

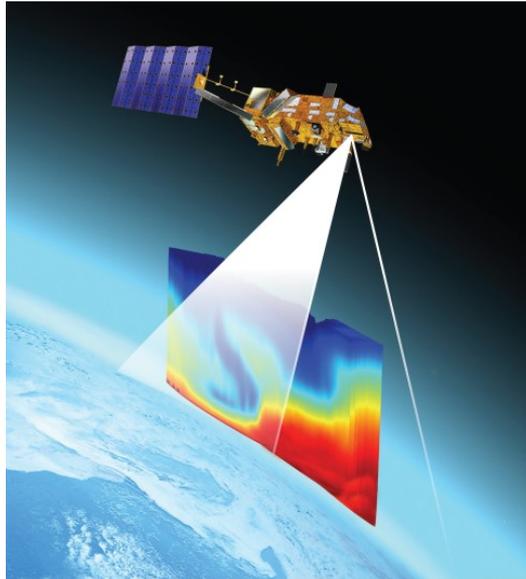


Le sondage de l'atmosphère

Caroline Bès (CNES)

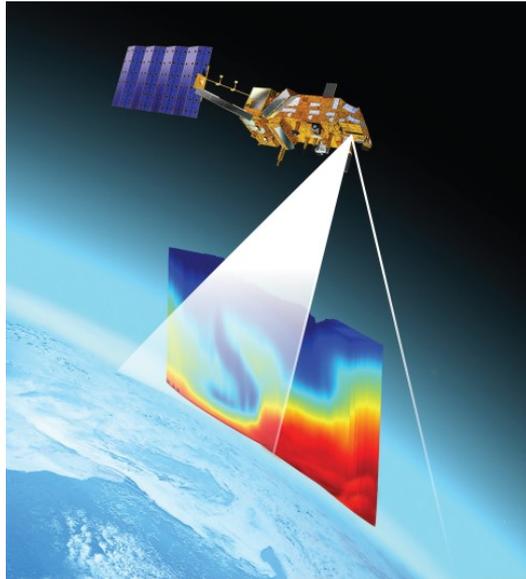
**En reprenant les travaux de mes collègues : ,
Denis Jouglet, Elsa Jacquette, Clémence Pierangelo, Clément Luitot, Quentin Cebe et les
projets MicroCarb, IASI, IASI-NG et Merlin**

Plan de la présentation



1. L'atmosphère terrestre
2. Le sondage atmosphérique
3. IASI – IASI-NG
4. MicroCarb
5. Merlin
6. Conclusion

Plan de la présentation



1. L'atmosphère terrestre
2. Le sondage atmosphérique
3. IASI – IASI-NG
4. MicroCarb
5. Merlin
6. Conclusion

La composition de l'atmosphère terrestre

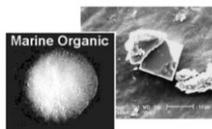
Constituée de **gaz**, dont la composition chimique est la suivante :
 Proportion molaire (mol/mol d'air sec) = Volume Mixing Ratio (VMR)
 Valables dans l'homosphère (<100km)

- Azote N₂ : 78%
- Oxygène O₂ : 21%
- Argon : 1%
- Dioxyde de carbone CO₂ : 420 ppmv
- Néon : 18.2 ppmv
- Hélium : 5.24 ppmv
- Méthane CH₄ : 1.7 ppmv
- Krypton : 1.14 ppmv
- Hydrogène : 0.5 ppmv
- Oxyde nitreux N₂O : 0.3 ppmv
- Monoxyde de carbone CO : 0.2 ppmv
- Xénon : 0.08 ppmv
- Ozone O₃ : 0.01 ppmv
- Radon : 6e-18
- NO₂, NO_x, SO₂
- + Vapeur d'eau H₂O : 0 à 5%

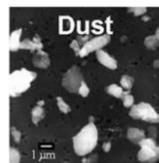
...Et également de **particules** solides et liquides



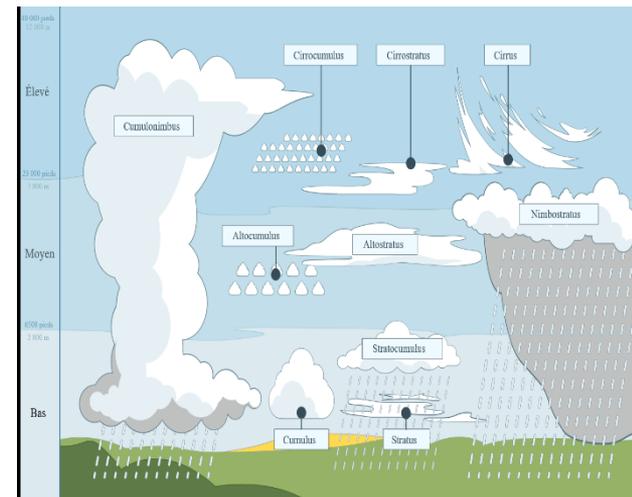
- Hydrométéores
- Cristaux de glace → 1 à 50µm
 - Gouttelettes d'eau liquide → 100µm à 1cm
 - Précipitations → 100µm à 1cm
- Poussières désertiques
 - Sels marins
 - Matière organique
 - Industriels
 - Suies



Sels de mer



Poussières désertiques



La structure verticale de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère dépend de l'altitude (exprimée en échelle métrique (km) ou en pression (hPa)).

Avec l'altitude, la densité moléculaire décroît.

Température

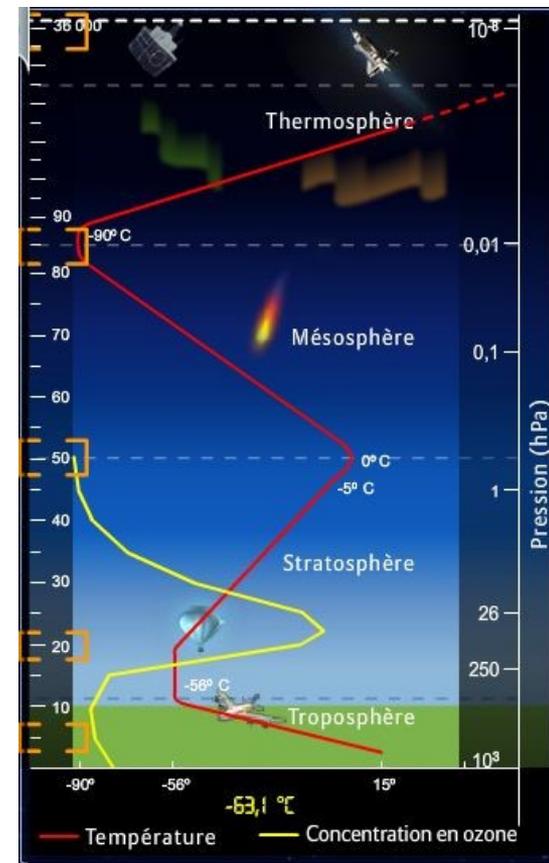
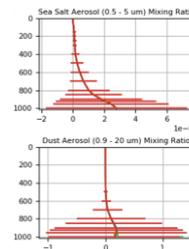
- Décroissance verticale dans la troposphère
- Stagnation dans la tropopause (épaisseur variable en fonction de la latitude)
- Croissance verticale dans la stratosphère (chauffage par photodissociation de l'O₃)

Pour les **gaz**, on parle de profil de concentration d'un gaz = sa variation en fonction de l'altitude.

