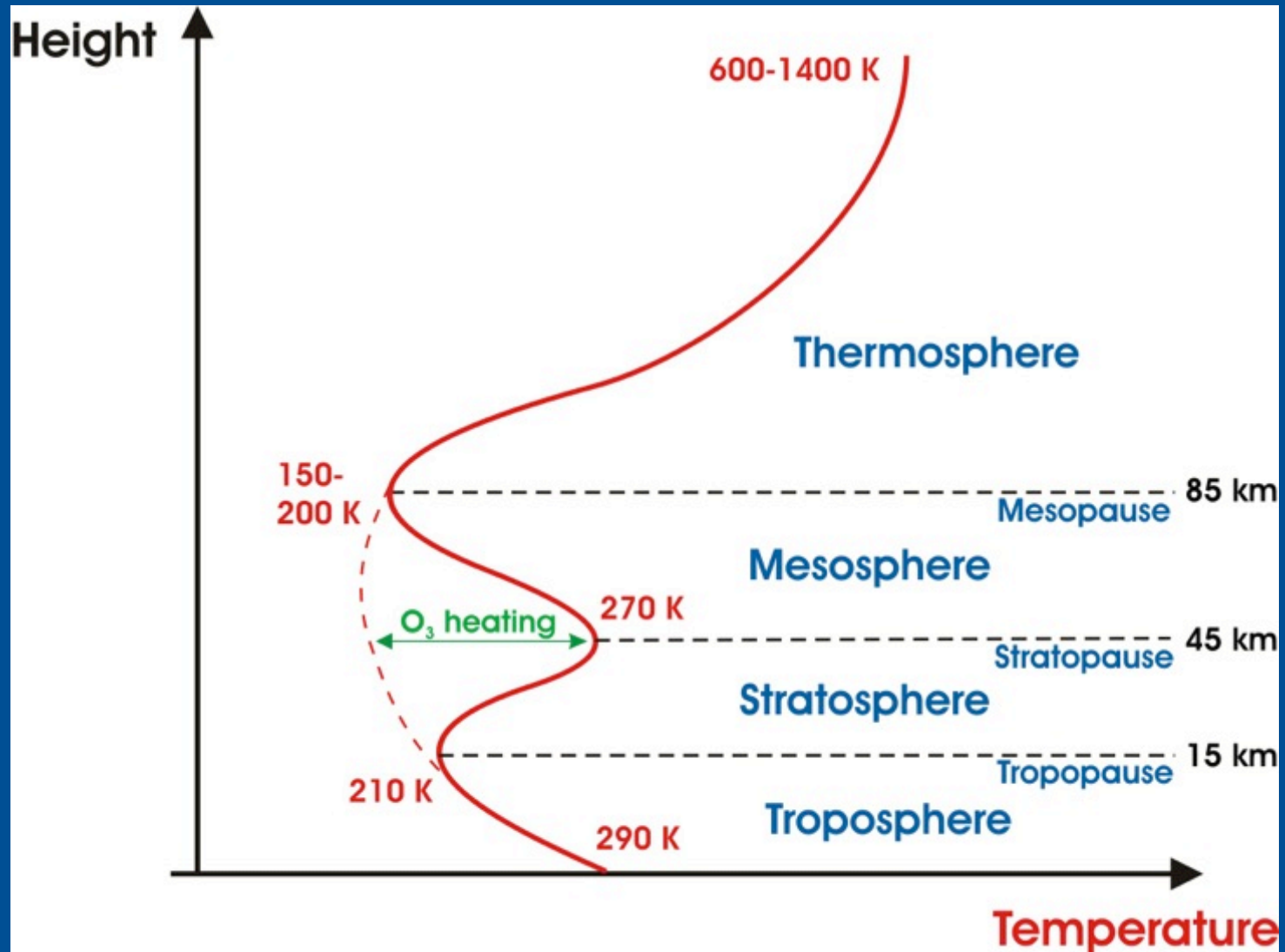


Le freinage atmosphérique

Sean Bruinsma, CNES, Géodésie Spatiale

La thermosphère

Les couches de la haute atmosphère neutres ;
les satellites sont dans la thermosphère



Calculer le freinage

L'accélération de traînée atmosphérique :

$$a_{drag} = -\frac{1}{2} C_D \frac{A}{m} \rho v^2$$

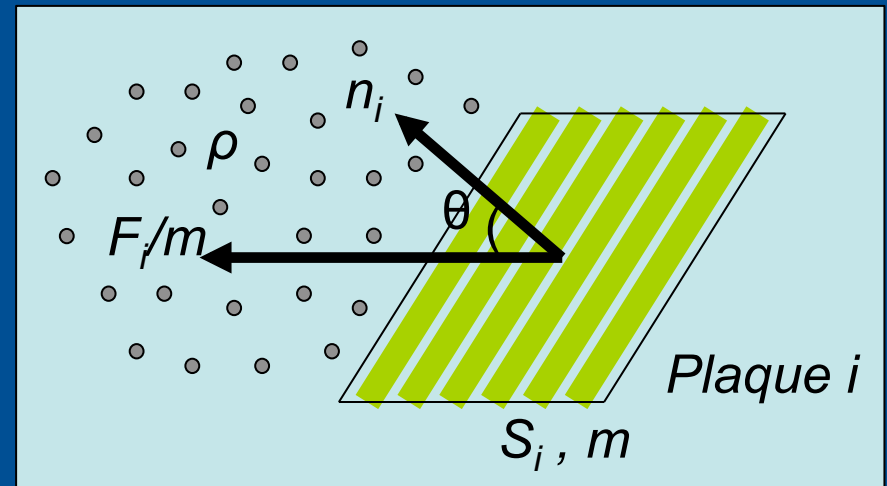
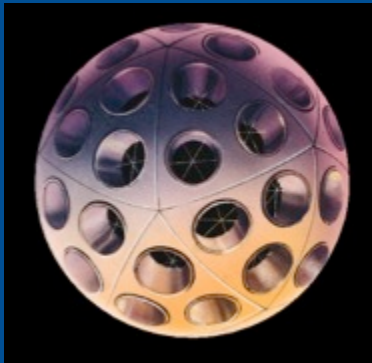
v = vitesse par rapport à l'atmosphère en rotation

A = surface perpendiculaire à la vitesse

m = masse

C_D = coefficient aérodynamique

ρ = density



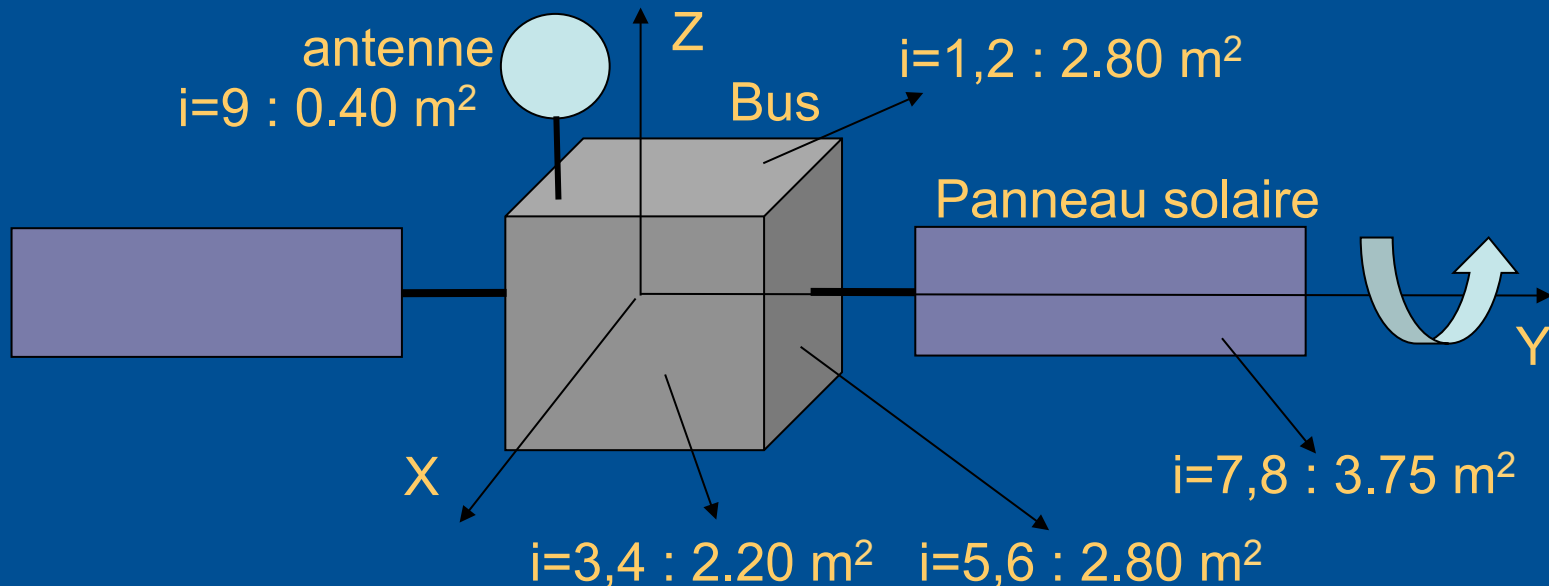
Calculer le freinage

Accélération de traînée atmosphérique calculée par élément i :

$$a_{drag} = FD \cdot \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{2} C_{Di} \frac{A_i}{m} \rho v^2 \right)$$

