

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf  
Faculté de physique  
Département de Génie physique



**PFE** *Pour l'obtention du diplôme de  
Master en physique*

**Modélisation du trajet descendant du REM dans  
l'atmosphère par  
GEANT4**

Présentés par : **ZERHOUI Imad-Eddine**  
**HASSOUS Abdel basset**

Année Universitaire 2017/2018

# Plan :

## ➤ Introduction

### ➤ **Partie I : Interaction REM- Atmosphère**

- ❖ Propriétés optiques de l'atmosphère
- ❖ constituants de l'atmosphère
- ❖ Mécanismes d'interaction rayonnement-matière dans l'atmosphère
- ❖ Transfert radiative

### ➤ **Partie II: Geant4 : Principe de fonctionnement**

- ❖ Principes physiques
- ❖ Fonctionnement
- ❖ Sorties du logiciel

### ➤ **Partie III : Modélisation tu trajet descendant**

- ❖ Direction d'incidence
- ❖ Discrétisation de l'atmosphère

### ➤ **Partie IV: Résultats et interprétations**

- ❖ Description du modèle utilisé
- ❖ Description de la géométrie
- ❖ Résultat et discussion

### ➤ **Conclusion générale et perspectives**

## Introduction:

Lors de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est en partie atténué. Le phénomène d'atténuation se divise en trois parties:

L'absorption, la diffusion par les gaz, la diffusion par les particules solides (aérosols) et la réflexion vers l'espace extérieur.

Dans notre étude, nous abordons les méthodes de simulation Monte Carlo, pour modéliser le trajet descendant du REM et simuler les interactions qui se déroulent lors de cette traversée.

# Partie I:

## Interaction REM- Atmosphère

### Introduction :

L'atmosphère terrestre est un mélange formé de différents gaz et de particules diverses.

Ce mélange forme une enveloppe gazeuse autour de la Terre qui contient l'air que nous respirons. C'est grâce à l'atmosphère que l'apparition et le maintien de la vie sont possibles sur Terre.

# Constituants de l'atmosphère:

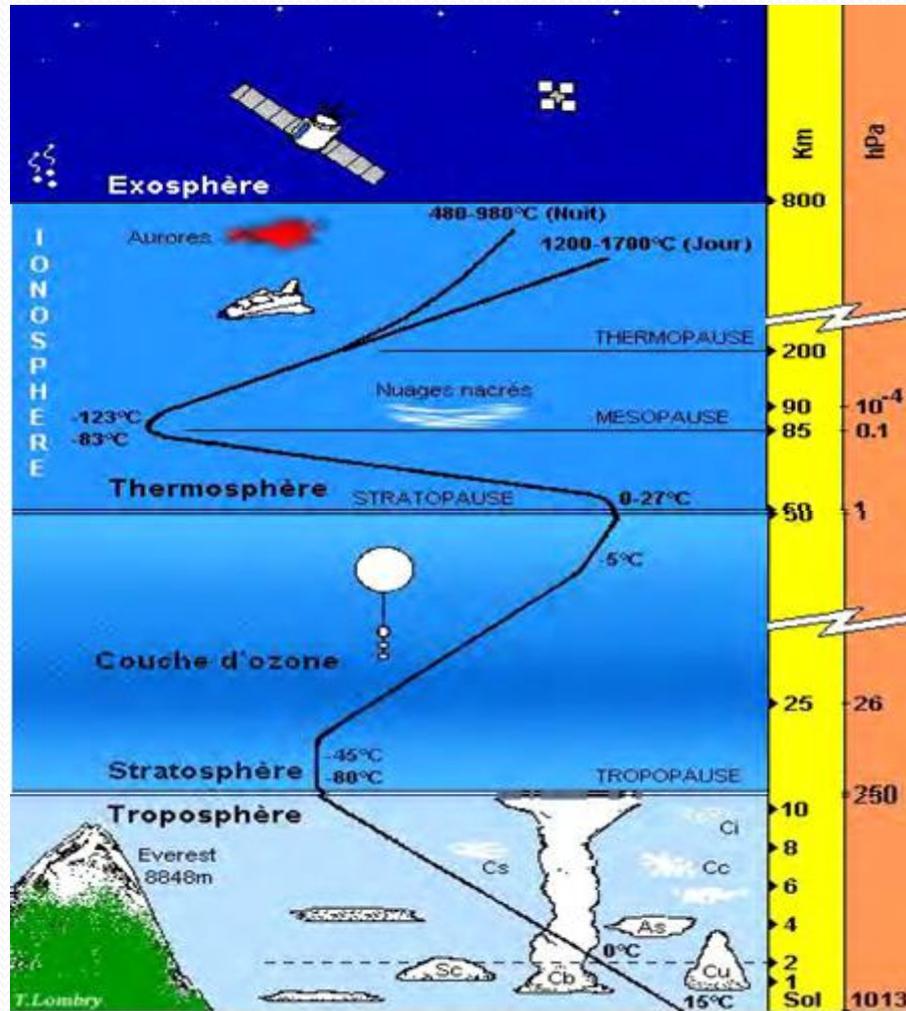


Figure 1 : Structure verticale de l'atmosphère

# Molécules:

L'atmosphère est composée essentiellement de l'azote (78%) et de l'oxygène (21%).

Gaz	Proportion(%)
Azote (N <sub>2</sub> )	78.08
Oxygène (O <sub>2</sub> )	20.95
Argon (Ar)	0.934
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0.0382
Néon (Ne)	1.818.10 <sup>-3</sup>
Hélium (He)	5.24.10 <sup>-4</sup>
krypton (Kr)	1.14.10 <sup>-4</sup>
Dihydrogène (H <sub>2</sub> )	5.0. 10 <sup>-5</sup>
Xénon (Xe)	8.7. 10 <sup>-6</sup>
Ozone (O <sub>3</sub> )	0. 10 <sup>-6</sup>
Radon (Rn)	6.0. 10 <sup>-18</sup>

**Tableau 1** : Le pourcentage de la composition de l'atmosphère

## Aérosols :

On définit les aérosols atmosphériques comme les populations des particules solides et liquides en suspension dans l'air, à l'exception des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace composant les nuages et les brouillards.

Selon l'ordre de grandeur du rayon  $r$  de la particule (supposée sphérique), on distingue trois classes :

Les particules  
d'Aitken : [0.001 ; 0.1  
 $\mu\text{m}$ ]

Les particules fines:  
[0.1 ; 1  $\mu\text{m}$ ]

Les grosses particules  
: [1 ; 100  $\mu\text{m}$ ]

# Les mécanismes de l'interaction rayonnement matière dans l'atmosphère :

## Absorption

```
graph TD; A([Absorption]) --> B[Aspect macroscopique : loi de Beer-Lambert-Bouguer]; A --> C[Aspect microscopique : absorption par les gaz et liaisons moléculaires];
```

**Aspect macroscopique : loi de Beer-Lambert-Bouguer**

$$\log L_{\lambda}(l) / L_{\lambda}(o) = -\zeta_1 \text{ et } L_{\lambda}(l) = L_{\lambda}(o) \cdot e^{-\zeta_1 l}$$

$L_{\lambda}(o)$ : la luminance spectrale, d'un faisceau incident.