- N₂, O₂ : ~constants avec l'altitude
- H₂O : décroît rapidement avec l'altitude (négligeable dans la stratosphère)
- **O₃** : maximum vers 20km
- Gaz produits par la surface (CO₂, CH₄, CO, NO₂) : décroissent généralement avec l'altitude (dépend de leur stabilité)

Pour les **particules solides / liquides**

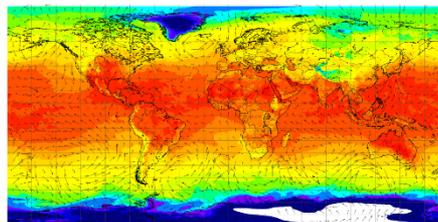
- Aérosols essentiellement dans la troposphère (sauf les volcans)
- Nuages liquides dans la troposphère
- Cirrus entre ~6 et 10km



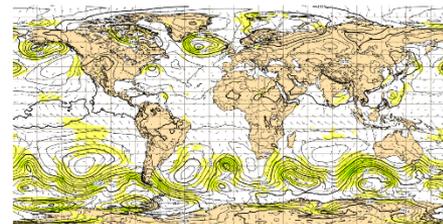
La structure horizontale de l'atmosphère

- L'atmosphère a également une structure horizontale : sa constitution précise varie en fonction de notre position sur le globe.
- Selon le processus étudié, les grandeurs varient selon différentes échelles spatiales
- En altitude, la distribution horizontale s'homogénéise
- Exemple de cartographie des sorties des modèles météo :

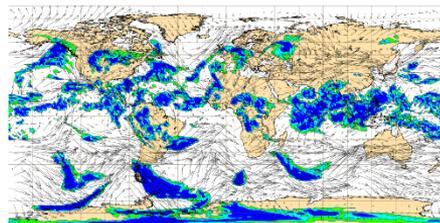
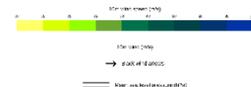
Sorties des modèles
ECMWF



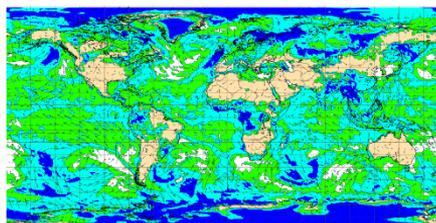
Température à 2m



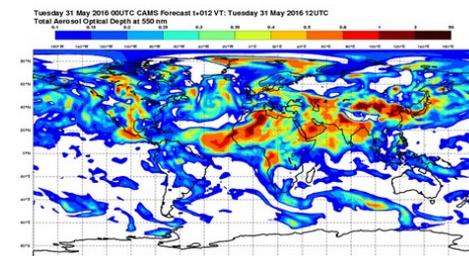
Pression (sea level)
+ vents à 100m



H2O (RH) à 10km



H2O (RH) surface



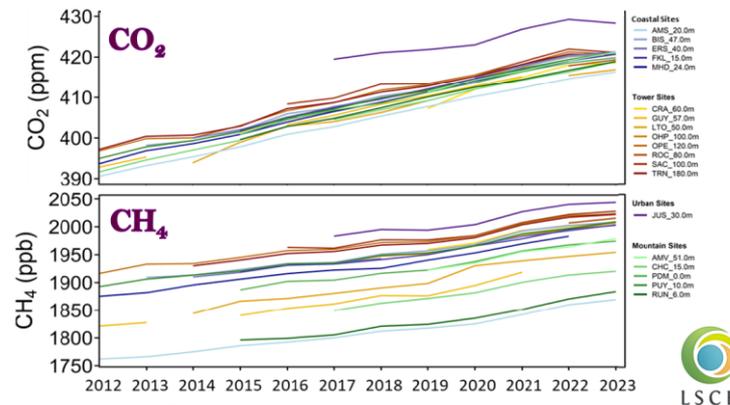
Épaisseur optique des aérosols

La variabilité temporelle de l'atmosphère

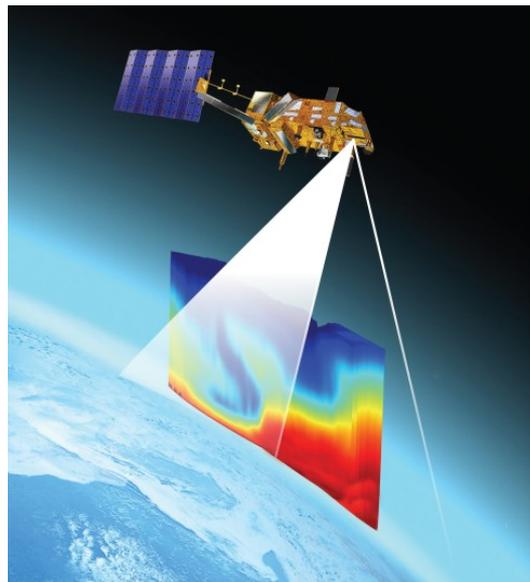
- Les variables atmosphériques présentent différentes échelles de variations temporelles
 - Court terme (<1h) : nuages, précipitations, température, H₂O, vents
 - Moyen terme (quelques jours) : grandes structures météorologiques Pression, Température, H₂O, vents, gaz traces anthropiques, aérosols transportés
 - Saisonnier : météo, gaz traces naturels
 - Annuel: climat, gaz traces anthropiques



Gaz	Durée de séjour approximative dans l'atmosphère
Gaz carbonique (CO ₂)	100 ans (pour l'élimination d'une grosse moitié du surplus créé)
Méthane (CH ₄)	12 ans
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	120 ans
Halocarbures (CnHalp)	jusqu'à 50.000 ans



Plan de la présentation



1. L'atmosphère terrestre
2. Le sondage atmosphérique
 1. Principe
 2. Modélisation
3. Quelles applications ?
4. IASI – IASI-NG
5. MicroCarb
6. Merlin
7. Conclusion

Le sondage atmosphérique

- Le sondage atmosphérique consiste à observer la structure verticale des variables atmosphériques
- On cherche à obtenir des profils, ou a minima des colonnes intégrées, de plusieurs variables atmosphériques :
 - Température, humidité, vents
 - Pression de surface
 - Nuages et précipitations (type, altitude, quantité)
 - Aérosols (type, altitude, quantité)
 - Concentration des gaz traces O_3 , CO_2 , CH_4 , NO_2 , etc.
- Le besoin de résolution spatiale est généralement plus relâchée qu'en imagerie de surface
- La couverture demandée est généralement continentale voire **globale**
- **Le besoin de revisite temporelle est élevé en général**



Mesures sol



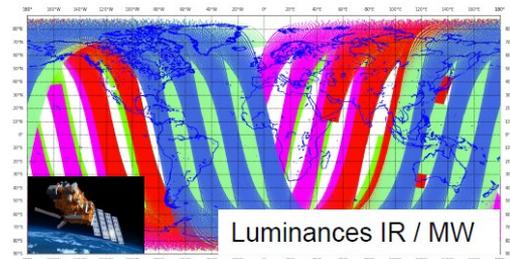
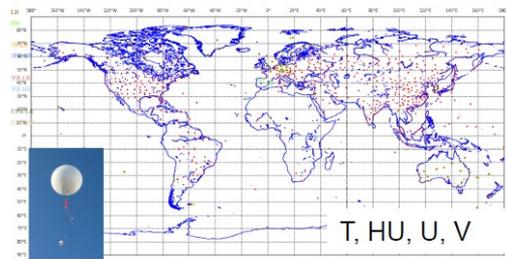
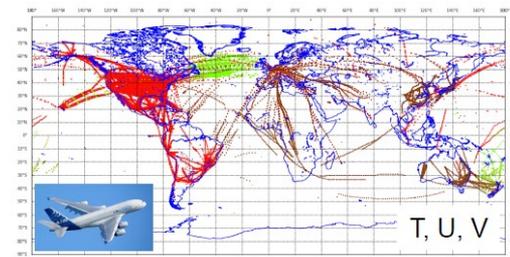
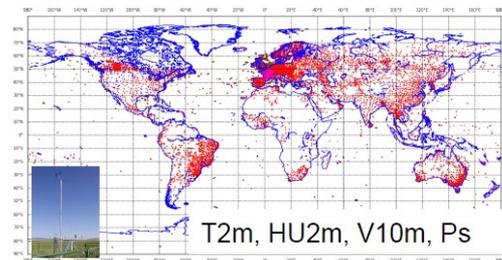
Mesures avion



