



Calitoo un instrument pour le climat

Samedi 19 et Dimanche 20 Novembre 2022
Université de Lille / LOA



Luc BLAREL ingénieur CNRS

Notre empreinte carbone...

Un « cube » d'air



Test de vision

Presque Rien....

Notre empreinte carbone...

0,04% de CO₂ -----> 400ppm

0,002% de Méthane CH₄

0,002% de protoxyde d'azote N₂O

Durée de séjour dans l'atmosphère

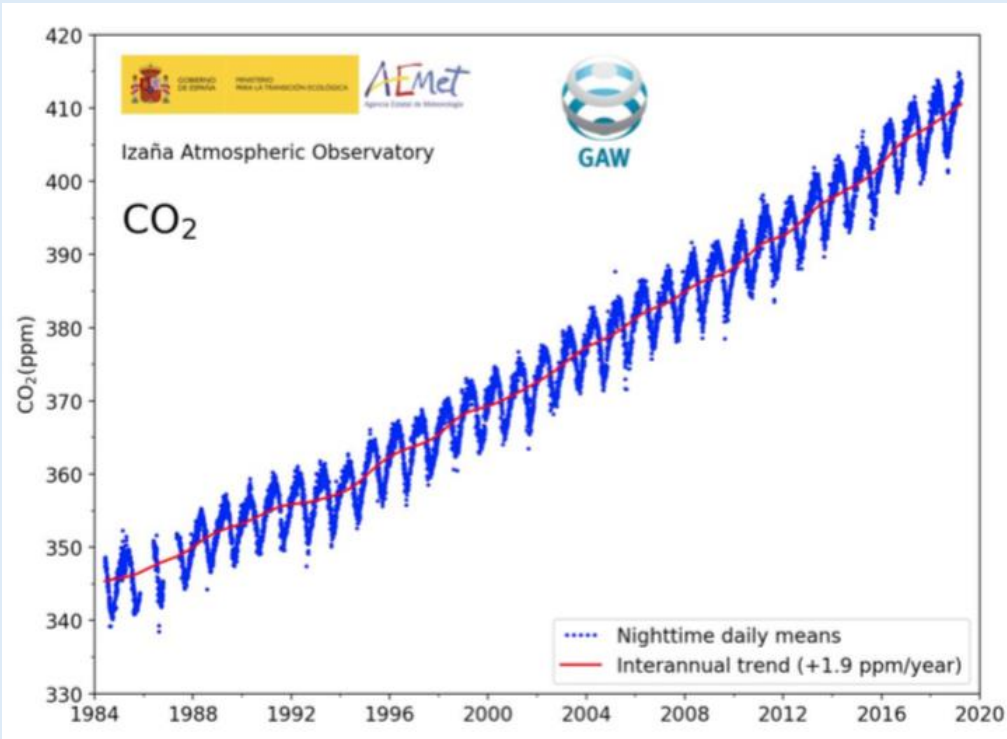
CO₂ → 100ans

CH₄ → 12 ans

N₂O → 120 ans

BONPOTE

**le climat
en questions**



L'atmosphère est **formée à 99 % d'azote (N₂) et d'oxygène (O₂)**.

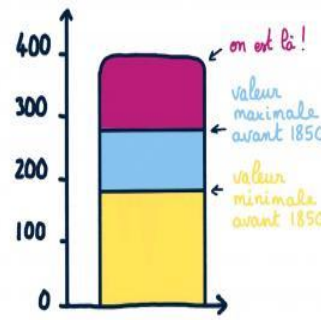
Ces molécules diatomiques n'absorbent pas le rayonnement infrarouge. Les « **gaz à effet de serre** », **dotés de trois atomes ou plus, absorbent l'infrarouge**.

Ils comprennent : la vapeur d'eau (H₂O), le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂), l'ozone (O₃), le méthane (CH₄) et quelques autres gaz (oxydes d'azote, CFC, etc.).

Les gaz à effet de serre sont présents en quantité infime : au total, ils représentent moins de 1 % des gaz dans l'atmosphère terrestre.

LE CO₂ ATMOSPHÉRIQUE EST PASSÉ DE 280 ppm (parties par million) EN 1850 À 400 ppm AUJOURD'HUI. IL A DONC AUGMENTÉ DE 42% EN 170 ANS.

AVANT 1850, SUR DES CENTAINES DE MILLIERS D'ANNÉES, LES CONCENTRATIONS DE CO₂ OSCILLAIENT ENTRE 180 ET 280 ppm.



Rapide comparaison gaz aerosols nuages

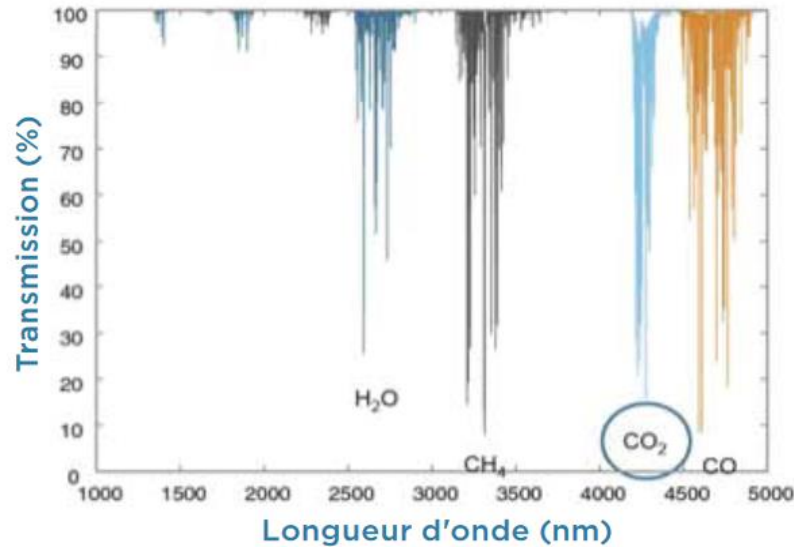
Les Gaz effet de serre

Pas simple de les mesurer...

Ils sont invisibles.

En très très faible quantité.

