

# TDEM8 – Rayonnement dipolaire électrique et diffusion

## 0 Exercices classiques vus en cours :

**A.1.c :** Interprétation physique de l'approximation  $a \ll \lambda$

**A.2.b :** Analyse des symétries et des invariances – Analyse dimensionnelle - Structure locale d'onde plane

**A.3.a-b-c :** Vecteur de Poynting → anisotropie du rayonnement et expression de la puissance moyenne

Capacités exigibles	Ch EM8	TD EM8
<p><b>Champ électromagnétique rayonné par un dipôle oscillant dans la zone de rayonnement. Puissance rayonnée.</b>                      Justifier l'intérêt du modèle du dipôle oscillant et citer des exemples dans différents domaines.                      Formuler et commenter les approximations reliant les trois échelles de longueur pertinentes.                      Analyser la structure du champ électromagnétique rayonné, les expressions des champs étant fournies, en utilisant des arguments généraux : symétrie, conservation de l'énergie et analyse dimensionnelle.                      Effectuer un bilan énergétique, les expressions des champs étant fournies.                      Représenter l'indicatrice de rayonnement.                      Détecter une onde électromagnétique rayonnée.</p>	•	•

### Données pour l'ensemble des exercices :

♦  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$  et  $\epsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

♦ Dans la zone de rayonnement, le champ électromagnétique créé par un dipôle électrique oscillant de moment dipolaire  $\vec{p}(t) = p(t)\vec{u}_z = p_0 \cdot \cos(\omega t + \psi) \vec{u}_z$  est :

$$\vec{E}(M, t) = \frac{\mu_0 \sin(\theta)}{4\pi r} \cdot \ddot{p} \left( t - \frac{r}{c} \right) \cdot \vec{u}_\theta = - \frac{\mu_0 \omega^2 \sin(\theta)}{4\pi r} \cdot p_0 \cdot \cos(\omega t - kr + \psi) \vec{u}_\theta$$

$$\vec{B}(M, t) = \frac{\mu_0 \sin(\theta)}{4\pi r c} \cdot \ddot{p} \left( t - \frac{r}{c} \right) \cdot \vec{u}_\varphi = - \frac{\mu_0 \omega^2 \sin(\theta)}{4\pi r c} \cdot p_0 \cdot \cos(\omega t - kr + \psi) \vec{u}_\varphi$$

avec  $\omega = kc$  et  $\ddot{p} = \frac{d^2 p}{dt^2}$

## 1 Zone statique et zone de rayonnement

On donne l'expression du champ électromagnétique créé dans le vide par un dipôle électrique oscillant  $\vec{p}(t) = p_0 \cos(\omega t) \vec{u}_z$  placé en O, en un point de coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$  (avec  $r \gg \ell$ , taille caractéristique du dipôle) :

$$\vec{E} = \frac{p_0 \cos \theta}{2\pi \epsilon_0 r} \left( \frac{1}{r^2} \cos(\omega t - kr) - \frac{\omega}{cr} \sin(\omega t - kr) \right) \vec{u}_r$$

$$+ \frac{p_0 \sin \theta}{4\pi \epsilon_0 r} \left( \frac{1}{r^2} \cos(\omega t - kr) - \frac{\omega}{cr} \sin(\omega t - kr) - \frac{\omega^2}{c^2} \cos(\omega t - kr) \right) \vec{u}_\theta,$$

et

$$\vec{B} = \frac{p_0 \sin \theta}{4\pi \epsilon_0 c r} \left( - \frac{\omega}{cr} \sin(\omega t - kr) - \frac{\omega^2}{c^2} \cos(\omega t - kr) \right) \vec{u}_\varphi,$$

en notant  $k = \frac{\omega}{c}$ .

**1.** Vérifier l'homogénéité de ces expressions.

**2.** Simplifier ces expressions dans le cas où  $kr \ll 1$  en ne gardant pour chaque champ que le(s) terme(s) sinusoïdal(aux) de plus forte amplitude. Commenter les expressions simplifiées. Comparer les densités volumiques moyennes d'énergie électrique et magnétique dans ce cas.

