

Avec Erwan nègre, hibernant à DDU et titulaire en 2016 d'un doctorat en physique (spectroscopie laser).  
*« j'utilise les propriétés de la lumière pour sonder la matière (solide, liquide ou gazeuse) »*



**ETUDE DE L'OZONE.** PROGRAMME 209

**LE SAOZ ET LE LIDAR. PARTIE 1.**

- COMPRENDRE LES OBJECTIFS
- LES RELIER AUX RÉSULTATS OBTENUS

**PROGRAMME IPEV 209 NDACC-ANTARCTICA  
DIRIGÉ PAR JUMELET JULIEN**



Les objectifs du Programme 209 NDACC antarctique consistent en la surveillance à long terme de l'ozone stratosphérique, en particulier par l'étude de populations de particules (aérosols, nuages stratosphériques polaires ou « PSC ») impliqués dans sa destruction. Un ensemble d'instruments dédiés à la mesure d'occurrence des nuages polaires et la caractérisation de leurs propriétés physiques, ainsi qu'à la mesure d'ozone sont actuellement en place dans les stations françaises de Dumont d'Urville et de Kerguelen.



**Le Shelter LIDAR à D.D.U**

## SURVEILLANCE DE L'OZONE STRATOSPHERIQUE à D.D.U

### Le spectromètre SAOZ

Système d'Analyse par  
Observation Zénithale.

*Spectroscopie passive en  
absorption*

- ➔ mesure deux fois par jour, matin et soir, des colonnes stratosphériques d'ozone ( $O_3$ ) et de dioxyde d'azote ( $NO_2$ )

### Le LIDAR atmosphérique de DDU

*Spectroscopie active par  
rétrodiffusion*

Instrument comportant un laser, des optiques d'émission et de réception, un système électronique de détection et d'acquisition.

- ➔ mesure le phénomène optique de diffusion de certaines particules atmosphériques

Réseau de surveillance Mondial NDACC (Network for the detection of atmospheric composition change) ➔ apport pour le GIEC

**Rappel** : la concentration en ozone correspond à un **équilibre dynamique (cycle naturel)** entre production et destruction naturelles. Les activités humaines perturbent ce cycle et accentuent la destruction de cette molécule.

La destruction de l'ozone stratosphérique se produit :

- à la **lumière**
- en présence de chlorofluorocarbones (**CFC**) ou d'hydrates de chlorofluorocarbones (**HCFC**) issues des activités humaines. (le Protocole de Montréal signé en 1987 interdit progressivement l'utilisation des CFC, mais la durée de vie de ces composés dans l'atmosphère est de l'ordre d'une centaine d'année).

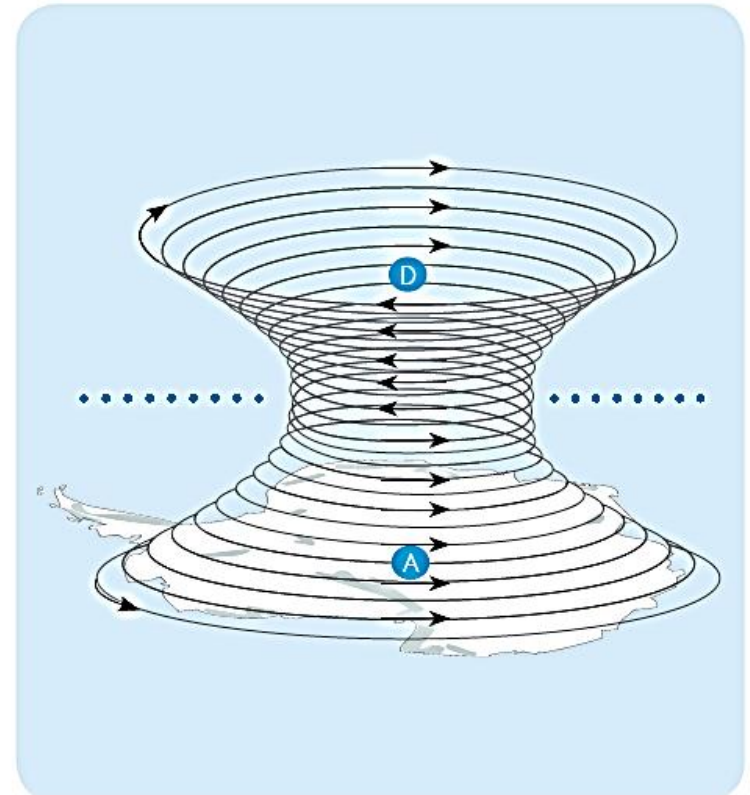
### **Pourquoi cette destruction a-t-elle lieu essentiellement au-dessus de l'Antarctique ?**

car d'autres facteurs interviennent dans la destruction de l'ozone stratosphérique :

- des **température très basses**
- le **vortex polaire** (tourbillon d'air très froid) qui empêche le mélange des particules d'air avec les autres zones du globe
- les **nuages polaires** dans la stratosphère qui accélèrent la destruction de la couche d'ozone  
**(PSC : polar stratospheric cloud)**

*Rq : il n'y a pas de vortex polaire en Arctique.*

Structure type d'un vortex polaire en Antarctique

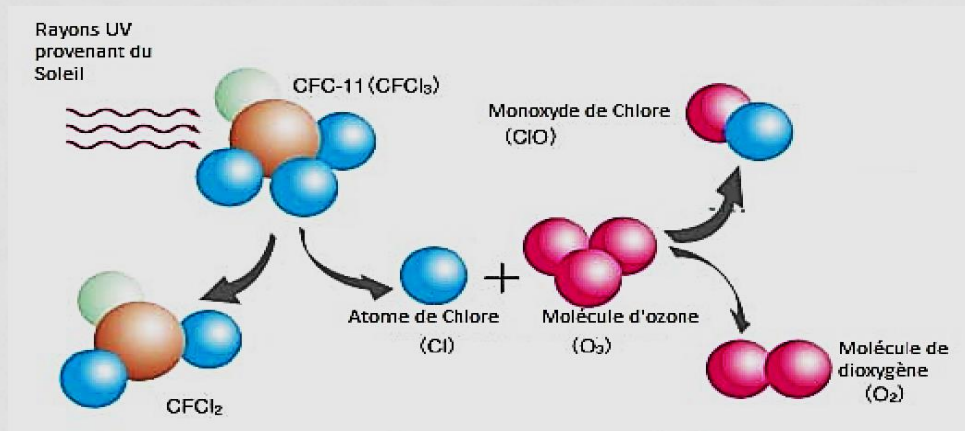


**A retenir** : la destruction de l'ozone stratosphérique a donc lieu de la fin de l'hiver jusqu'au printemps austral (d'août à décembre). Puis l'ozone suite à l'ouverture du vortex et à l'apport d'ozone provenant des régions voisines



## LE SAOZ : un peu de chimie ...

On l'a dit : les CFC sont responsables de la destruction de l'ozone stratosphérique. Mais le **dioxyde d'azote,  $\text{NO}_2$**  va servir de **catalyseur vis-à-vis de ces composés** : il va casser ces composés et ainsi libérer l'atome de chlore ou l'atome de brome qui va réagir avec la molécule d'ozone.