FD : facteur d'échelle, a-priori=1

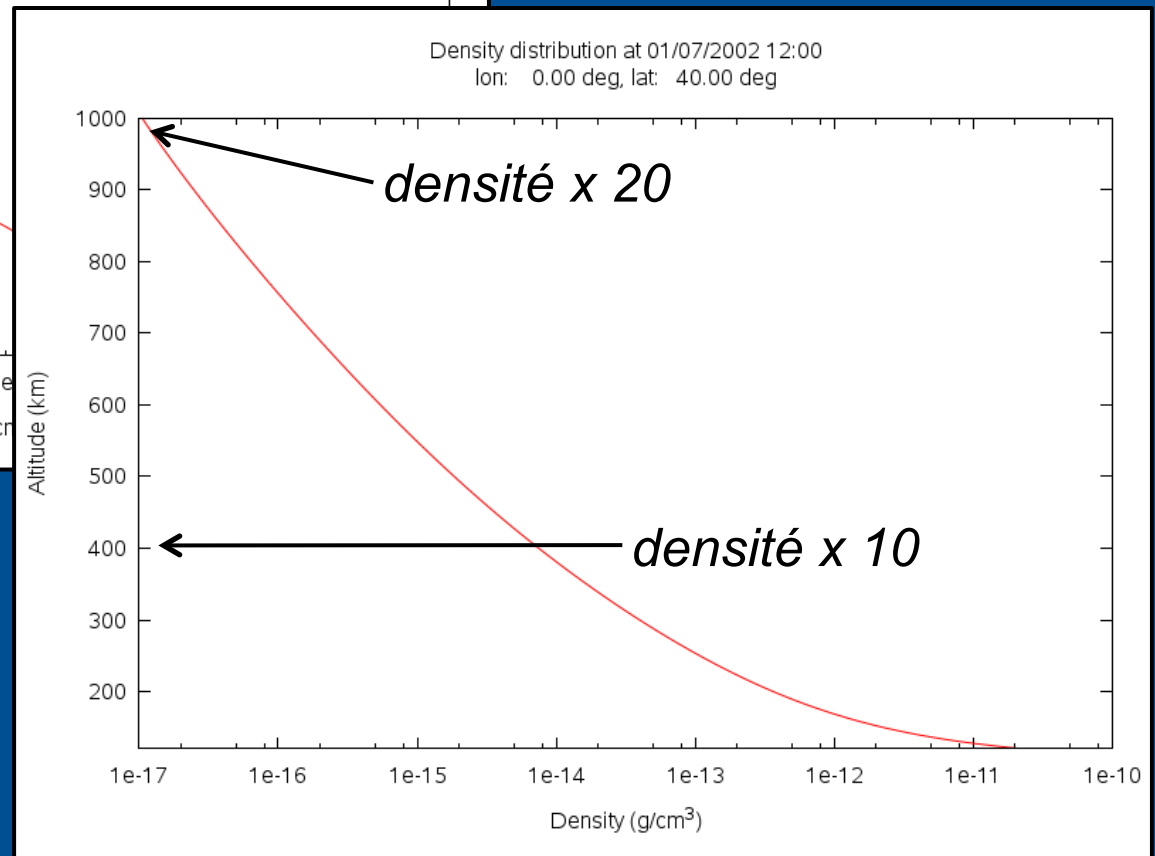
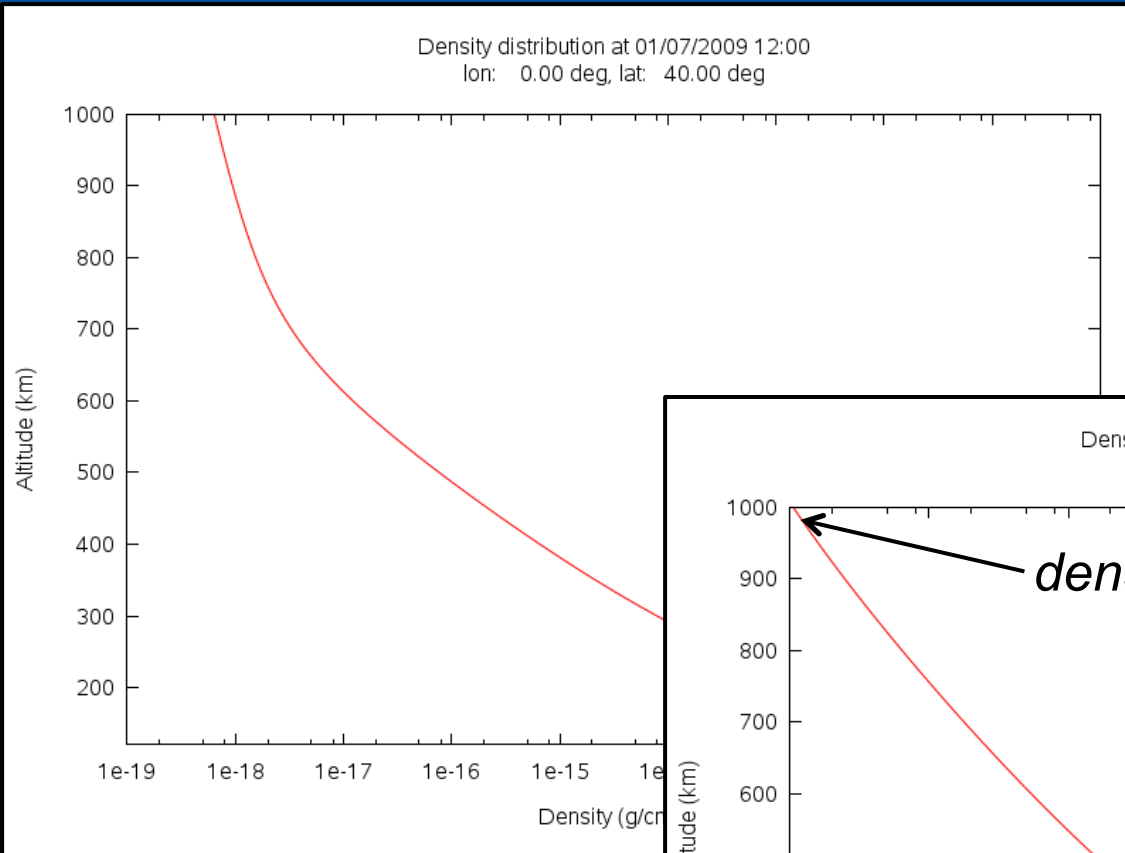
Modèle simple du satellite : macro modèle (boîte, panneaux, antenne)



Calculer le freinage

Densité en fonction
d'altitude :
Activité solaire faible

Activité solaire forte

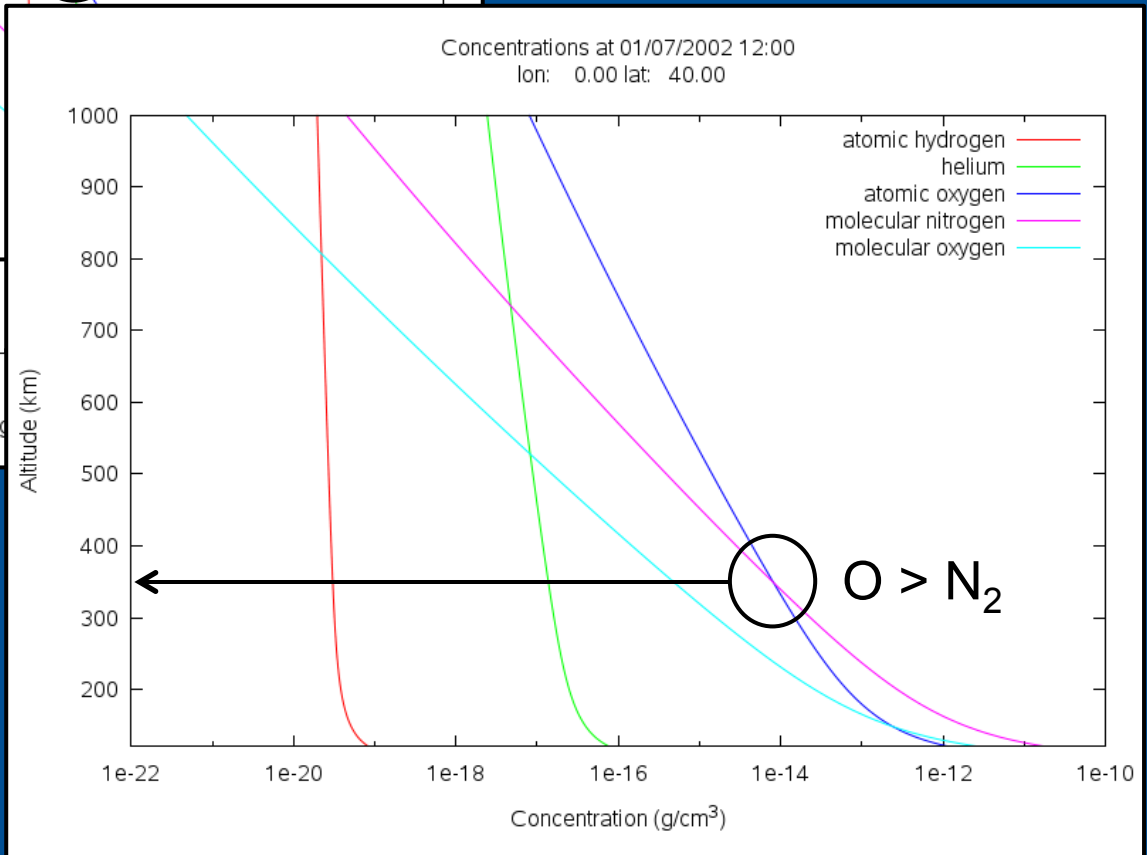
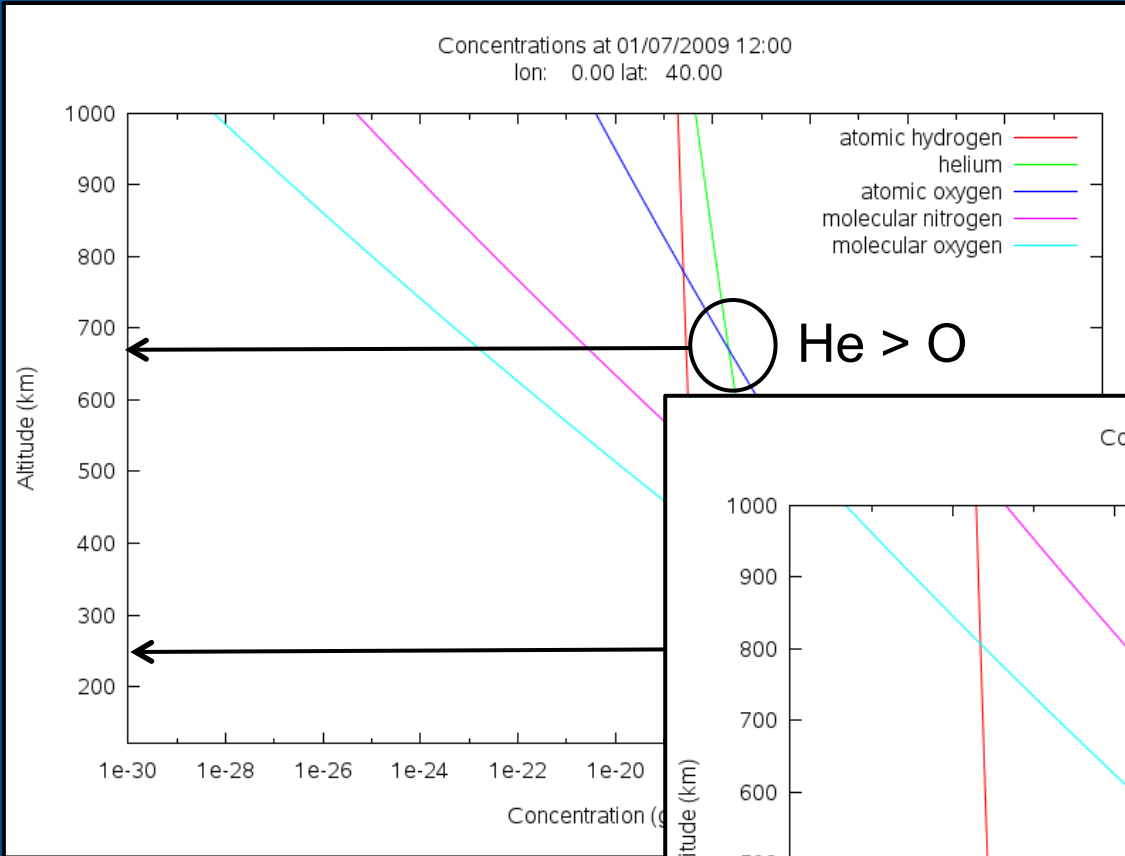


(1 juillet, lat=40°, hl=12)