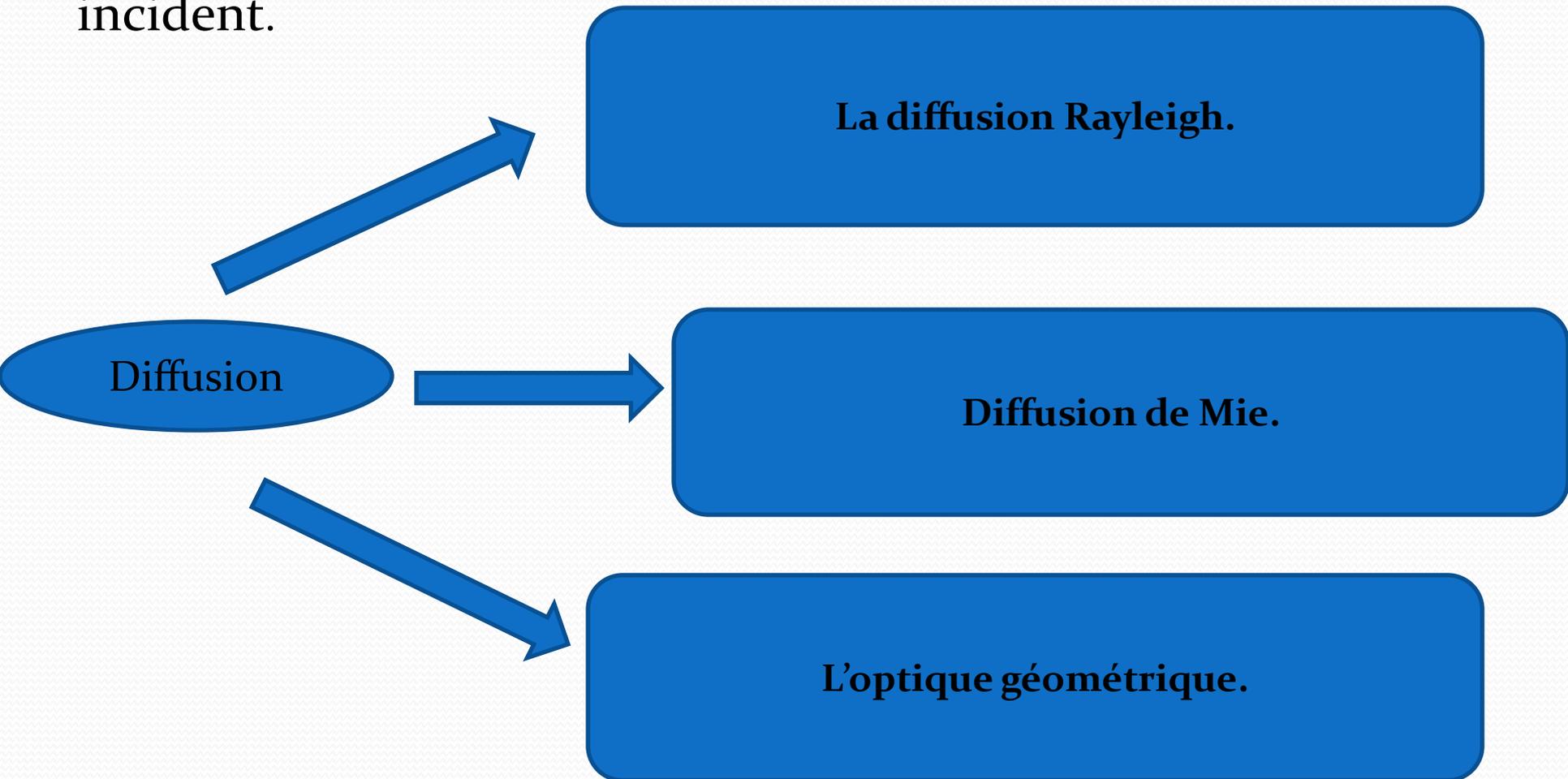
$L_{\lambda}(l)$ : la luminance après traversée du milieu de longueur  $l$ .

$\zeta$  : constante en  $m^{-1}$  (coefficient d'extinction)

**Aspect microscopique :**  
absorption par les gaz et liaisons moléculaires

## Diffusion:

La diffusion est un phénomène macroscopique résultant de la réflexion, de la réfraction et de la diffraction du rayonnement incident.



## Transfert radiatif :

La théorie du transfert radiatif décrit la propagation de la lumière dans un milieu où se produisent des phénomènes d'absorption et de diffusion multiple

Processus d'absorption  $\longrightarrow \frac{dI_e}{ds} = -\kappa_T I_e(\vec{\Omega}, \vec{r})$

Processus de diffusion  $\longrightarrow \frac{d\phi_e}{ds} \Big|_{\vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}'} = \kappa_T \frac{p(\vec{\Omega}', \vec{\Omega})}{4\pi} I_e(\vec{\Omega}) d\Omega d\Omega'$

### Equation du transfert

$$\frac{dI_e(\vec{\Omega}, \vec{r})}{ds} = -\kappa_T I_e(\vec{\Omega}, \vec{r}) + \kappa_T \int_{\Omega'} p(\vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}') I_e(\vec{\Omega}', \vec{r}) \frac{d\Omega'}{4\pi}$$

## Trajectoire :

Lors de sa trajectoire descendant le rayonnement solaire est atténué.

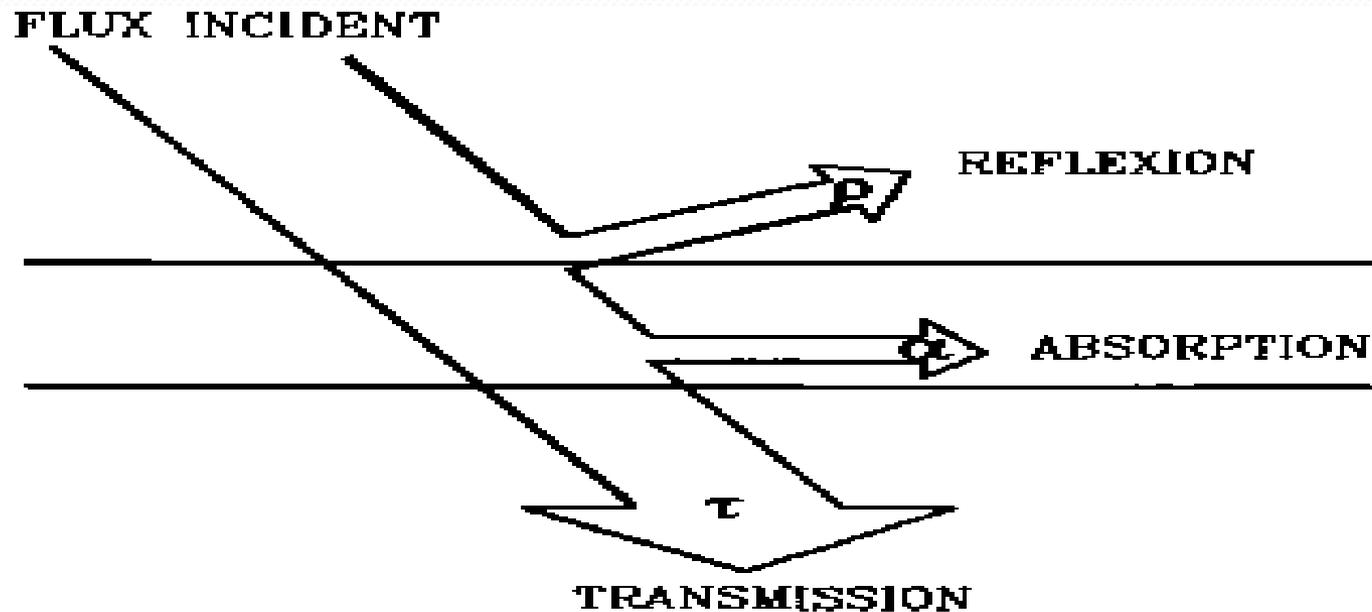


Figure 2: Trajectoire du rayonnements

## Partie II

### Geant4

Le code de simulation Monte Carlo GEANT4 (GEometry And Tracking) a été développé par le CERN pour simuler le passage des particules à travers la matière.

GEANT4 offre la possibilité d'étudier plusieurs aspects d'une expérience :

géométrie du système

particules et processus physiques

suivi des particules

matériaux utilisés

génération des particules primaires

Visualisation des interactions

## Principes physiques:

Les méthodes Monte-Carlo sont des techniques basées sur des tirages de nombres aléatoires.

Elles sont utilisées pour décrire des phénomènes physiques et simuler leur caractère aléatoire.

De nombreux codes Monte-Carlo ont été développés tels que les codes MCNP, MCNPX, GEANT<sub>4</sub> ...etc.

La plupart de ces codes sont écrits dans le langage de programmation FORTRAN, à l'exception de GEANT<sub>4</sub> qui est écrit en C++.

## Fonctionnement:

Le fonctionnement d'un programme GEANT4 passe par deux étapes :

**1. Initialisation de la simulation, qui comporte :**

**La construction d'une géométrie .**

**La génération des particules  
primaire.**

## **2. Déroulement de la simulation : qui comporte :**

**Suivi des particules**

**Exécution.**

## Sorties du logiciel:

Les sorties du code GEANT<sub>4</sub> sont données sous plusieurs formes à l'aide de plusieurs logiciels de visualisation qui sont associés à GEANT<sub>4</sub> tels que :

DAWN, OpenGL... qui permet de visualiser les géométries et les trajectoires des particules.

Aussi les logiciels de traitements des données tels que : ROOT, gnuplot, OpenScientist,... qui permettent de tracer les graphes et les histogrammes et d'analyser les évènements.