Le **SAOZ** mesure donc à la fois :

- la concentration en  $\text{O}_3$
- la concentration en  $\text{NO}_2$

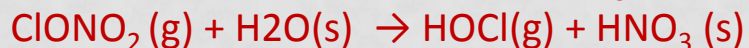
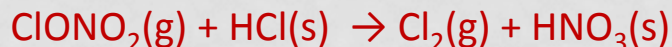
dans la haute troposphère et dans la basse stratosphère.

Étape finale de la destruction de la molécule d'ozone

## LE SAOZ : un peu de chimie ...

Dans le détail, Erwan explique :

*Au sein des PSC les molécules de HCl, ClONO<sub>2</sub> et BrONO<sub>2</sub> du réservoir, vont venir précipiter et des réactions chimiques hétérogènes (réactions qui se déroulent à la surface de solides), qui n'ont pas lieu dans des conditions atmosphériques « normales », vont se produire dans les nuages stratosphériques polaires. Le HCl va se dissoudre dans les cristaux et, lorsque le ClONO<sub>2</sub> rencontre de tels cristaux, les réactions suivantes ont lieu (cas du Cl illustré ici) :*

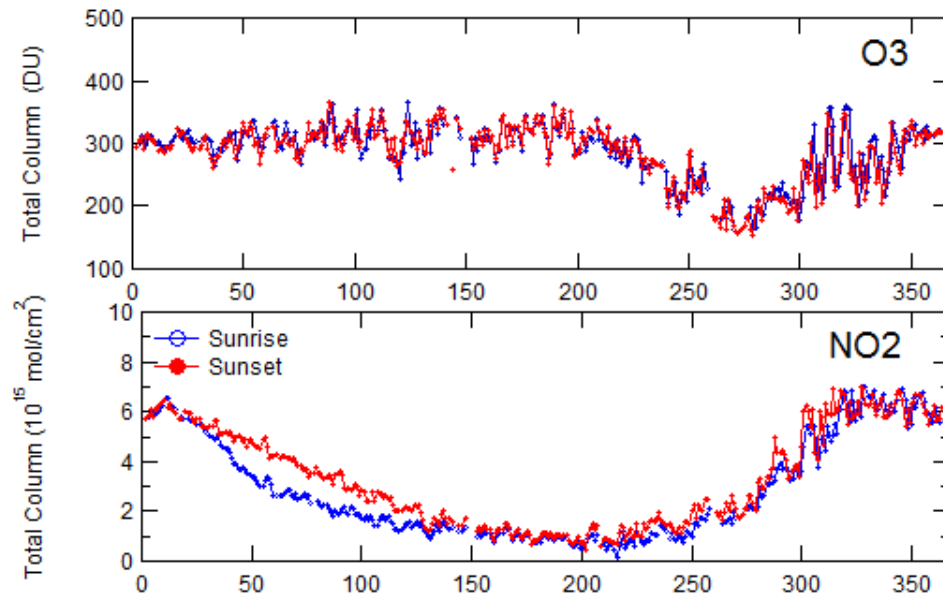


(« g » signifie gaz et « s » solide)



Dumont d'Urville 66.7 S; 140.0 E 2015

## LE SAOZ : résultats



Rq : en ordonnée pour l'ozone : dobson unit ; en abscisse : nombre de jours

**Dans un premier temps, durant l'hiver austral,** le  $\text{NO}_2$  s'associe aux composés CFC (oxydes de brome et de chlore) provenant des plus basses latitudes : formation de composés type  $\text{ClONO}_2$  et  $\text{BrONO}_2$  d'où la diminution de la concentration en  $\text{NO}_2$  dans la stratosphère.

**Dans un second temps, à la fin de l'hiver et durant tout le printemps austral,** la lumière revient : elle contribue à casser les liaisons établies entre la molécule de dioxyde d'azote et l'atome de chlore (ou de brome). Le chlore et le brome réagissent alors avec l'ozone dont la concentration diminue. (le  $\text{NO}_2$  libéré sous l'action des UV augmente alors dans la stratosphère).