**3.** Reprendre la questions précédente dans le cas où  $kr \gg 1$ .

## 2 Modèle de l'électron élastiquement lié (diffusion Rayleigh) : couleurs du ciel

Pour décrire l'interaction entre les molécules de l'atmosphère et le rayonnement électromagnétique du soleil on adopte le modèle suivant appelé *modèle de l'électron élastiquement lié* :

- les noyaux atomiques sont fixes ;
- chaque électron (de masse  $m_e$ ) est traité indépendamment des autres et considéré comme soumis, en plus de la force exercée par le champ électromagnétique, à une force de rappel élastique  $\vec{F} = -m_e \omega_0^2 \vec{r}$ , où  $\vec{r}$  est le déplacement de l'électron par rapport à sa position au repos, et à une force dissipative modélisée comme un frottement fluide  $\vec{F}_f = -\frac{m_e}{\tau} \frac{d\vec{r}}{dt}$ .

On prend pour valeurs des paramètres du modèle :  $\omega_0 = 2,0 \cdot 10^{16} \text{ rad.s}^{-1}$ ,  $\tau \simeq 10^{-8} \text{ s}$ .

**1.** On étudie le mouvement forcé d'un électron sous l'action du champ électromagnétique d'une onde excitatrice. Le champ électrique de cette onde est donné, en notation complexe, par  $\vec{E} = E_0 \exp(i(\omega t - kz)) \vec{u}_x$ . On admet que la vitesse de l'électron reste très inférieure à la vitesse de la lumière  $c$ .

a. Écrire l'équation du mouvement de l'électron en faisant une approximation classique.

b. On cherche la solution sous la forme  $\vec{r} = \vec{r}_0 \exp(i(\omega t - kz))$ . Déterminer  $\vec{r}_0$ .

c. En déduire le moment dipolaire induit par l'onde sous la forme  $\vec{p} = \vec{p}_0 \exp(i(\omega t - kz))$ .

On notera  $e$  la valeur absolue de la charge de l'électron.

d. Simplifier l'expression de  $\vec{p}_0$  en tenant compte des valeurs numériques données et sachant que l'onde excitatrice est une onde lumineuse.

e. Exprimer la puissance moyenne  $\mathcal{P}_{\text{ray}}$  rayonnée par ce dipôle oscillant en fonction de  $E_0$  et  $\omega$  et de paramètres caractéristiques du modèle.

f. Expliquer à l'aide de ce modèle la couleur bleue du ciel.

## 3 Rayonnement et perte d'énergie

Dans le modèle classique de l'atome d'Hydrogène, on considère qu'un électron est en mouvement circulaire uniforme de rayon  $r_0 = 10^{-10} m$ , à la vitesse angulaire  $\omega$  autour du proton immobile. Ce mouvement est la superposition de 2 dipôles oscillants, perpendiculaires, d'amplitude  $p_0$  et de pulsation  $\omega$ .

- 1) Exprimer puis calculer  $\omega$ ,  $p_0$  et l'énergie mécanique  $E_m$  du système.
- 2) Expliquer l'anomalie énergétique de ce modèle.

## 4 Approche documentaire : couleurs du ciel

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.

### Document 1 : Le rayonnement solaire

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 3.

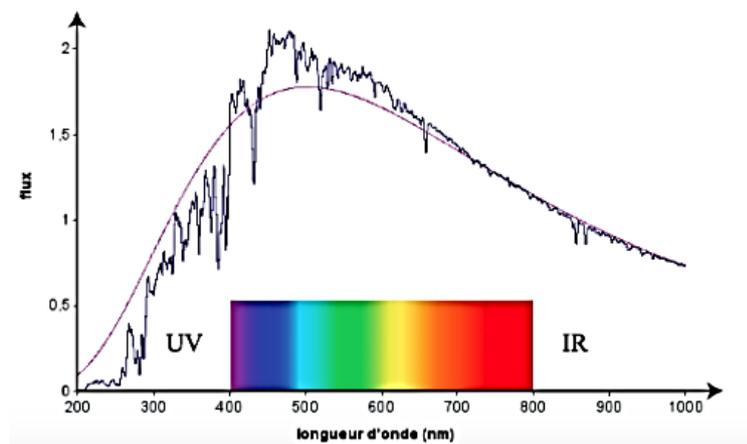


FIGURE 3 – Spectre d'émission du soleil. L'unité de flux est  $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$  ce qui correspond à l'éclairement -par unité d'intervalle spectral en nm- reçu en un point proche de la Terre, hors de l'atmosphère

