

Concentrations et flux de CO₂ vus de l'espace

Frédéric Chevallier

Colloque *Carbones atmosphériques naturels et anthropiques*, Collège de France, 22 mai 2015

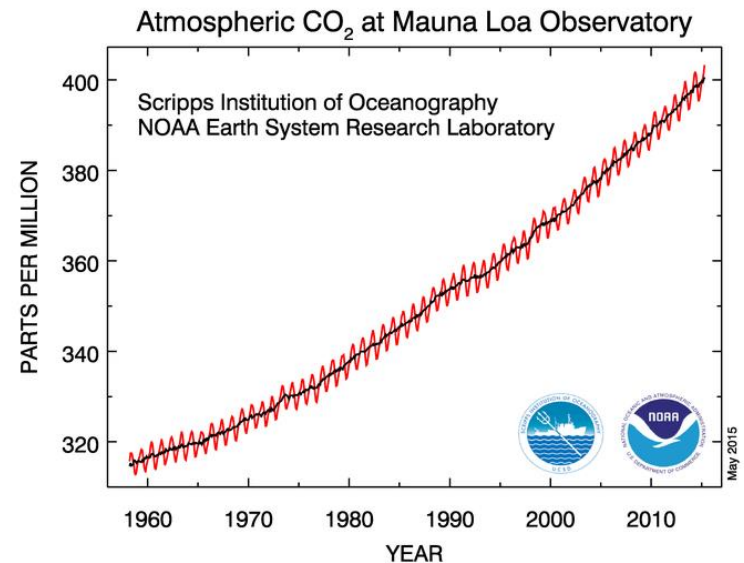


LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT & DE L'ENVIRONNEMENT



Gaz carbonique, gaz exceptionnel

- Dans l'atmosphère, il est presque transparent à la lumière du soleil mais absorbe le rayonnement de la Terre.
 - Il influence le climat.
- Il s'accumule dans l'atmosphère.
 - L'activité humaine contribue à ses sources.
 - Ses puits ne se trouvent qu'à la surface du globe.
- On veut le surveiller, mais ses variations sur le globe ne sont en général que de l'ordre du %.

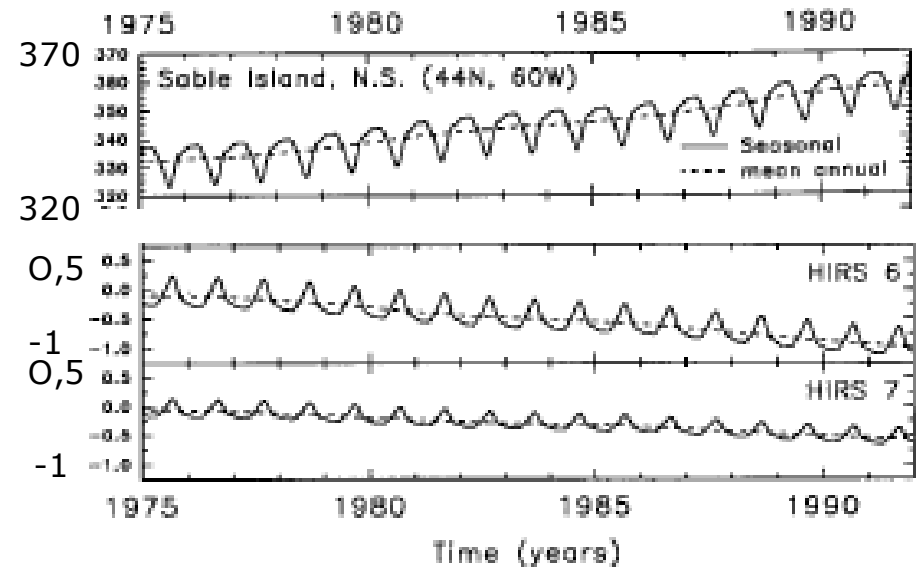


Le CO₂ point d'appui pour sonder la température atmosphérique

- Télédétection de la température atmosphérique en supposant le CO₂ connu – satellites météorologiques de la NOAA (TOVS).

CO₂ (ppm)

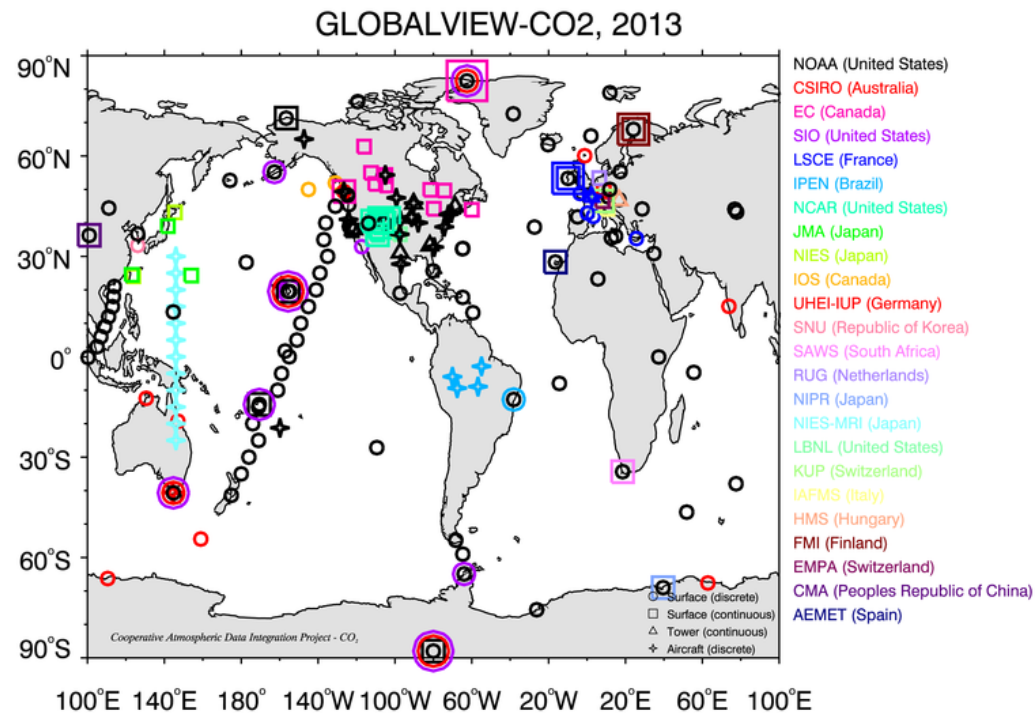
Température de brillance (CO₂ variable) –
Température de brillance (CO₂ à 330ppm) (°C)