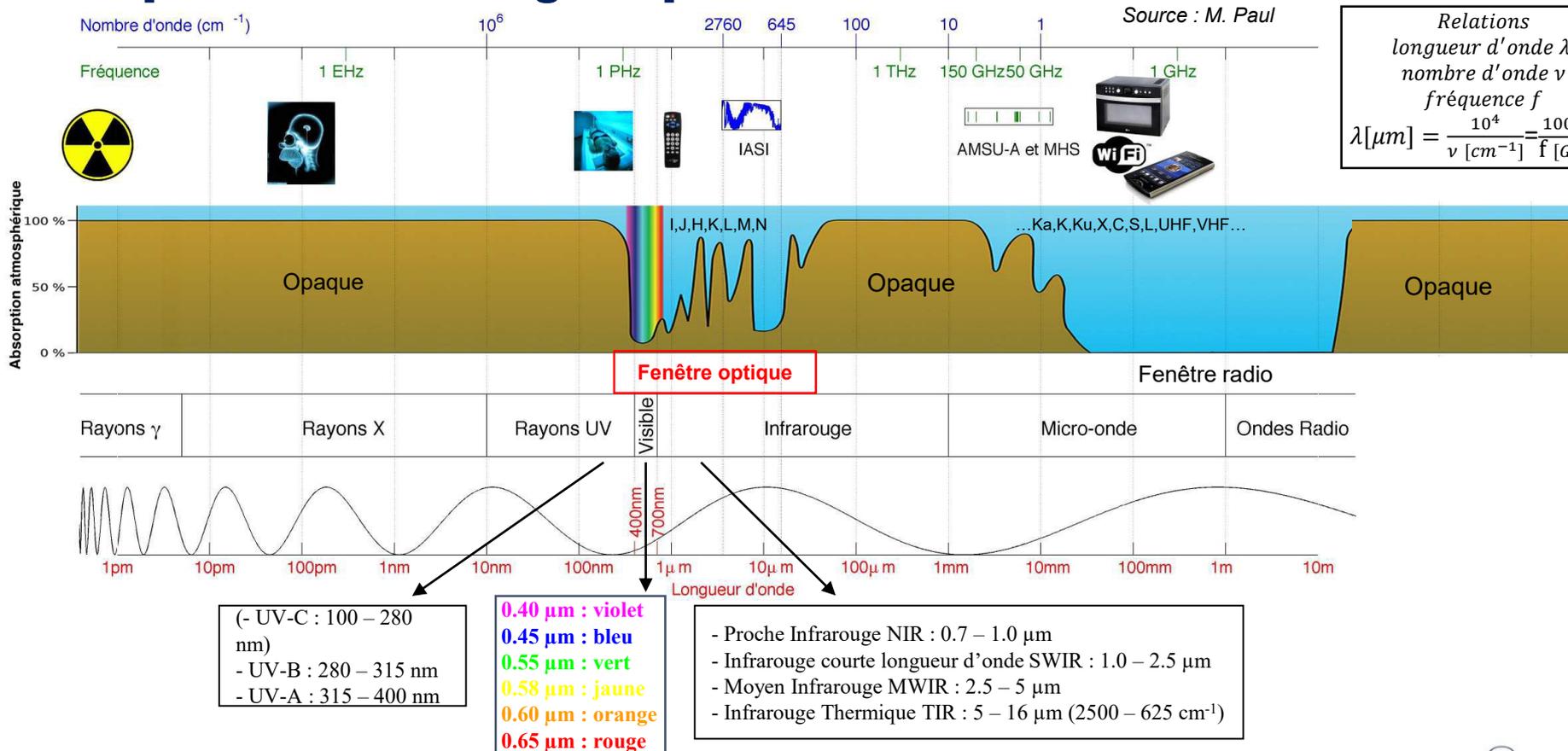
Mesures ballon

L'intérêt du satellite pour observer l'atmosphère

- Permet d'observer une colonne atmosphérique dans toute sa profondeur, grâce à la surface terrestre qui agit comme réflecteur ou émetteur (dépend de la longueur d'onde)
- Permet d'observer une grande partie du globe avec revisite élevée, avec un seul et même instrument
 - IASI : terre entière 2 fois par jour
- Permet d'observer des zones difficiles d'accès, mal couvertes par les réseaux sol, mais importantes pour l'étude de l'atmosphère (pôles, tropiques, océans, déserts...)

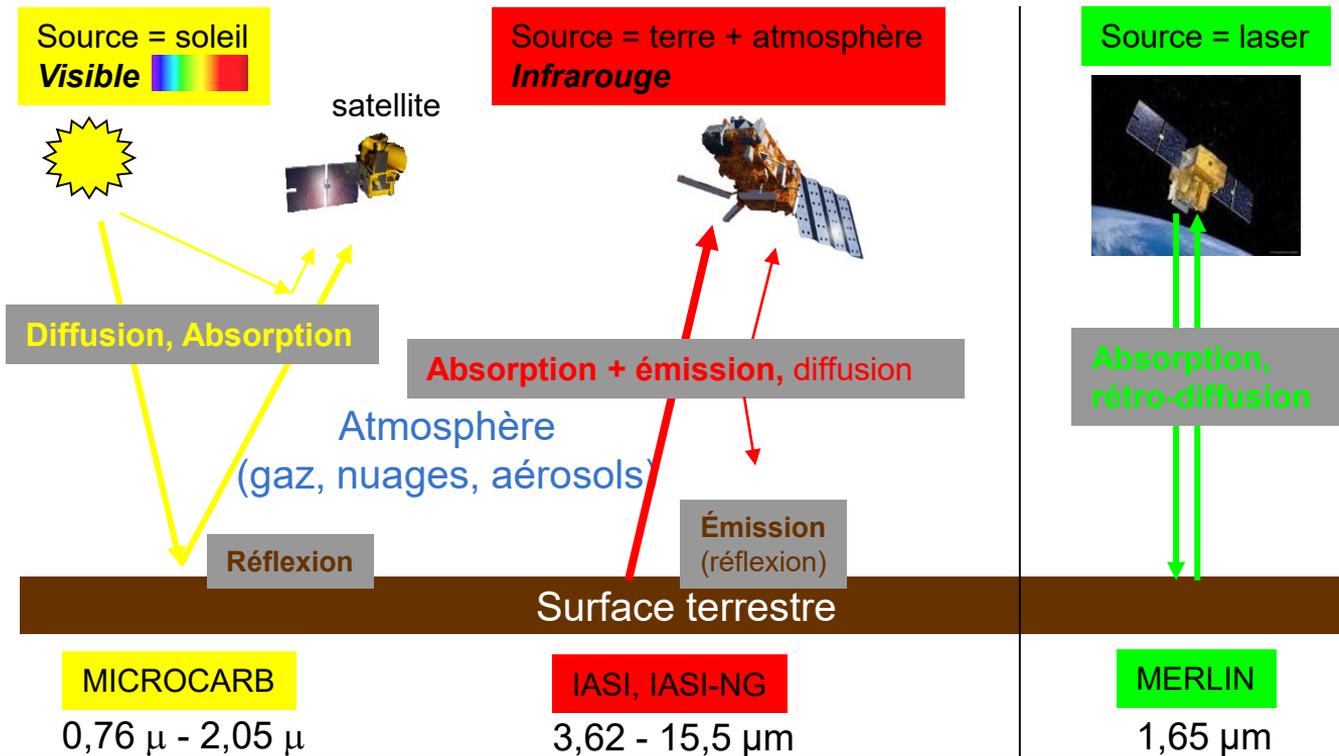


Le spectre électromagnétique



Mesurer la composition de l'atmosphère à distance : comment?

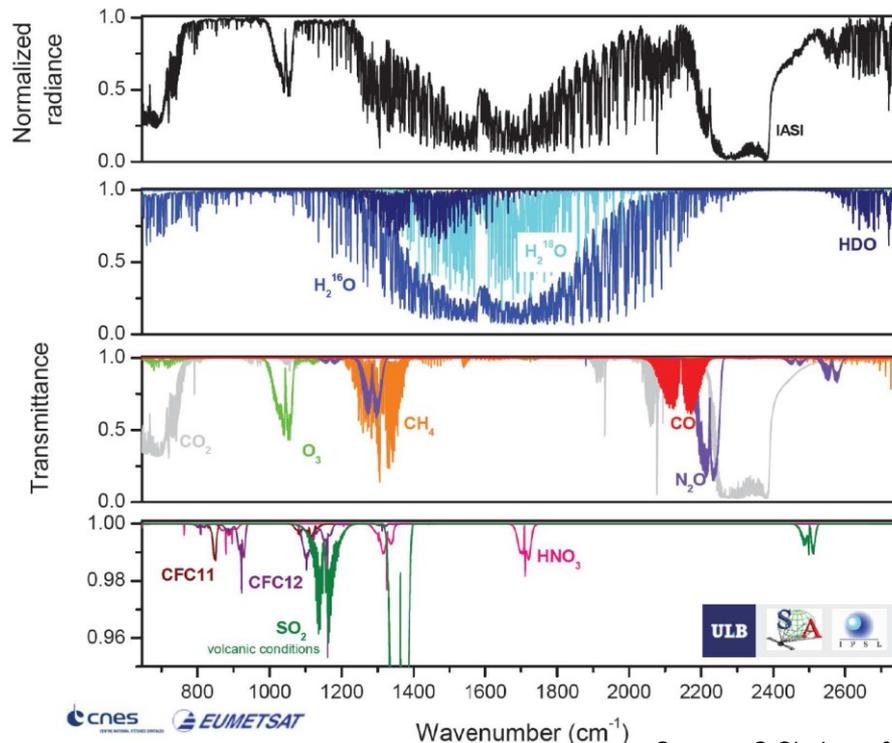
Grâce aux interactions entre le rayonnement et l'atmosphère : absorption, diffusion, émission...