Calculer le freinage

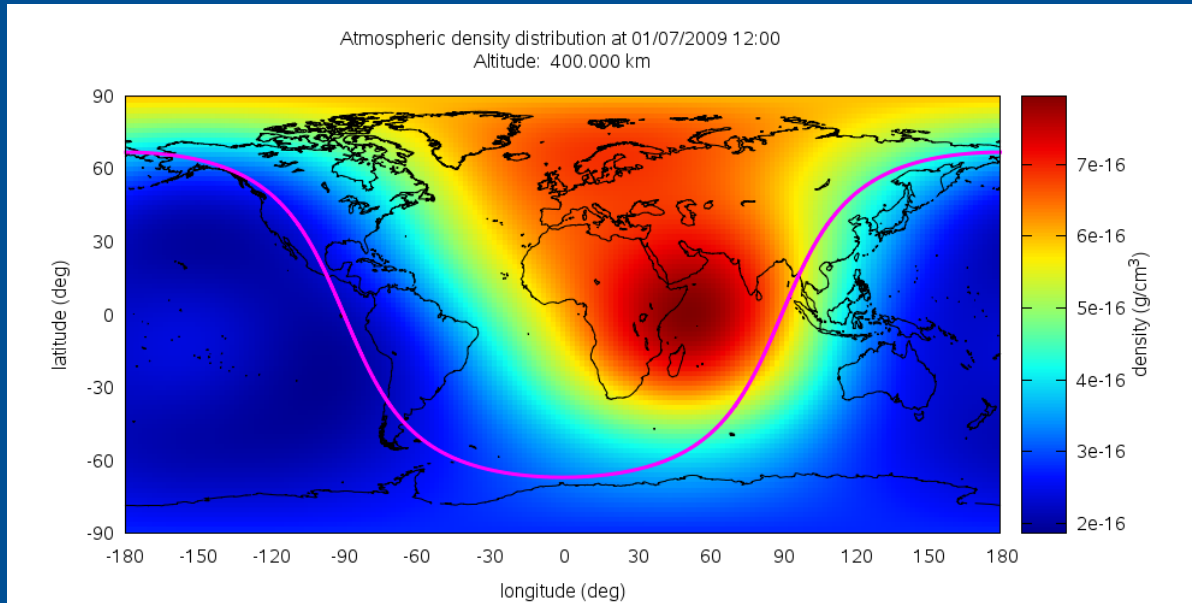
Composition en
fonction d'altitude :
Activité solaire faible

Activité solaire forte



(1 juillet, lat=40°, hl=12)

Calculer le freinage



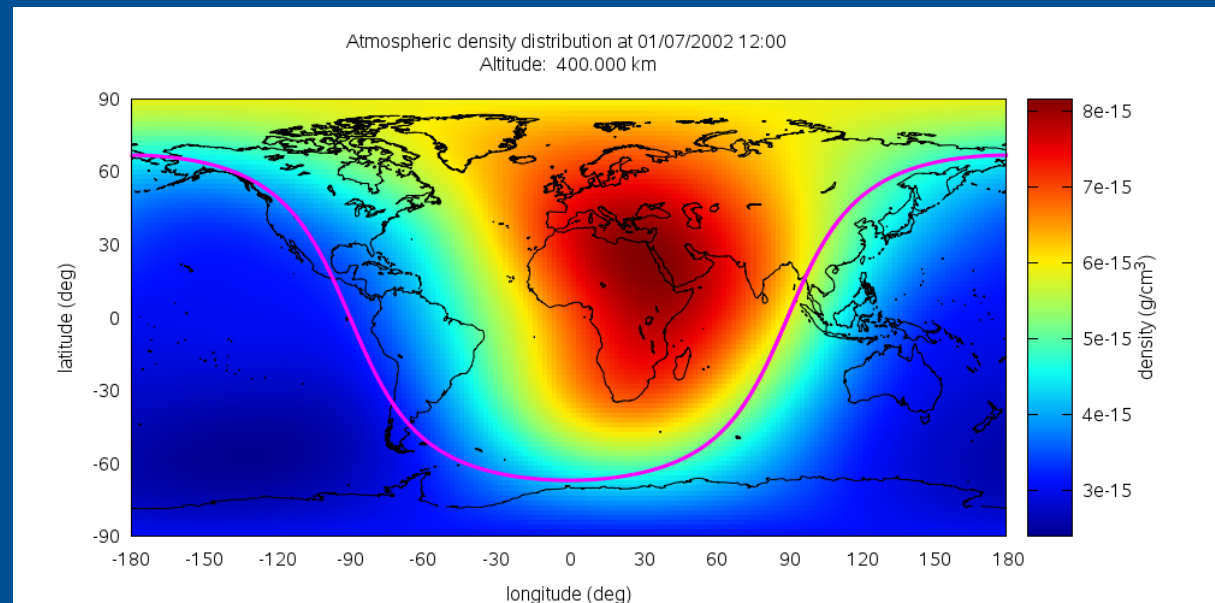
Densité à 400 km :
activité solaire faible

Densité x 10

Activité solaire forte

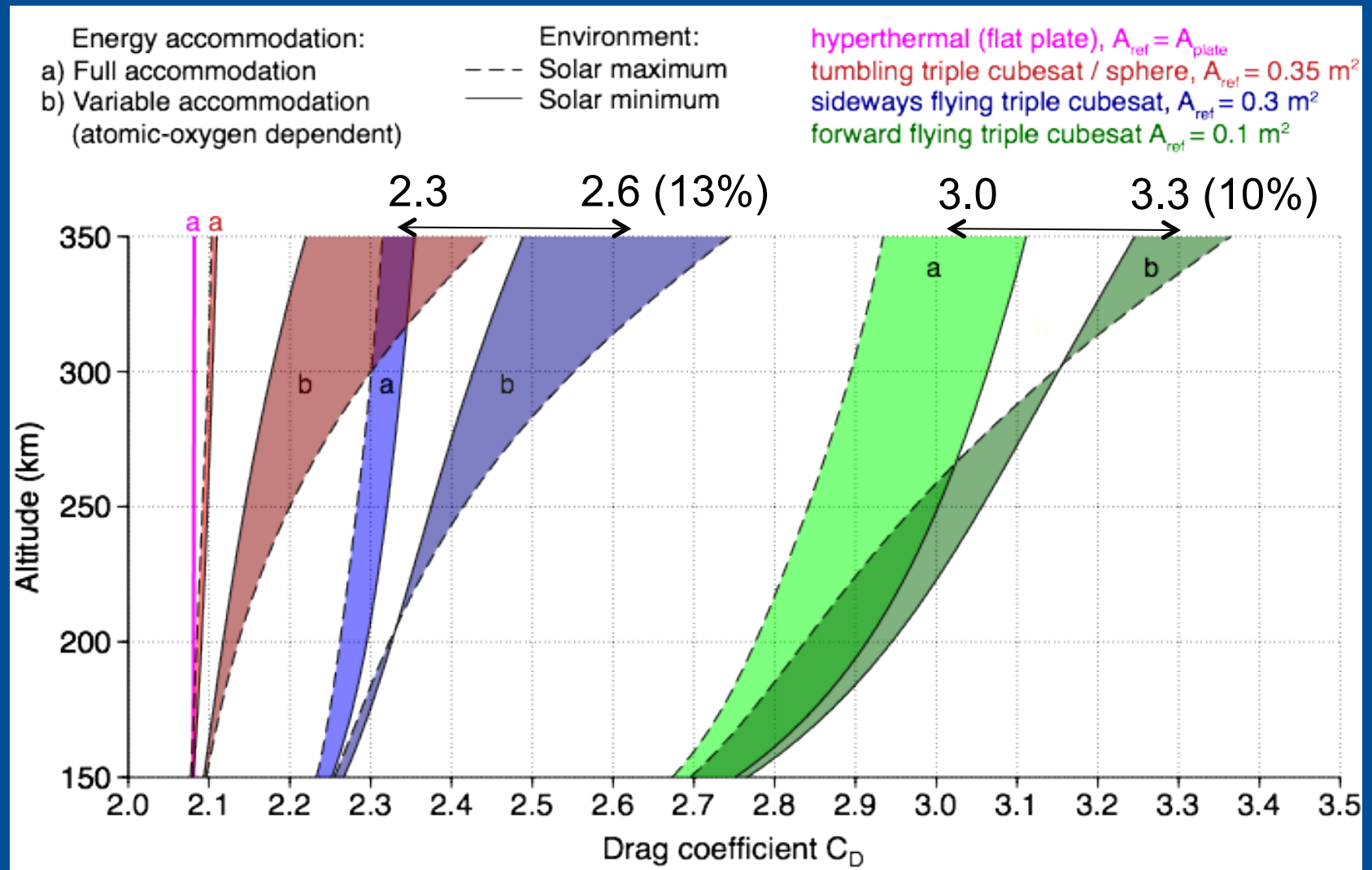
Variation saisonnière :
maximum dans
l'hémisphère d'été pour
T, O₂, N₂ et O.