- *The brightness temperature differences can be as large as 1 K for a 30-ppmv CO₂ increase and a seasonal variation of a few tenths of a Kelvin may exist (Turner, 1993).*

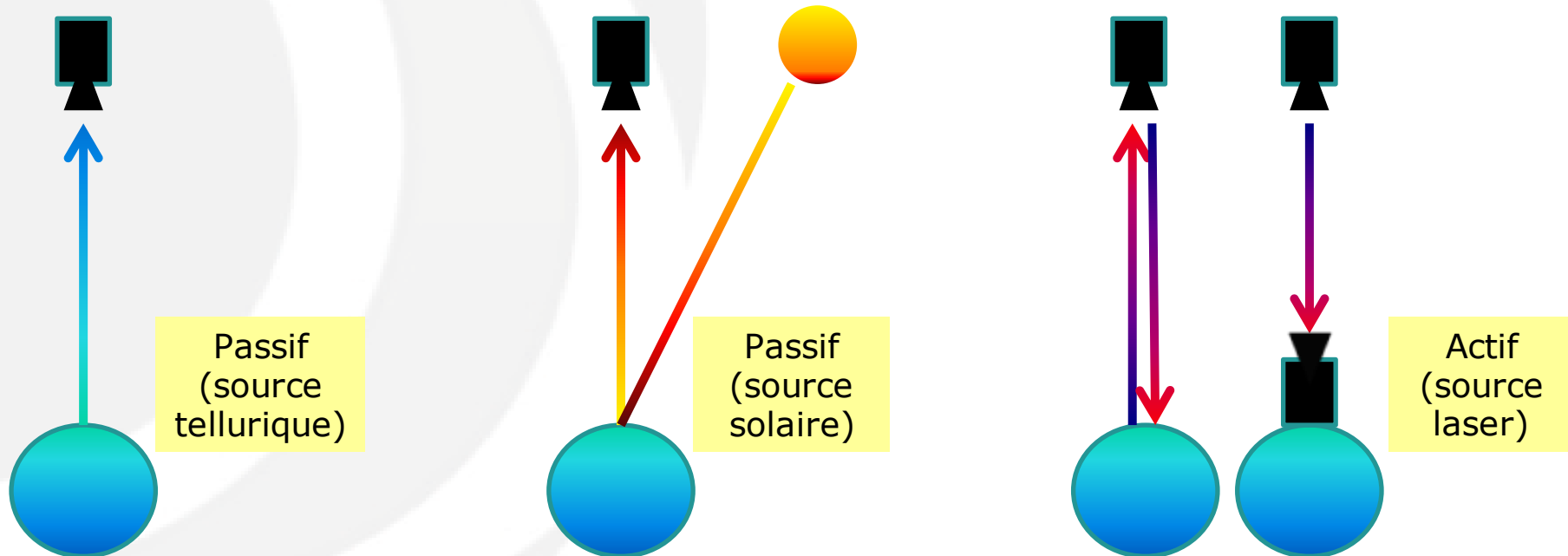
Mesures conventionnelles

- Les mesures de surveillance du CO₂ à la surface du globe sont en général exactes à mieux que 1 ‰ en moyenne pluriannuelle.
 - Leur cahier des charges **pénalise leur couverture du globe.**



Téledétection spatiale du CO₂

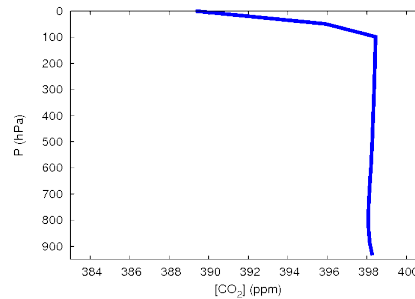
- Mesurer le CO₂ indirectement par ses effets radiatifs.
- Signal en compétition avec celui des nuages, des aérosols, etc.
- Volume massif de mesures moins précises que celles faites sur site.
 - Pas de sondage en présence de nuages épais ou en l'absence de source.



Téledétection spatiale du CO₂

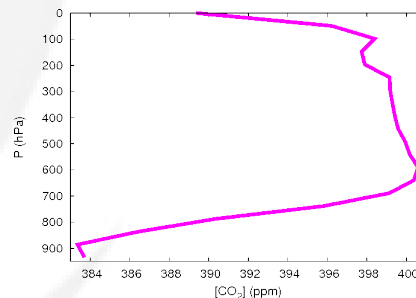
- Le problème d'estimation est sous-contraint: on complète les mesures par une information a priori. La fusion des informations est exprimée de manière rigoureuse par le théorème de Bayes.

Concentrations
a priori
+ incertitudes.

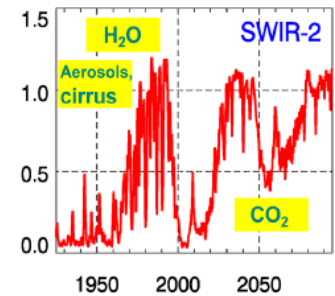


$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x}).p(\mathbf{y}|\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}$$

Concentrations
estimées
+ incertitudes.