Le rayonnement solaire nous parvenant à la surface de la Terre est presque exclusivement réduit au visible. En effet, d'après la figure 4 :

- 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

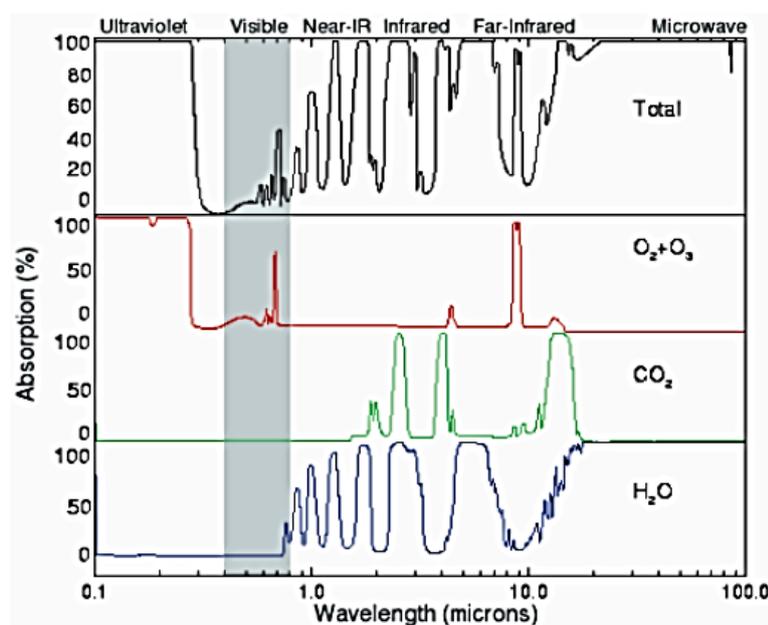


FIGURE 4 – Spectre d'absorption de l'atmosphère et de ses principaux constituants.

## Document 2 : Le bleu du ciel

De nombreuses théories sur le bleu du ciel se sont succédées au cours du temps. 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.

Rayleigh, vers 1900, a étudié les lois de la diffusion de la lumière et a proposé le modèle suivant : l'onde électromagnétique émise par le Soleil, excite les électrons des atomes ou molécules de l'atmosphère. Ceux-ci se transforment alors en dipôle oscillant, et rayonnent à leur tour une onde électromagnétique dans tout l'espace. C'est le phénomène de diffusion.

Dans le cas où les centres diffuseurs sont de taille petite par rapport à la longueur d'onde de l'onde excitatrice, le phénomène étudié est la **diffusion de Rayleigh**. La diffusion de Rayleigh étant un phénomène linéaire et élastique, la longueur d'onde diffusée est la même que la longueur d'onde incidente, et toute la puissance absorbée est réémise.

Dans ce cadre, la puissance rayonnée par le dipôle est proportionnelle à  $\frac{1}{\lambda^4}$ . Ainsi, la puissance associée au violet est donc environ seize fois plus grande que le rouge.

Pourquoi ne voit-on pas le ciel violet ? Le rayonnement solaire est peu intense dans le violet, et présente un maximum vers le vert (voir figure 3). Aussi, l'œil humain présente un pic de sensibilité aux environs de 550 nm, tandis que sa sensibilité au violet est 100 fois plus faible.

