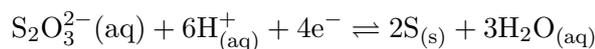


FIGURE 12 – a) Expérience permettant de reproduire les phénomènes de diffusion atmosphériques. b) Une aurore boréale observée dans le nord de la Finlande.

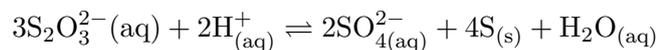
8. Peut-on expliquer les phénomènes d'aurores boréales (voir figure (b) ci-dessus) en se basant sur la diffusion du rayonnement électromagnétique? Quelle est leur origine?
9. Sachant que le rayonnement thermique émis par les astres vérifie très bien la loi de Wien donnée par $\lambda_m T = cste$, où λ_m est la longueur d'onde du maximum d'émission et T est la température de surface de l'astre en degrés Kelvin, expliquer pourquoi le CO_2 est qualifié de "gaz à effet de serre"? On s'appuiera sur les figures 1 et 2 pour répondre à la question le plus précisément possible, sachant que la température de la surface du soleil est d'environ 6000 K.

Réponses aux questions

- En montagne, le ciel est d'un bleu plus soutenu car la couche sur laquelle s'est faite la diffusion est plus faible : on est "plus près du noir que du blanc".
 - Sur Terre, la nuit, le ciel est noir car la diffusion par l'atmosphère de la lumière émise par les astres autres que le soleil est très faible.
 - La Lune n'ayant pas d'atmosphère, le ciel y est noir même en plein jour !
- Au dessus de certaines forêts de résineux ou d'eucalyptus, l'air apparaît bleuté à cause de la présence de très fines gouttelettes d'hydrocarbures en suspension dans l'air (le plus souvent du terpène), qui se combinent chimiquement avec l'ozone de l'atmosphère pour générer de très fines particules d'environ $0.2 \mu\text{m}$ de diamètre qui diffusent la lumière². Cet effet accentue le bleuissement du ciel juste au-dessus de la forêt.
 - En présence de particules en suspension dans l'air - aérosols ou même poussières issues d'une éruption volcanique - la diffusion est nettement plus importante. Le phénomène de rougeoiement au coucher du soleil s'en trouve accentué, et on observe une teinte rougeâtre même en pleine journée. De plus, la présence de telles particules fines réduit la luminosité ambiante puisqu'elles absorbent une partie de la lumière. L'ensemble contribue à donner une couleur brune au ciel et une impression de brouillard.
- En fin de journée, la chaleur du soleil a localement fait évaporer une partie de l'eau présente à la surface du globe, et la diffusion est donc plus importante au crépuscule qu'à l'aube. Les couchers de soleil sont donc plus rouges en bord de mer à cause de la présence de gouttelettes d'eau ou de microcristaux de sel dans l'air.
- Il s'agit ici d'une simple réflexion de la lumière du soleil sur la surface de l'eau qui n'est pas plane à cause des vaguelettes présentes sur la mer. Sans aucune perturbation, nous verrions une réflexion parfaite du soleil (effet miroir).
- La lumière bleue est plus diffusée que la lumière rouge et on choisira donc une lanterne rouge, au même titre que les feux anti-brouillard des voitures sont rouges.
- Lorsqu'on pointe une étoile dans le ciel, le télescope n'indique pas la direction de l'étoile sauf si celle-ci est située au zénith, à cause de l'effet de la réfraction de l'atmosphère.
- La réaction de dismutation du thiosulfate peut être obtenue à partir des demi-équations électroniques ci-dessous, sachant que l'oxydant du couple de potentiel le plus fort réagit sur le réducteur du potentiel le plus faible :



où les demi-équations ont été écrites en milieu acide car la solution a été fortement acidifiée. L'équation bilan s'écrit donc :



- Intéressons nous tout d'abord à la couleur des deux faisceaux. La diffusion se faisant dans toutes les directions principalement pour le bleu, la solution apparaîtra bleutée lorsqu'elle est observée de côté. En revanche, la lumière observée dans l'axe apparaîtra rouge car le bleu et le vert ont été diffusés presque intégralement si la cuve est suffisamment longue. On retrouve bien les analogies du ciel bleu en journée et du rougeoiement au coucher du soleil.