Profils de CO₂: OCO-2



Observations
+ incertitudes

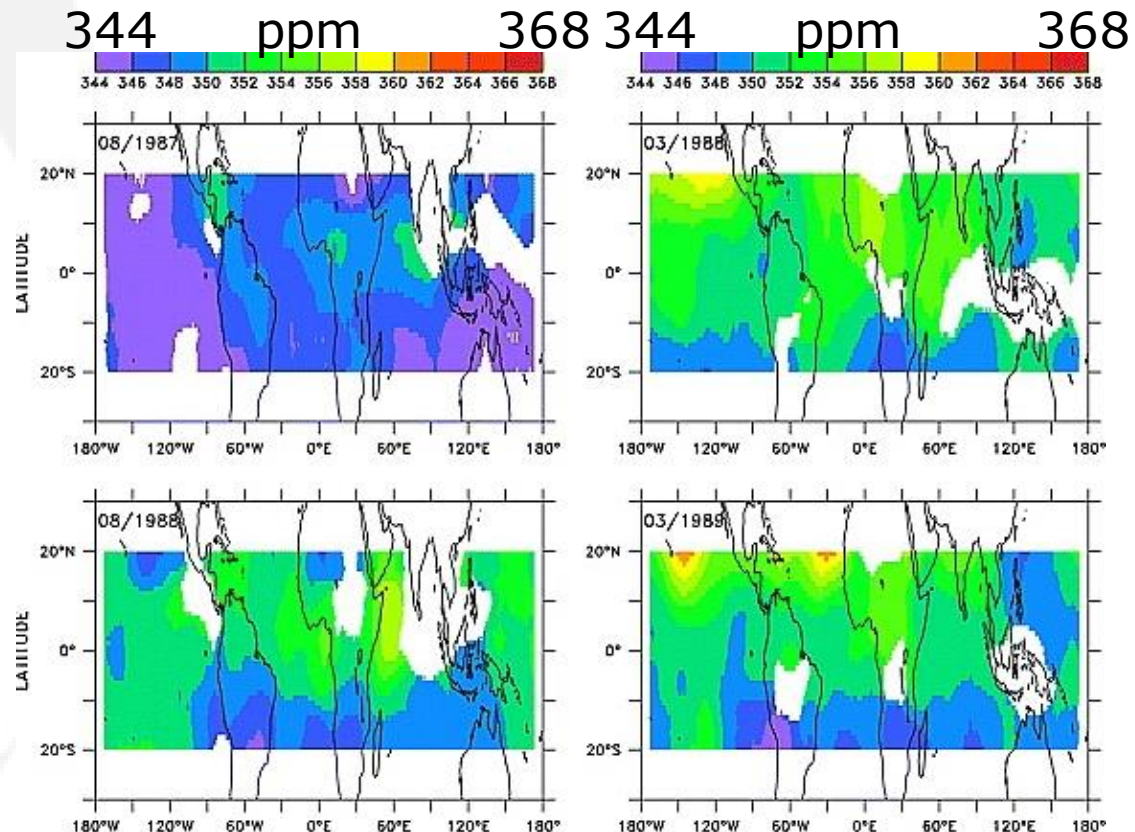
- des mesures (luminances),
- du modèle de rayonnement.

Premières cartes de CO₂ depuis l'espace

- Première télédétection spatiale du CO₂ (Chédin et al., 2003) – satellites météorologiques de la NOAA (TOVS).
- Colonne partielle (haute troposphère) dans les Tropiques.

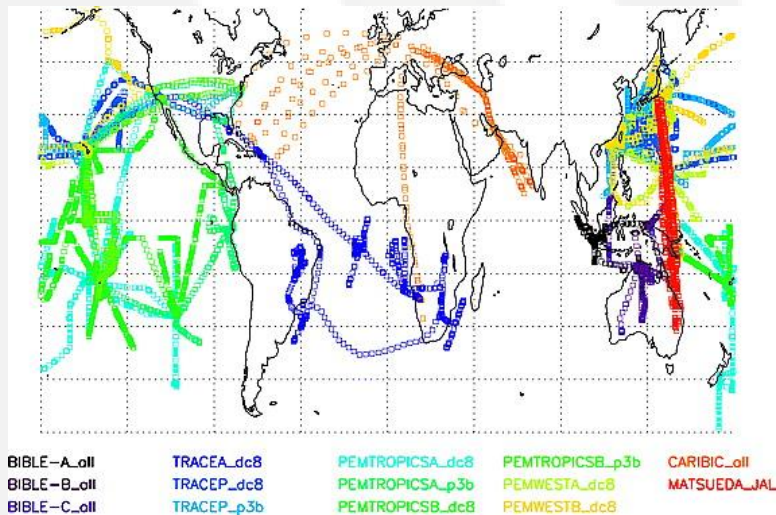
- L'amplitude simulée par les modèles de transport est 2 × moindre.

Chédin et al., *JGR*, 2003



Premières cartes de CO₂ depuis l'espace

- Les modèles de transport du CO₂ (LMDZ et TM3) sont plus proches des mesures aéroportées que les produits satellitaires (TOVS).
- Statistiques des différences aux mesures aéroportées pour différentes campagnes (ppm).