Exception : He



Calculer le freinage

Exemples des coefficients aérodynamiques C_d modélisés

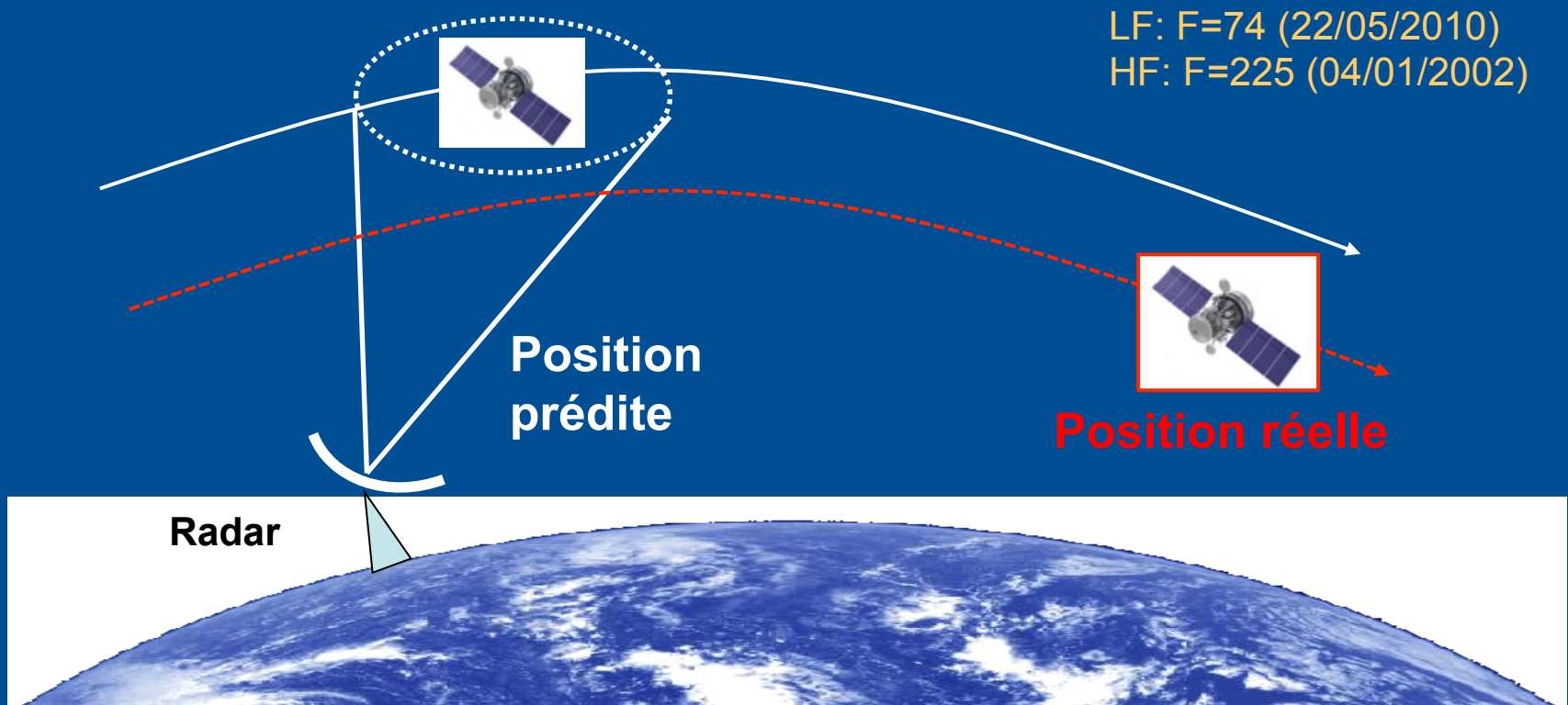


NB: il y a des modèles plus simple aussi, voire $C_d=2.2$

Calcul d'orbite : freinage

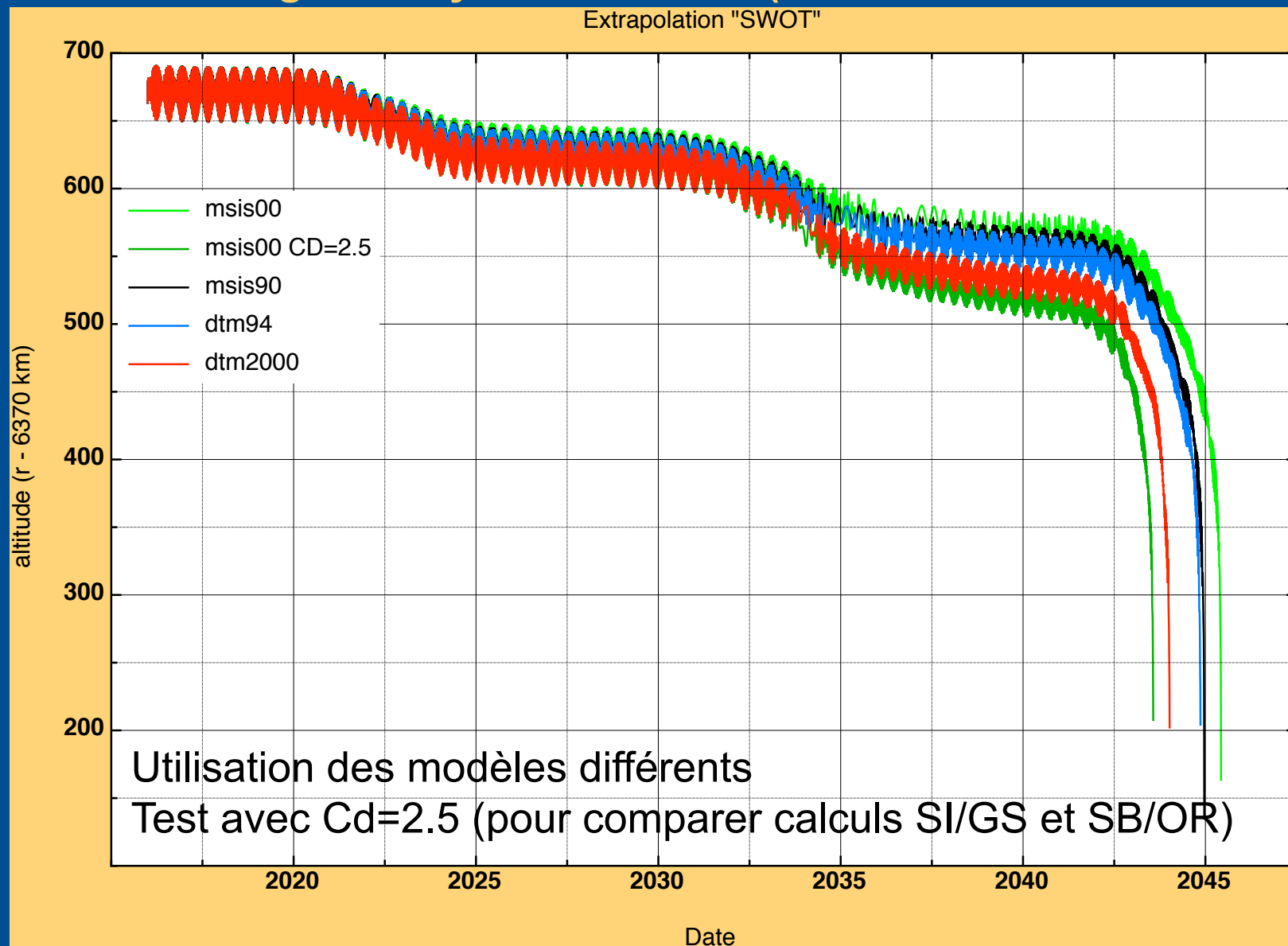
Effet de freinage le long de la trace (2 jours)

	250 km		550 km		850 km	
	LF	HF	LF	HF	LF	HF
Effet total	89.8 km	414.0 km	146.3 m	4.2 km	15.8 m	195.6 m
* 0.5	45.0 km	209.4 km	73.4 m	2.1 km	7.9 m	98.1 m
Δ modèles	5.7 km	12.2 km	42.1 m	0.8 km	5.6 m	60.7 m



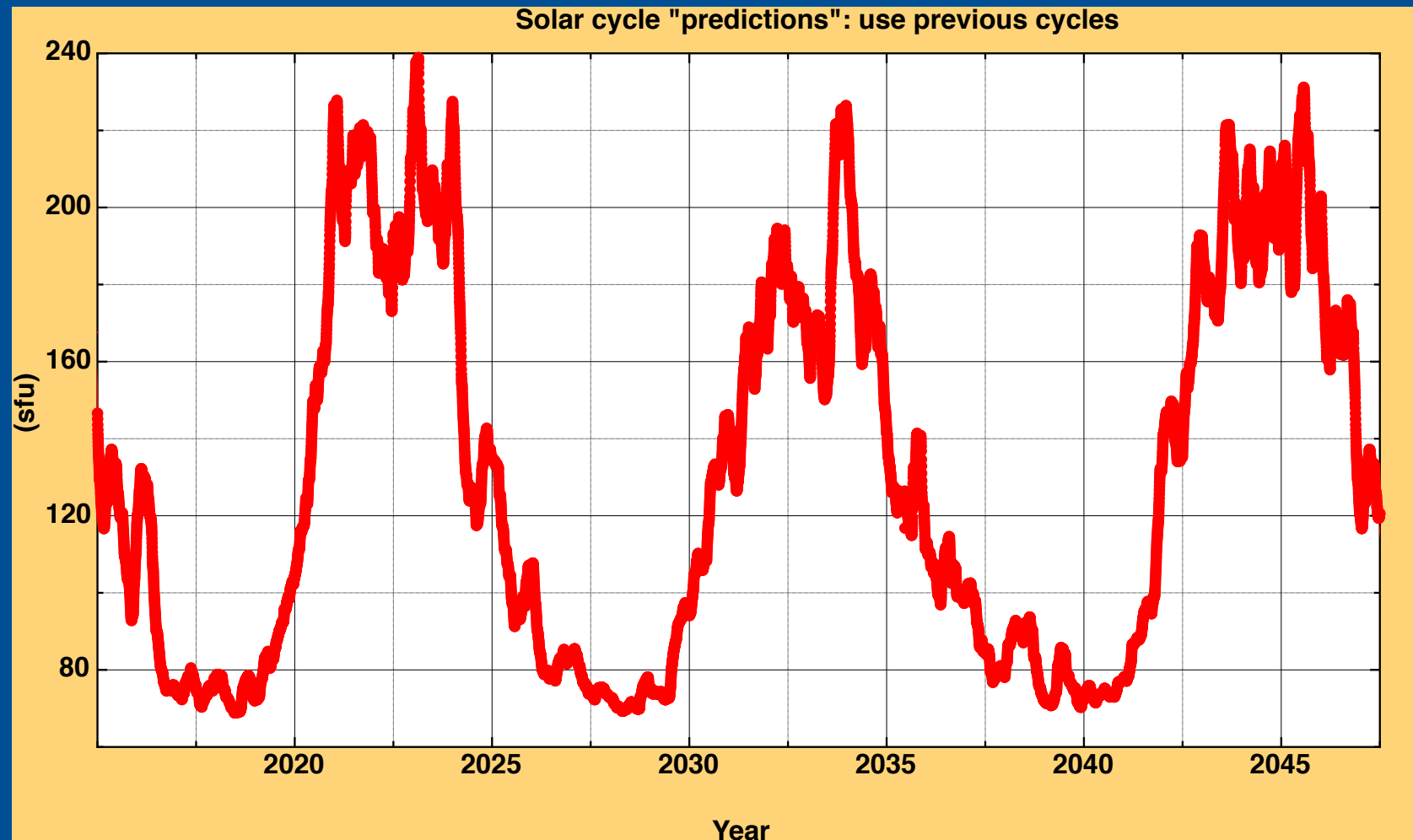
Calcul d'orbite : freinage

Effet de freinage : analyse de mission (estimation de durée de vie)



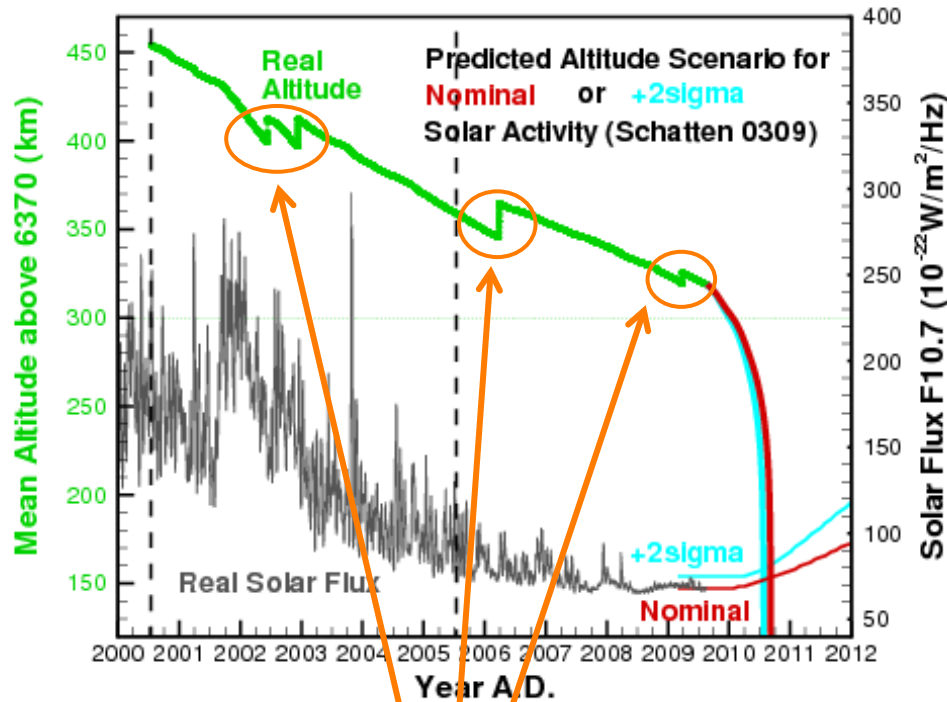
Calcul d'orbite : freinage

Effet de freinage : analyse de mission (estimation de durée de vie)
Le calcul nécessite des prédictions d'activité solaire



Calcul d'orbite : freinage

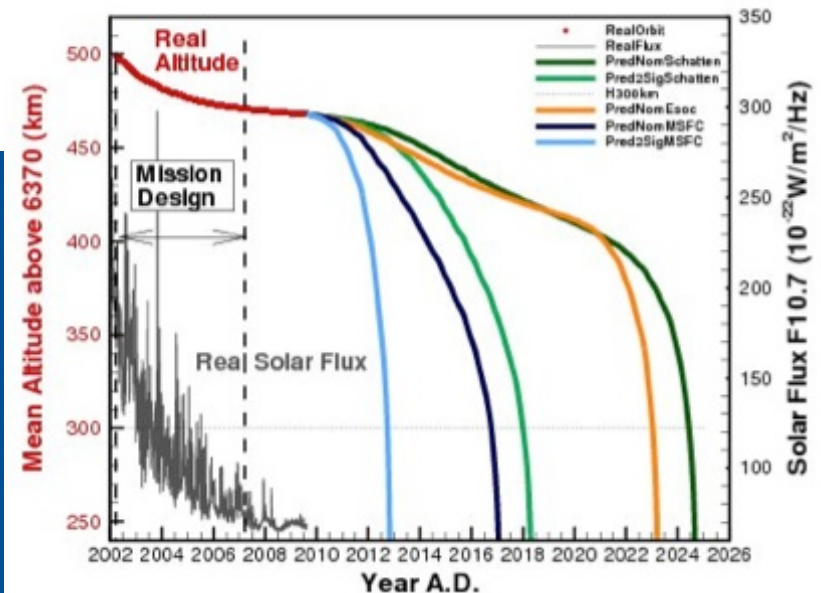
CHAMP Orbit Decay Prediction (24-Aug-2009)