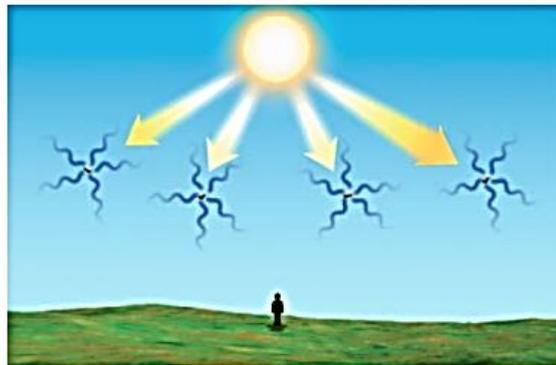


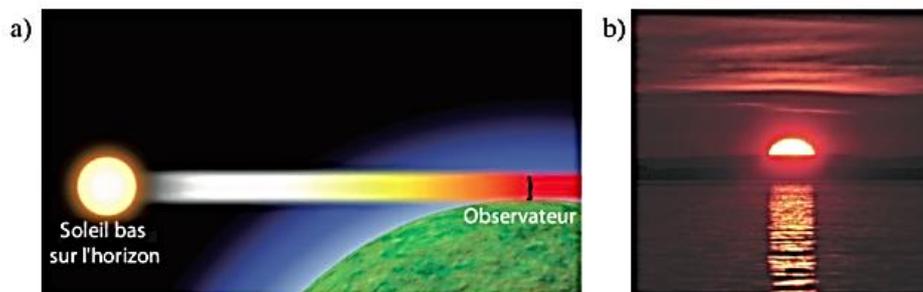
FIGURE 5 – Diffusion Rayleigh : on perçoit sur Terre une lumière bleuté provenant de toutes les directions

## Document 3 : Le rouge du crépuscule

D'après le document 2, 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).

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  $4^\circ$  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.



## Document 4 : Polarisation

Dès le début du XIX<sup>e</sup> siècle, on a observé le fait que la lumière diffusée par l'atmosphère était polarisée dans certaines directions d'observation. La lumière émise par le Soleil qui est à l'origine de la diffusion n'est pas polarisée. C'est le physicien français ARAGO qui a particulièrement étudié ce phénomène. Si l'on utilise des lunettes de soleil à verres polarisés, lunettes qui sont de plus en plus courantes de nos jours, on voit facilement que la perception du ciel avec et sans lunettes est nettement différente.

L'onde électromagnétique rayonnée dans le cadre dipôle de HERTZ possède la structure d'une onde plane locale car elle est observée dans la zone de rayonnement (voir cours sur le dipôle rayonnant  $r \gg \lambda$ ). Les champs électrique et magnétique sont situés dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Dans ces conditions, on peut comprendre en observant le schéma de la figure 7 que en fonction de la direction d'observation, la lumière que l'on perçoit n'est pas polarisée et ou bien l'est. Si l'on regarde dans la direction incidente, le champ électrique  $\vec{E}$  présente toutes les directions possibles du plan d'onde qui nous fait face. Par contre, si l'on observe dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière, on peut voir le plan d'onde par la tranche en quelque sorte. Le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  est évolue dans une direction unique : on perçoit alors une onde polarisée rectilignement. Entre ces deux directions, tous les cas intermédiaires de polarisation partielle existent. On parle de polarisation partielle lorsque la composante du champ électrique  $\vec{E}$  est plus élevée dans une direction donnée que dans la direction qui lui est perpendiculaire.

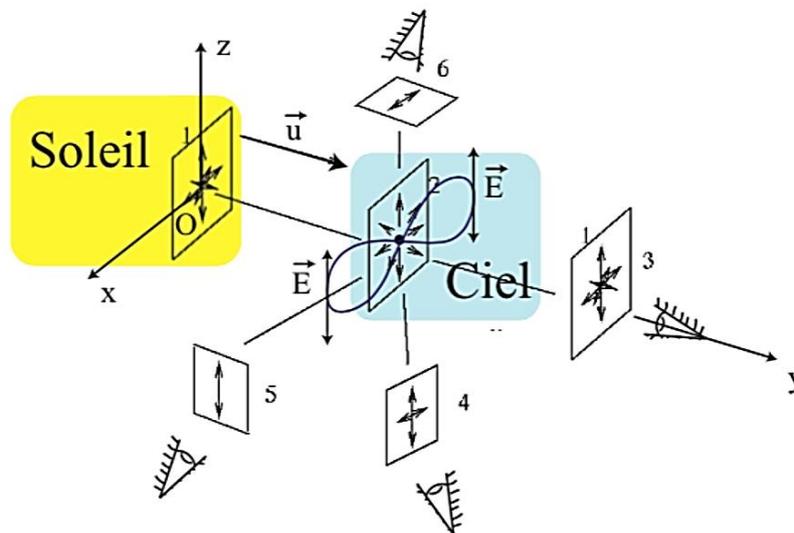


FIGURE 7 – Illustration du phénomène de polarisation

Sur les photographies de la figure 8, on peut voir qu'en fonction de l'orientation d'un polariseur rectiligne présent devant l'objectif de l'appareil photo, l'intensité lumineuse du ciel est atténuée. On voit donc que dans la direction d'observation, on perçoit une lumière bleue du ciel polarisée puisque pour une direction verticale du polariseur, il y a quasiment extinction de Malus.