Quant à la polarisation, toujours par analogie avec le cas du ciel, les dipôles que constituent les cristaux de soufre vont être excités dans une direction quelconque du plan transverse au faisceau

2. On notera que la diffusion de Mie intervient également dans ce phénomène puisque les particules ont une taille plus importante - ce type de diffusion diffère de la diffusion de Rayleigh principalement au niveau de l'indicatrice de rayonnement qui dépend de la longueur d'onde.

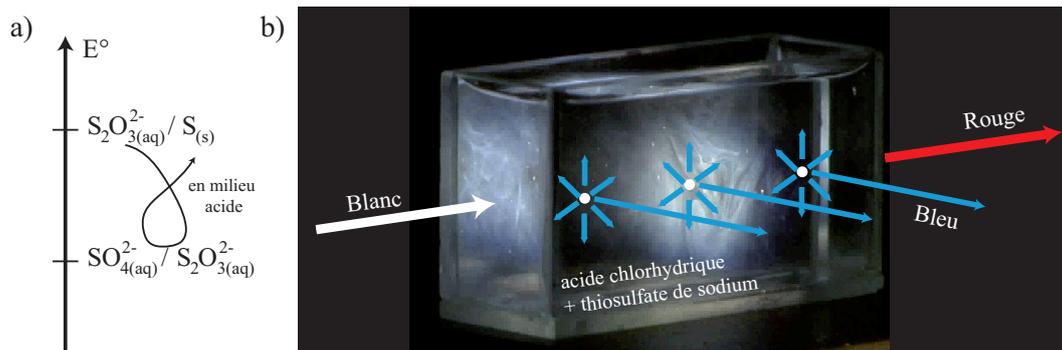


FIGURE 13 – a) Échelle des potentiels et règle du "gamma". b) Les couleurs dans l'expérience du soleil couchant.

incident et vont donc rayonner une onde non polarisée dans l'axe du faisceau, une onde polarisée rectilignement orthogonalement à l'axe, et partiellement polarisée dans toutes les autres directions. On devrait en particulier constater qu'on peut pratiquement éteindre la lumière bleutée émise latéralement par la cuve avec un polariseur. Ce ne sera pas le cas si on essaye d'éteindre la lumière arrivant de biais.