La spectroscopie en résumé

- ❖ La **position** des raies donne la **composition chimique** de l'atmosphère
= Carte d'identité
- ❖ La **profondeur** des raies dépend, entre autres, de la **quantité de gaz** absorbant
- ❖ La **largeur** des raies dépend de la pression, de la température, et au second ordre de la concentration du gaz, de la concentration en vapeur d'eau
- ➔ Utilisation qualitative pour faire de la détection de composition (ex: sonde Voyager, exo-planètes)
- ➔ Utilisation quantitative pour faire du sondage atmosphérique (Terre) ➔ Modélisation du transfert radiatif

spectre infrarouge thermique vu par le satellite : raies d'absorption des différents gaz



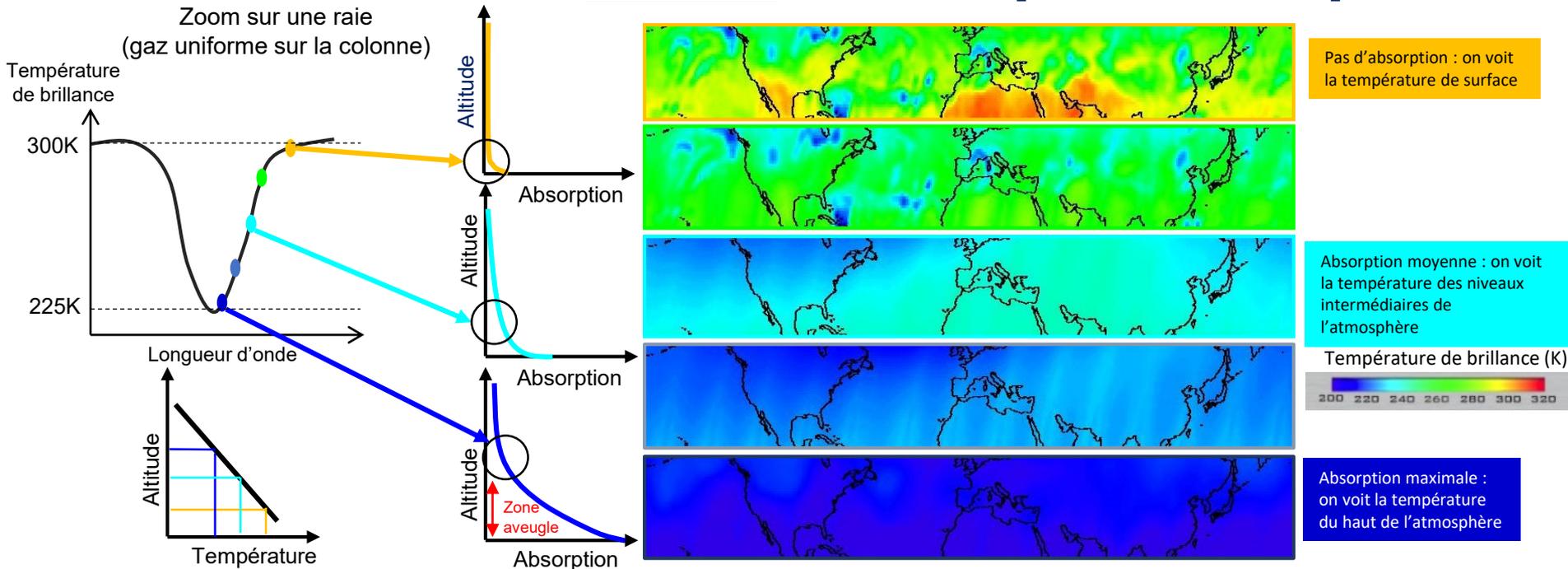
cnès EUMETSAT

Wavenumber (cm⁻¹)

Source : C. Clerbaux & al.

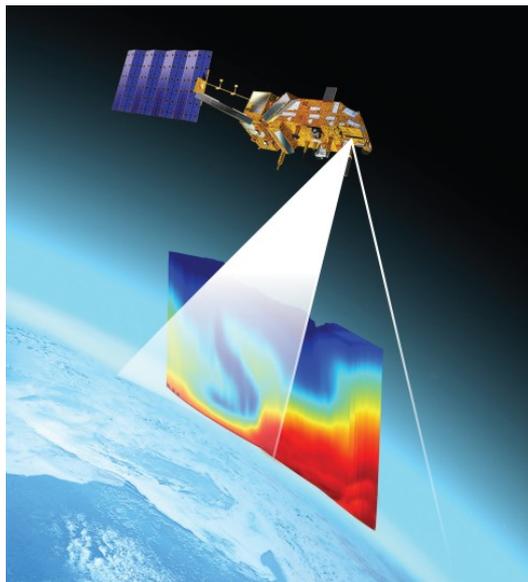
Contributions des principaux gaz sur la transmission atmosphérique dans l'infrarouge thermique

Peut-on voir la structure verticale de l'atmosphère? Oui en partie



- **Longueurs d'onde à forte absorption** : le rayonnement émis par la surface et la basse / moyenne atmosphère n'est pas transmis jusqu'au satellite car absorbé par la haute atmosphère. La haute atmosphère émet son propre rayonnement, non absorbé au-dessus. On voit la température de la haute atmosphère (froide).
- **Longueurs d'onde à faible absorption** : le rayonnement émis par la surface est transmis jusqu'au satellite. La haute atmosphère n'émet pas. On voit la température de surface (chaude).

Plan de la présentation



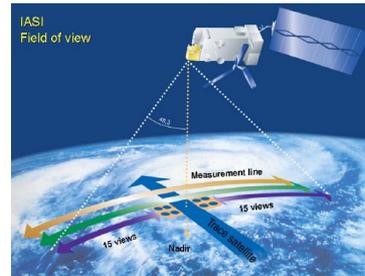
1. L'atmosphère terrestre
2. Le sondage atmosphérique
3. IASI – IASI-NG
4. MicroCarb
5. Merlin
6. Conclusion



La mission IASI

- ❖ Instruments **IASI-A/B/C** (Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge) sur les satellites européens **MetOp**.
- ❖ Coopération entre le **CNES** et **EUMETSAT** (agence européenne d'exploitation des satellites météorologiques)
 - ✓ MetOp-A (2006 – 2021), MetOp-B (2012), et MetOp-C (2018)
- ❖ Objectifs du système IASI :
 - fournir des spectres atmosphériques en temps quasi-réel (NRT) aux centres météo (assimilation) : profils de température et d'humidité de l'atmosphère.
 - Mesures de concentrations de certains gaz (CO_2 , H_2O , O_3 , N_2O , CO , CH_4 , etc) qui influencent directement le climat.

➤ <https://iasi.cnes.fr/>



Principe d'un interféromètre

- Principe de fonctionnement de IASI
- Interféromètre de Michelson
 - Séparation la lumière incidente en deux faisceaux, l'un des faisceaux subit un trajet optique plus long (DDM = Différence de Marche)
 - Projection des deux faisceaux sur le même plan focal
 - Création d'interférences alternativement constructives et destructives = **interférogramme**
- La transformée de Fourier inverse fournit le spectre atmosphérique recherché

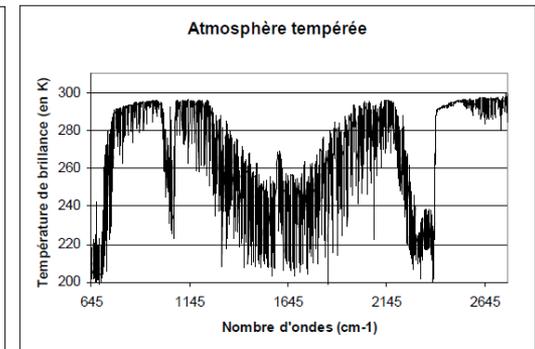
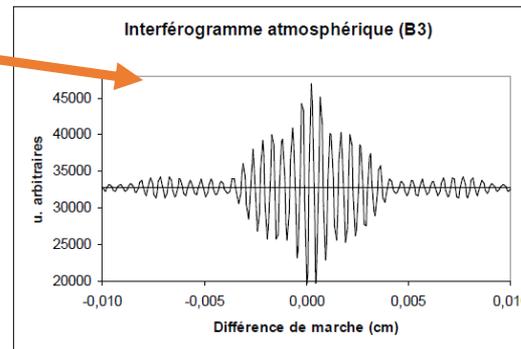
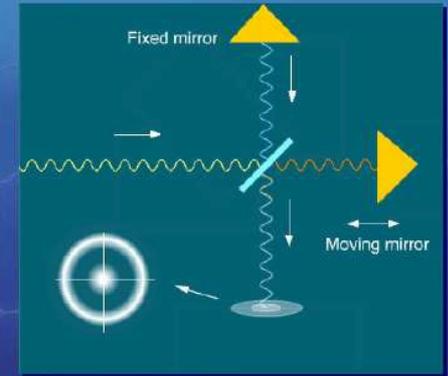
Fourier transform spectroscopy