## LE LIDAR : un peu de physique...

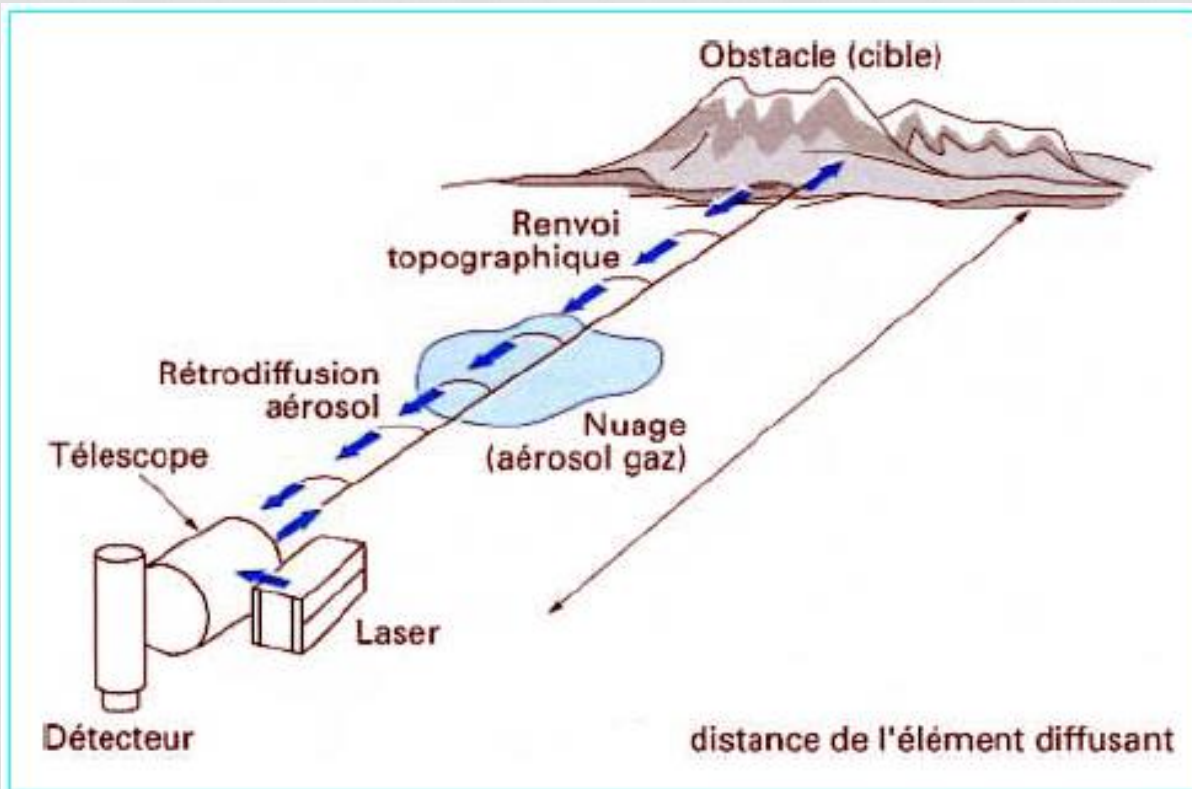


Figure 1 : Principe du lidar atmosphérique (J. Cornillault CILAS)

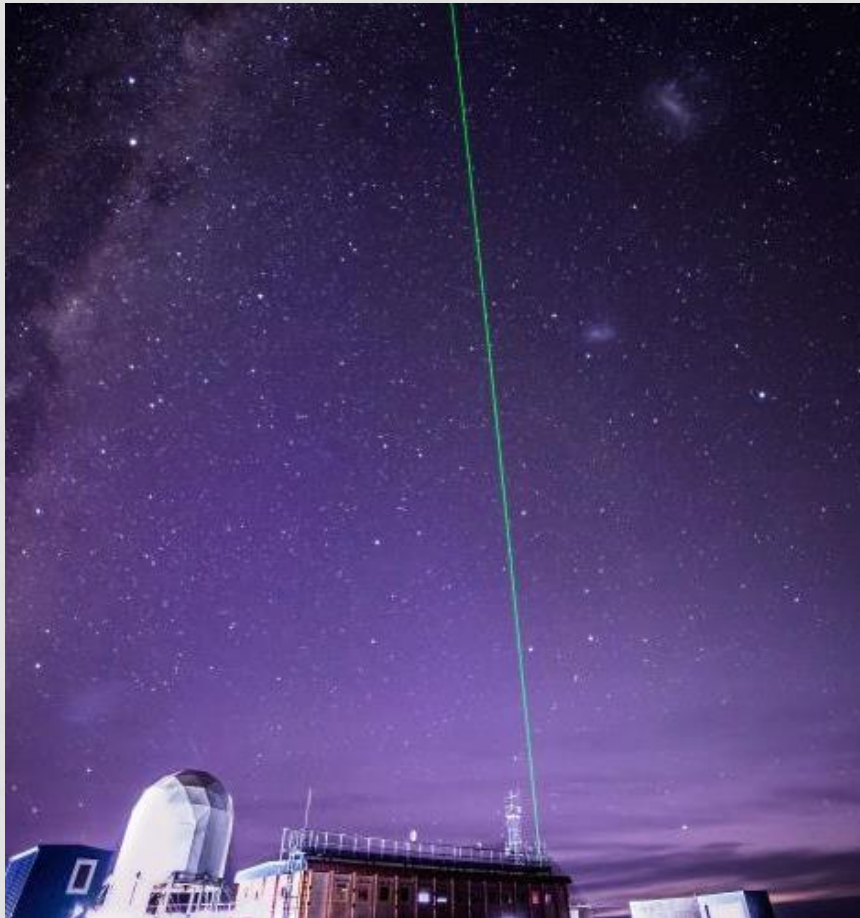
Le principe utilisé est voisin de celui du radar, d'où le nom de Lidar (*Light Detection And Ranging*) qui s'applique à la fois à l'instrument et à la méthode de télédétection correspondante.

Un lidar comporte toujours un émetteur et un récepteur (figure 1). La source est un laser, généralement impulsionnel, émettant dans un domaine de transparence de l'atmosphère soit, typiquement, entre 0,3 et 10  $\mu\text{m}$ .



## LE LIDAR du DDU : repérer la formation des PSC ! Mesures des aérosols et de la vapeur d'eau en haute troposphère et basse stratosphère

Tir laser réalisé par un hivernant à DDU



Le lidar de DDU est composé d'un laser et de 4 détecteurs : un pour la polarisation parallèle couche basse, un pour la polarisation parallèle haute (deux voies pour ne pas griller les détecteurs de ce type de LIDAR, trop sensibles aux émissions des particules de la basse troposphère), un pour la polarisation perpendiculaire et un pour l'effet raman à 607 nm, peu exploité pour l'instant. La fréquence naturelle du laser est 1064 nm (infrarouge) mais pour optimiser l'interaction entre les particules et le laser, un cristal doubleur de fréquence est utilisé pour que le laser « tire » à 532 nm, c'est-à-dire dans les longueurs d'onde du vert. C'est **la longueur d'onde la plus fréquemment utilisée à DDU ce qui donne cette couleur verte au faisceau sortant de la station Lidar.**

**Ce type de lidar ne fonctionne que la nuit.**

## LE LIDAR de DDU : comment caractériser les PSC ?

On l'a dit : les PSC (polar stratospheric cloud) accélère la destruction de l'ozone stratosphérique.

### Il y a trois type de PSC :

- Les ICE : ils sont constitués de cristaux asphériques de glace. Formation lorsque T est très faible, vers 185 Kelvin (-88°C)
- Les NAT : ils sont essentiellement constitués de cristaux d'eau et d'acide nitrique asphériques. Température de formation 7 à 10 K au dessus des ICE. Tailles des particules Nat : environ 1 µm.
- Les STS : ils sont constitués de particules sphériques en phase liquide d'acide nitrique, d'acide sulfurique et d'eau. Température de formation 2 à 3 K au dessous des NAT (vers 191 Kelvin, soit -82°C) . Taille des particules STS : environ 0,5µm.

**Rappel** : les PSC ne se forment que dans la stratosphère.

### Quel est le rôle du LIDAR de DDU vis-à-vis de ces PSC ?

- détecter la présence des PSC
- caractériser la nature chimique des PSC (les ICE étant les plus dangereux)

### Quel principe de physique est utilisé ?

Le Lidar à DDU est un **laser** de type Rayleigh/Mie/Raman. Il utilise un phénomène optique particulier : **la diffusion**. Chaque molécule ou particule de l'atmosphère renvoie une partie plus ou moins importante du signal lumineux (par diffusion Rayleigh, Mie ou Raman), que l'on appelle **signal rétrodiffusé**. Ce dernier sera collecté à l'aide d'un **télescope de Newton**, et un traitement numérique adapté permettra d'obtenir un profil de diffusion en fonction de l'altitude. Le lidar de DDU collecte donc le signal rétrodiffusé par les aérosols et la vapeur d'eau constitutifs des différents PSC.