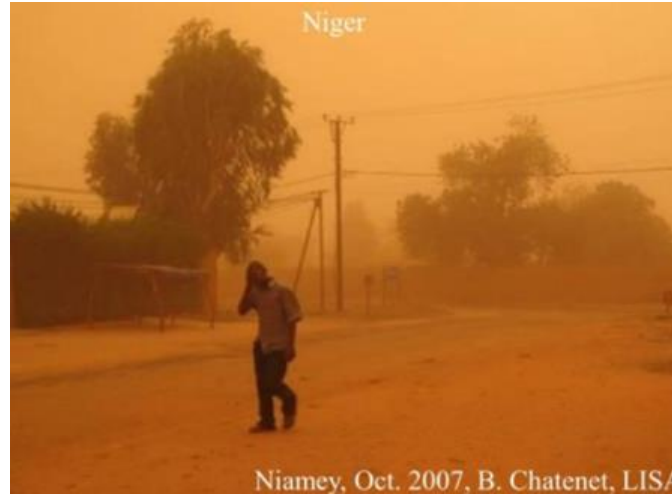
Capteurs spectroscopiques IR



Les Aérosols

Impactent **tout le spectre**

Mesure possible dans le visible



Répartition planétaire hétérogène.

Durée de vie très variable (QqH, PIJ).

Variété de natures

Impact sur le climat et la santé

Le forçage radiative 3,3 W/m² (Watt par m²) pour l'effet de serre et -1 W/m² pour les aérosols, soit 2,3 W/m² en tout.

Les Nuages

Impacte **toutes le spectre**

Variété très importante de types

Evaluation complexe par photo et radar depuis le sol et par satellite.

Les nuages ont deux effets opposés, refroidissant et réchauffant, sur le climat de la Terre.

Les mesures par satellites indiquent que, **en moyenne, les nuages refroidissent le climat**

La mesure des nuages demande beaucoup de moyens. Ils sont responsables de la **principale incertitude pour la prévision du climat futur**

Interaction entre l'H₂O, les aérosols et les nuages...

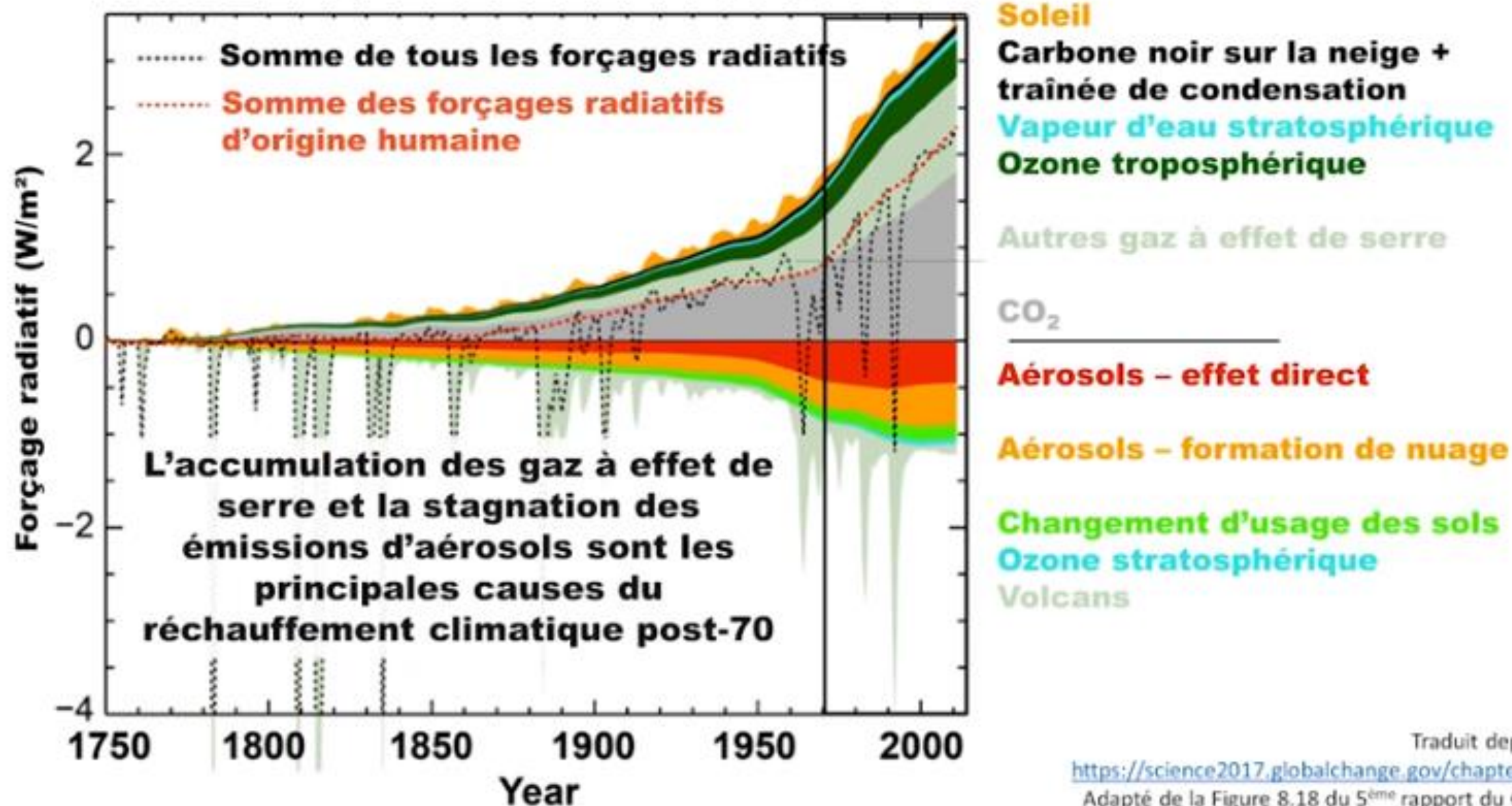
Figure 1. Absorption par IR du CO₂ et d'autres gaz.