• Physical measurement is not a spectrum

• Lots of transformations are necessary to retrieve the spectrum

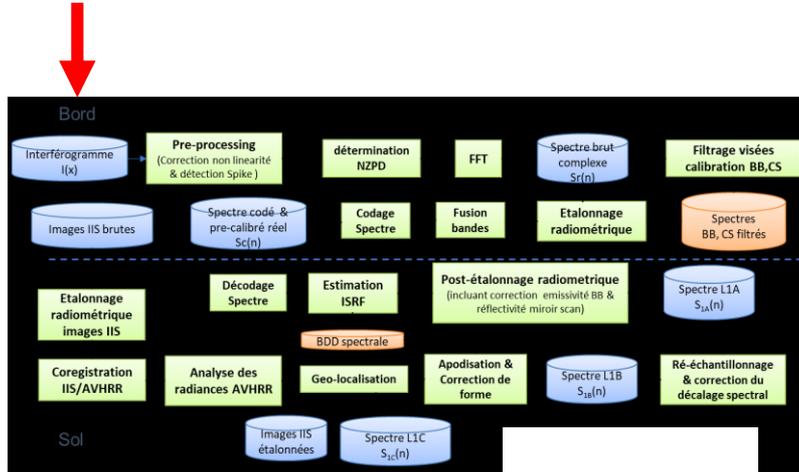
• Interferogram
$$I(x) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu) (1 + \cos(2\pi\nu x)) d\nu$$

• Raw spectrum computation
$$TF^{-1}(I) : \nu \mapsto S(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) e^{2i\pi\nu x} dx$$



Les traitements bord et sol des données IASI

Instrument



- Assimilation des spectres : distribution des données < 135 min après la mesure
- 1.3 million de spectres par jour et par instrument.
- Les produits finaux représentent 84 Go par jour (30.6 To/an) et par instrument.

Distribution des données

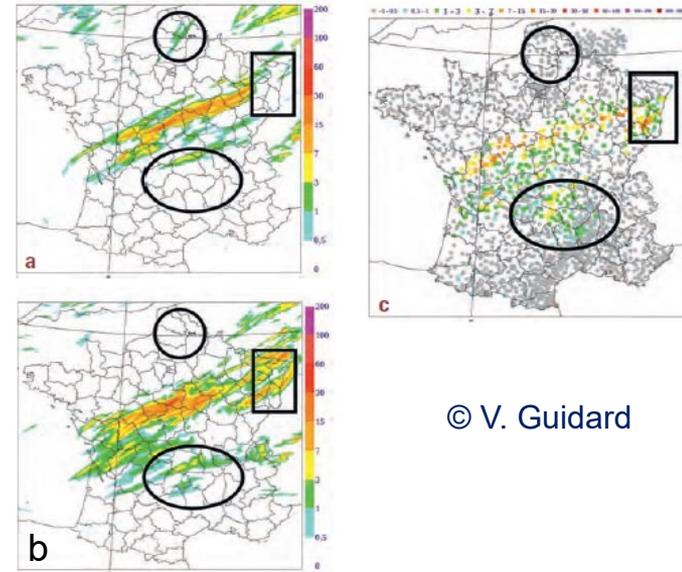
IASI et la prévision numérique du temps

- ❖ Un contributeur majeur de la prévision météorologique mondiale
- Les mesures de IASI fournissent des profils de **température**, de **vapeur d'eau**, de **température/pression** au sommet des nuages, de températures de surface des mers et terres émergées.
- Ces mesures sont injectées dans les modèles de prévision météorologique et servent également à recalibrer ces modèles (prévision versus observé).
- Utilisateurs: centres de prévisions météorologiques Européens et US

❖ Exemple

Comparaison des prévisions de précipitation du modèle Arome, observations de IASI et mesures pluviométriques. Le 21 mai 2009, entre 00 h UTC et 12 h UTC :

- a) prévision à 12 heures sans l'utilisation de IASI ;
- b) prévision à 12 heures avec utilisation de IASI ;
- c) les mesures pluviométriques.



© V. Guidard

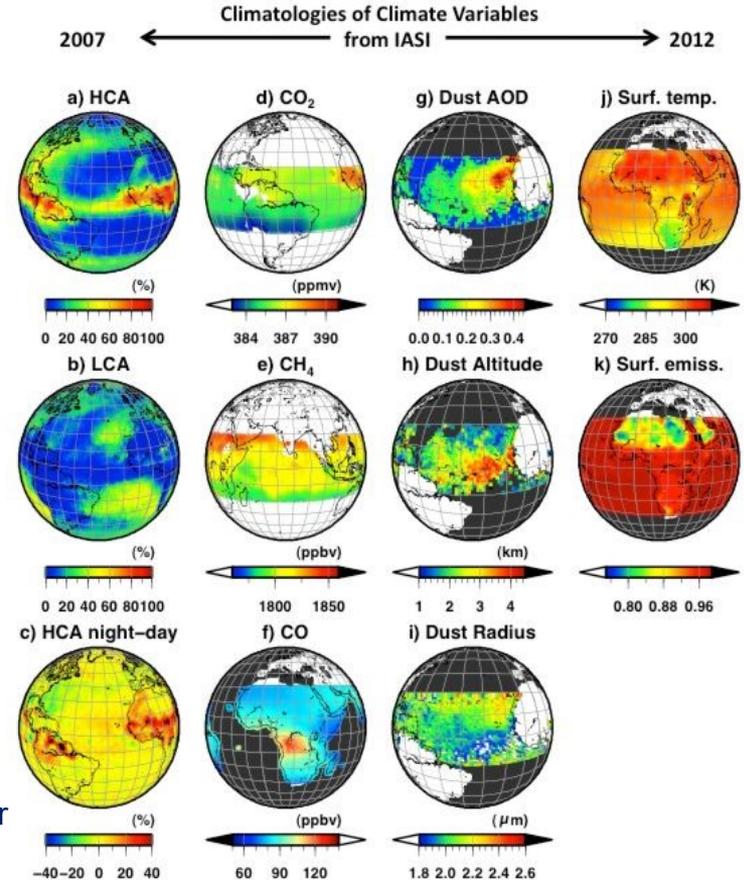
Les résultats exceptionnels de Iasi, sondeur atmosphérique hyperspectral de Metop - Phulpin, T and al.- La Météorologie - N°72 - Février

Contribution de IASI à l'étude du climat

- ❖ IASI contribue à la surveillance de plusieurs **variables essentielles du climat**.
- ❖ Disponibles depuis juillet 2007 : suivi **long terme** (stabilité de la mesure nécessaire)
- ❖ Utilisateurs : laboratoires de recherche scientifique
- ❖ Exemple
 - Cartes mensuelles des variables climatiques essentielles observées par le sondeur IASI embarqué sur Metop-A.
 - Légende : distribution des nuages hauts (a), des nuages bas (b) et variation diurne de ces nuages (c) ; contenu en gaz à effet de serre : CO₂ (d), CH₄ (e) et CO (f) ; poussières désertiques : épaisseur optique (g), altitude (h) et taille des particules (i) ; surface : température (j) et émissivité (k).