## LE LIDAR de DDU : comment caractériser les PSC ?

Pour détecter et caractériser les PSC, Erwan doit connaître 3 paramètres :

- **l'altitude**
- **Identifier les particules grâce au signal de diffusion**
- **Identifier le type de PSC grâce à la dépolarisation des particules**

## LE LIDAR de DDU. Etape 1 : connaître l'altitude.

On l'a dit : les PSC se forment dans la stratosphère.

**Mais où est la limite troposphère – stratosphère ?  
Erwan se fie au rapport du ballon sonde météo émis  
chaque jour à DDU.**

**Rappel 1** : la tropopause est plutôt basse en Antarctique :  
entre 6 et 10 km

**Rappel 2** : cette valeur varie selon les jours !  
Erwan doit donc savoir quel nuage il est entrain d'observer !  
Tous les nuages présents sous la stratosphère ne peuvent en  
aucun cas être des PSC !

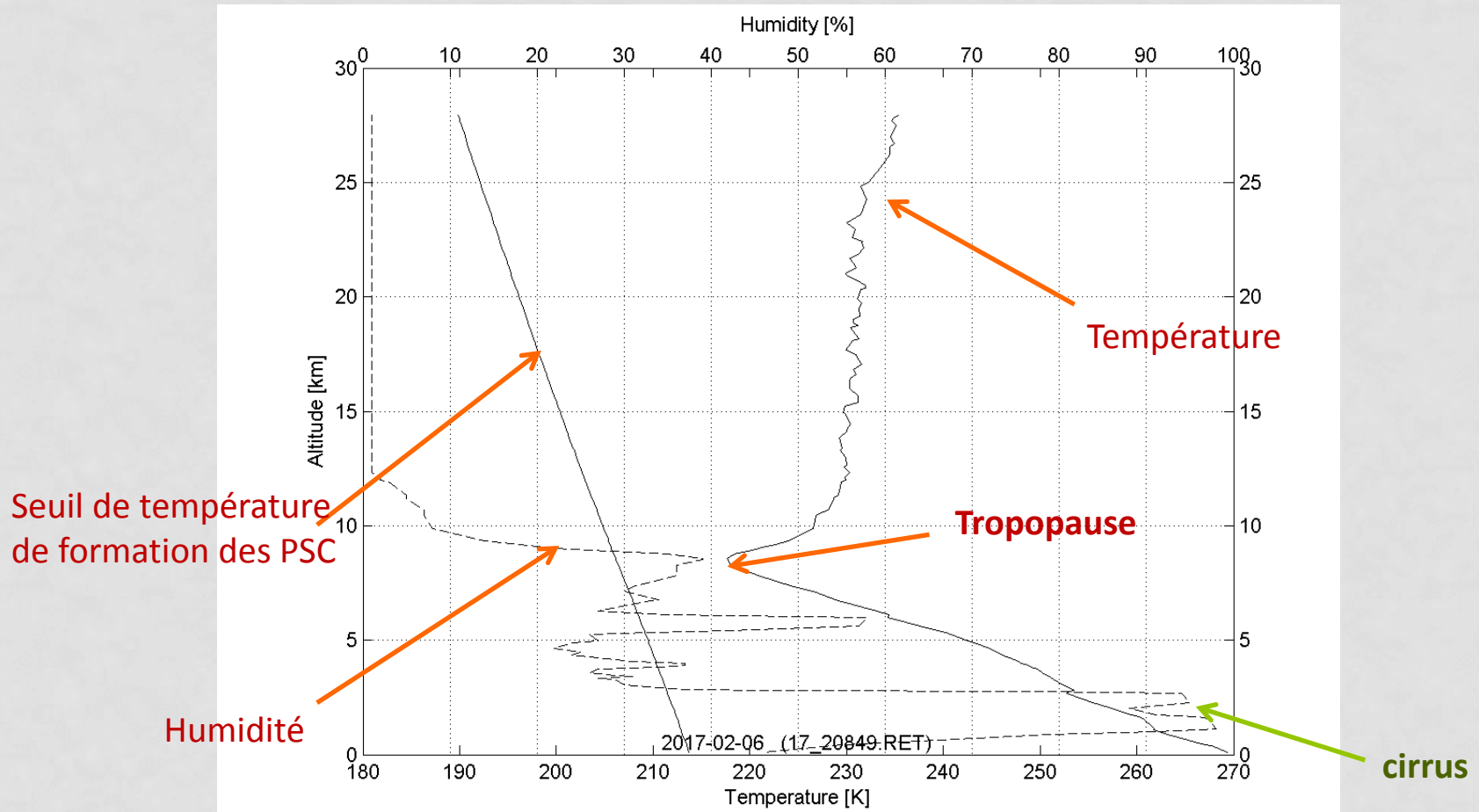
Alexandre Flouttard, météo de DDU qui gonfle le ballon sonde