Peu de mesures planétaires

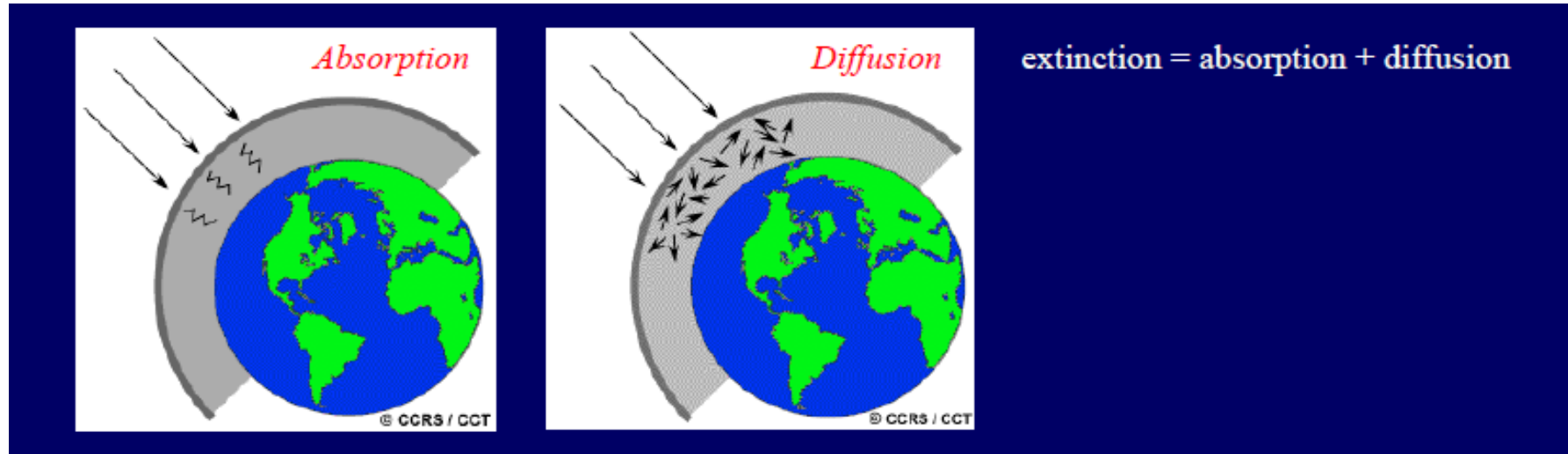
Mais assez représentatif.

Les gaz sont homogènes dans l'atmosphère et à durée de vie très longue.

Évolution temporelle des forçages radiatifs

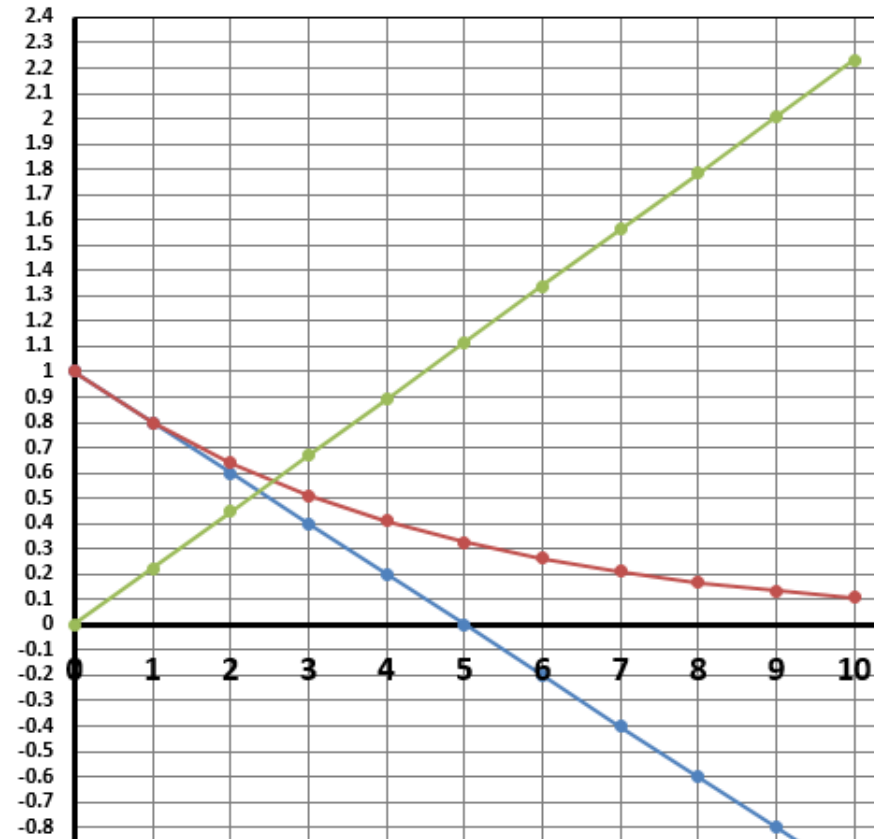
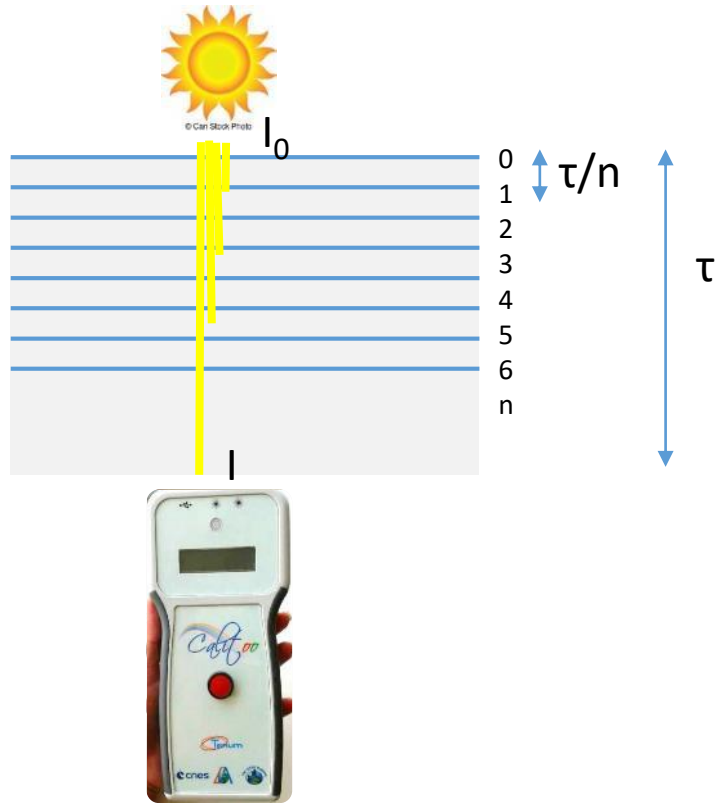


La signature optique des aérosols



**Epaisseur
Optique Aérosol
Ou AOD
Aerosol Optical
Depth**

La signature optique des aérosols



$$I_1 = I_0 \cdot (1-X) \text{ avec } X = \tau/n$$

$$I_2 = I_1 \cdot (1-X) = I_0 \cdot (1-X) \cdot (1-X)$$

....