## Partie III:

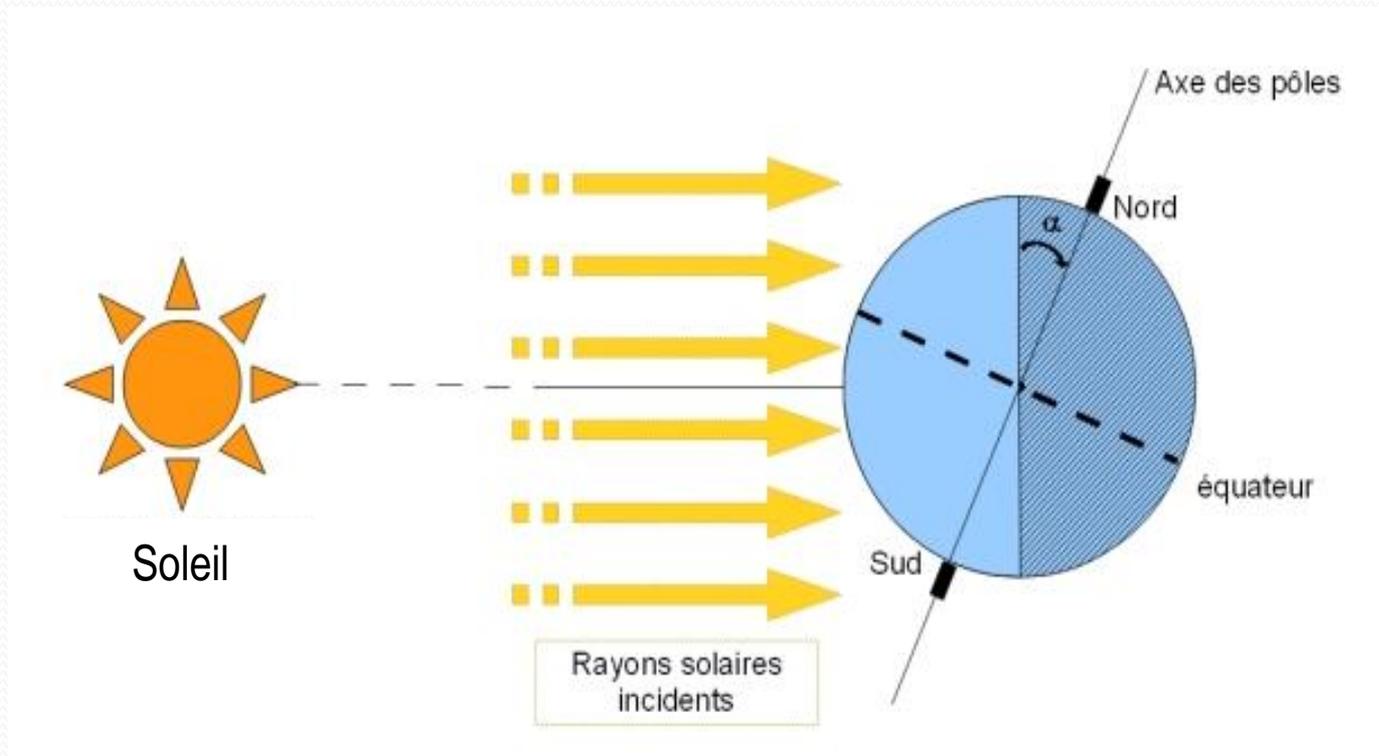
### Modélisation tu trajet descendant

#### Introduction :

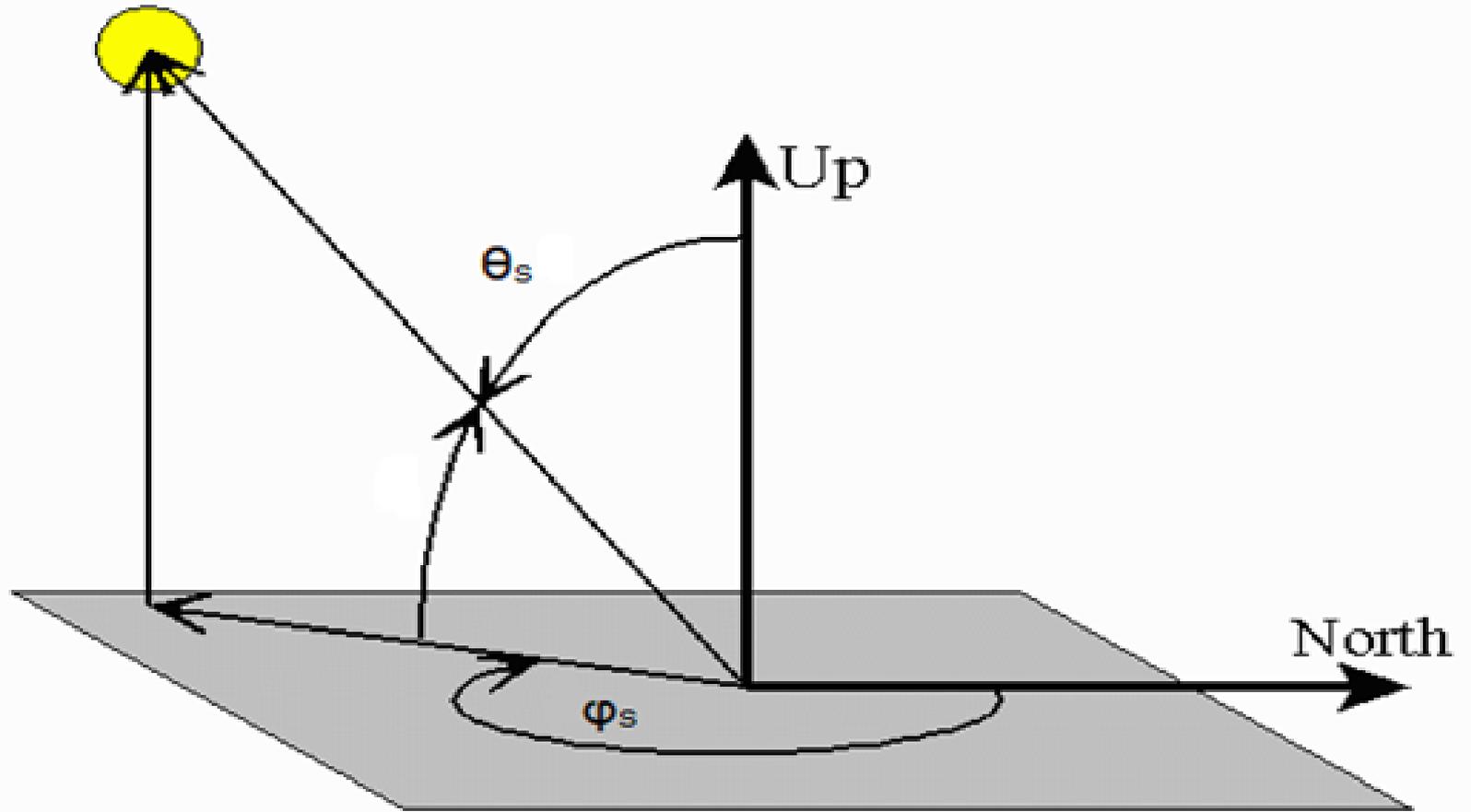
Pour modéliser le trajet descendant du REM dans l'atmosphère, des paramètres importants et essentiels tel que : la direction d'incidence, l'indice de réfraction et la fonction de phase sont à déterminer.

## Direction d'incidence :

La direction d'incidence définit la direction par laquelle le rayonnement solaire pénètre dans l'atmosphère.



**Figure 3 :** La direction d'incidence.



**Figure 4 :** Les angles zénithal et azimutal.

## Discrétisation de l'atmosphère :

La discrétisation vertical de l'atmosphère permet de définir les paramètres optiques de chaque couche, à savoir : l'indice de réfraction, le libre parcours et la fonction de phase.