# LE LIDAR de DDU. Etape 1 : connaître l'altitude pour rechercher d'éventuels PSC.

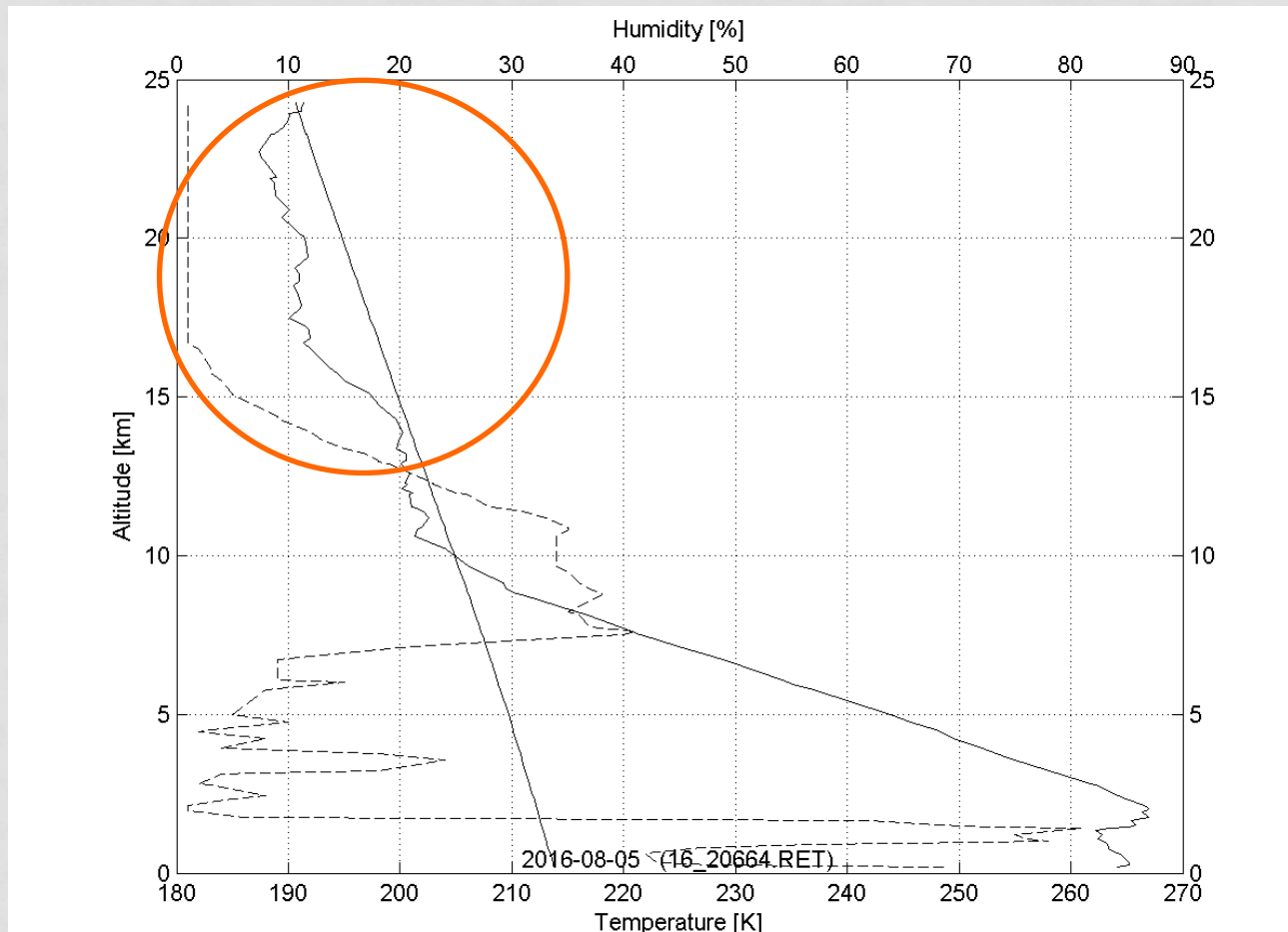
## Exemple 1 : altitude de la stratosphère et nuages présents



Ici, il n'y a pas de nuages type PSC qui peuvent se former. La température n'est pas assez basse. Nous sommes en février. Les nuages que l'on peut deviner ici sont plutôt de type cirrus

## LE LIDAR de DDU. Etape 1 : connaître l'altitude pour rechercher d'éventuels PSC.

Exemple 2: altitude de la stratosphère et nuages présents. ALERTE PSC !



Ici, au moins d'août 2016, on voit **que la température est passée sous le seuil de formation des PSC. Cette nuit là, l'hivernante de DDU, Anne-Gaëlle, a enchaîné 13 heures de tirs laser : alerte PSC maximale !!**

Annabelle KREMER\_2017-02-09

## LE LIDAR de DDU. Etape 2 : remonter à la nature des particules grâce au signal de diffusion reçu.

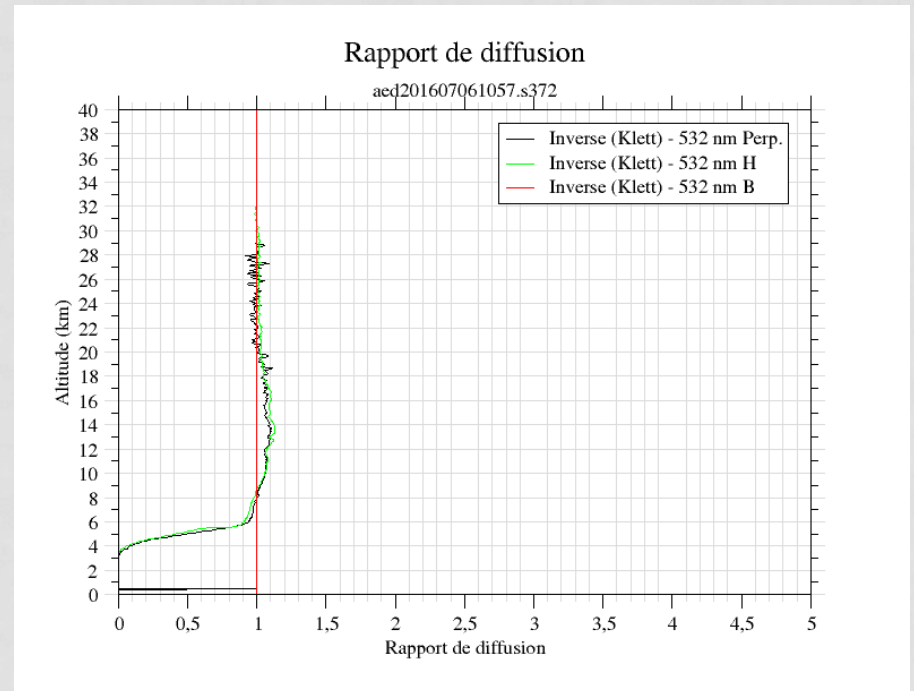
Erwan inverse le signal optique lidar pour remonter à la nature des particules.

**C'est la rétrodiffusion.**

Il analyse **un rapport de diffusion** :

$$1 + (\beta_{\text{part}} / \beta_{\text{mol}})$$

où  $\beta_{\text{part}}$  correspond à la rétrodiffusion des particules intervenant dans la formation de PSC ou de nuages en général et où  $\beta_{\text{mol}}$  correspond à la rétrodiffusion naturelle de l'atmosphère.