$$I_n = I_{n-1} \cdot (1-X) = I_0 \cdot (1-X)^n = I_0 \cdot (1 - \tau/n)^n$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau} \text{ ou } T(\text{transmission}) = I/I_0 = e^{-\tau}$$

$$\tau = -\ln(T)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e$$

\mathcal{L} l'épaisseur optique (OD/AOD) *Optical depth*

- $\tau_{\text{total}} = \tau_{\text{aérosol}} + \tau_{\text{moléculaire}}$ (Moléculaire = de l'air)

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-m(\tau_a + \tau_g + \tau_{NO_2} + \tau_w + \tau_{O_3} + \tau_r)) \quad [1]$$

- **I_0 : intensité de la lumière solaire hors atmosphère**
 - **I : lumière reçue au sol**
 - **λ est la longueur d'onde de la lumière**
 - τ_a : coefficient de transparence des aérosols
 - τ_g : coefficient de transparence des gaz (CO₂ et O₂)
 - τ_{NO_2} : coefficient de transparence du dioxyde d'azote (pollution)
 - τ_w : coefficient de transparence de la vapeur d'eau
 - τ_{O_3} : coefficient de transparence de l'ozone
 - **τ_r : coefficient de la diffusion Rayleigh**
 - **m : coefficient de la masse d'air traversée par la lumière (chemin optique)**
 - **$m = \frac{1}{\sin(\theta)}$ avec θ l'angle de la position du Soleil avec l'horizon**
 - **R : Coefficient de correction de la distance terre soleil**
 - **P : pression atmosphérique**
- $$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{a\lambda} = -\frac{1}{m} \cdot \ln(T_\lambda \cdot R^2) - \tau_{r\lambda} \left(\frac{P}{P_0}\right) - \tau_{O_3\lambda} \\ T_\lambda = \frac{I_\lambda}{I_{O\lambda}} \end{array} \right.$$

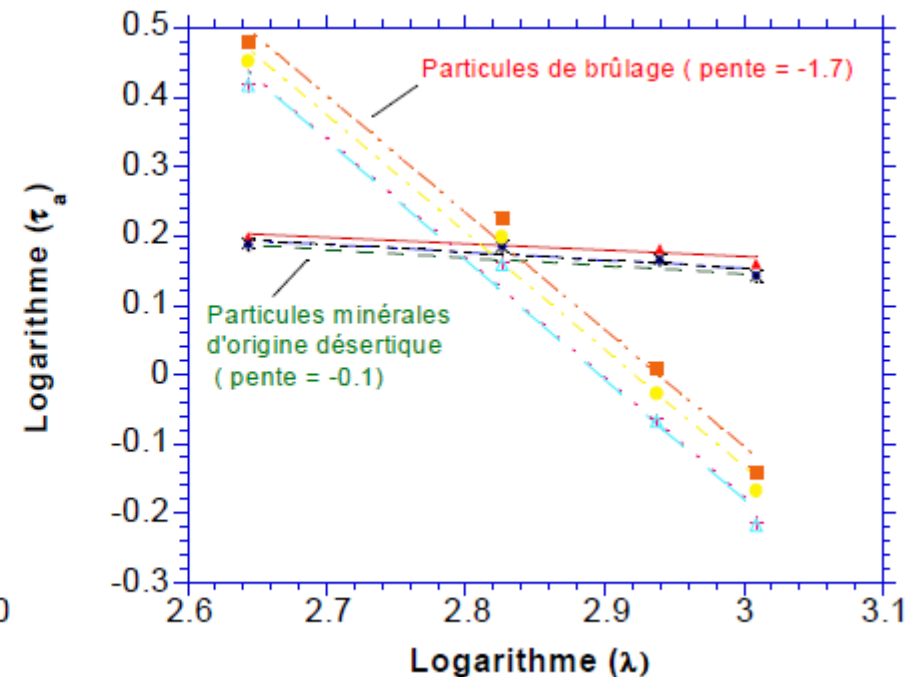
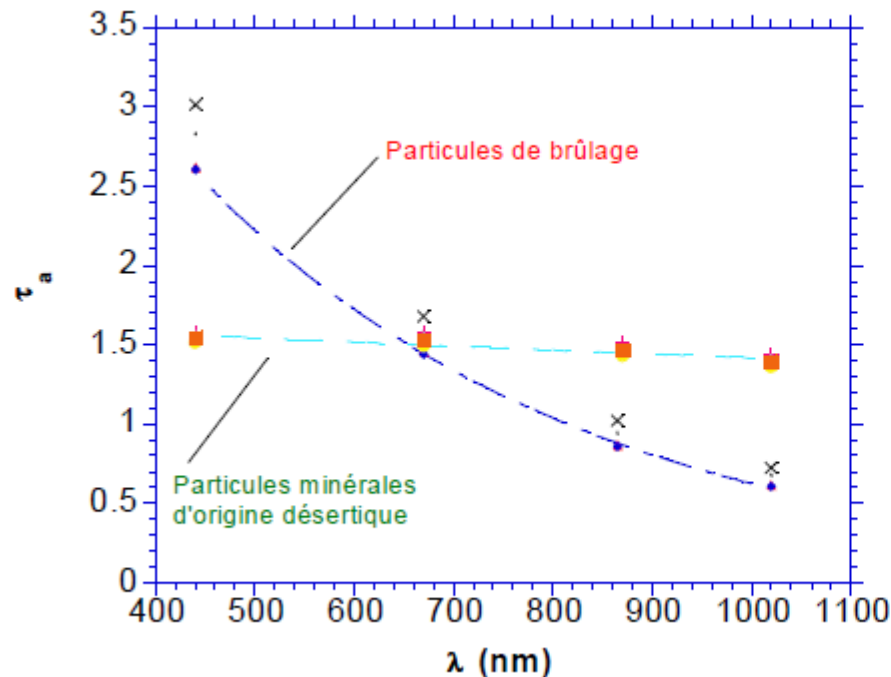
Coefficient d'Angström

Le comportement spectral de l'AOD peut être décrit à l'aide du coefficient d'Angström

Ici, τ_1 et τ_2 sont respectivement les mesures de l'épaisseur optique réalisées aux longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 . Le coefficient d'Angström, comme l'épaisseur optique à deux longueurs d'ondes, peut **donc être considéré comme un indicateur de la taille moyenne** de la distribution de taille des aérosols.