### 1. Indice de réfraction

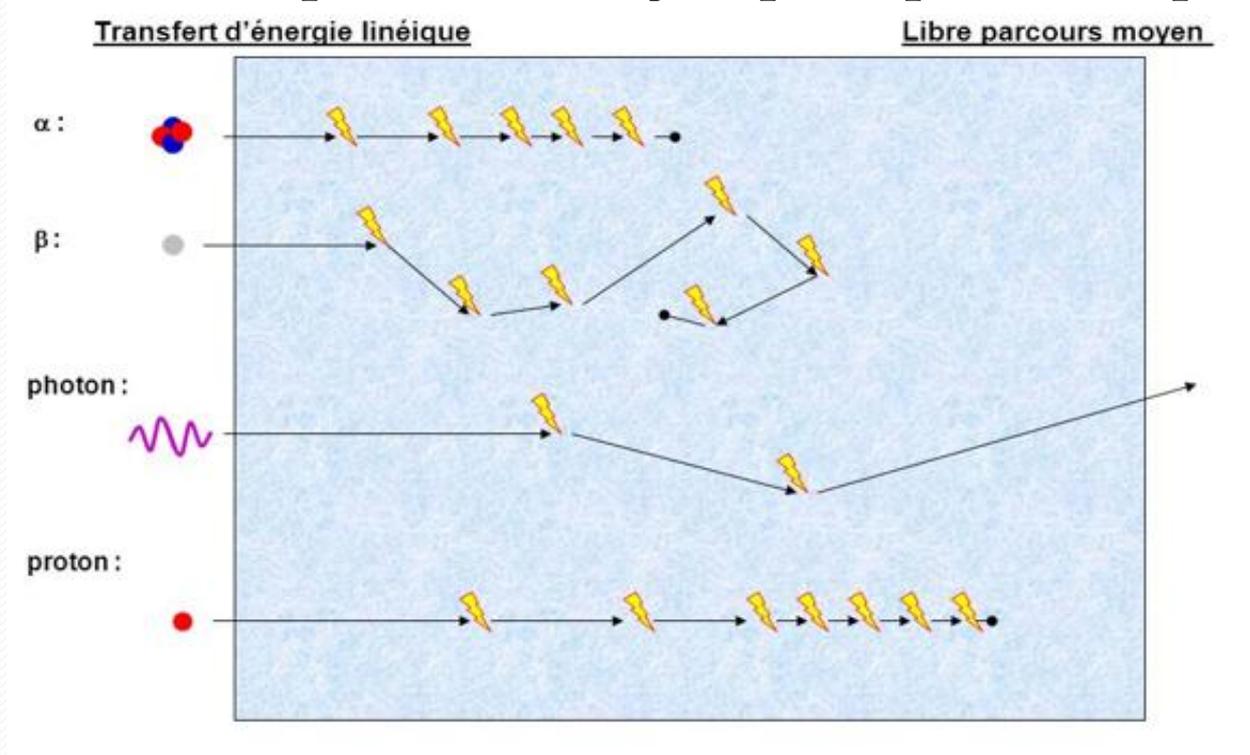
Pour tenir compte de la pression et de la température, nous utilisons l'équation suivante:

$$n(\lambda, T, P) = 1 + \frac{n_0 - 1}{1 + 3,4785 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_0)} \cdot \frac{P}{P_0}$$

Ou:  $n_0$  L'indice de réfraction de l'air pour une atmosphère standard.

## 2. Libre parcours :

Le libre parcours est défini comme la distance traversée par les photons entre deux interactions successives. Chaque interaction peut être représentée par un point. L'ensemble de ces points définit le trajet du photon. La figure suivante représente le libre parcours moyen pour plusieurs particules :



**Figure 5 :** libre parcours moyen.

### 3. Fonctions de phase

La fonction de phase est une fonction qui dépend de deux angles ( $\theta$  et  $\phi$ ) et qui définit la densité de probabilité de diffusion dans une direction donnée.

Selon le type de la particule diffusante on peut définir l'angle de diffusion à partir de l'une des deux fonctions de phases :

La fonction de phase de Rayleigh et La fonction de phase de Henyey-Greenstein

# Partie IV: Résultats et interprétations

## Introduction :

Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du rayonnement solaire lors de son trajet descendant vers la terre.

A ce stade nous avons calculé le nombre de photons transmis pour différentes valeurs d'énergie et par conséquent, différentes valeurs de la longueur d'onde du faisceau incident.

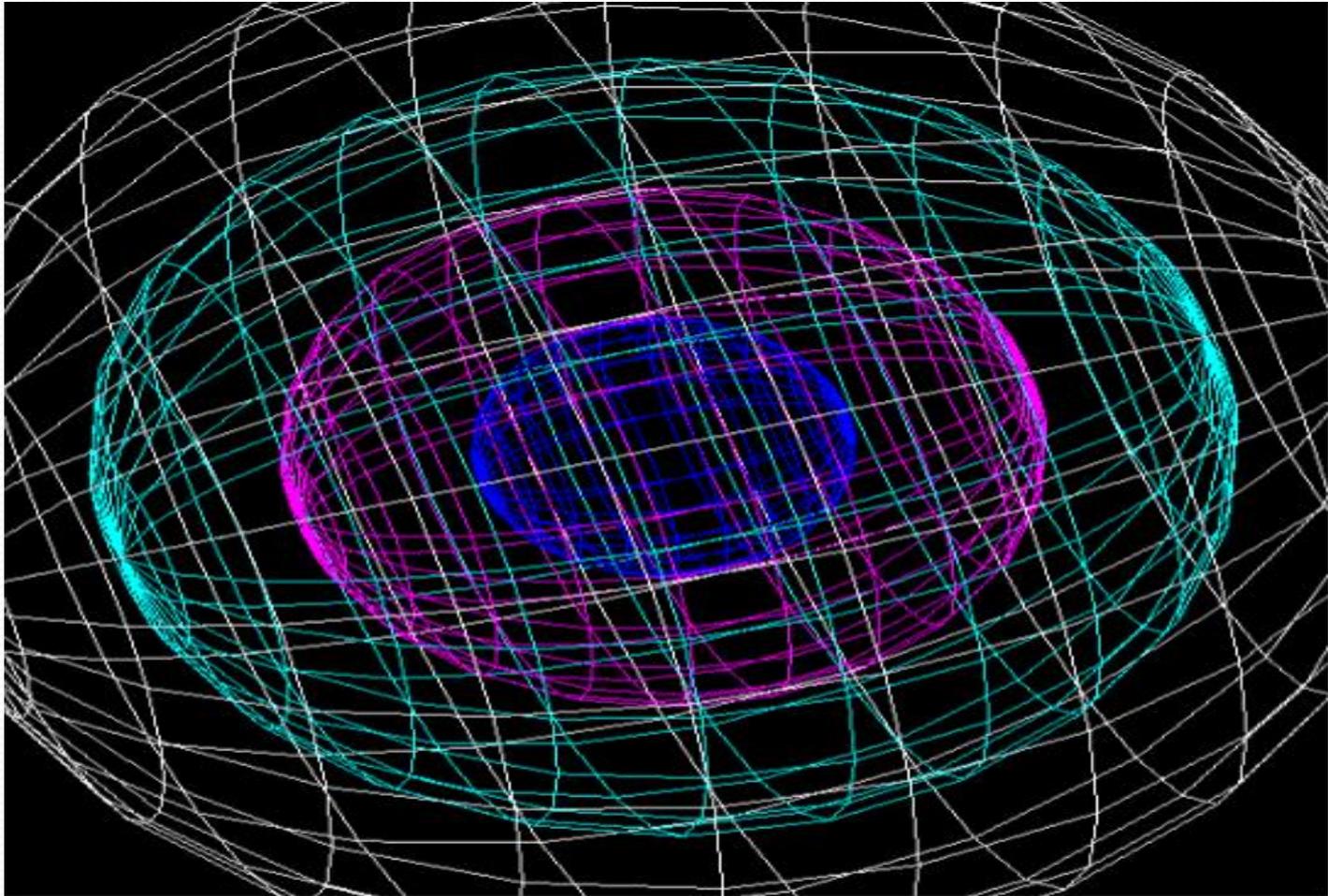
## Description du modèle utilisé :

### **OpNovice : description générale**

OpNovice est un programme écrit en c++ intégré et implanté dans geant4, il est utilisé dans la simulation du transport des photons optiques générés à partir d'une source.

## Description de la géométrie :

La géométrie du modèle utilisé est constituée de trois couches atmosphériques comme l'indique la figure .



**Figure 6 :** Géométrie du modèle utilisé.

## Paramètre :

Nous avons calculé la moyenne de la température et de la pression dans chaque couche.

Couche atmosphérique	Hauteur(Km)	Température (kelvin)	Pression(Pa)
Couche I (aérosols + gaz)	2 km	281.7	902.2666667
Couche II (gaz)	10 km	245.9625	458.8875
Couche III (ozone)	50 km	225.67	71.8863

**Tableau 2 :** Hauteur, température et pression de chaque couche.

## Constituants des couches :

La couche	Compositions	Densité mg/cm <sup>3</sup>	Concentration (%)
Couche I	O <sub>2</sub>	1.42	20.948
	N <sub>2</sub>	1.25	78.084
	CO <sub>2</sub>	1.96	0.036
	CO	1.25	0.000008
	Methane	0.71	0.00013
	N <sub>2</sub> O	1.872	0.00003
	Vapeur	1.22	0.04
	Aérosol	1.22	0.04
Couche II	O <sub>2</sub>	1.42	20.948
	N <sub>2</sub>	1.25	78.084
	CO <sub>2</sub>	1.96	0.036
	CO	1.25	0.000008
	Methane	0.71	0.00013
	N <sub>2</sub> O	1.872	0.00003
	Vapeur	1.22	0.04
Couche III	O <sub>2</sub>	1.42	20.948
	N <sub>2</sub>	1.25	78.084
	Ozone	0.0012	0.0012

**Tableau 3 :** Les constituants de chaque couche en pourcentage.

## Rayon incident :

Le rayonnement solaire représente un maximum d'émission dans le visible, d'où le choix du spectre incident porté sur l'intervalle [200, 1000 nm] qui englobe l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge. Ce spectre est échantillonné en 40 valeurs avec un pas de 20 nm.