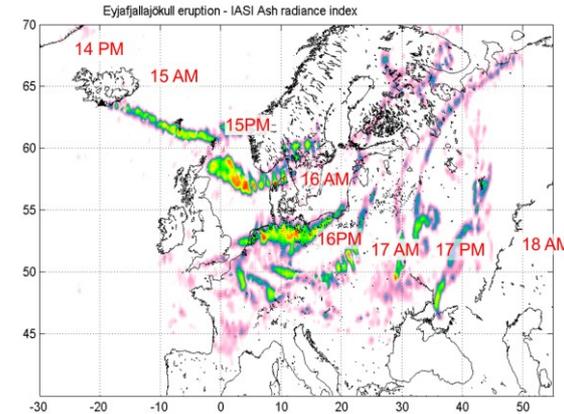
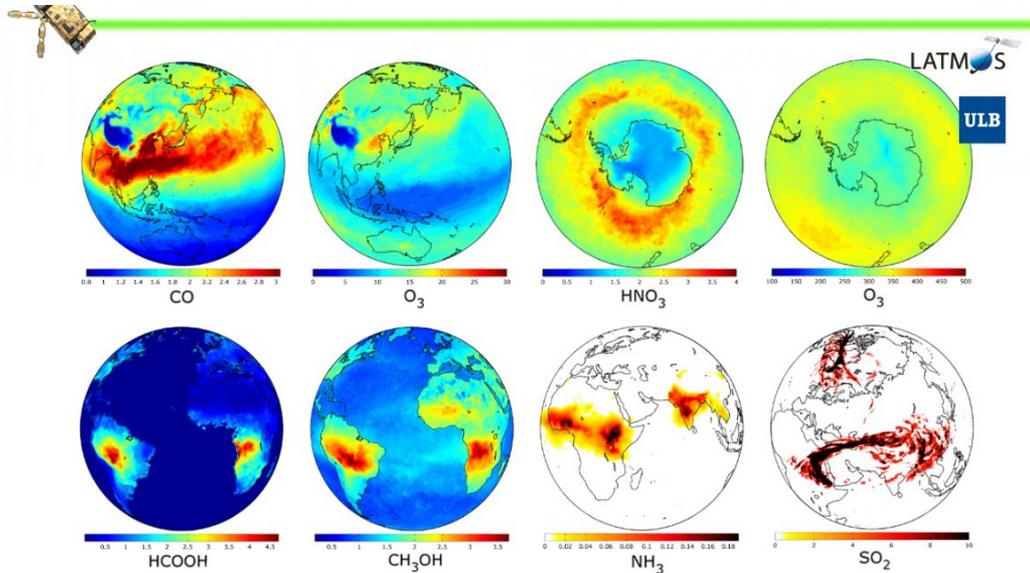
© LMD/CNRS

© C. Crevoisier



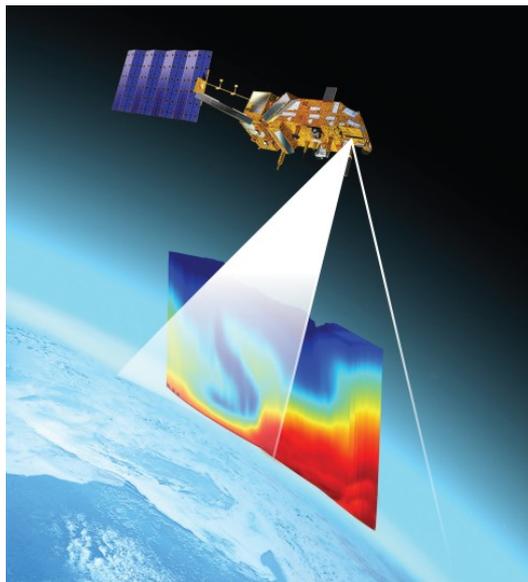
IASI et la chimie atmosphérique

- ❖ Utilisation des mesures IASI pour la chimie atmosphérique
- Mesure de la concentration d'une vingtaine de gaz atmosphériques (CO, O₃, HNO₃, HCOOH, CH₃OH, NH₃, SO₂ ...)
- Suivi des gaz à effet de serre, suivi des polluants, alertes éruptions volcaniques, suivi feux de forêts
- Utilisateurs : laboratoires de recherche scientifique



© C. Clerbaux

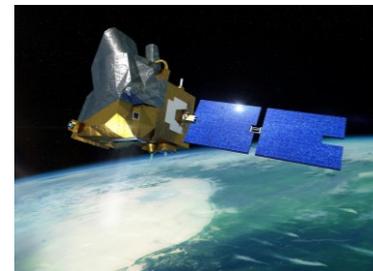
Plan de la présentation



1. L'atmosphère terrestre
2. Le sondage atmosphérique
3. Quelles applications ?
4. IASI – IASI-NG
5. **MicroCarb**
6. Merlin
7. Conclusion

La mission MicroCarb

- Mission définie, réalisée et développée par le CNES et les laboratoires scientifiques pour mesurer le CO₂
- Lancement en 2025
- **Objectifs**
 - Principal : Améliorer notre connaissance des sources et des puits de carbone pour améliorer la compréhension du cycle du carbone, et donc du climat
 - Secondaire : démonstrateur d'estimation des sources locales



Justification de la mission : mieux appréhender le changement climatique

Augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère = principal responsable du changement climatique

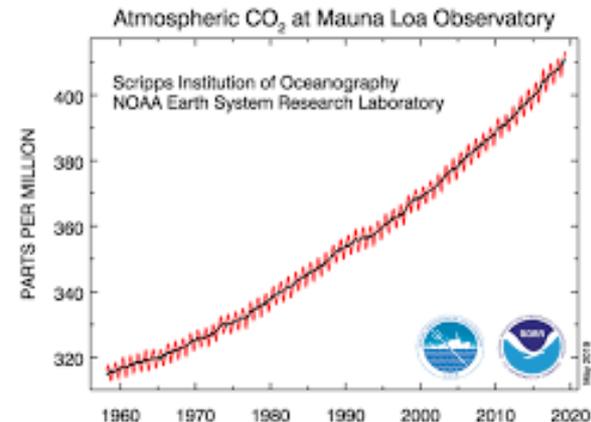
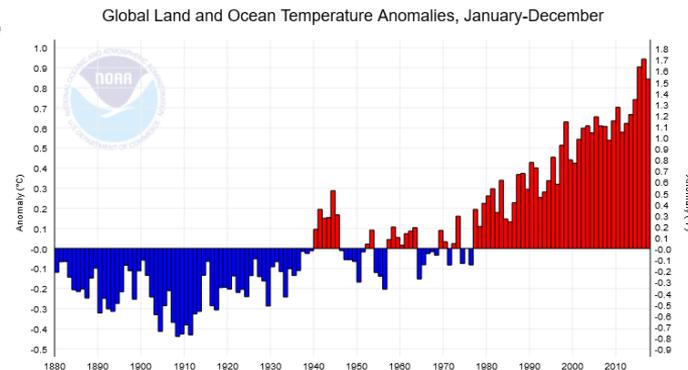
➤ Corrélation aujourd'hui clairement établie

(rapport GIEC IPCC, 2013 : Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013)

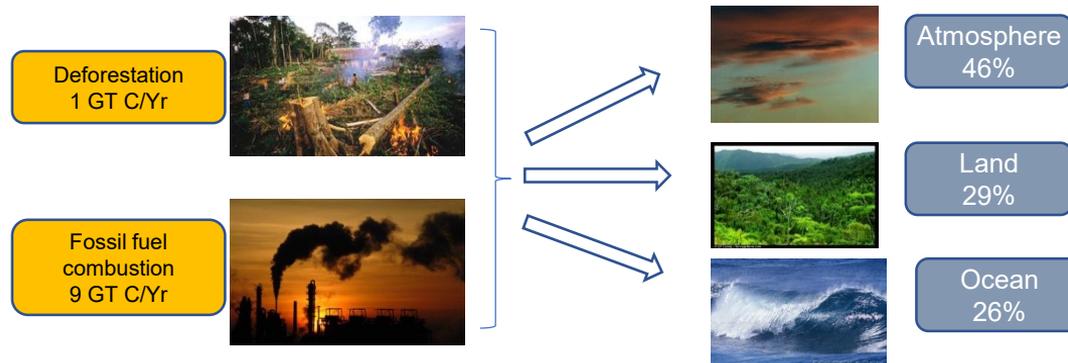
- T° moyenne à la surface de la Terre : +1°C depuis l'ère pré-industrielle
- Elle atteindra 1.5° C entre 2030 et 2052
- COP 21 (Paris 2015) a fixé un seuil à ne pas dépasser (2°C) et un objectif de limitation à < 1.5°C

➤ L'activité humaine est à l'origine de cette augmentation :

- Le CO₂ est le GES qui apporte la plus forte contribution
- La quantité atmosphérique de CO₂ a augmenté de 250 ± 10 GtC
- La concentration est passée de 280 (ère pré industrielle) à 420 ppm



- Flux de CO₂ à la surface de la Terre = ~200 GTonnes C/an
- Emissions anthropiques = 10 GTonnes C/an → ils déséquilibrent le bilan :
 - La moitié absorbée par les puits naturels (océans, biosphère continentale)
 - L'autre moitié reste dans l'atmosphère