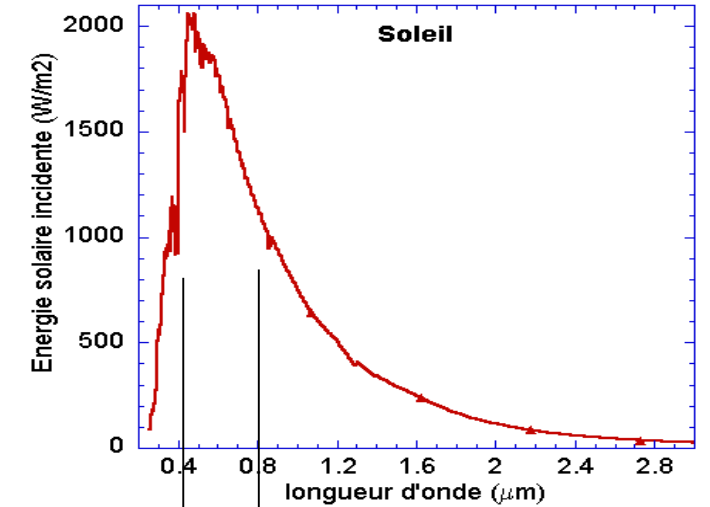
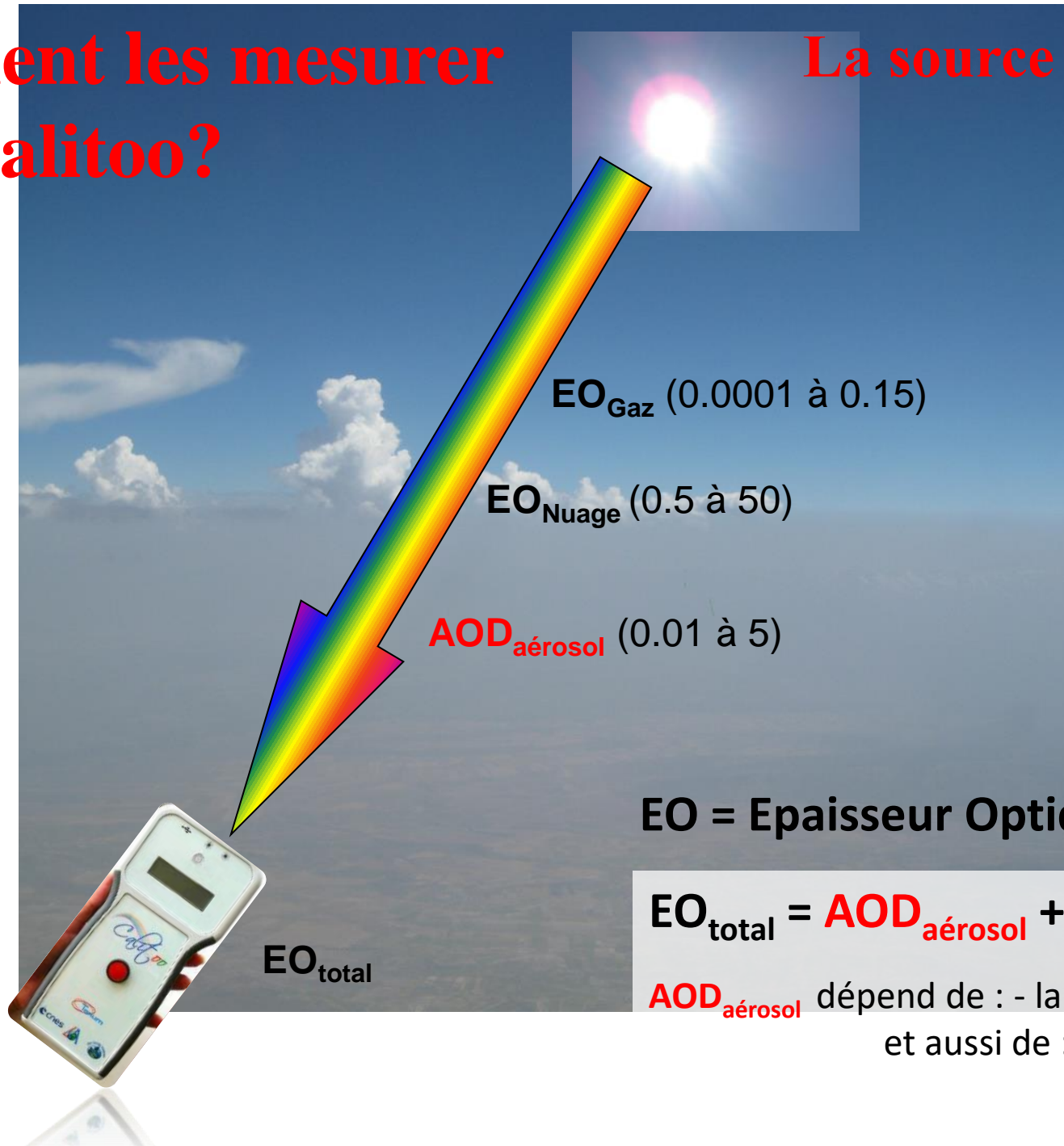
$$\alpha = - \frac{\ln\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}$$

- **α est grand, la distribution de taille est petite et inversement**



Comment les mesurer avec Calitoo?

La source d'énergie : le soleil



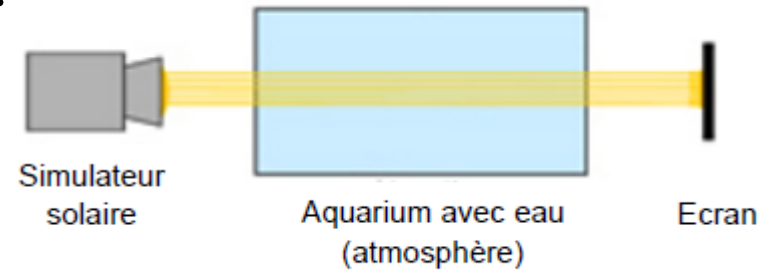
L'intégrale sur tout le spectre donne ~ 1367 W/m² (au sommet de l'atmosphère)