Prédiction de la durée de vie, ici seulement en fonction des prédictions de l'activité solaire (il y a des paramètres technique aussi)

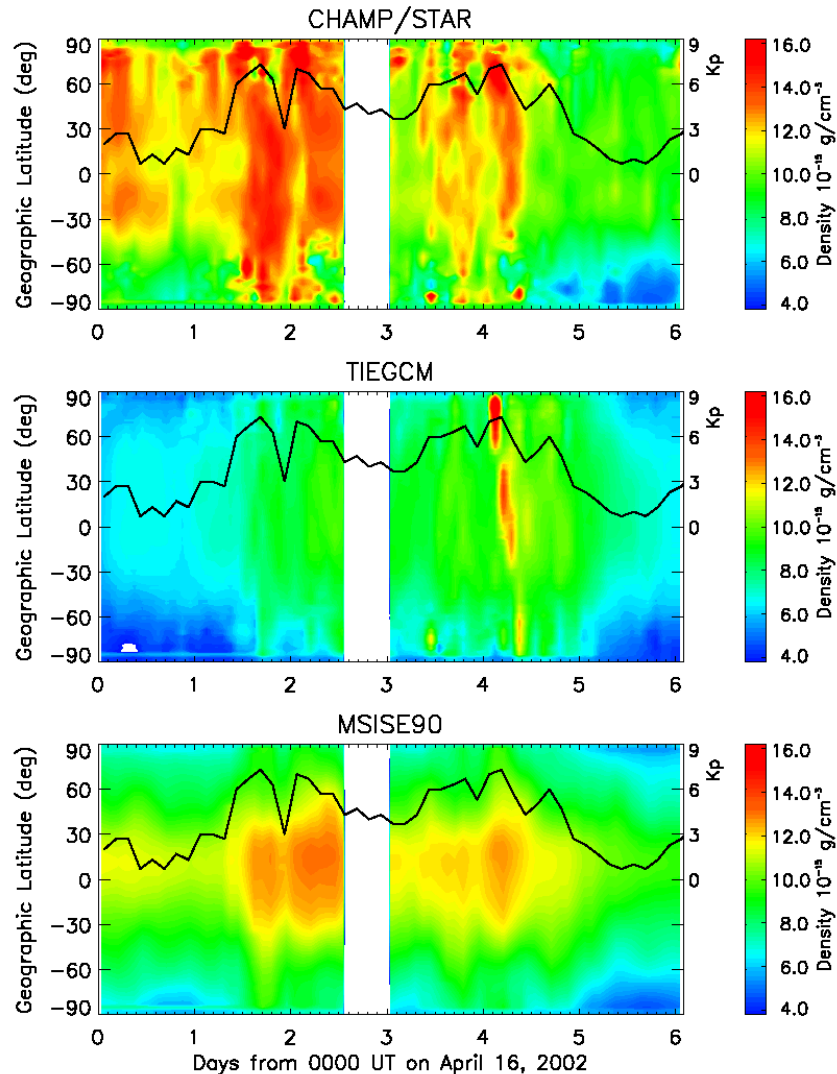
L'orbite de CHAMP a été montée 4 fois afin de prolonger la mission

GRACE-1 Decay Scenario (20-Aug-2009)

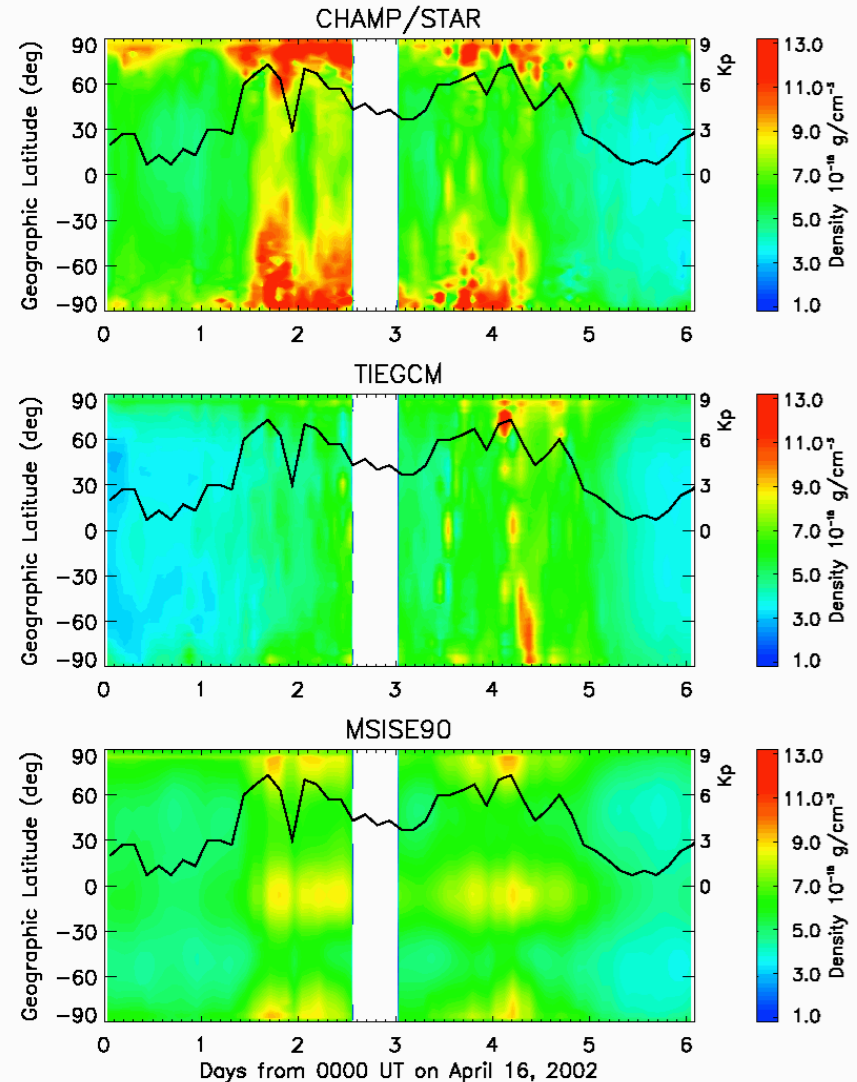


Résolution modèle (beaucoup) plus faible que les observations

Total Mass Densities at 410 Km, Dayside: $\overline{LST}=15:44$



Total Mass Densities at 410 Km, Nightside: $\overline{LST}=04:36$



Les variations ci-dessous sont modélisées

périodiques

diurne

semi-diurne

ter-diurne

annuelle

semi-annuelle

(& couplées avec activité solaire)

non-périodiques

latitude (zonal)

activité solaire*

activité géomagnétique **

* Tests avec Hell, F10.7 et F30

** kp (3-h et moyenne 24 hr)

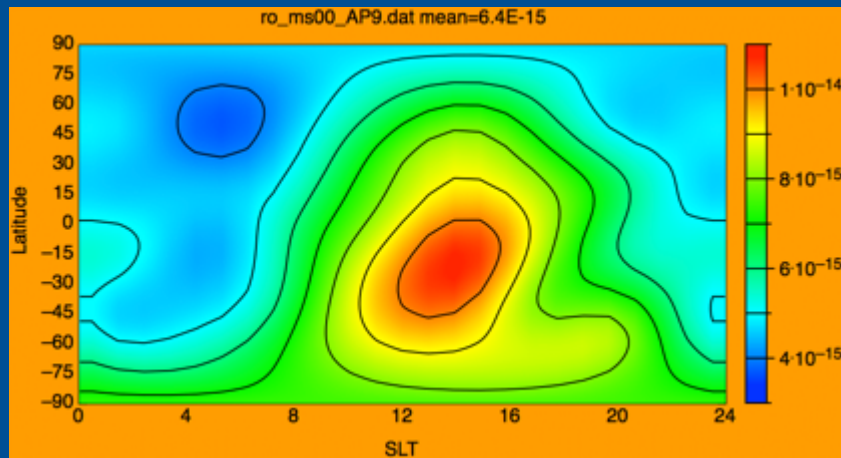
Modèles empiriques:

Calcul rapide, facile, précision (10-20%, 1σ)

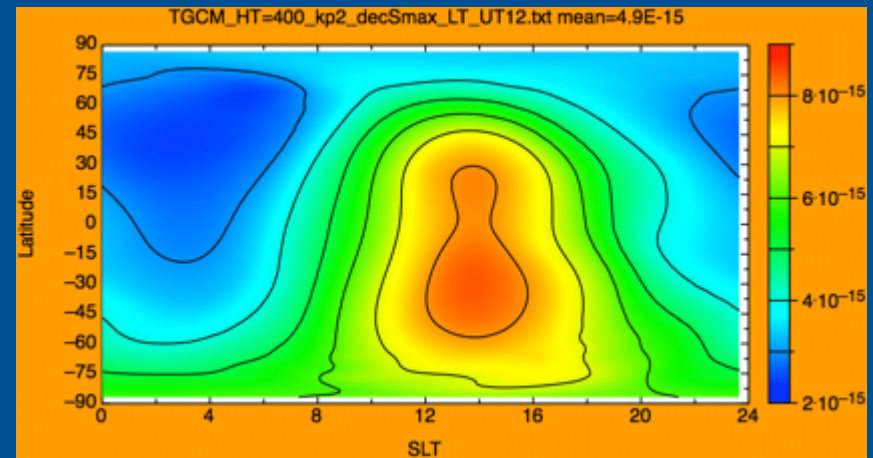
Faible résolution, réponse statique, proxies, pb échelle/biais,....