Figure 8

## Questions :

- 1) Justifier la phrase que dans le cas des atomes présents dans l'atmosphère, "les centres diffuseurs sont de taille petite devant la longueur d'onde de l'onde excitatrice."
- 2) La taille des gouttelettes d'eau dans les nuages étant de  $1 \mu\text{m}$ , pourquoi ne font-elles pas de diffusion Rayleigh ? C'est pourquoi nous ne voyons pas les nuages bleus... La diffusion de ce type de particules est appelé diffusion de Mie.
- 3) Dans quelle direction par rapport au moment dipolaire du dipôle le champ électrique rayonné est-il le plus intense ? Quelle est alors la polarisation du champ électrique rayonné ? Afin d'analyser la figure 7, refaire le schéma qu'on observerait dans le cas où la polarisation de la lumière du Soleil est selon (Oz) (en bleu) et dans le cas où elle est selon (Ox) (en rouge). On superposera sur un même schéma ces deux configurations. On fera apparaître dans chaque cas : la direction de polarisation du champ incident, la direction du dipôle, le diagramme de rayonnement, et le champ observé aux positions 3, 5 et 6. En déduire que dans le cas d'une lumière du Soleil non polarisée, le rayonnement arrivant en 3 n'est pas polarisé tandis qu'il l'est en 5 et en 6. Conclure : en plein jour, dans quelle direction doit-on regarder pour visualiser une polarisation de la lumière rayonnée ?

## 5 Rayonnement d'une antenne demi-onde

Une antenne filiforme, colinéaire à l'axe  $Oz$ , de longueur  $l = \frac{\lambda}{2}$ , centrée à l'origine, est le siège d'un courant sinusoïdal d'intensité :

$$\underline{I}(z,t) = I_0 \cos\left(2\pi \frac{z}{\lambda}\right) \exp(i\omega t) \quad \text{avec} \quad \omega = \frac{2\pi c}{\lambda}.$$

Un point  $M$  est repéré par ses coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$  d'origine  $O$ , d'axe  $Oz$ . On se place dans la zone de rayonnement,  $r \gg \lambda$ .

On admet que le champ magnétique total rayonné en  $M$  par l'antenne est :

$$\underline{B}(M,t) = i \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \exp\left(i\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right) \underline{u}_\varphi,$$

et que localement ce champ électromagnétique a la structure d'une onde plane progressive de direction de propagation  $\underline{u}_r$ .

**1.** Calculer le vecteur de Poynting en  $M$  et sa valeur moyenne dans le temps. Dans quelle direction l'antenne rayonne-t-elle le maximum d'énergie ? Représenter l'indicatrice de rayonnement.

**2.** Calculer la puissance moyenne  $\mathcal{P}$  rayonnée par l'antenne à travers une sphère de rayon  $r$ .

On donne :  $\int_0^\pi \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} d\theta = 1,22.$  et  $\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right) \approx 0,95 \sin^2 \theta$

En déduire la résistance de rayonnement  $R$  de l'antenne définie par  $\mathcal{P} = RI_{\text{eff}}^2$ . Calculer numériquement  $R$ . Quelle serait la valeur de l'intensité maximale  $I_0$  pour une antenne demi-onde dont la puissance moyenne de rayonnement est  $\mathcal{P} = 2100 \text{ kW}$  (puissance de l'émetteur Grandes Ondes de France Inter à Allouis).

Quelle est l'amplitude du champ électrique rayonné dans le plan équatorial de cette antenne à  $100 \text{ km}$  de l'antenne ?

## ✍ Filtre polarisant (d'après CCINP MP 2021)

Un filtre polarisant est un accessoire qui se fixe devant l'objectif. On admet qu'il se comporte comme les polariseurs utilisés en travaux pratiques de physique : il permet de polariser rectilignement la lumière qui le traverse. On appelle "axe du polariseur" ou "direction de polarisation" la direction de polarisation du champ électrique de l'onde électromagnétique transmise par le polariseur.

Le champ électrique émergent est la projection sur l'axe de polarisation du champ électrique incident. La rotation du filtre sur lui-même permet de choisir la direction de la polarisation de la lumière filtrée. Le document 9, décrit les effets qu'on peut obtenir avec un filtre polarisant.