## **Calcul d'énergie :**

On calcule l'énergie en fonction de la longueur d'onde par la relation de Planck-Einstein :

$$E = h \cdot c / \lambda$$

## Propriétés optiques :

### 1. Indice de réfraction :

L'indice de réfraction dépend de la pression  $P$ , la température  $T$  et de la longueur d'onde  $\lambda$ .

Les graphes suivants montrent la variation de l'indice de réfraction des différentes couches en fonction de la longueur d'onde.

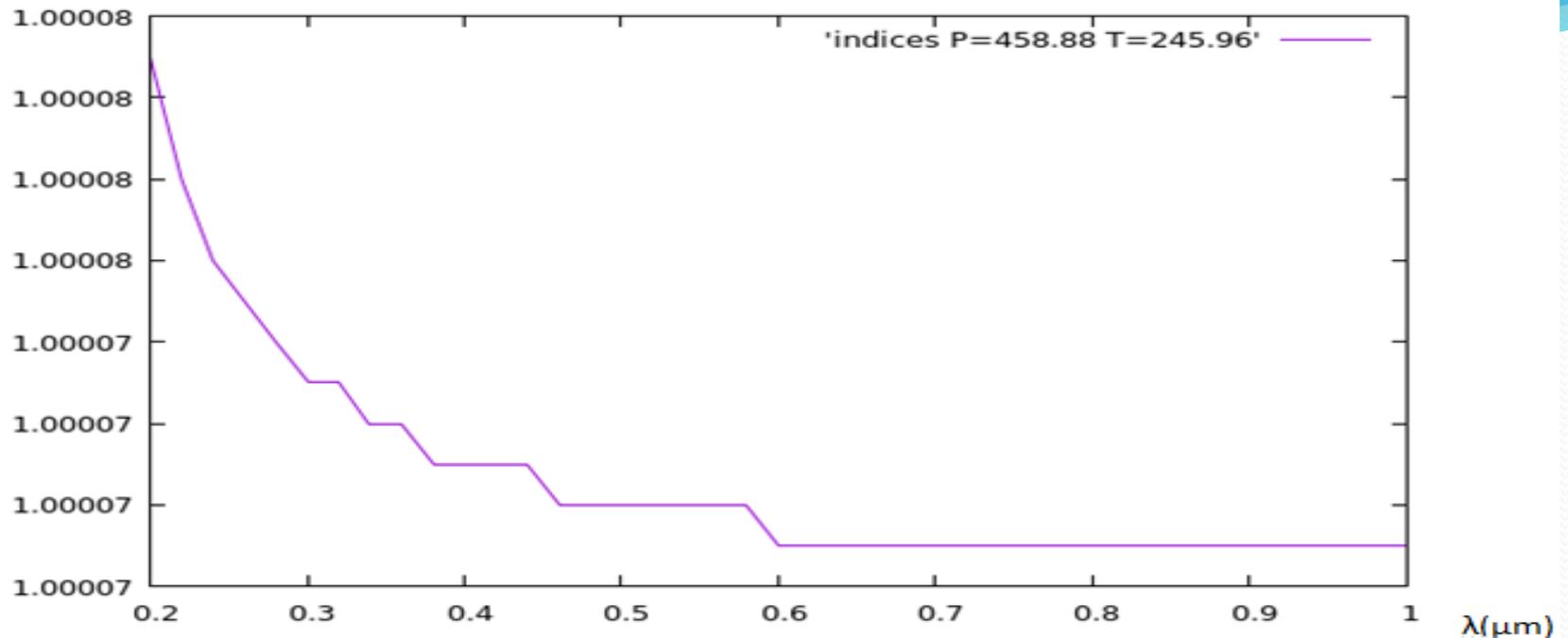


Figure 8 : L'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde : couche II

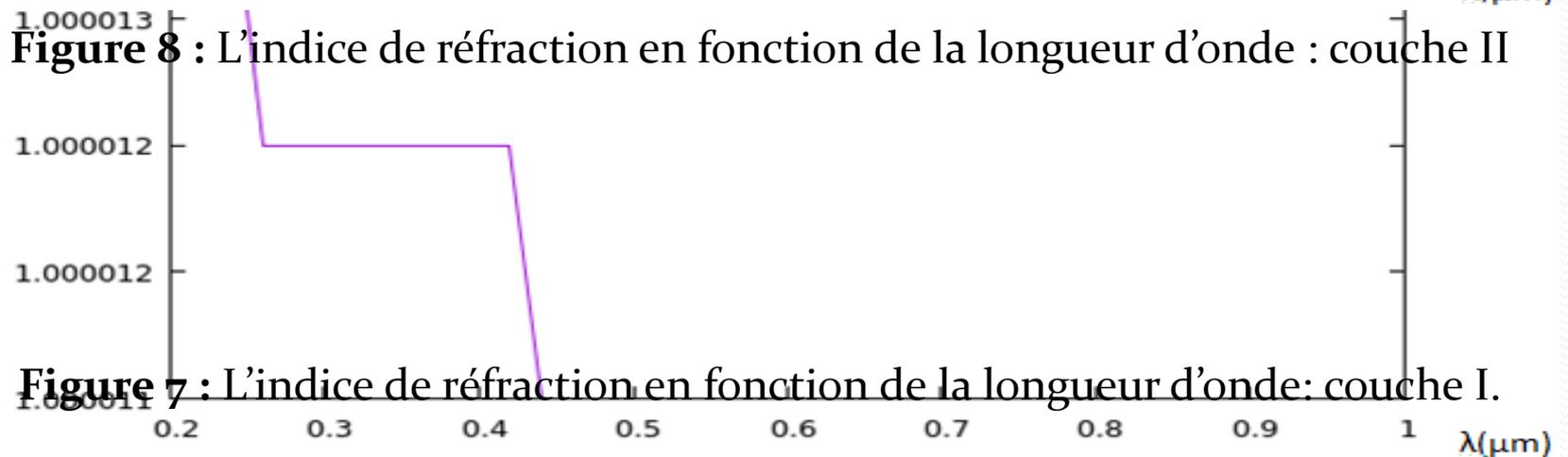


Figure 7 : L'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde: couche I.

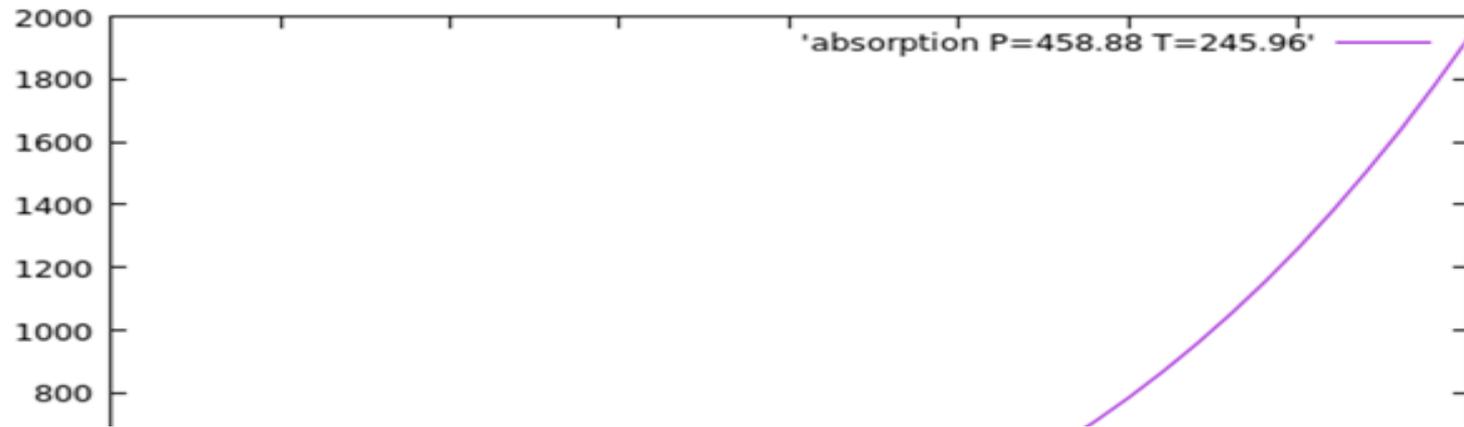
Figure 9 : L'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde : couche III

## **2.Absorption:**

L'absorption par les gaz dépend de la température, de la pression et de la longueur d'onde.

Les graphes suivants montrent la variation de l'absorption en fonction de la longueur d'onde pour chaque couche.