EO = Epaisseur Optique = extinction

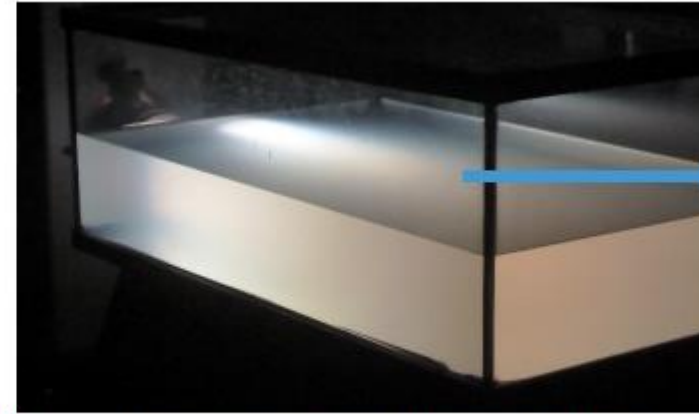
$$EO_{\text{total}} = AOD_{\text{aérosol}} + EO_{\text{Gaz + vapeur d'eau}} + EO_{\text{Nuage}}$$

$AOD_{\text{aérosol}}$ dépend de : - la quantité de particules (nombre)
et aussi de : - la taille des particules
- la nature des particules

Un arc en ciel d'aérosols



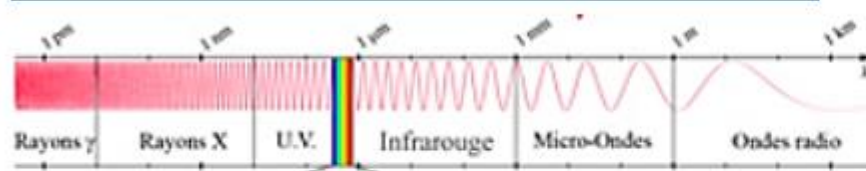
Expérience après avoir ajouté le lait



On ajoute du lait dans l'eau. Le lait représente les particules dans l'atmosphère.

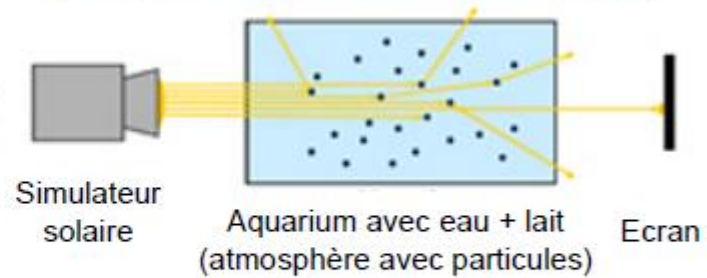
Le lait représente les particules dans l'atmosphère.

Ordre des couleurs présentes dans la lumière blanche

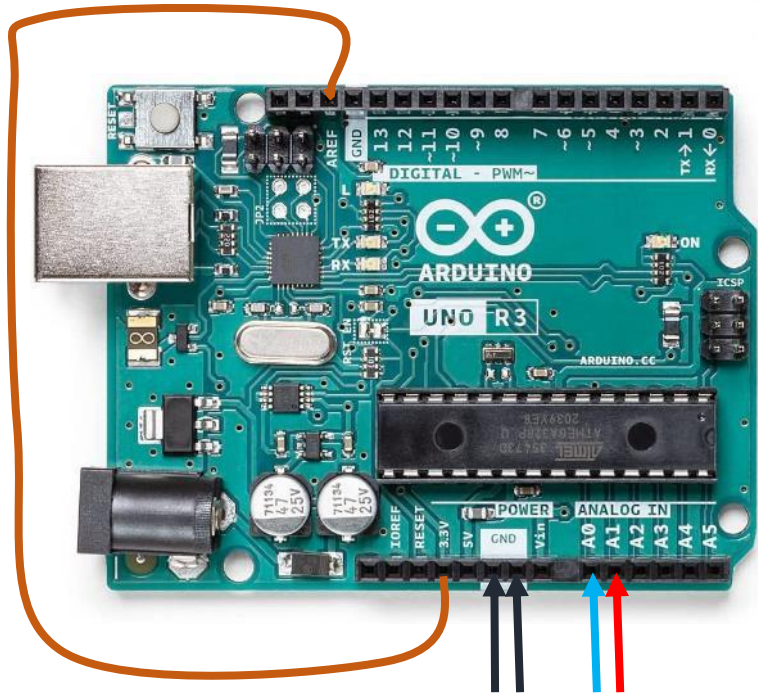
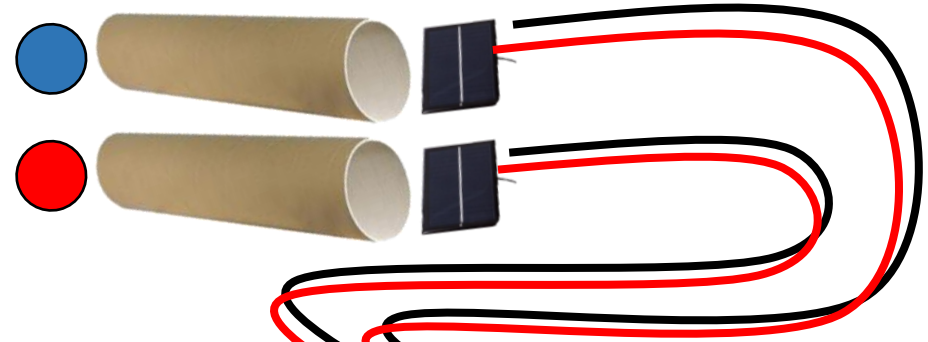
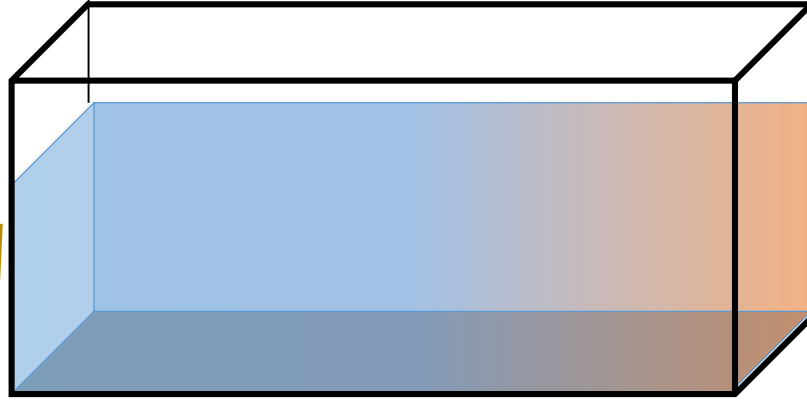
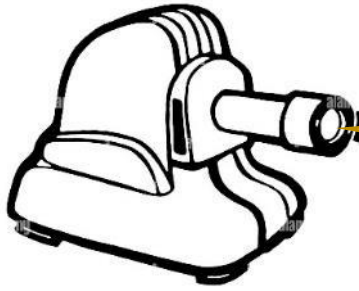