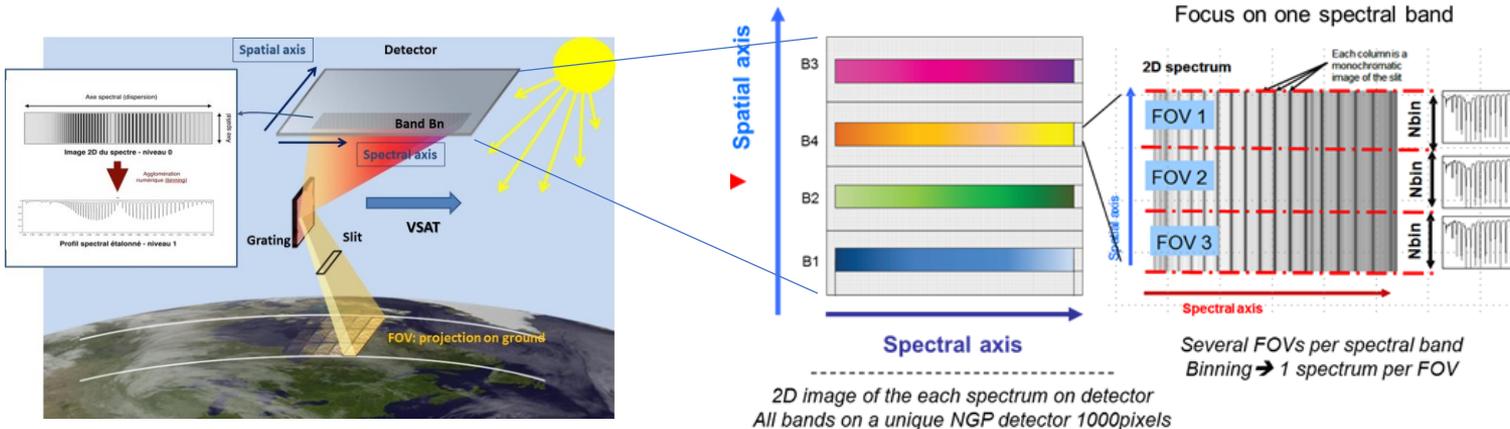


Augmentation CO₂ → augmentation de t° → limitation de la capacité d'absorption des puits
Inconnue : dans quelle mesure ? Risque d'emballement ???

➔ **Besoin de mesurer les flux de CO₂ globalement et sur le long terme pour améliorer les modèles**

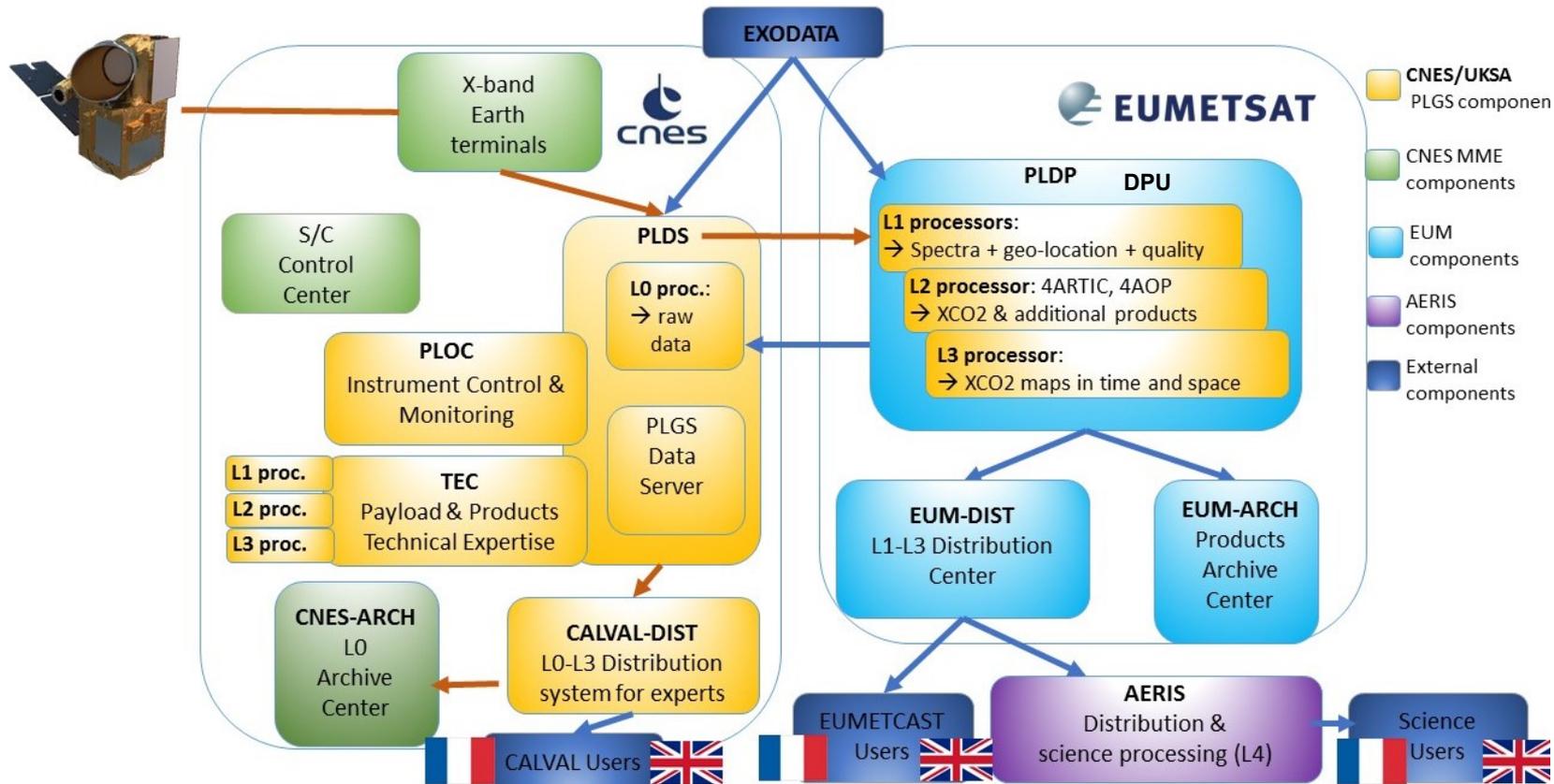
Principe de l'instrument

- Le télescope fait l'image de la Terre sur la fente d'entrée du spectromètre
- Le spectromètre fait l'image de la fente sur le détecteur, dont la position dépend de la longueur d'onde
- Sur le détecteur une dimension correspond à la dimension spatiale, l'autre à la dimension spectrale
- Intégration temporelle de 1.3s : champ de 13.5km * 8.9km



2D image of the each spectrum on detector
All bands on a unique NGP detector 1000pixels

Segment sol



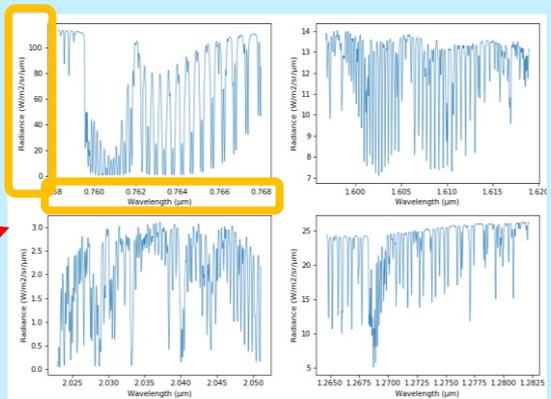
Les niveaux de produits (exemple MicroCarb)



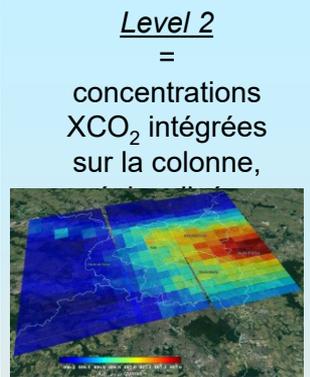
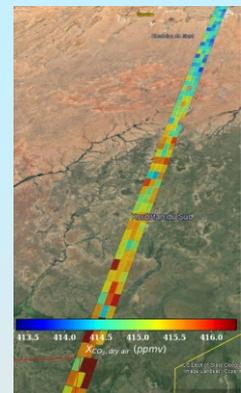
Level 0 = TM instrument + SCAO + orbite

Time	Lat	Lon	Alt	...
2013-01-01T00:00:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:00:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:00:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:00:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:00:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:00:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:01:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:01:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:01:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:01:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:01:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:01:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:02:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:02:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:02:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:02:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:02:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:02:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:03:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:03:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:03:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:03:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:03:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:03:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:04:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:04:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:04:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:04:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:04:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:04:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:05:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:05:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:05:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:05:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:05:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:05:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:06:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:06:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:06:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:06:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:06:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:06:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:07:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:07:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:07:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:07:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:07:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:07:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:08:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:08:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:08:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:08:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:08:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:08:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:09:00	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:09:10	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:09:20	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:09:30	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:09:40	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:09:50	0.0	0.0	400.0	...
2013-01-01T00:10:00	0.0	0.0	400.0	...