L'absorption(Km)



L'absorption(Km)

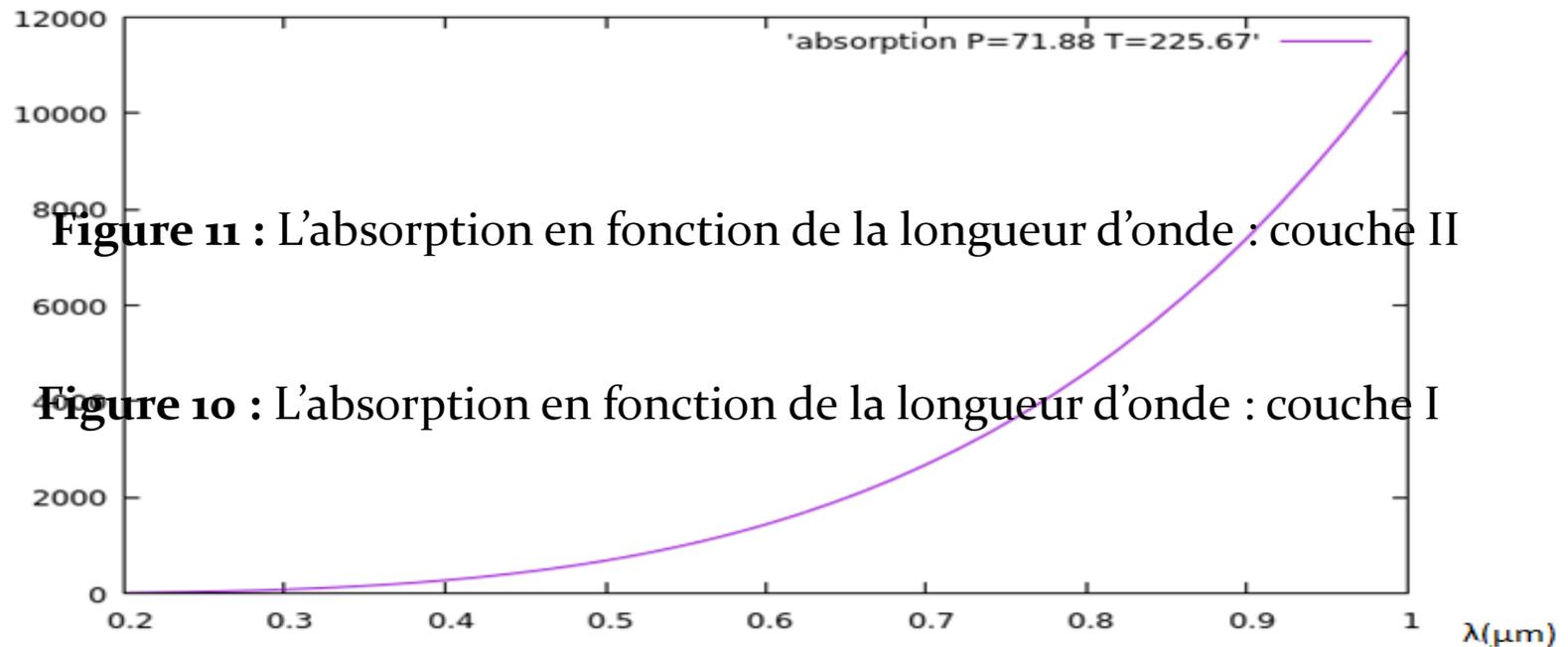


Figure 11 : L'absorption en fonction de la longueur d'onde : couche II

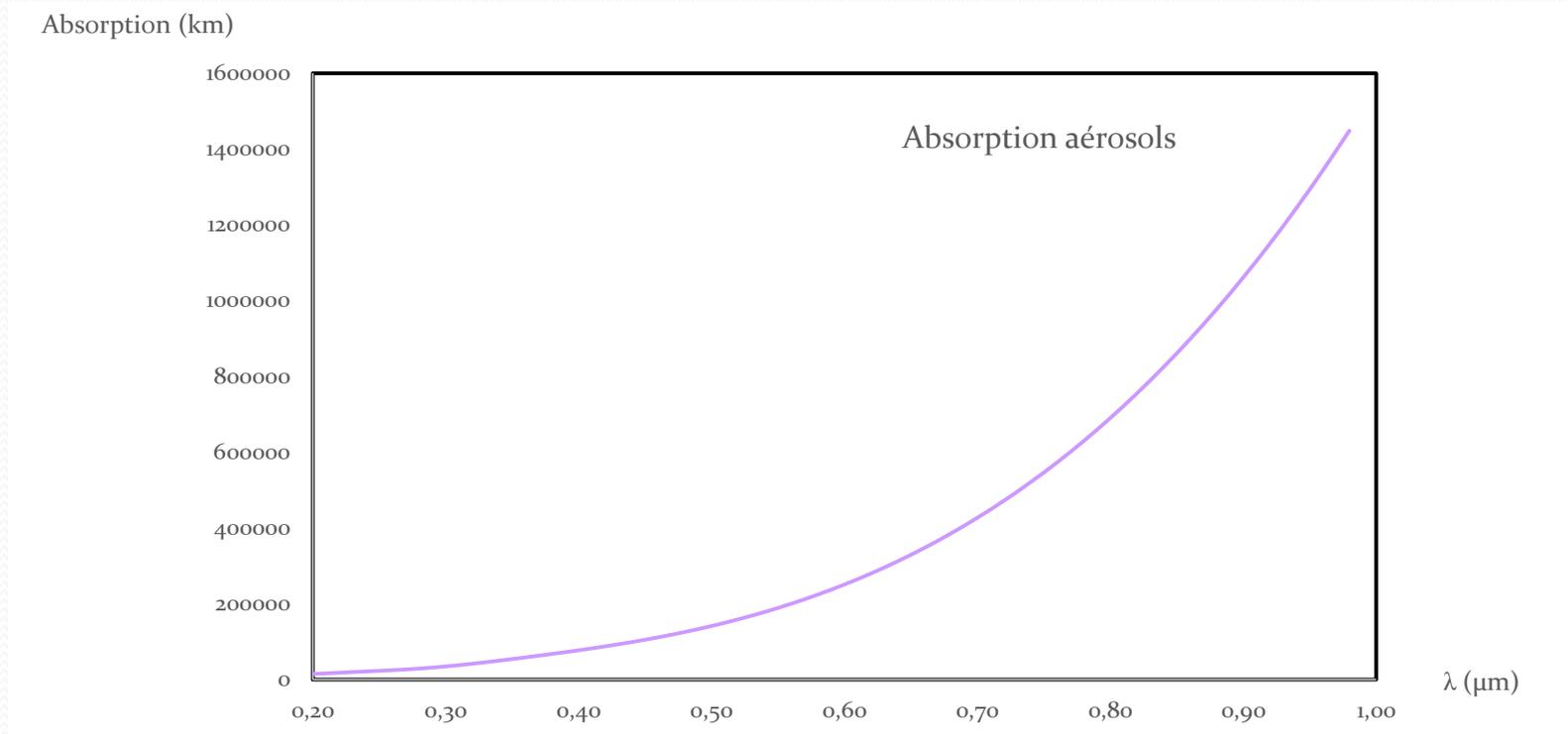
Figure 10 : L'absorption en fonction de la longueur d'onde : couche I

Figure 12 : L'absorption en fonction de la longueur d'onde : couche III

m)

## L'absorption des aérosols:

L'absorption des aérosols dépend uniquement de la longueur d'onde. Le graphe suivant illustre l'absorption de Mie en fonction de la longueur d'onde:



**Figure 13 :** L'absorption des aérosols en fonction de la longueur d'onde

## Résultat et discussion :

Après avoir défini les composants de chaque couche et introduit les énergies des photons incidents on peut lancer la simulation.