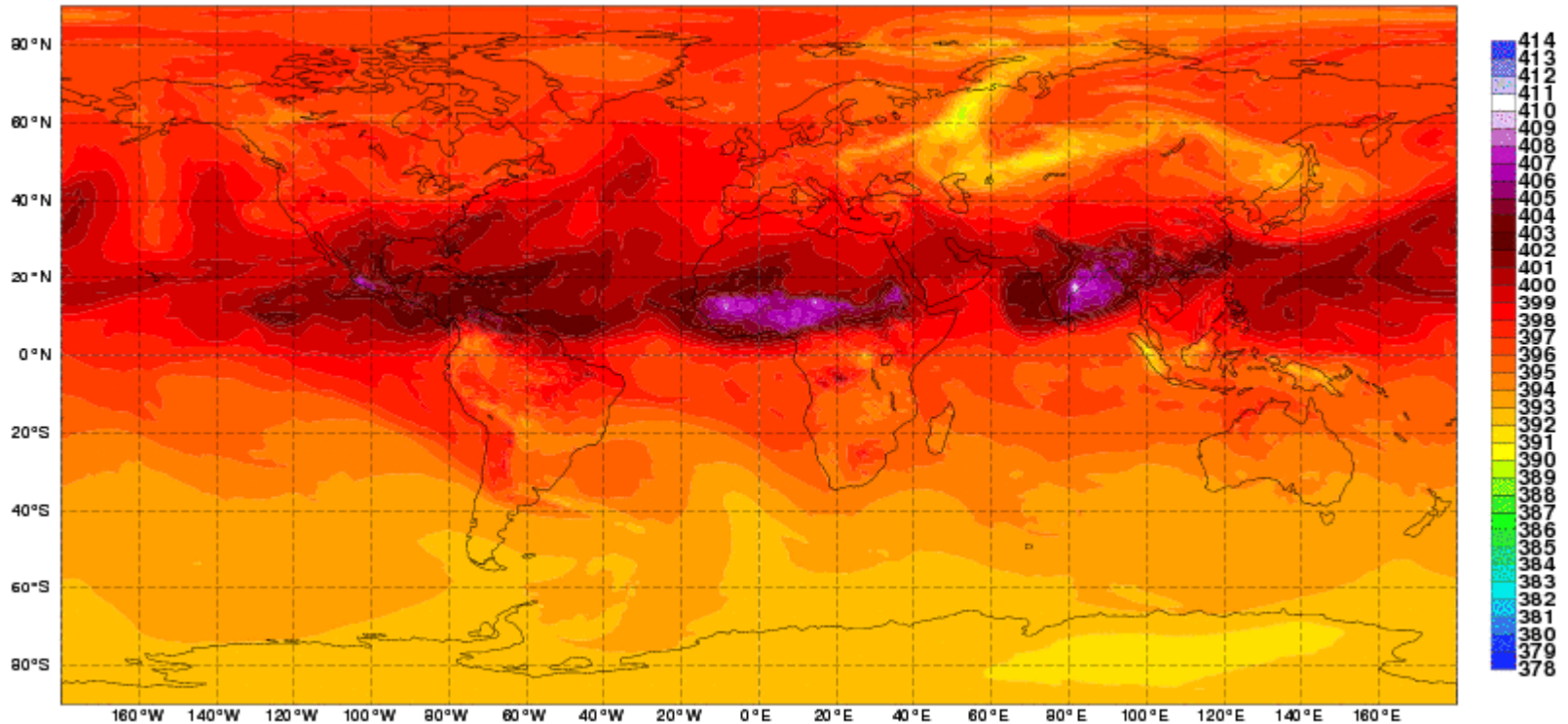
Peylin et al., *JGR*, 2007

	LMDz_integr		TM3_integr		TOVS	
	Bias	RMS	Bias	RMS	Bias	RMS
PEMTROPICSA	-0.08	0.49	-0.30	0.64	-1.40	1.98
PEMTROPICSB	0.25	0.92	0.18	0.97	0.61	1.41
PEMWESTA	0.77	1.26	0.84	1.32	0.83	1.32
PEMWESTB	-0.23	0.61	-0.55	0.75	0.61	1.31
TRACEA	-0.27	1.78	-0.70	1.85	1.62	2.40
TRACEP	-0.02	0.96	-0.54	1.07	-0.10	2.05
BIBLE-A	-0.71	0.95	-0.74	1.01	-0.38	1.02
BIBLE-B	-0.96	1.12	-1.05	1.21	-1.70	1.77
BIBLE-C	-0.66	0.81	-0.59	0.74	3.15	3.73
MATSUEDA	-0.08	0.83	0.01	0.88	0.30	1.88
CARIBIC	0.77	1.42	0.61	1.34	1.61	2.64
All campaigns	-0.10	0.96	-0.27	1.04	0.30	2.03

Variations de la colonne de CO₂

- Prévisions du CEPMMT (Reading, GB), maille de 15 km.

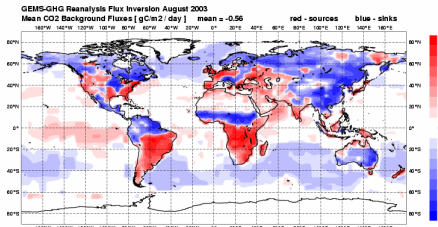
Monday 18 May 2015 00UTC MACC-III Forecast t+108 VT: Friday 22 May 2015 12UTC
Mean column CO2 dry molar fraction [ppm]



Inversion atmosphérique

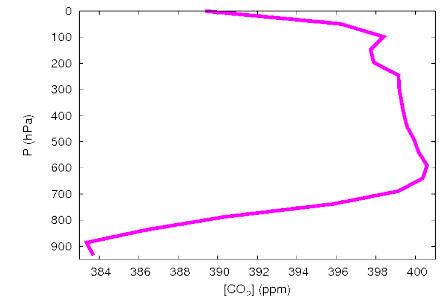
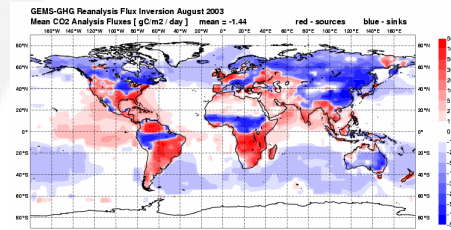
- Le problème d'estimation est sous-contraint: on complète les mesures par une information a priori. La fusion des informations est exprimée de manière rigoureuse par le théorème de Bayes.

Flux
a priori
+ incertitudes.



$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x}).p(\mathbf{y}|\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}$$

Flux
estimés
+ incertitudes.



Observations
+ incertitudes

- des mesures (concentrations),
- du modèle de transport.