## LE LIDAR de DDU. Etape 2 : remonter à la nature des particules grâce au signal de diffusion reçu.

**Klett** est le nom du scientifique ayant mis au point la méthode d'inversion du signal lidar.

**Perp.** pour la polarisation perpendiculaire

**H** pour la polarisation parallèle couche haute

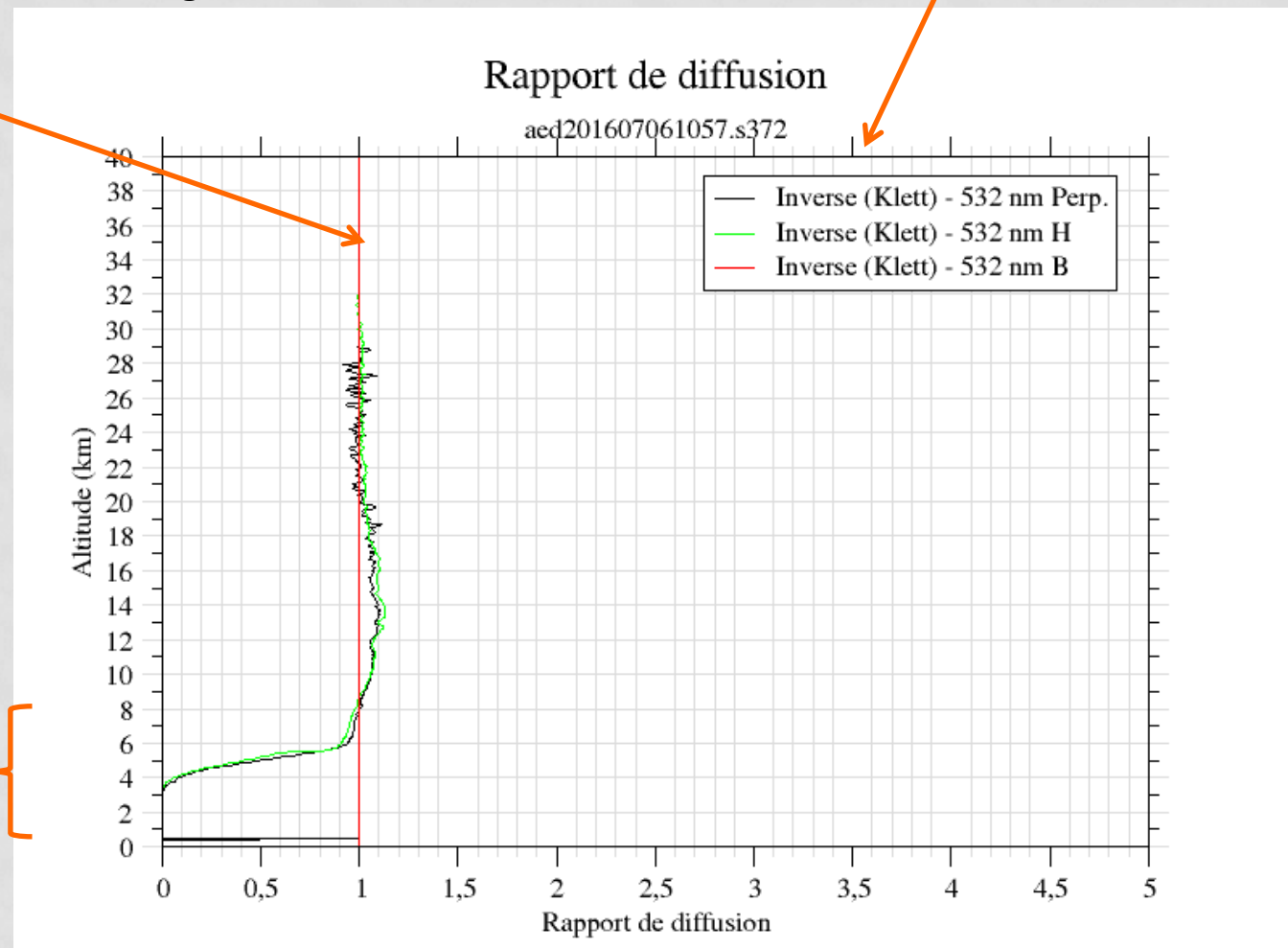
**B** pour la polarisation parallèle couche basse

### Exemple 1 : ciel dégagé. Aucun nuage.

En l'absence de particule, le rapport de diffusion vaut environ 1

*Les valeurs au dessus de 1 observées ici correspondent au « fond de ciel » c'est-à-dire les particules naturellement présentes dans l'atmosphère*

Zone non étudiée par ce LIDAR (la basse troposphère contient beaucoup de particules ; la quantité de photons qu'elles diffuseraient à la suite d'un tir laser serait donc trop élevée et risquerait d'abîmer les détecteurs de ce type de lidar.



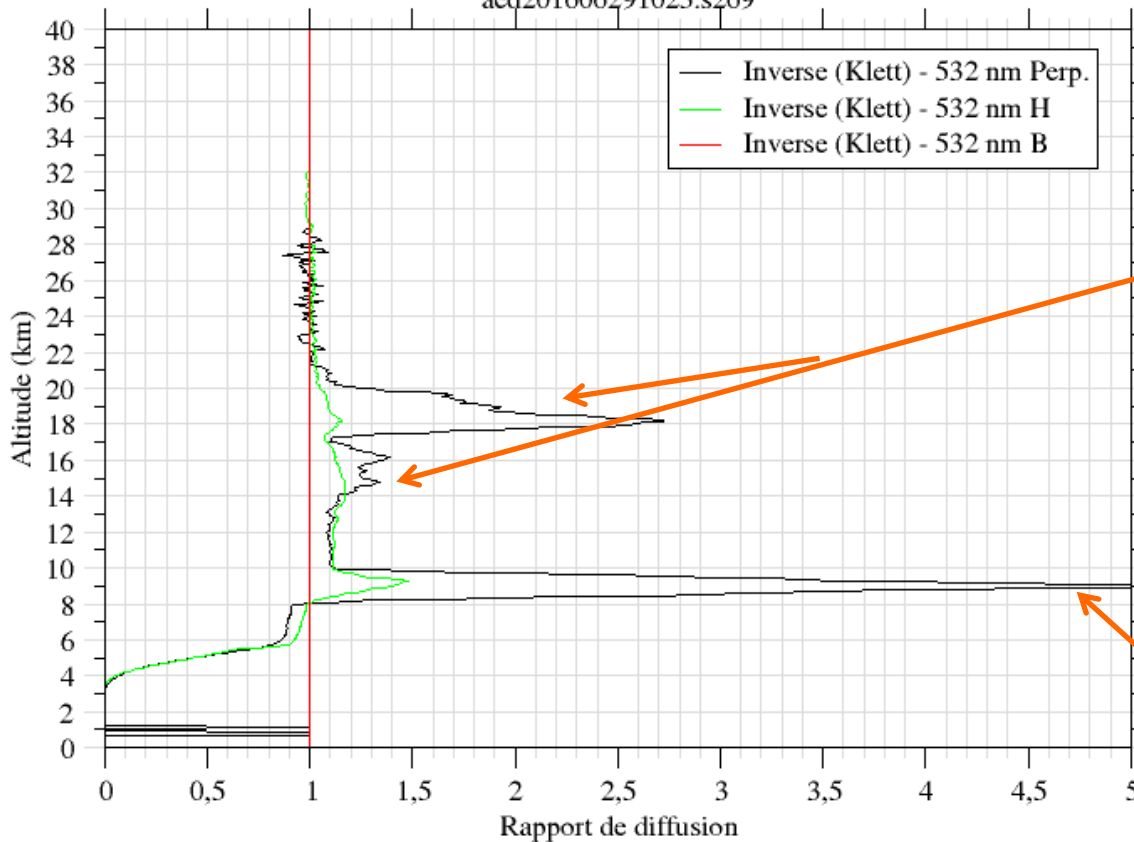


# LE LIDAR de DDU. Etape 2 : remonter à la nature des particules grâce au signal de diffusion reçu.

## Exemple 2 : présence de cirrus et de PSC

### Rapport de diffusion

aeq201606291025.s269



Différentes couches de PSC

Altitude trop basse (voir étape 1) : il ne peut s'agir d'un PSC. C'est un cirrus (caractérisé d'ailleurs par un fort rapport de diffusion