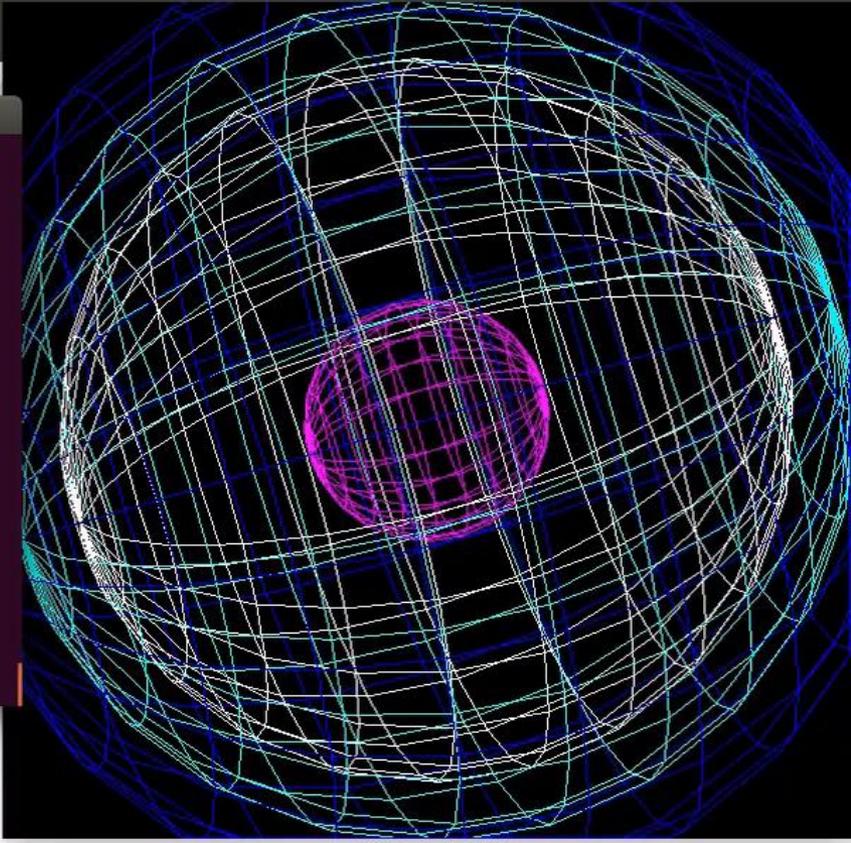
Le choix des longueurs d'ondes est porté sur 40 valeurs qui balaye le spectre solaire de l'ultraviolet jusqu'au proche infrarouge.

Ouvrir

Récents

Dossier OpNoviceDetectorConstruction.cc

```
sidahmed@sidahmed-MS-7636: ~/Bureau/Nouveau dossier/OpNovice-build
- adobe-courier-bold-r-normal--34-240-100-100-m-200-iso8859-1
Visualization verbosity changed to errors (2)
/tracking/storeTrajectory 2
Attributes available for modeling and filtering with
"/vis/modeling/trajectories/create/drawByAttribute" and
"/vis/filtering/trajectories/create/attributeFilter" commands:
G4TrajectoriesModel:
  Event ID (EventID): G4int
  Run ID (RunID): G4int
G4SmoothTrajectory:
  Charge (Ch): unit: e+ (G4double)
  Track ID (ID): G4int
  Initial kinetic energy (IKE): G4BestUnit (G4double)
  Initial momentum magnitude (IMag): G4BestUnit (G4double)
  Initial momentum (IMom): G4BestUnit (G4ThreeVector)
  No. of points (NTP): G4int
  PDG Encoding (PDG): G4int
  Parent ID (PID): G4int
  Particle Name (PN): G4String
G4SmoothTrajectoryPoint:
  Auxiliary Point Position (Aux): G4BestUnit (G4ThreeVector)
  Step Position (Pos): G4BestUnit (G4ThreeVector)
Visualization verbosity changed to warnings (3)
Idle>
```



```
/run/beamOn 10000
#/score/drawProjection boxMesh_1 pop
#/score/drawProjection boxMesh_2 pop
#/score/dumpQuantityToFile boxMesh_1 pop pop_transm3-7.xls
#/score/dumpQuantityToFile boxMesh_2 pop pop_reflect3-7.xls
```

Ubuntu desktop taskbar with icons for Dash, Home, Firefox, LibreOffice, and other applications.

Dans la présente simulation nous avons couvert une gamme d'énergie de 1,2 jusqu'à 6,2 eV pour un faisceau de 10000 photons pour chaque valeur d'énergie.

Le comptage des photons se fait sur trois détecteurs placés à 10km, 2km et au niveau de la terre (0km).

Dans ce qui suit, nous représentons le nombre de photon transmis dans les diverses couches.

Energie (eV)	longueur d'onde (nm)	0Km	2Km	10Km
6,2	200	8	17	315
5,7	220	51	113	946
5,2	240	318	517	2091
4,7	260	1079	1504	3725
4,2	290	2581	3151	5478
3,7	340	4551	5152	6990
3,2	390	6501	6934	8208
2,7	460	8022	8308	9108
2,2	560	9147	9270	9607
1,7	730	9692	9736	9863
1,2	999	9894	9910	9953

**Tableau 4:** L'énergie et les longueurs d'ondes de chaque couche

Le graphe suivant représente les courbes de transmission des photons dans chaque couche.

Transmission=nombre des photons transmis /nombre des photons incidents.