Etalonnage & binning par FOV



Level 1 = spectres étalonnés en radiométrie (luminance), en spectral (longueurs d'onde), géolocalisés



Level 2 = concentrations XCO₂ intégrées sur la colonne,

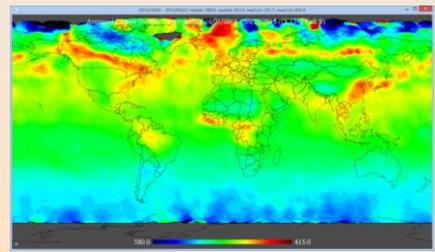
Modes nominaux

Mode city

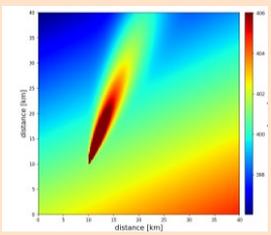
Sommation spatio-temporelle

Level 3 = cartes XCO₂

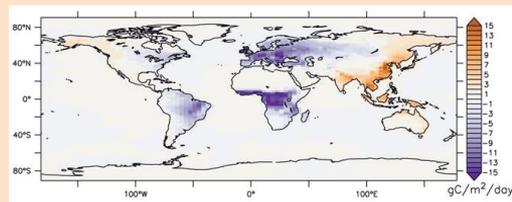
Inversion du transport atmosphérique



Level 4 = flux de surface



Emissions locales

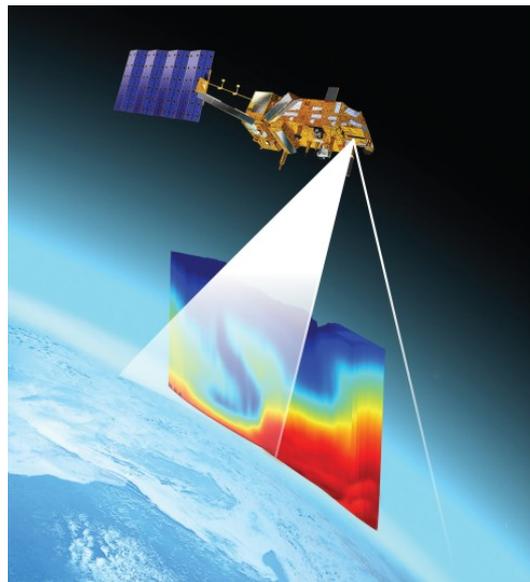


Sources et puits naturels

Laboratoires scientifiques

CNES + labos

Plan de la présentation



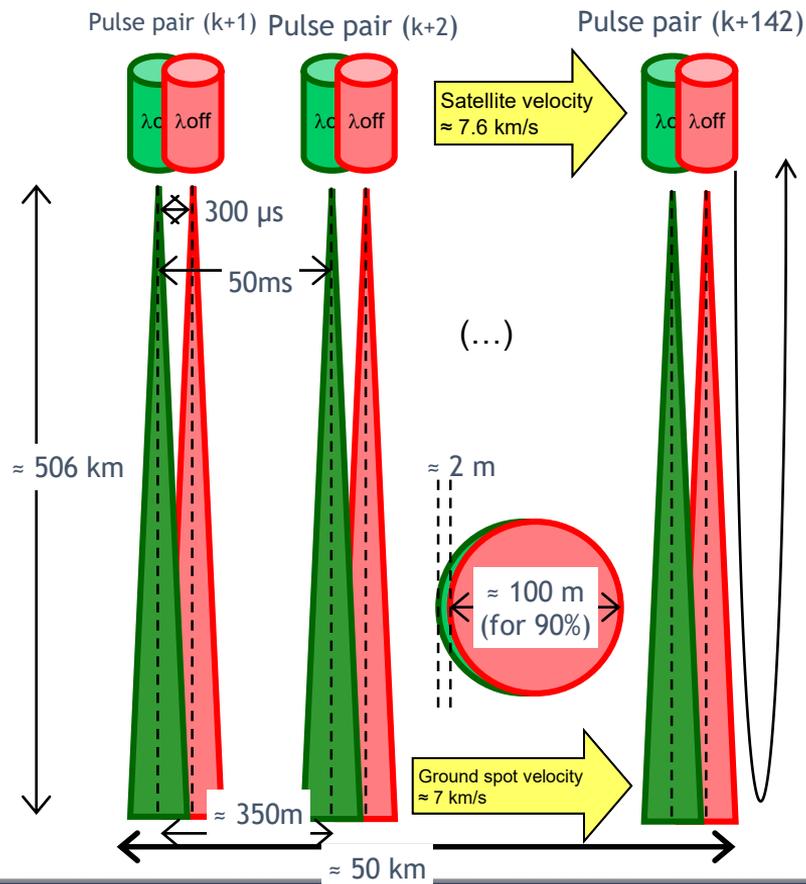
1. L'atmosphère terrestre
2. Le sondage atmosphérique
3. Quelles applications ?
4. IASI – IASI-NG
5. MicroCarb
6. **Merlin**
7. Conclusion

- **MERLIN is a LIDAR satellite dedicated to the observation of the spatial and temporal gradients of atmospheric methane (CH_4) columns**
- **MERLIN is a cooperation between France and Germany space agencies:**
 - ❖ CNES in charge of platform, satellite, system, launcher, and part of ground segments
 - ❖ DLR in charge of payload, and part of ground segments
- **Methane observing Key regions :**
 - ❖ Arctic regions (boreal forest, permafrost)
 - ❖ Eurasia (anthropogenic emissions)
 - ❖ the tropical regions (forest, wetlands).



MERLIN will provide truly global and high accuracy measurements of XCH_4 to estimate CH_4 fluxes at regional to continental scale.

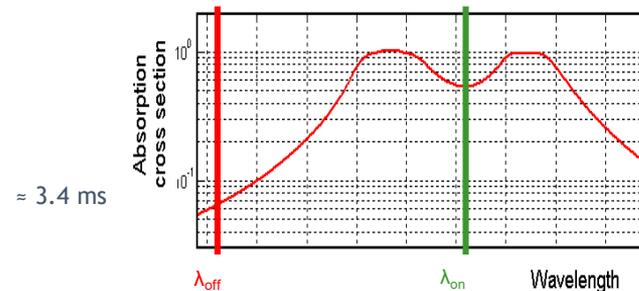
Measurement concept



• Integrated Path Differential Absorption (IPDA) lidar

λ_{on} : 1645.552 nm = 6076.988 cm⁻¹

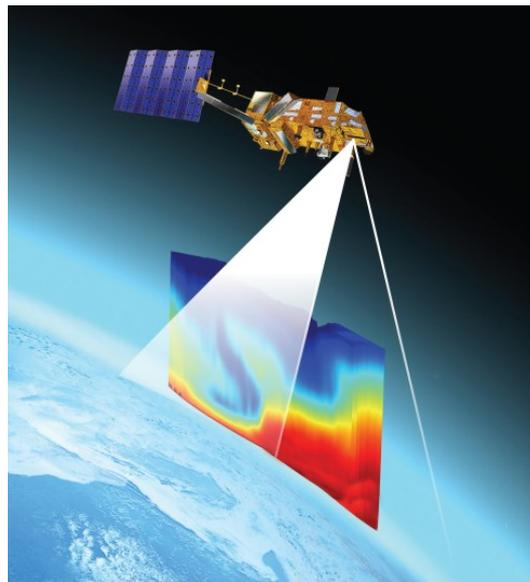
λ_{off} : 1645.846 nm = 6075.903 cm⁻¹



- **acquisition**: all over the orbit, without interruption (20Hz)
- **averaging** of the data along track on 50 km for SNR purpose

Lancement 2029

Plan de la présentation



1. L'atmosphère terrestre
2. Le sondage atmosphérique
3. Quelles applications ?
4. IASI – IASI-NG
5. MicroCarb
6. Merlin
7. Conclusion

- **Enjeux sociétaux très importants : météo, composition atmosphérique, climat**
 - **Nécessite des contributions de nombreuses domaines :
Physique, mathématiques, sciences de la Terre...**
 - **Acteurs très divers :
Laboratoires, agences spatiales, acteurs institutionnels, industriels, PME ...**
 - **Très porteur : beaucoup de projets publics et privés**
- ... rendez-vous l'an prochain pour les lancements de MicroCarb et IASI-NG**