## Exemple 1 : ciel dégagé. Aucun nuage.

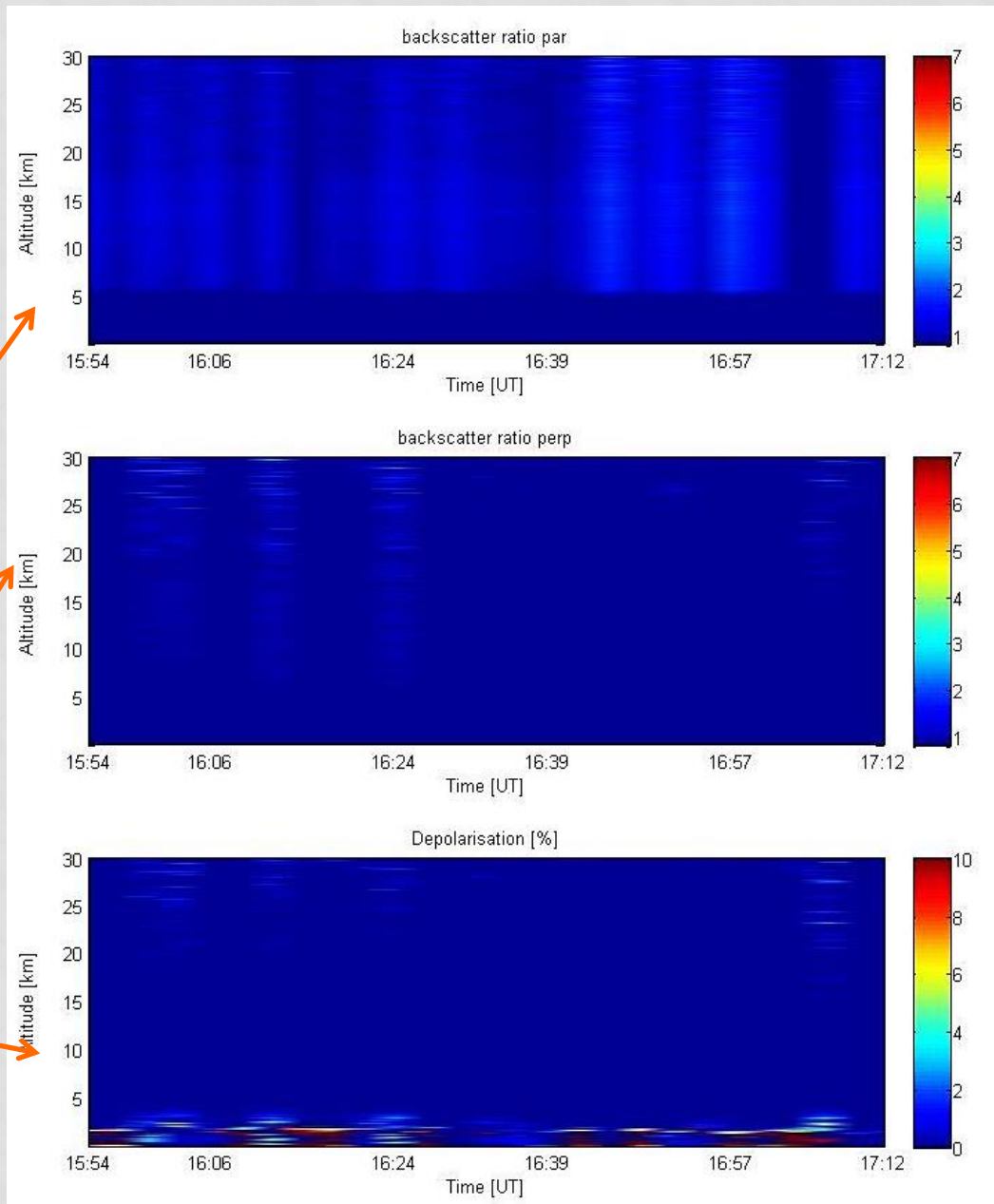
### LE LIDAR de DDU. Etape 3 : caractériser le type de PSC

Erwan analyse enfin la direction de propagation du champ électrique induit par la lumière renvoyée par la particule d'intérêt.

Deux cas possibles :

-Le champ électrique des photons incident et diffusé se propage dans la même direction. On parle de polarisation parallèle (*figure : pas d'unité*).

-Le champ électrique du photon diffusé à une direction de propagation modifiée. On regarde alors le taux (en %) de polarisation selon l'axe perpendiculaire au champ du photon incident