Chaîne de traitement des mesures satellitaire

- Mesures brutes



- Mesures étalonnées et exprimées en termes de luminances



$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x}) \cdot p(\mathbf{y}|\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}$$

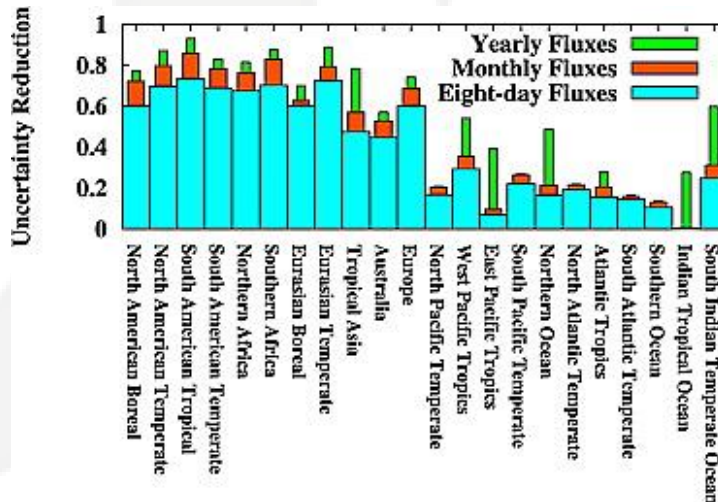
- Profils ou colonnes de CO₂



$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x}) \cdot p(\mathbf{y}|\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}$$

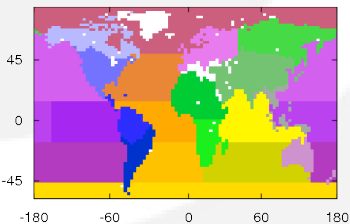
- Cartes des puits et sources de CO₂

Si la chaîne est cohérente de bout en bout, on s'attend à accroître considérablement notre connaissance sur les flux de CO₂.



Réduction d'incertitude théorique pour des mesures du satellite GOSAT (0=neutre; 1=parfait)

Chevallier et al. (*GRL*, 2009)




Une exactitude exceptionnellement fine requise pour la mesure du CO₂

Besoin pour les flux de CO₂, étant donné l'amplitude du signal attendu:

- Fidélité: erreurs aléatoires < 2%.
- Justesse: erreurs systématiques < 1,25 ‰ (3 ‰ pour CH₄).

Très ambitieux pour des mesures spatiales.

	ESA Climate Change Initiative (CCI)	Page 14
	User Requirements Document Version 2 (URDv2)	Version 2 – Final
	for the Essential Climate Variable (ECV) Greenhouse Gases (GHG)	28 August 2014

Requirements for regional CO ₂ and CH ₄ source/sink determination					
Parameter	Req. type	Random error ("Precision")		Systematic error	Stability
		Single obs.	1000 ² km ² monthly		
XCO ₂	G	< 1 ppm	< 0.3 ppm	< 0.2 ppm (absolute)	As systematic error but per year
	B	< 3 ppm	< 1.0 ppm	< 0.3 ppm (relative ^{§1})	–
	T	< 8 ppm	< 1.3 ppm	< 0.5 ppm (relative ^{§1})	–
XCH ₄	G	< 9 ppb	< 3 ppb	< 1 ppb (absolute)	As systematic error but per year
	B	< 17 ppb	< 5 ppb	< 5 ppb (relative ^{§1})	–
	T	< 34 ppb	< 11 ppb	< 10 ppb (relative ^{§1})	–

Table 1: GHG-CCI XCO₂ and XCH₄ random ("precision") and systematic retrieval error requirements for measurements over land. Abbreviations: G=Goal, B=Breakthrough, T=Threshold requirement. ^{§1} Required systematic error after an empirical bias correction, that does not use the verification data. ^{§2} Required systematic error and stability after bias correction, where bias correction is not limited to the application of a constant offset / scaling factor.

Des programmes spatiaux dédiés

- Japon:
 - **GOSAT (JAXA/NIES/MoE), lancé en 2009.**
 - **GOSAT-2 (JAXA/NIES/MoE), prévu pour 2018.**
- USA:
 - **OCO (NASA), lancement échoué en 2009.**
 - **OCO-2 (NASA), lancé en 2014.**
 - ASCENDS (NASA), à l'étude (2023+).
 - etc.
- Chine:
 - **TANSAT (CAS, MOST, CMA) prévu pour 2015.**
- Europe (ESA):
 - Carbosat, soumis mais non sélectionné pour *Earth Explorer 2*.
 - A-SCOPE, candidat *Earth Explorer 7*, non sélectionné.
 - Carbonsat, candidat *Earth Explorer 8* (2022+).
- France (CNES):
 - Microcarb, à l'étude (phase A en 2010-2014).
 - Très forte expertise sur les détecteurs et l'optique (industrie), sur la spectroscopie et l'étude des flux de carbone (laboratoires). Le CNES investit dans la physique de la mesure et sur les aspects système.

État des chaînes de traitement pour GOSAT (2009-...)

○ Mesures brutes



○ Luminances



$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x}) \cdot p(\mathbf{y}|\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}$$

○ Profils ou colonnes de CO₂



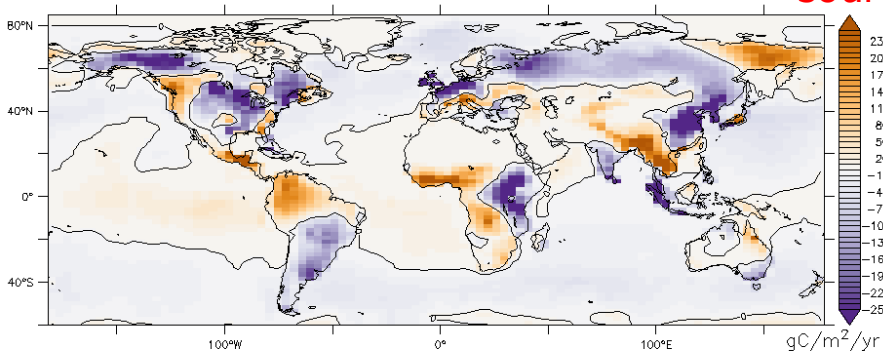
$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x}) \cdot p(\mathbf{y}|\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}$$

○ Cartes des puits et sources de CO₂

Progrès spectaculaires réalisés: facteur 2 obtenu sur l'exactitude. Les biais résiduels restent significatifs, mais situation très évolutive.

Résultats dispersés et biaisés.