### Document 9 - Utilisation d'un filtre polarisant

Le filtre polarisant est l'un des accessoires préférés des amateurs de photographie, en particulier de ceux qui pratiquent la photo de paysages. Les effets obtenus avec ce type de filtre sont impossibles à obtenir avec un logiciel de retouche. Deux effets sont particulièrement appréciés :

- le filtre polarisant permet d'atténuer voire de supprimer les reflets sur toutes les surfaces (eau, verre) sauf sur les parties métalliques brillantes. Il suffit de faire tourner le filtre polarisant jusqu'à disparition des reflets ;
- il permet également d'augmenter la saturation de bleu du ciel. La couleur du ciel est donc d'un bleu plus renforcé. Pour obtenir un effet maximal, le photographe doit se trouver à  $90^\circ$  par rapport à la direction des rayons du soleil.

Par contre le filtre polarisant fait perdre de la lumière. Il faut donc en tenir compte pour le réglage de l'exposition.

Source : d'après [apprendre-la-photo.fr](http://apprendre-la-photo.fr)

On cherche à expliquer les effets obtenus en photographie avec l'utilisation de ce type de filtre.

### VI.1 - Rayonnement d'un dipôle oscillant

Un dipôle oscillant peut être considéré comme étant constitué de deux charges :

- une fixe placée en un point A et de charge  $-q$ ,
- une mobile placée en B et de charge  $+q$ ,

les charges étant constantes.

La distance  $AB = d$  représente la taille du dipôle.

Q31. a) Définir le moment dipolaire associé à ce doublet de charges. Avec quelle unité s'exprime-t-il dans le Système International ?

- b) À l'échelle microscopique, les atomes et certaines molécules peuvent être considérés comme des dipôles. Donner l'ordre de grandeur de leur moment dipolaire.

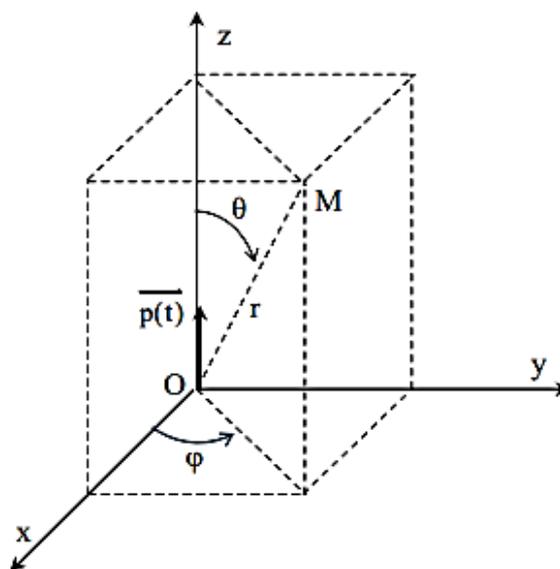


Figure 6 - Coordonnées sphériques d'un point M

On considère à présent ce dipôle oscillant harmonique placé à l'origine O d'un repère (O,x,y,z) et dont le moment dipolaire est donné par la formule  $\overline{p}(t) = p_0 \cos(\omega t) \overline{e}_z$  avec  $p_0 = q \cdot d_{\max}$ .

Le repère est associé à la base cartésienne  $(\overline{e}_x, \overline{e}_y, \overline{e}_z)$ .

On étudie le rayonnement de ce dipôle oscillant en un point M de l'espace repéré (figure 6) par ses coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$ .

**Q32.** On étudie le rayonnement de ce dipôle dans la zone de rayonnement, en se plaçant dans l'approximation dipolaire et dans le cadre d'une hypothèse non relativiste.

Traduire ces approximations par trois inégalités reliant trois échelles de longueurs pertinentes en les justifiant.

Ces approximations étant vérifiées, on étudie l'onde électromagnétique rayonnée par le dipôle ; les champs électrique et magnétique en M sont donnés par les formules :

$$\overline{E}(M, t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} p_0 \frac{\omega^2}{r} \sin(\theta) \cos(\omega t - kr) \overline{e}_\theta \quad \text{et} \quad \overline{B}(M, t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} p_0 \frac{\omega^2}{rc} \sin(\theta) \cos(\omega t - kr) \overline{e}_\varphi.$$

L'onde électromagnétique a localement la structure d'une onde plane progressive harmonique de pulsation  $\omega$ . On pose  $\overline{k} = k \overline{e}_r$  avec  $k = \frac{\omega}{c}$ .