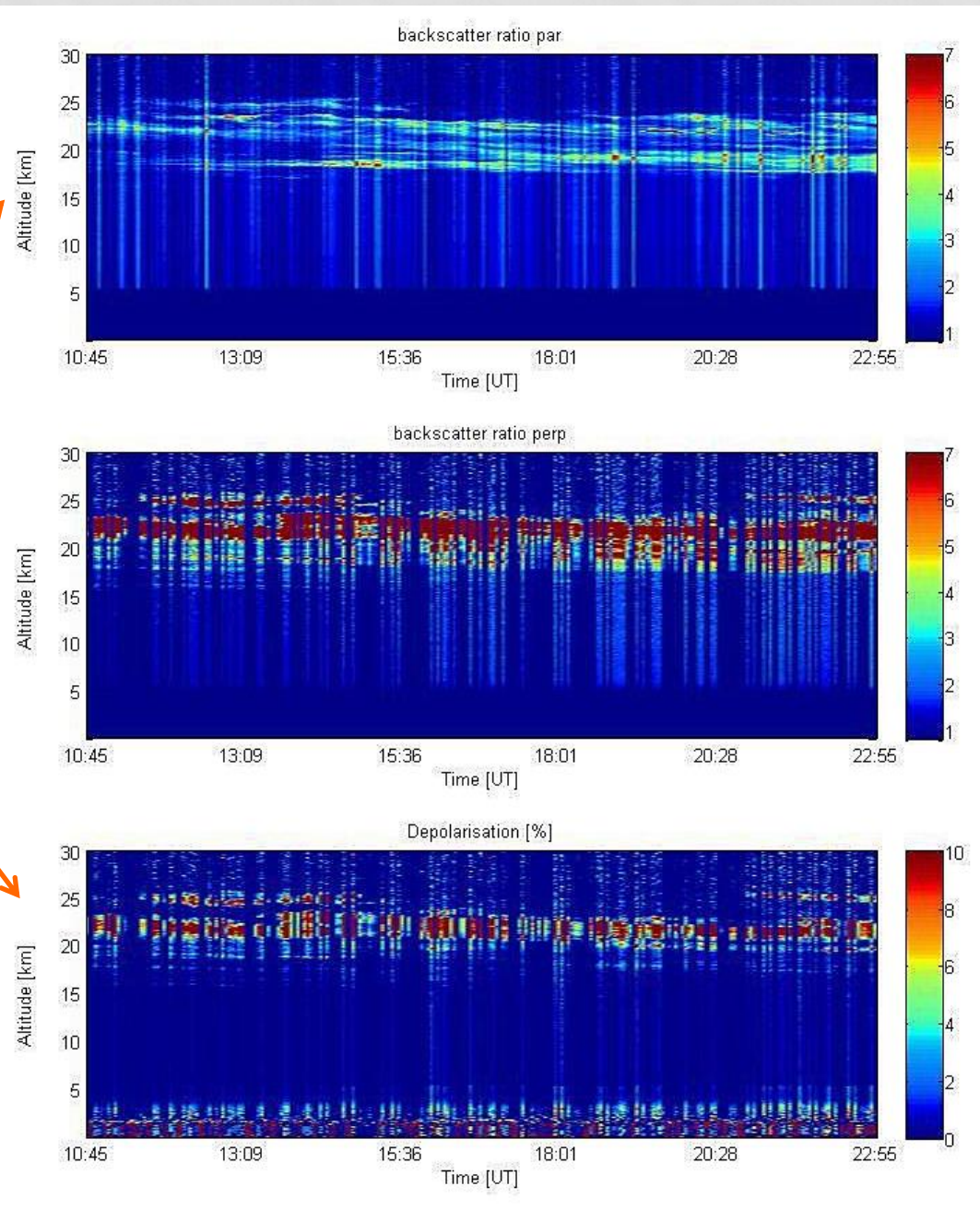
## Exemple 2 : PSC de type ICE et STS

### LE LIDAR de DDU. Etape 3 : caractériser le type de PSC

Ici un signal sur la voie parallèle haute correspond à des particules sphériques : probablement un PSC de type STS

Fort taux de dépolarisation : caractérise des particules non sphériques.

Les seuls nuages dépourvus de particules sphériques sont les **PSC de type ICE** (cristaux de glace asymétriques)



## Question à Erwan : pourquoi continuer à étudier l'ozone stratosphérique si « le trou » se résorbe ?

**Erwan :**

*« Premièrement, on ne connaît pas l'état des stocks de CFC et de HCFC qui demeurent dans certains pays, notamment en Inde et en Chine. Si ces stocks venaient à être rejetés dans l'atmosphère ce serait catastrophique !*

*Deuxièmement, pour s'assurer que notre modèle est valide jusqu'en 2050, il faut poursuivre les mesures.*

*Troisièmement, et c'est une nouvelle donnée : jusqu'à présent le phénomène d'augmentation de l'effet de serre et celui de la destruction de l'ozone n'étaient pas corrélés car proviennent de deux mécanismes atmosphériques différents. Deux observations laissent penser qu'il peut y avoir un lien :*

*-d'une part, les cirrus se vaporisent plus facilement du fait du réchauffement climatique. Une augmentation de la vapeur d'eau dans la stratosphère laisse penser que celle-ci passe plus volontiers à travers la tropopause. Or l'eau est le constituant principal des PSC de type ICE.*

*-d'autre part : si la troposphère se réchauffe, la stratosphère va mécaniquement se refroidir (équilibre dynamique), ce qui est déjà observé. Cela peut impacter la durée du vortex polaire présent sur l'Antarctique. Il dure plus longtemps, davantage de PSC se forment, davantage d'ozone est détruit. **Il semble donc y avoir une interaction ozone-climat qui justifie que l'on poursuive les mesures évoquées.** »*



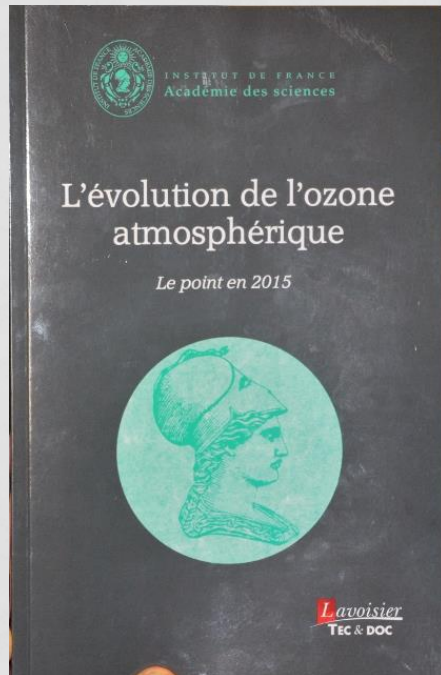
## Ce qui attend Erwan cette année ...

- Recueils de données LIDAR et SAOZ et premiers traitements (analyse partielle poursuivie en France au LATMOS (Laboratoire ATmosphère, Milieux et Observations Spatiales))
- Partie instrumentation pure : entretien du laser et notamment des circuits de refroidissement\*
- Cataloguer les phénomènes naturels pour mieux discriminer ce qui relève de la pollution anthropique et ce qui relève de la pollution naturelle (particules atmosphériques émises par les volcans ou les feux de forêt par exemple)
- Chercher dans quelle mesure les données issues du LIDAR (mesures essentiellement faites durant l'hiver austral) et celles issues du SAOZ (mesures autonomes à l'année) ne pourraient pas être couplées pour affiner le modèle de compréhension des processus de destruction de l'ozone.

Erwan sur le toit du Shelter LIDAR (trappe du télescope et des détecteurs)



## Erwan vous conseille ...



## Annabelle vous conseille ...

### Prendre connaissance de la PARTIE 2 : SAOZ et LIDAR, les instruments !

Le LIDAR était en réparation en France. Erwan vient de le recevoir sur la rotation R3. A présent, il doit monter son laser et l'aligner. A suivre très vite !