MACC



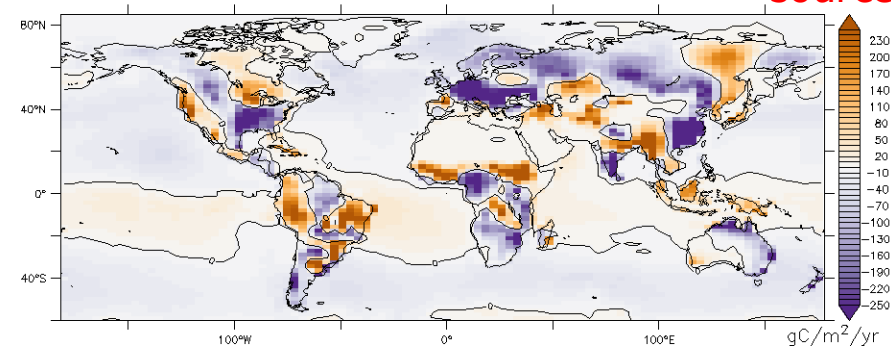
source

gC/m²/yr

Bilan net du CO₂ naturel obtenu avec les mesures de surface pour 2010 (MACCv13.1)

puits

ACOS



source

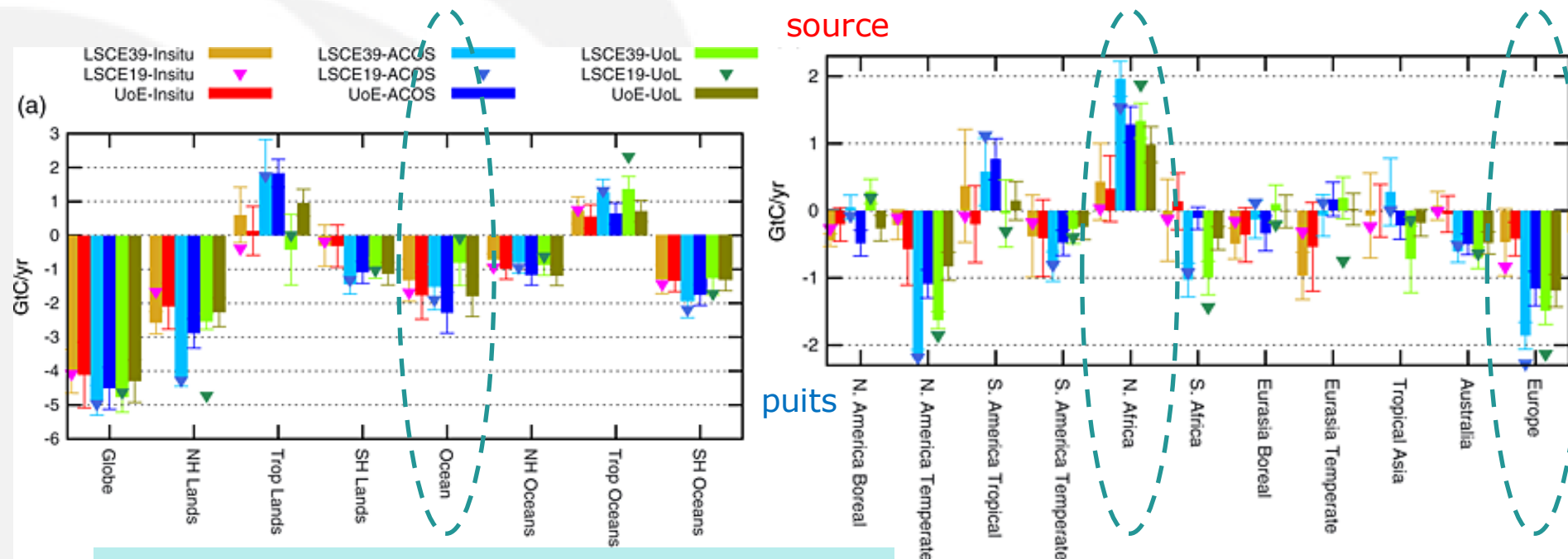
gC/m²/yr

Bilan net du CO₂ naturel obtenu avec GOSAT pour 2010 (ACOSb3.4)

puits

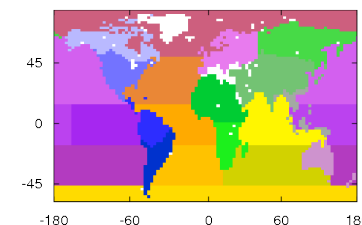
Estimations du bilan des flux naturels de CO₂ pour 2010

- Ensemble de 9 résultats construit avec 2 produits CO₂ alternatifs de GOSAT, avec des mesures de surface (référence), avec 2 systèmes d'inversion et avec 2 versions d'un des modèles de transport.



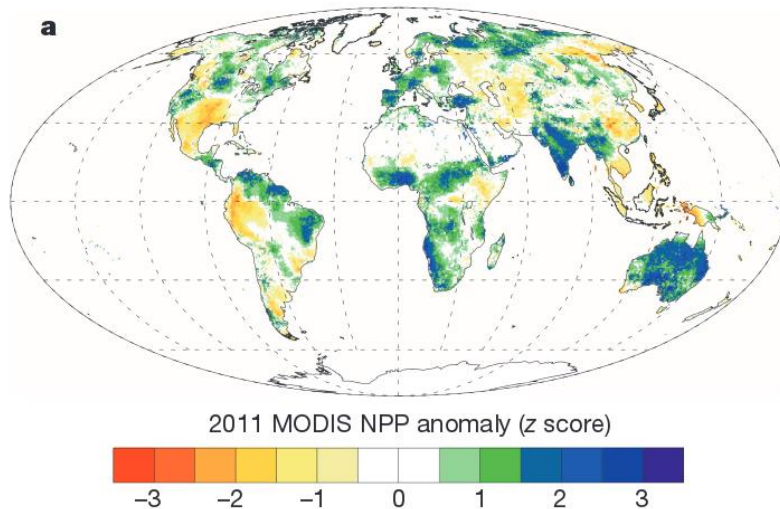
Océan mondial: puits entre 0 et 2 GtC.
 Europe: puits entre 1 et 2 GtC ?
 Afrique du nord: source entre 1 et 2 GtC ?