Comparaison des modèles - exemple

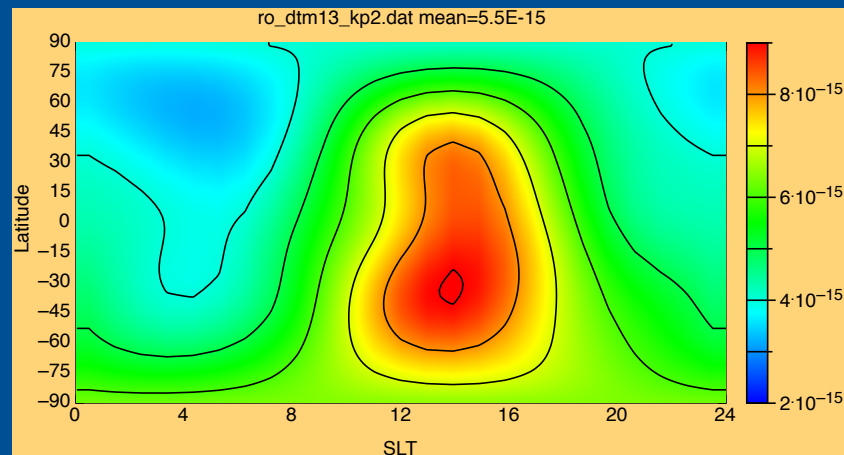
NRLMSIS00



TGCM



DTM2013

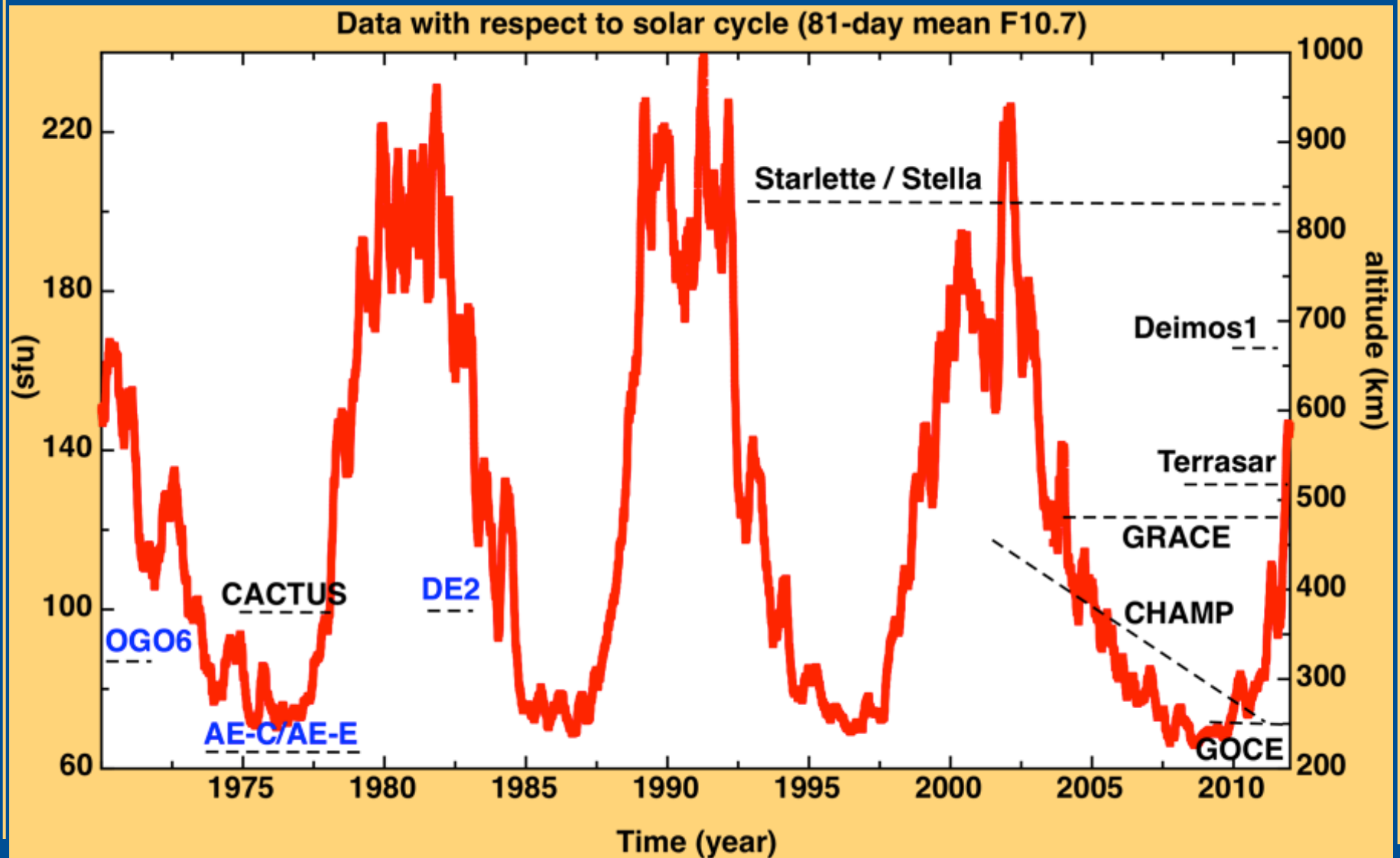


Différences :

- Amplitude
- Phase diurne
- Structure en latitude

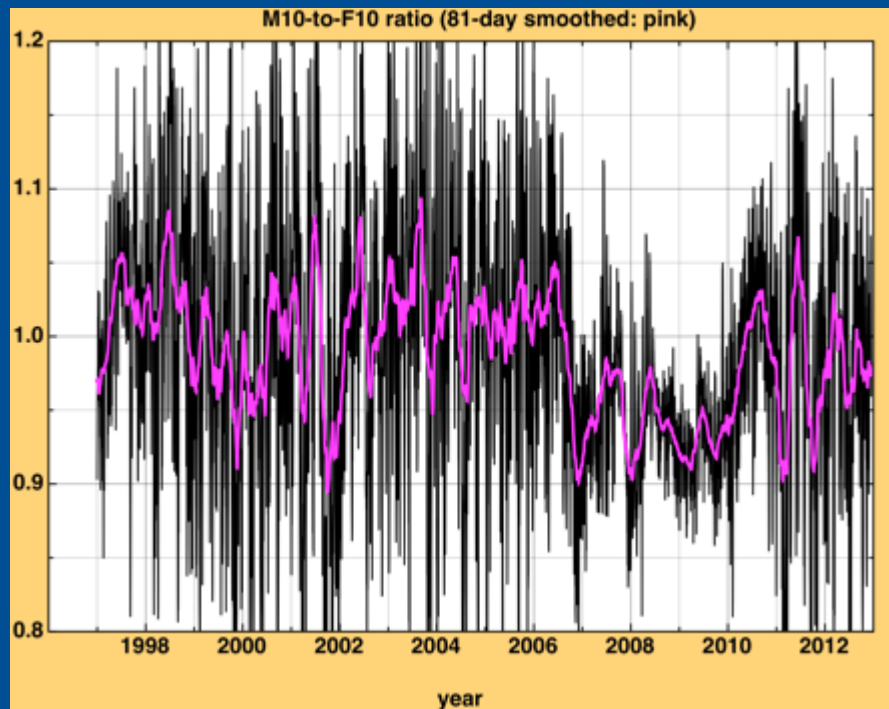
(altitude 400 km, 21 décembre, F=180, Kp=2)

Les observations disponibles en fonction de F10.7 (cycle solaire)



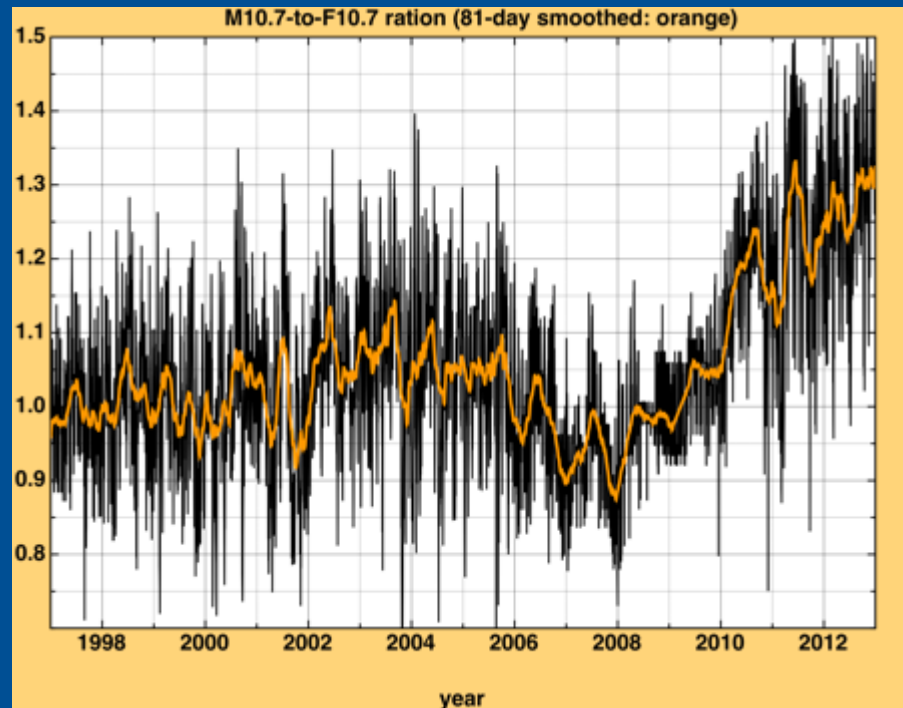
Quel proxy représente l'effet de l'activité solaire au mieux ?
Etudes de corrélation, modélisation : F10.7, MgII, Hell, F30