Le rayonnement que nous percevons (visible) n'est qu'une infime partie du rayonnement total émis par le Soleil

Diffusion de la lumière par les particules



Plan mainp photomètre "Low-tech"



```
int analogPin = A0; // potentiometer wiper (middle terminal) connected to analog pin 3
int analogPin2 = A1; // potentiometer wiper (middle terminal) connected to analog pin 3
// outside leads to ground and +5V
int val = 0; // variable to store the value read
int val2 = 0; // variable to store the value read
```

```
void setup() {
  // permet de choisir une tension de référence externe à la carte
  analogReference(EXTERNAL);
}
```

```
Serial.begin(9600); // setup serial
Serial.println("CLEARDATA"); // on efface les données déjà présentes, s'il y a lieu
Serial.println("LABEL, Temps, Mesure"); // titre des colonnes, dans Excel
```

```
}

void loop() {
  delay(300); // wait for a second - Ajouter sinon le prog Excel plante - sans doute un pb de buffer saturé
  val = analogRead(analogPin); // read the input pin
  val2 = analogRead(analogPin2); // read the input pin
  Serial.print("DATA, TIME, "); // envoi du temps et la mesure à Excel
  Serial.println(float(val)/1023*3.3); // debug value passage en 3.3v Octobre 2022
  Serial.println("ROW, SET, 3");
  Serial.print("DATA, TIME, "); // envoi du temps et la mesure à Excel
  Serial.println(float(val2)/1023*3.3); // debug value passage en 3.3v Octobre 2022
}
```

Matériel et cout pour la manip (fabrication) d'un Photomètre « Low tech »

Inwa - Aquarium Start 35 pack pur Noir - 13 Litres

<https://www.jardiland.com/inwa-aquarium-start-35-pack-pur-noir-13-litres-1487310.html> **31E**

Choisir un des 2 modèles mais c'est mieux 50x50 pour 5V:

Cellule solaire TRU COMPONENTS POLY-PVZ-4949-2V 1389147

<https://www.conrad.fr/fr/p/cellule-solaire-tru-components-poly-pvz-4949-2v-1389147-1-pc-s-1569022.html> **2x7.5E**

Cellule solaire TRU COMPONENTS POLY-PVZ-3070-5V (L x l) 70 mm x 30 mm

<https://www.conrad.fr/fr/p/cellule-solaire-tru-components-poly-pvz-3070-5v-1389155-1-pc-s-1565766.html> **2x9E**

Module d'acquisition Carte Arduino UNO 65139 ATmega328

<https://www.conrad.fr/p/carte-arduino-uno-65139-atmega328-191789> **27E**

Dichroic or Color Filters Edmund

Mounted M49 x 0.75 Threaded - Blue Filter

<https://www.edmundoptics.fr/p/mounted-m49-x-075-threaded-blue-filter/11489> **53.50E**

Mounted M49 x 0.75 Threaded - Red Filter

<https://www.edmundoptics.fr/p/mounted-m49-x-075-threaded-red-filter/11471/> **53.5E**

Total 185Euros

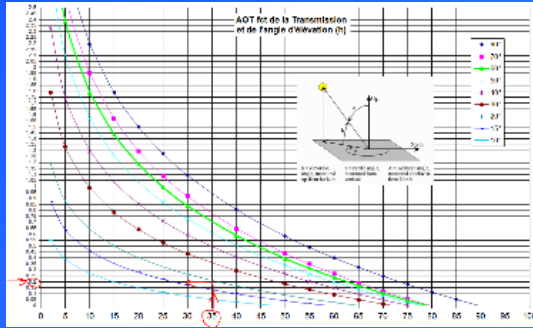
Soft et plan de montage Arduino

<https://tribu.phm.education.gouv.fr/toutatice-portail-cms-nuxeo/binary/Entr%C3%A9es+Analogique.pdf?type=FILE&path=%2Fdefault-domain%2Fworkspaces%2Finterface-arduino-excel%2Fdocuments%2Ffg%2Fentrees-analogique-pdf&portalName=foad&liveState=true&fieldName=file:content&t=1564046307>

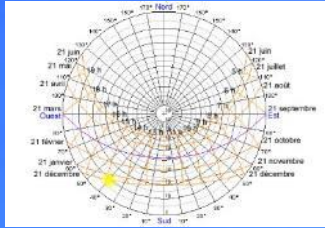
Plan mainp aquarium avec le Calitoo



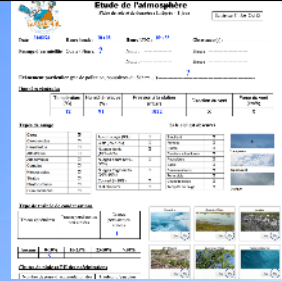
Les Aérosols une multitude d'approches



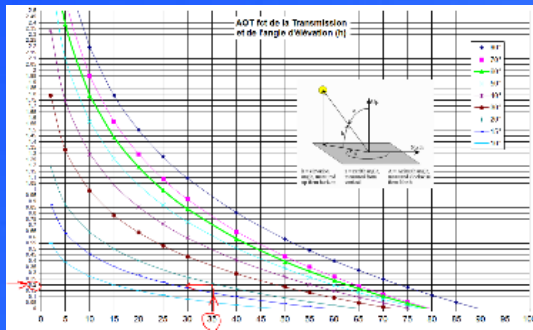
Calculs de l'AOD avec abaque



Observation mesure sur papier



Les Aérosols une multitude d'approches



Calculs de l'AOD avec abaque



Observation mesure sur papier



Approche de l'équation + Tableur

Calculateur d'épaisseur optiques AOD (t) + AE

$$T_{0.5} = \frac{CNR_{0.5}}{CNO_{\lambda}}$$

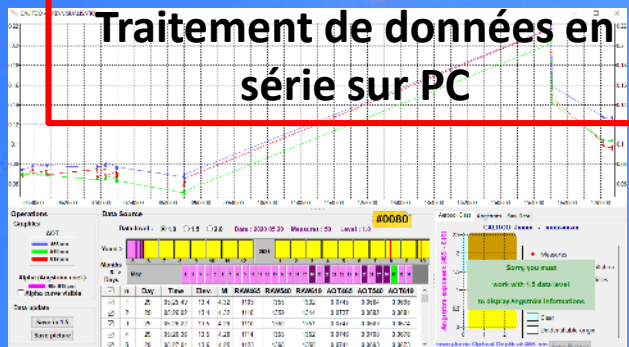
$$T_{0.5} = \frac{1}{m} \ln(T_{\lambda} R_{\lambda}) \quad T_{0.5} = \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad T_{0.5} = R = \frac{(1 - \epsilon^2)}{[1 - \epsilon \cos(2\theta) d / 265]}$$