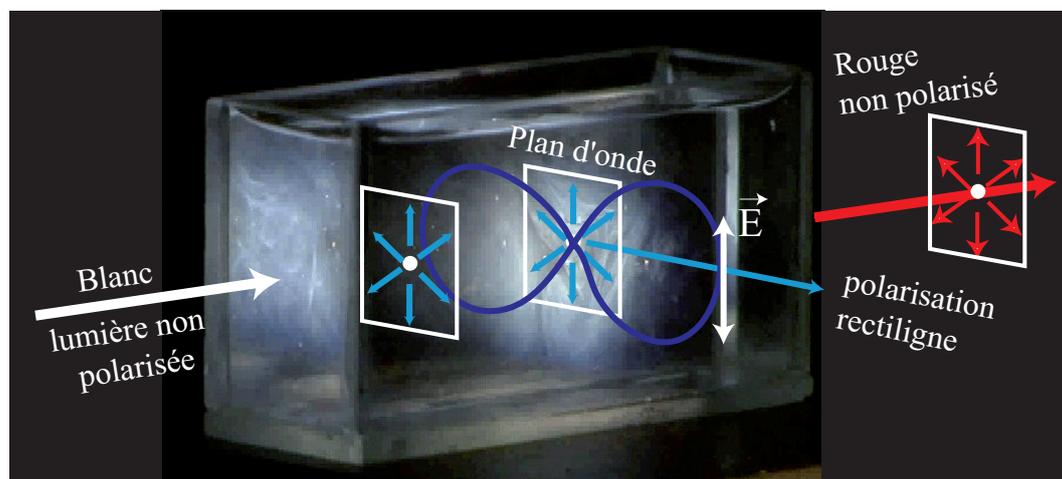
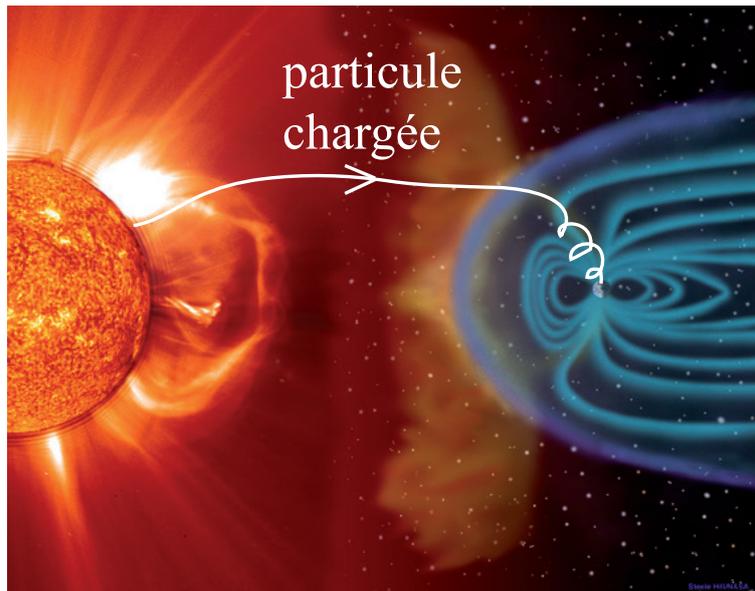


FIGURE 14 – La polarisation dans l'expérience du soleil couchant.

8. Une aurore boréale est un phénomène lumineux se produisant au niveau des pôles et qui correspond à l'ionisation des molécules de la haute atmosphère sous l'effet de particules chargées - électrons, protons et ions positifs - issues du vent solaire. Alors excitées, les molécules de l'ionosphère se dés excitent et émettent une lumière caractéristique du gaz ionisé : oxygène, ozone, hydrogène, azote ... La localisation de ces phénomènes s'explique par le fait que la plupart des particules du vent solaire sont absorbées ou déviées hors de l'atmosphère sous l'effet de la magnétosphère, mais certaines s'enroulent autour des lignes de champ magnétique pour atteindre les zones proches des pôles magnétiques terrestres.
9. L'effet de serre repose sur un phénomène non linéaire : les rayonnements incidents sur la Terre sont absorbés, puis réémis à une autre longueur d'onde caractéristique de la température de sa surface. Ce rayonnement décrit par la loi de Planck, dite "rayonnement du corps noir", se situe pour la Terre dans l'infrarouge, c'est à dire exactement là où la molécule de CO_2 présente des bandes d'absorption (vers $3-4 \mu m$ et $15 \mu m$). Le rayonnement réémis par la Terre est donc piégé et contribue au réchauffement climatique.

De manière plus quantitative, on peut écrire la loi de Wien $\lambda_m T = cste$ pour le soleil et la Terre, de sorte que le maximum d'émission pour la Terre se situe bien à :

$$\lambda_{m, Terre} = \frac{\lambda_{m, Soleil} T_{Soleil}}{T_{Terre}} \simeq \frac{500 \times 10^{-9} \times 6000}{300} = 10 \mu m$$



Bibliographie

- [1] C. Donald Ahrens, *Meteorology Today*, Thomson, Brooks-Cole (2006).
- [2] Jearl Walker, *Les couleurs du ciel*, Pour la science n° 27 (2000).