Chevallier et al. (*GRL*, 2014)

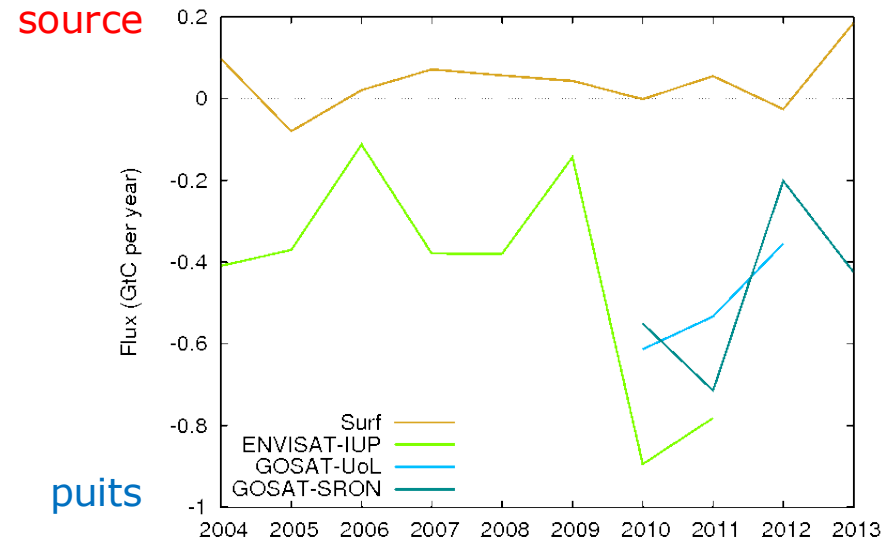


Cohérences

- Ensemble de 4 résultats pour l'Australie construit avec 2 produits CO₂ alternatifs de GOSAT, 1 produit de ENVISAT et des mesures de surface.



Production de matière organique végétale (NPP) anormalement forte en Australie en 2011 (Poulter et al., *Nature*, 2014).



L'anomalie australienne est vue par la tétédécion du CO₂, mais pas par le réseau de surface (Chevallier et al., *ESA GHG_CCI*, 2015).

État des chaînes de traitement pour GOSAT (2009-...)

- Mesures brutes



- Luminances



$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x}) \cdot p(\mathbf{y}|\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}$$

- Profils ou colonnes de CO₂



$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x}) \cdot p(\mathbf{y}|\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}$$

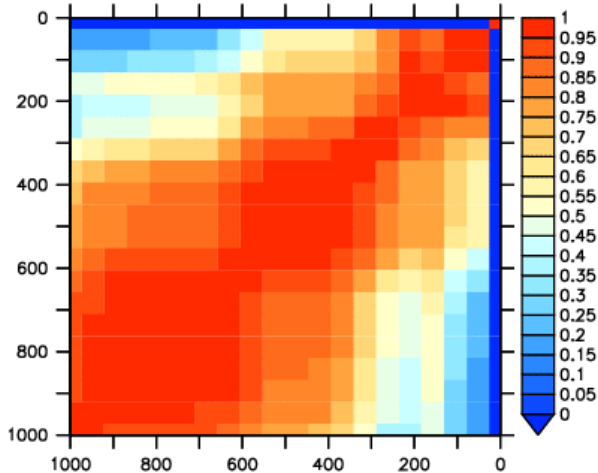
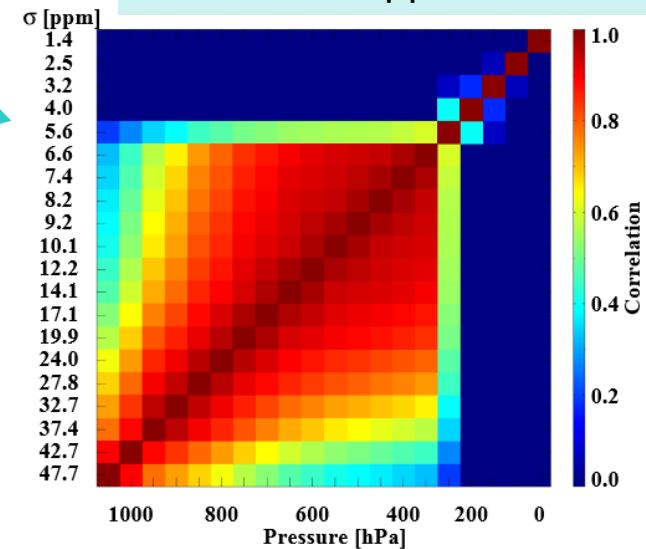
- Cartes des puits et sources de CO₂

- Les maillons sont pour l'instant incohérents.



Corrélations entre les erreurs des concentrations du profil a priori — NASA (O'Dell et al., *AMT*, 2012)

σ colonne = 12 ppm



Corrélations entre erreurs des concentrations du profil a priori à 3°N — LSCE

σ colonne \sim 0,4 ppm

État des chaînes de traitement pour GOSAT (2009-...)

- Mesures brutes



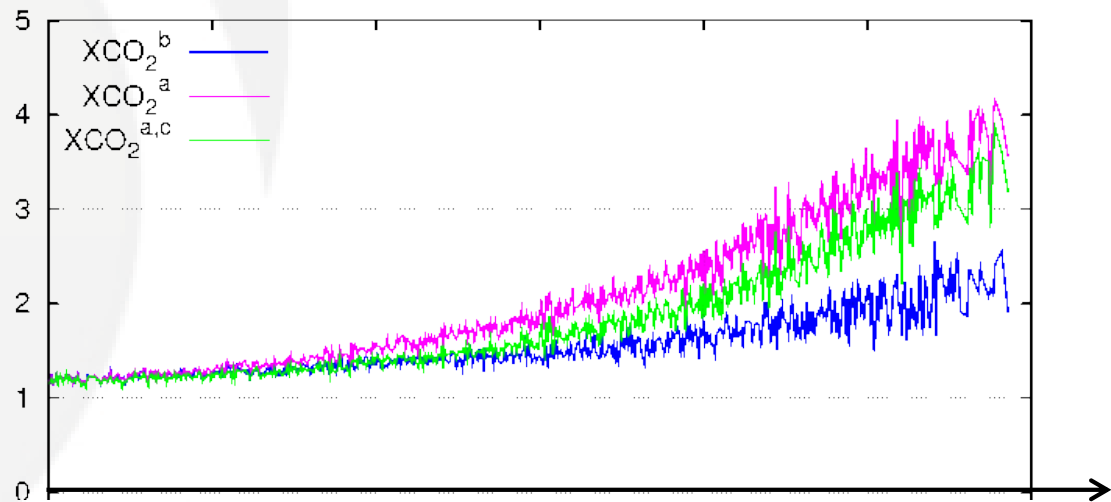
- Luminances



$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{x}) \cdot p(\mathbf{y}|\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}$$

- Profils ou colonnes de CO₂

- Les produits sont plus bruités (mais moins biaisés) que l'information a priori.