**Q33. a)** Montrer que la puissance surfacique moyenne rayonnée en un point M de la zone de rayonnement peut se mettre sous la forme  $P = K \omega^4 \frac{\sin^2(\theta)}{r^2}$ .

**b)** Exprimer K en fonction de  $\mu_0$ , c et  $p_0$ .

**Q34.** Le rayonnement est-il isotrope ? Si non, dans quel plan est-il maximal ?

**Q35. a)** Donner l'expression de la puissance moyenne totale  $P_{\text{totale}}$  rayonnée par ce dipôle en fonction de  $\mu_0$ , c,  $p_0$  et  $\omega$ .

**b)** Cette expression ne dépend pas de r. Quelle signification peut-on en donner ?

On peut considérer que l'atmosphère est constituée de molécules de diazote et de dioxygène.

Ces molécules peuvent être polarisées si elles sont soumises à une onde électromagnétique : l'onde électromagnétique provoque l'apparition d'un moment dipolaire induit  $\overline{p}_i$  dans chaque molécule, ce dernier étant proportionnel au champ électrique de l'onde incidente :  $\overline{p}_i = \alpha \overline{E}$  où  $\overline{E}$  est le champ électrique de l'onde électromagnétique incidente et  $\alpha$  un coefficient réel qui dépend (entre autres) de la molécule.

Les molécules se comportent alors comme des dipôles oscillants de moment dipolaire  $\overline{p}_i$ . On admettra que ce phénomène, appelé diffusion Rayleigh, est le seul qui intervient par beau temps.

**Q36.** La diffusion Rayleigh se produit lorsque la taille des molécules diffusantes est faible par rapport à la longueur d'onde de l'onde électromagnétique incidente. Montrer, par un calcul d'ordre de grandeur, que cette condition est vérifiée si on envisage la diffusion de la lumière visible par les molécules de l'atmosphère.

## VI.2 - Utilisation d'un filtre polarisant pour augmenter la saturation du bleu du ciel

Un photographe cherche à prendre une photo d'un personnage (point A **figure 7**) avec, en arrière-plan, le ciel bleu. Le temps est sec et la position du photographe (point O), du personnage (point A) ainsi que la direction des rayons du soleil sont donnés sur la figure pour laquelle l'axe Oz est vertical et ascendant. On suppose que la lumière solaire ne présente pas de direction de polarisation particulière.

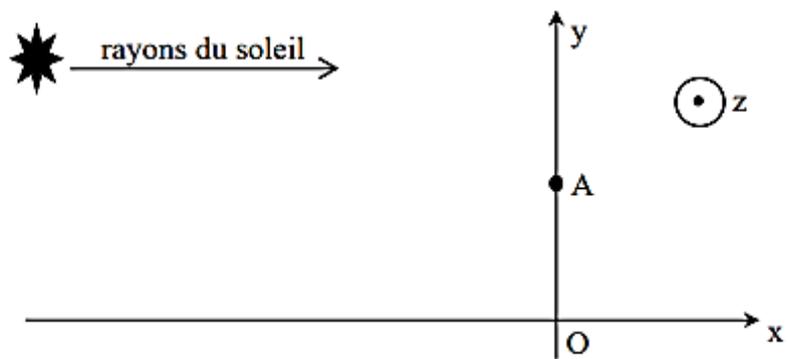


Figure 7 - Prise de vue par temps clair

- Q37. En utilisant la réponse à Q34, justifier la couleur bleue du ciel, vue par le photographe.
- Q38. a) Montrer que la lumière reçue par le photographe provenant de la diffusion par les molécules de l'atmosphère est polarisée rectilignement.  
b) Montrer en quoi l'utilisation d'un filtre polarisant peut augmenter la saturation du bleu du ciel (telle que définie dans le document 9).  
c) Expliquer la phrase du document : « Pour obtenir un effet maximal, le photographe doit se trouver à  $90^\circ$  par rapport à la direction des rayons du soleil ».  
d) Expliquer la phrase du document : « Par contre le filtre polarisant fait perdre de la lumière ».