Erreurs dans le proxy ↔ Erreurs dans le modèle



**Exemple : MgII composite
JB2008**

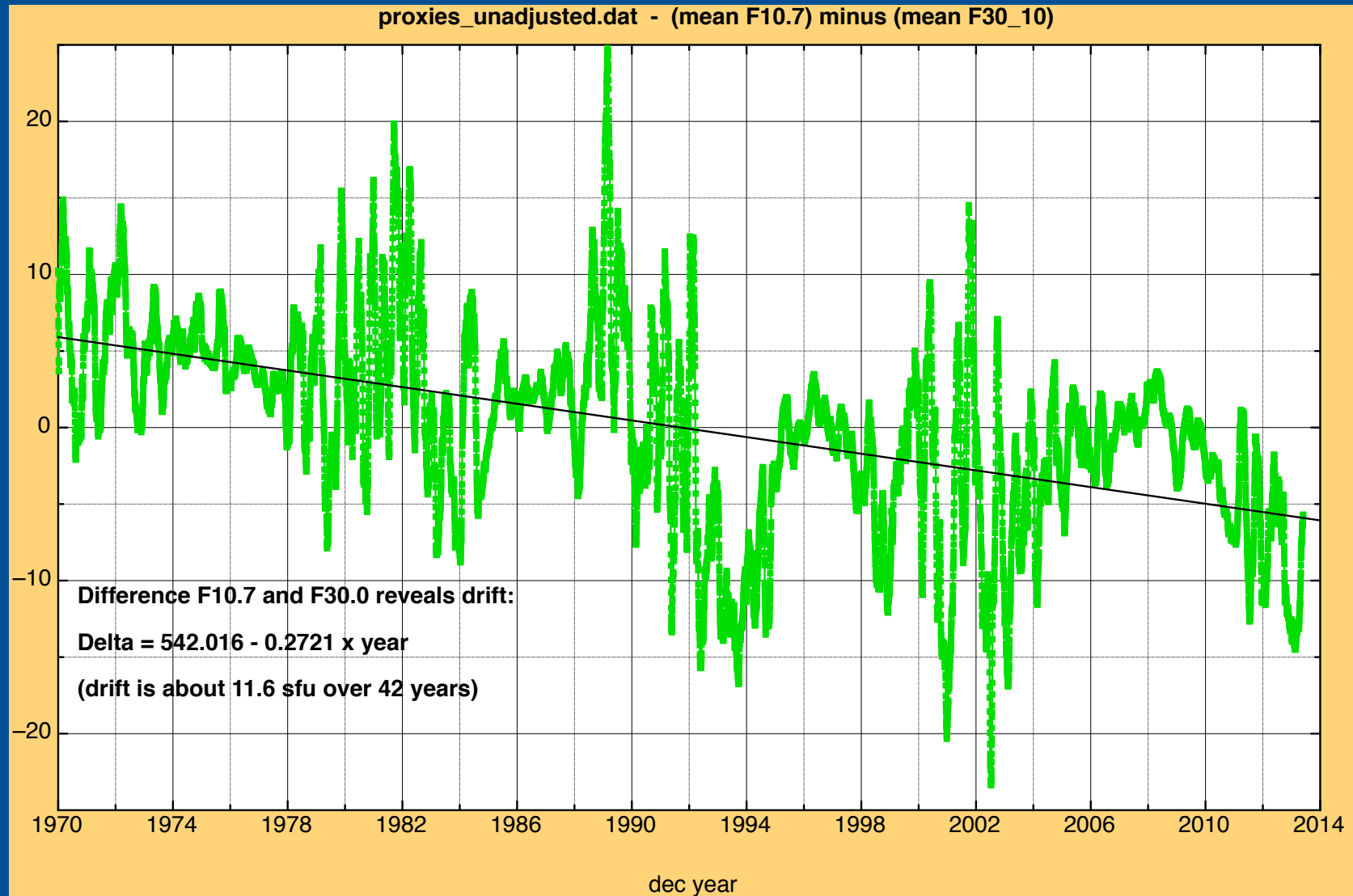
LASP



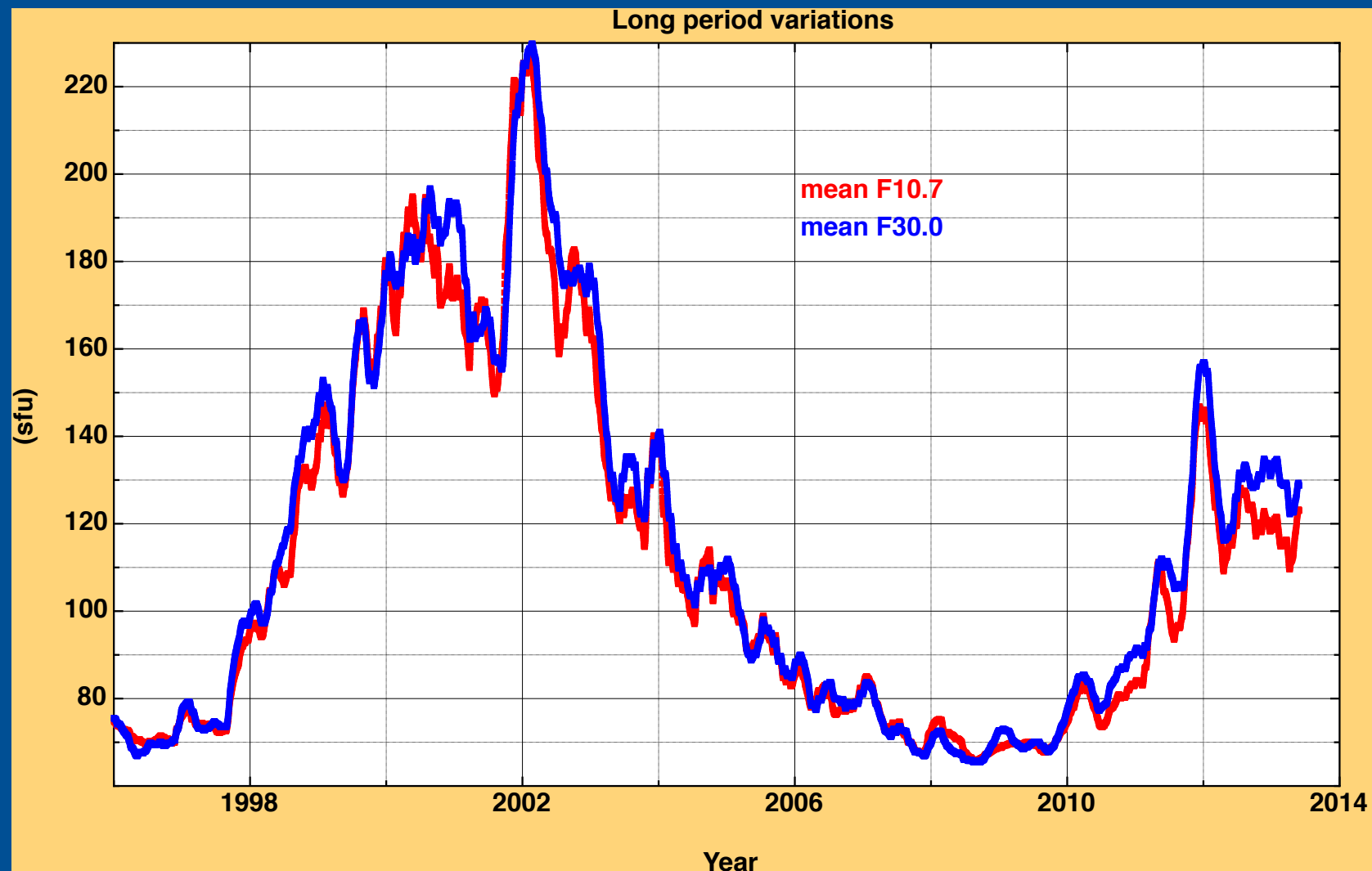
Données pour la modélisation – proxies

Dérive dans F10.7, F30, les deux ?

Erreurs dans le proxy $\longleftrightarrow$ Erreurs dans le modèle

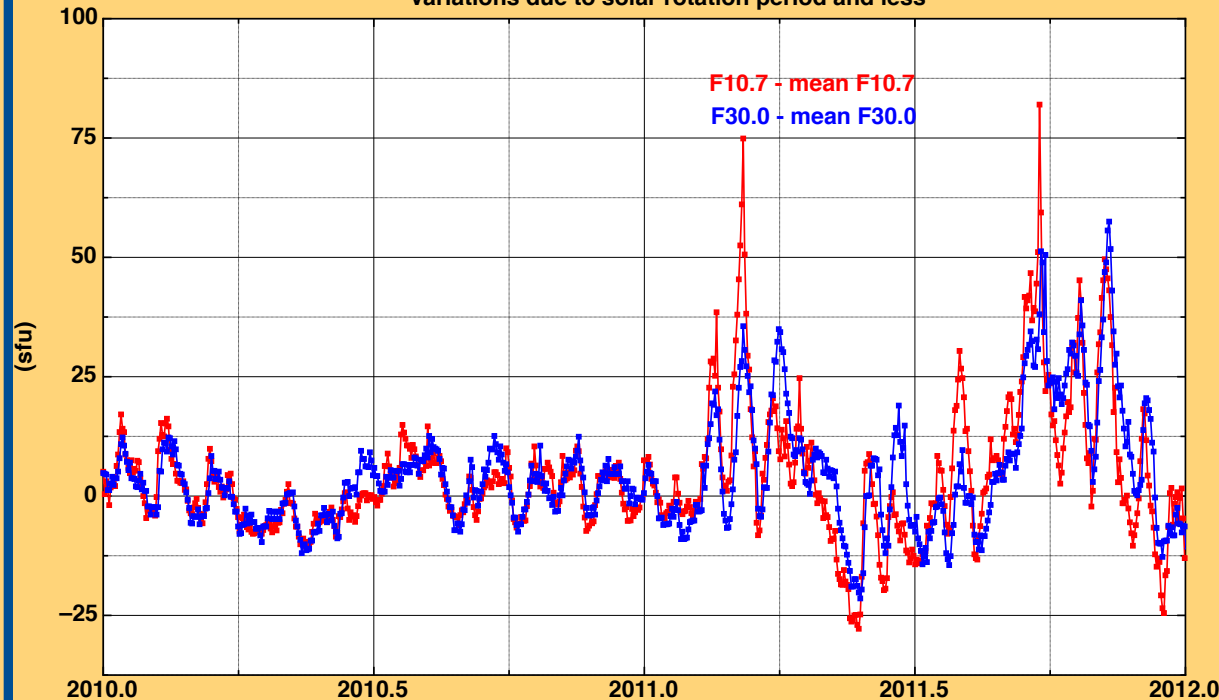


Différences entre F10.7 et F30 (moyennées sur 81 jours)