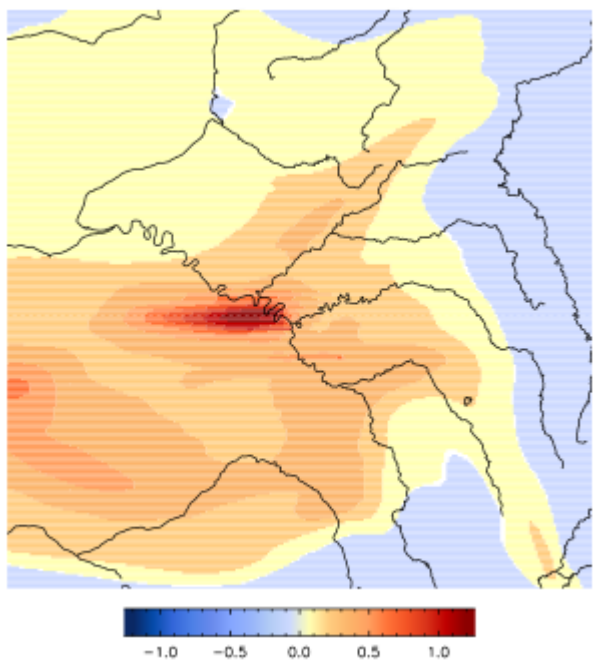
Bruit (σ) par rapport à une référence

- b: a priori
- a: estimation
- a,c: estimation après correction empirique

Taille de la correction apportée à l'information a priori (produit NASA)

Vers une imagerie des panaches de CO₂

- Surveillance des émissions des villes et des sources intenses.
 - Carbonsat (ESA, à l'étude)



Panache parisien simulé pour le 6 octobre 2010 à 11h.

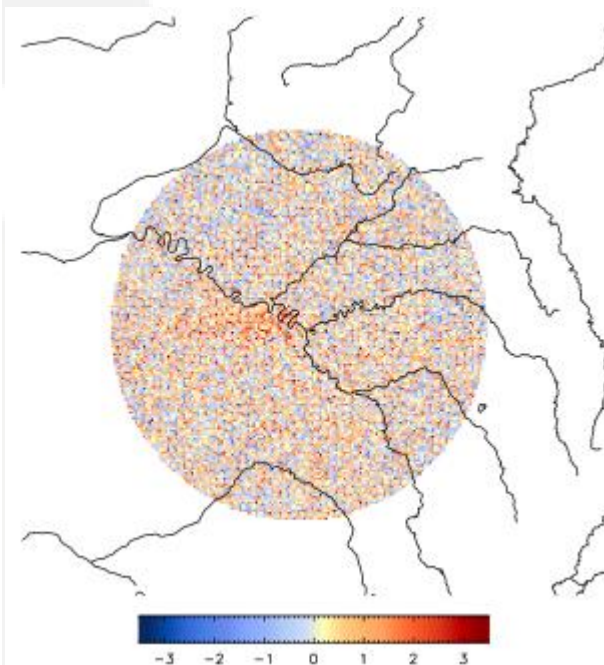
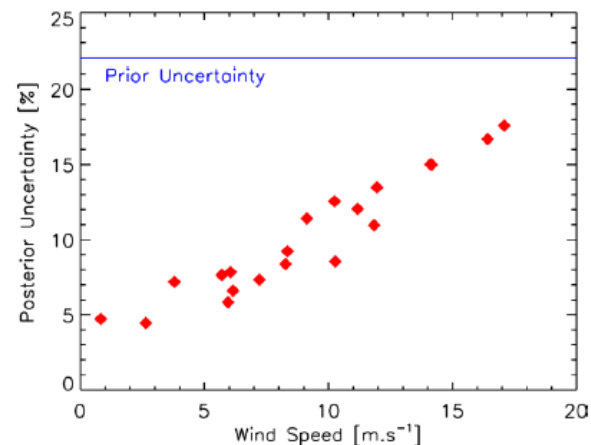


Image avec un bruit $\sigma = 1,1$ ppm



Incertitude sur l'estimation des émissions de l'Île-de-France entre 6h et 11h en fonction de la vitesse du vent

Le CO₂, nouvelle frontière pour l'observation spatiale (1/2)

- Le signal inédit des mesures spatiale est stratégique:
 - Permet un bilan exhaustif des puits et sources du CO₂, de manière non intrusive et standardisée,
 - Peut être combiné avec toute information disponible, y compris les inventaires (approche « ultime »).
- Mais il est très petit devant le signal de fond, qui, lui, est bien connu.
 - Renouvèle le problème de la télédétection pour l'atmosphère.
- Le paradigme des chaînes de traitement doit évoluer.
 - Meilleure cohérence de bout en bout.
 - Meilleure prise en compte de la connaissance a priori.

Le CO₂, nouvelle frontière pour l'observation spatiale (2/2)

- L'intérêt de telles mesures motive l'étude de nouveaux systèmes d'observation satellitaire:
 - Caractérisation des panaches de CO₂: imageurs (orbite polaire ou géostationnaire) ou constellations.
 - Moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère d'hiver: lidar.
 - Une composante sol est indispensable pour étalonner finement les mesures de différents satellites.
- Ces projets ont structuré une forte communauté scientifique en particulier en Europe.
 - Maturation scientifique rapide, à la fois du point de vue technique (mesure) et du point de vue numérique (traitement).