$$\alpha = \frac{\ln(\frac{T_{\lambda}}{T_0})}{d}$$

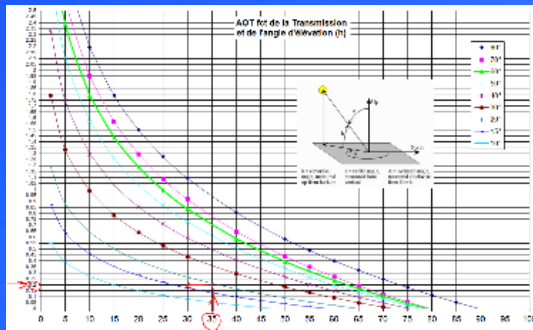
AE	019/505	019/505
01/01/2015 08:21:15	1017	15.3
02/01/2015 08:21:15	1017	15.3
03/01/2015 08:21:15	1017	15.3
04/01/2015 08:21:15	1017	15.3
05/01/2015 08:21:15	1017	15.3
06/01/2015 08:21:15	1017	15.3
07/01/2015 08:21:15	1017	15.3
08/01/2015 08:21:15	1017	15.3
09/01/2015 08:21:15	1017	15.3
10/01/2015 08:21:15	1017	15.3
11/01/2015 08:21:15	1017	15.3
12/01/2015 08:21:15	1017	15.3
13/01/2015 08:21:15	1017	15.3
14/01/2015 08:21:15	1017	15.3
15/01/2015 08:21:15	1017	15.3
16/01/2015 08:21:15	1017	15.3
17/01/2015 08:21:15	1017	15.3
18/01/2015 08:21:15	1017	15.3
19/01/2015 08:21:15	1017	15.3
20/01/2015 08:21:15	1017	15.3



Traitement de données en série sur PC



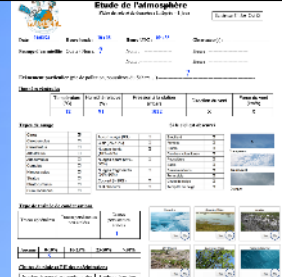
Les Aérosols une multitude d'approches



Calculs de l'AOD avec abaque



Observation mesure sur papier



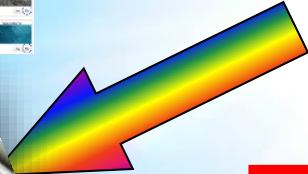
Approche de l'équation + Tableur

Calculateur d'épaisseur optique AOD (τ) + AE

$$\tau_{\text{aod}} = \frac{1}{m} \ln(I_0 / I) - \tau_{\text{aod}} \left(\frac{P}{P_0} \right) - \tau_{\text{aod}} R = \frac{(1 - \epsilon^2)}{[1 - \epsilon \cos(2\theta) + 1/265]}$$

$$T_p = \frac{CNR_{\text{ray}}}{CNO_{\lambda}}$$

AE	τ atm	τ atm-ray	τ atm-ray+ozone
019/540	0.19	0.19	0.19
019/505	0.19	0.19	0.19



Investigation

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER + Visit NASA.gov

AERONET

AEROSOL ROBOTIC NETWORK

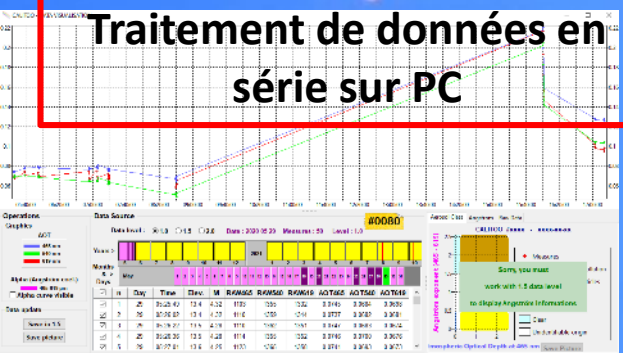
- + AEROSOL OPTICAL DEPTH
- + AEROSOL INVERSIONS
- + SOLAR FLUX
- + OCEAN COLOR
- + MARITIME AEROSOL

Web Site Feature: AERONET Data Synergy Tool - Access Earth Science data sets for AERONET sites

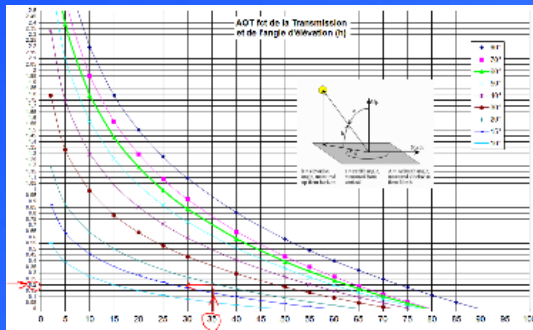
Home

The AERONET (AErosol Robotic Network) project is a federation of ground-based remote sensing aerosol networks established by NASA and PHOTONS (PHotométrie pour le Traitement

Traitement de données en série sur PC



Les Aérosols une multitude d'approches



Calculs de l'AOD avec abaque



Observation mesure sur papier

Approche de l'équation + Tableur

Calculateur d'épaisseur optique AOD (t) + AE

$$T_{0.5} = \frac{CNR_{0.5}}{CNO_{0.5}}$$

$$T_{0.5} = \frac{1}{m} \ln(T_{0.5} R^2) \tau_{0.5} \left(\frac{P_0}{P_s} \right) \tau_{0.5} R = \frac{(1-\epsilon^2)}{[1-\epsilon \cos(2\theta) d / 265]} \alpha = \ln\left(\frac{T_{0.5}}{T_0}\right)$$


Calinet

Investigation

AERONET AEROSOL ROBOTIC NETWORK

- + AEROSOL OPTICAL DEPTH
- + AEROSOL INVERSIONS
- + SOLAR FLUX
- + OCEAN COLOR
- + MARITIME AEROSOL

Traitement de données en série sur PC



Satellite data set selection

Comparaison Satellite