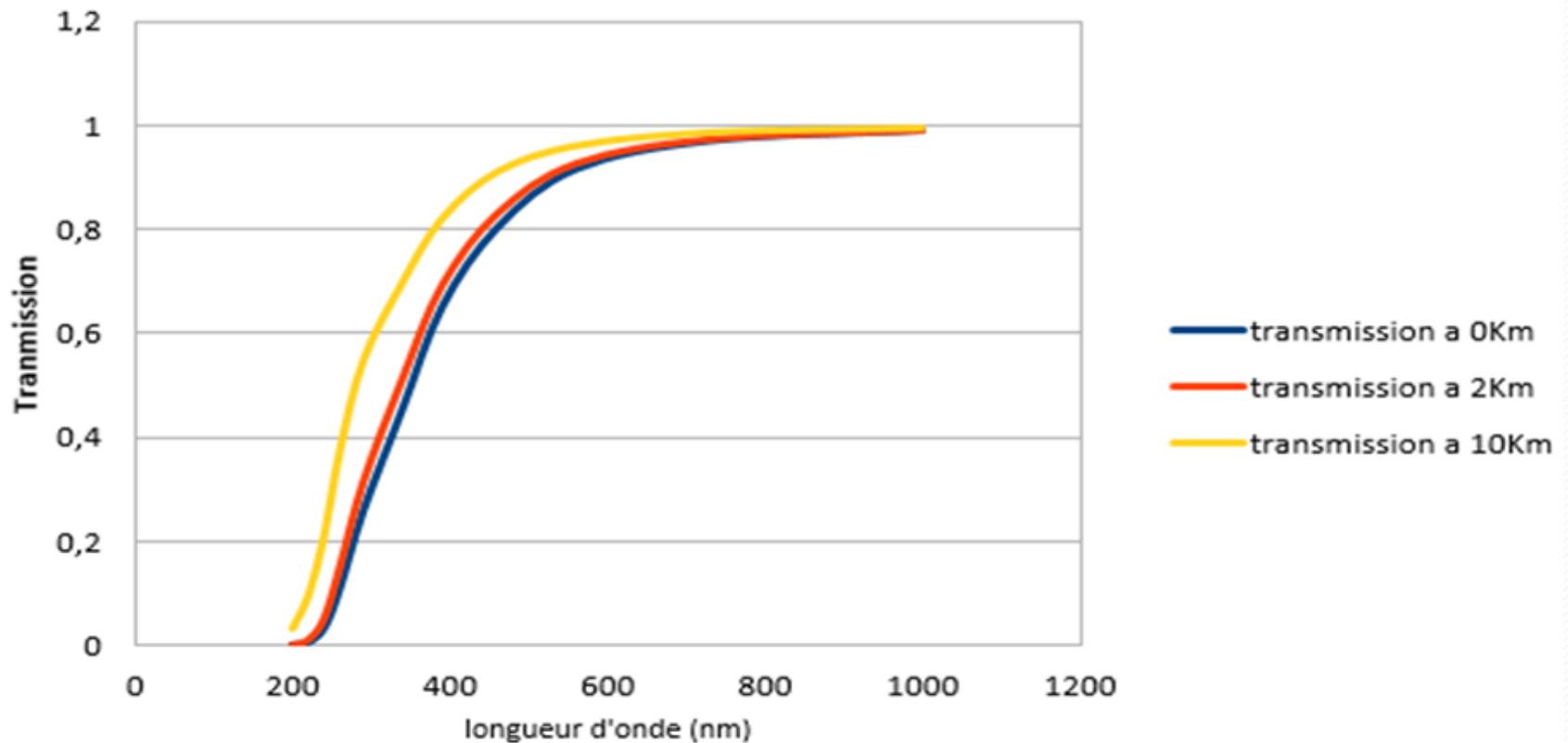


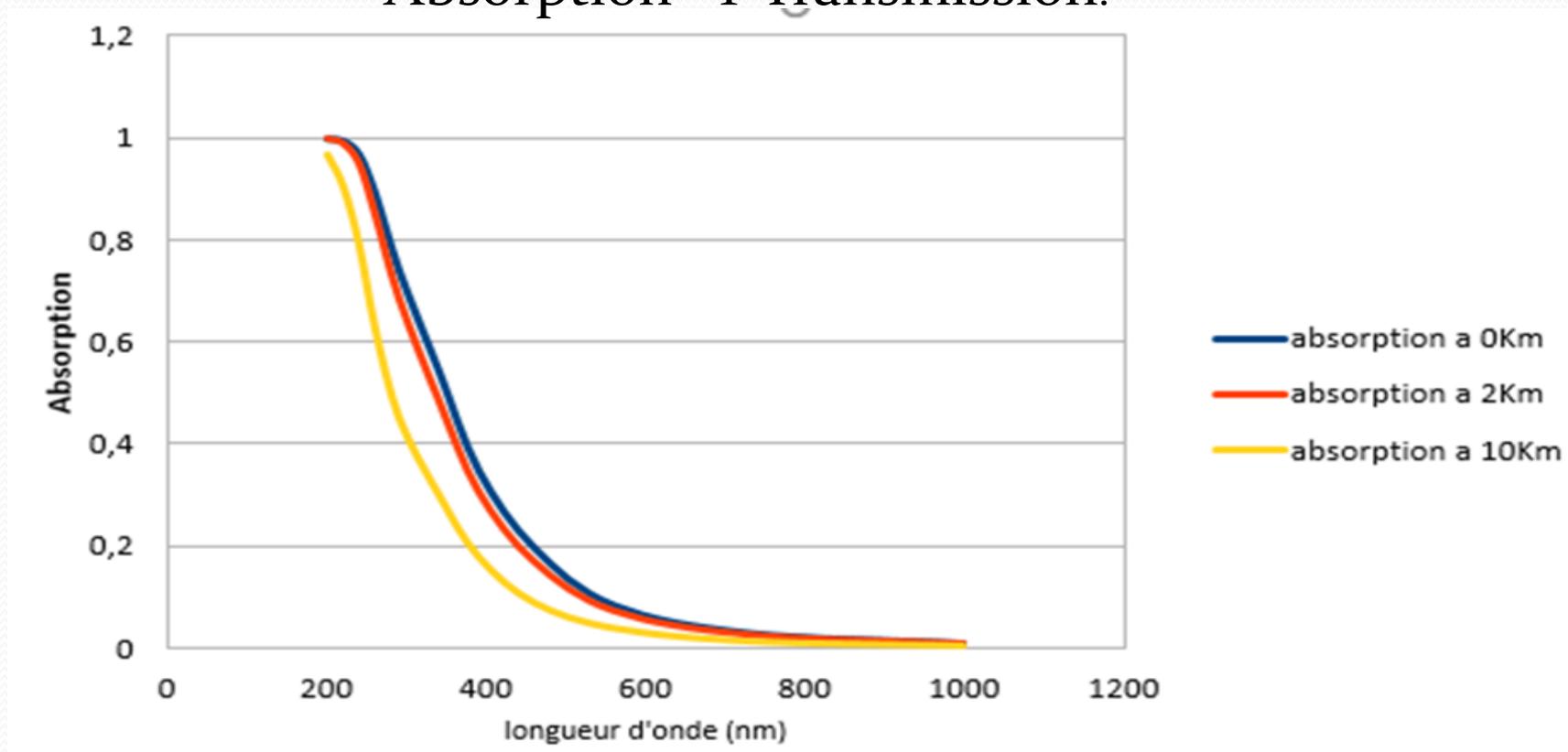
Figure 14 : Courbes de transmission à 0, 2 et 10 Km.

La faible transmission dans l'ultraviolet est due à la couche d'ozone qui absorbe la majorité des photons ultraviolet incidents. Par contre l'atmosphère est pratiquement transparente pour le visible et le proche infrarouge.

Nous représentons les courbes de l'absorption en fonction de la longueur d'onde.

L'absorption est obtenue à partir de la transmission par :

$$\text{Absorption} = 1 - \text{Transmission.}$$

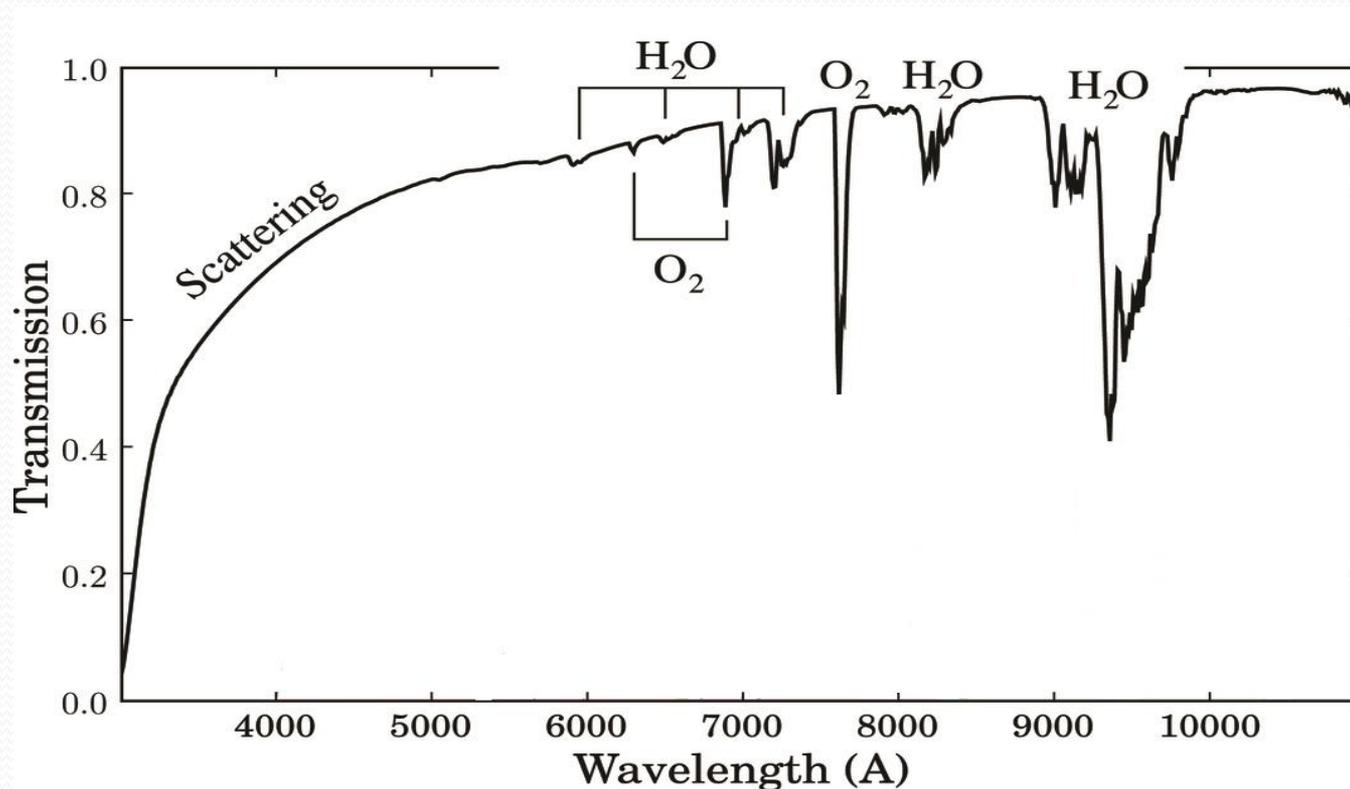


**Figure 15** : Courbe de l'absorption à 0, 2 et 10 Km.

## Conclusion :

Nous avons présenté un nouveau modèle qui décrit le trajet descendant du rayonnement solaire vers la terre.

Le graphe suivant représente une étude de la transmittance faite par Christopher W. et al. En Octobre 2007



**Figure 16 :** La transmission en fonction de la longueur d'onde

## Conclusion générale et perspectives :

La modélisation du trajet descendant du REM dans l'atmosphère par GEANT4 nous a permis de simuler les deux phénomènes qui s'alternent l'absorption et la diffusion.

Les valeurs, de la transmission, déterminés dans cette étude se rapproche de la littérature à une différence : les bandes d'absorption atmosphériques ne sont pas considérées dans notre étude.

L'objective de notre travail été de simulé le passage des photons optiques vers la terre à travers l'atmosphère. Notre modèle s'est limité à 3 couches en raison du temps court.

Pour que le modèle soit plus précis, l'atmosphère doit être divisée, au moins, en 33 couches pour tenir compte de la grande variation de la pression et de la température.

Prochainement dans le futur, nous espérons améliorer notre code de calcul et intégrer de nouvelles paramètres tel que les bandes d'absorption, la réflectance atmosphérique, l'albédo... un modèle plus précis de l'atmosphère nous permettra de mieux étudier l'interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère et par la suite, d'accéder à l'imagerie satellitaires et à la télédétection, que nous essayerons d'aborder avec la simulation Monte Carlo.

**Merci pour votre  
attention**