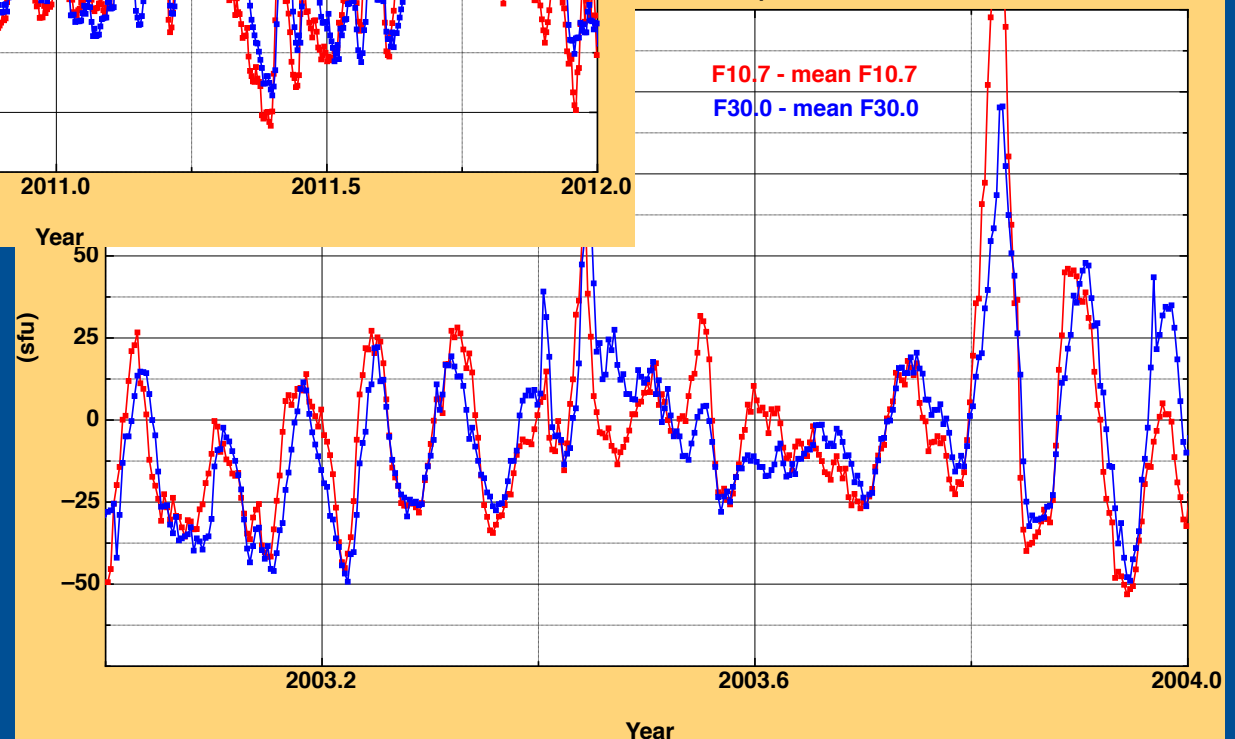
Données pour la modélisation – proxies

Variations due to solar rotation period and less

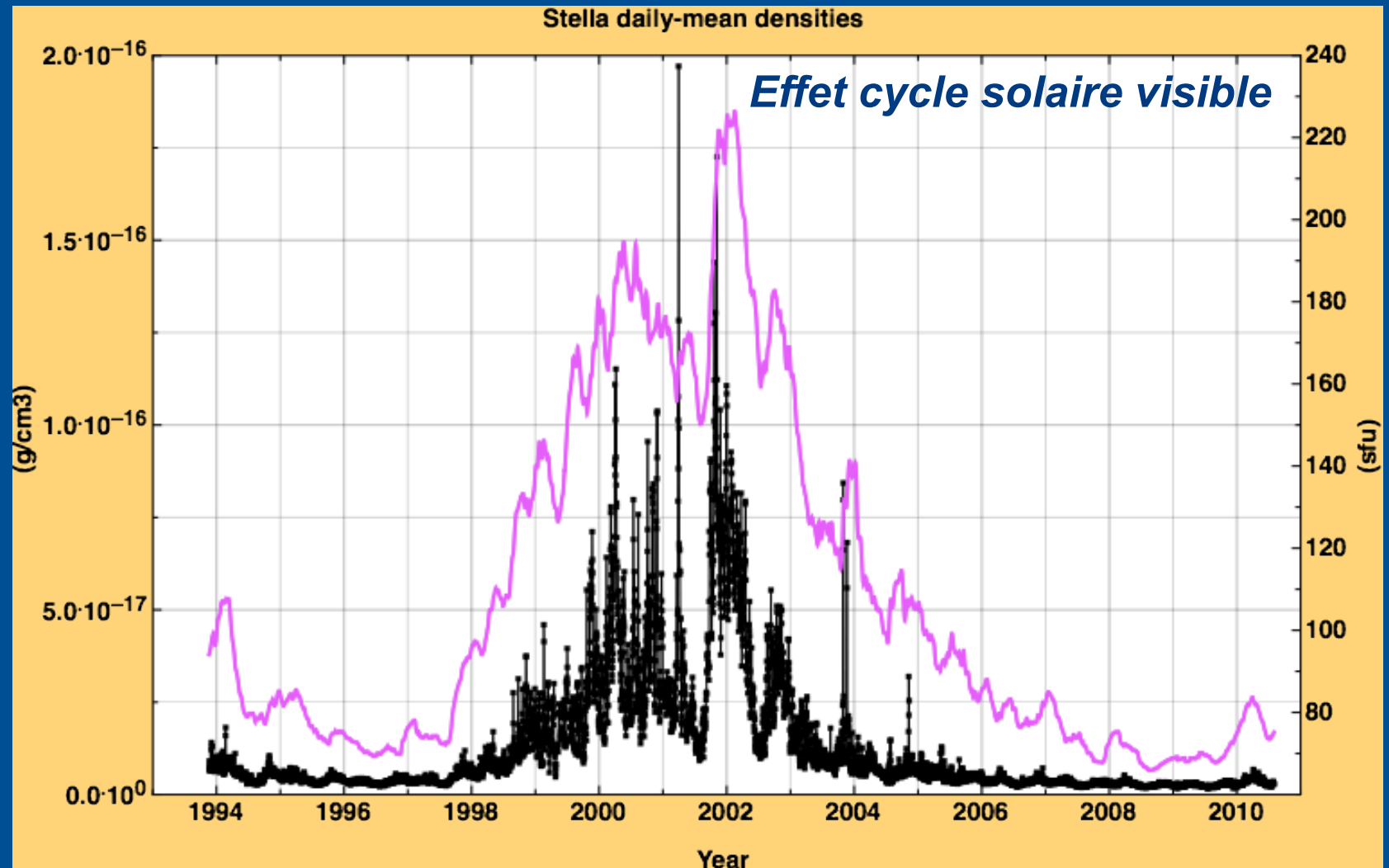


Les variations à 27 jours ;
Différences entre
F10.7 et F30

ar rotation period and less

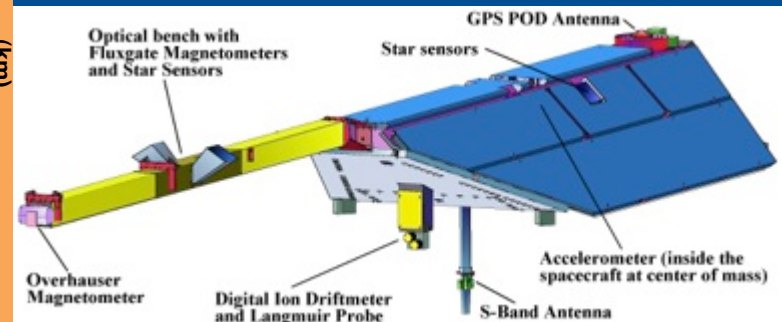
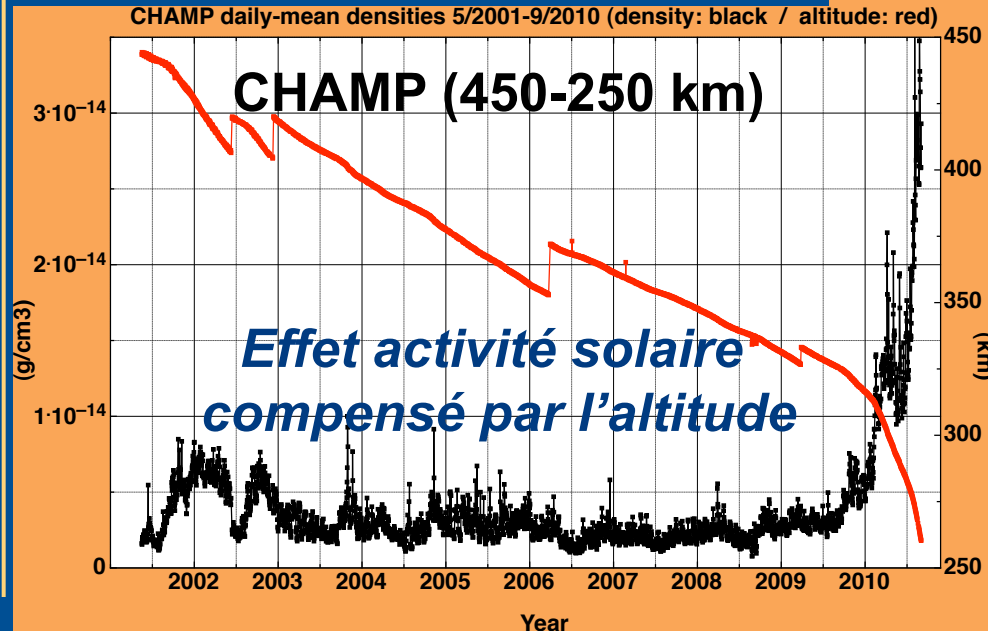
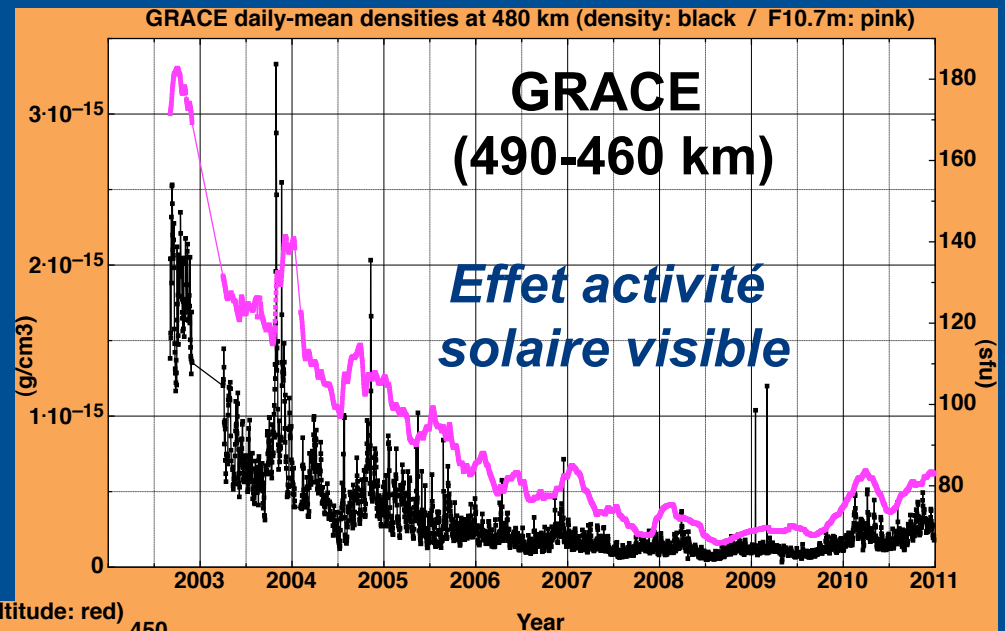


Observations : densités moyennes



Densités déduites des accéléromètres de CHAMP et GRACE

(160/80 km résolution le long de la trace)

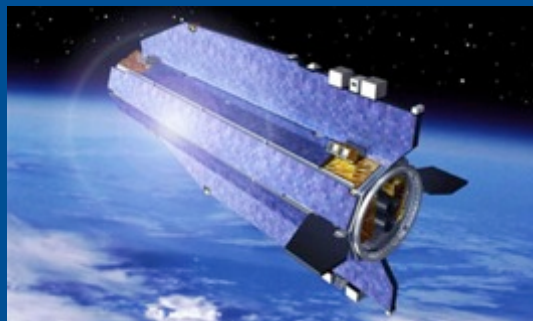
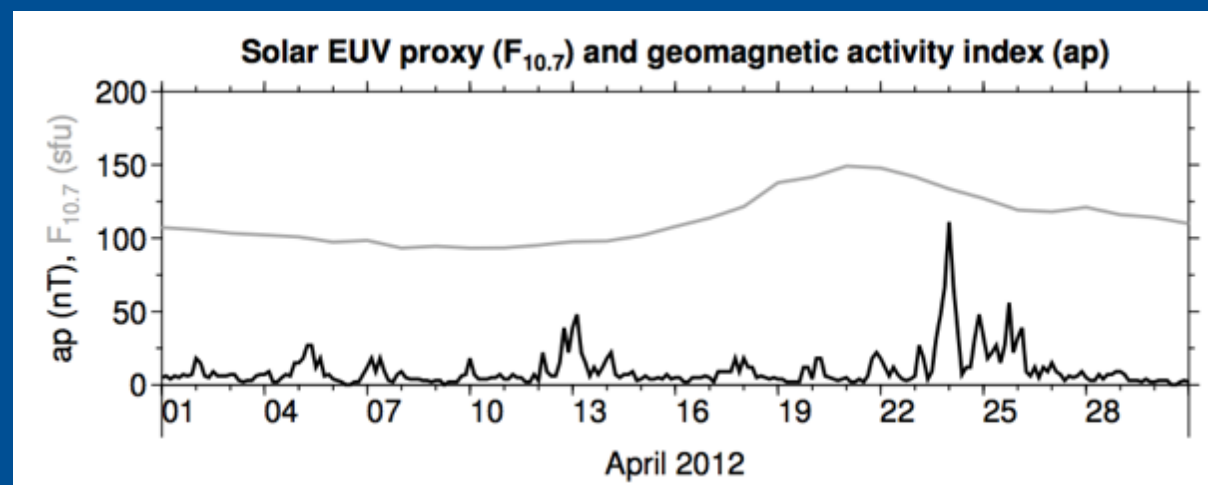
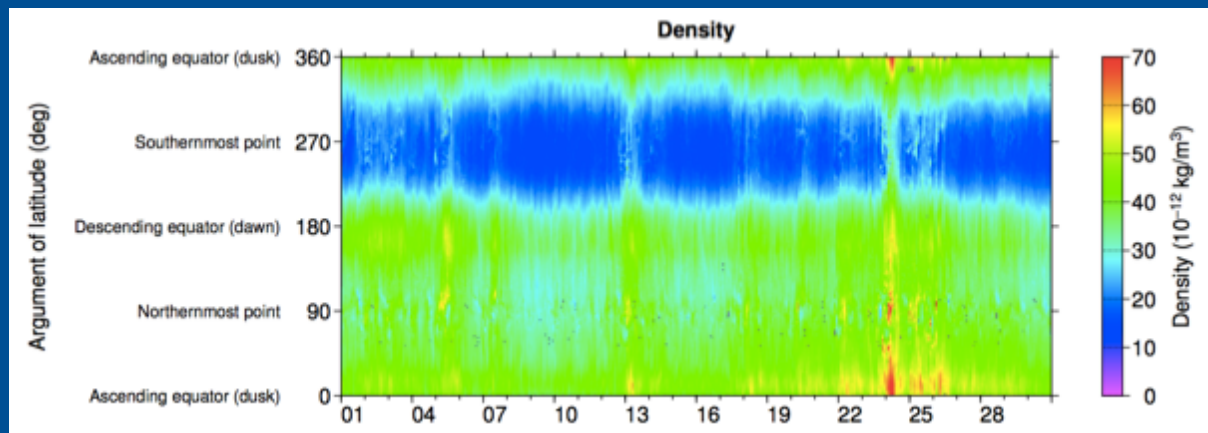


GOCE: ESA's first Earth Explorer

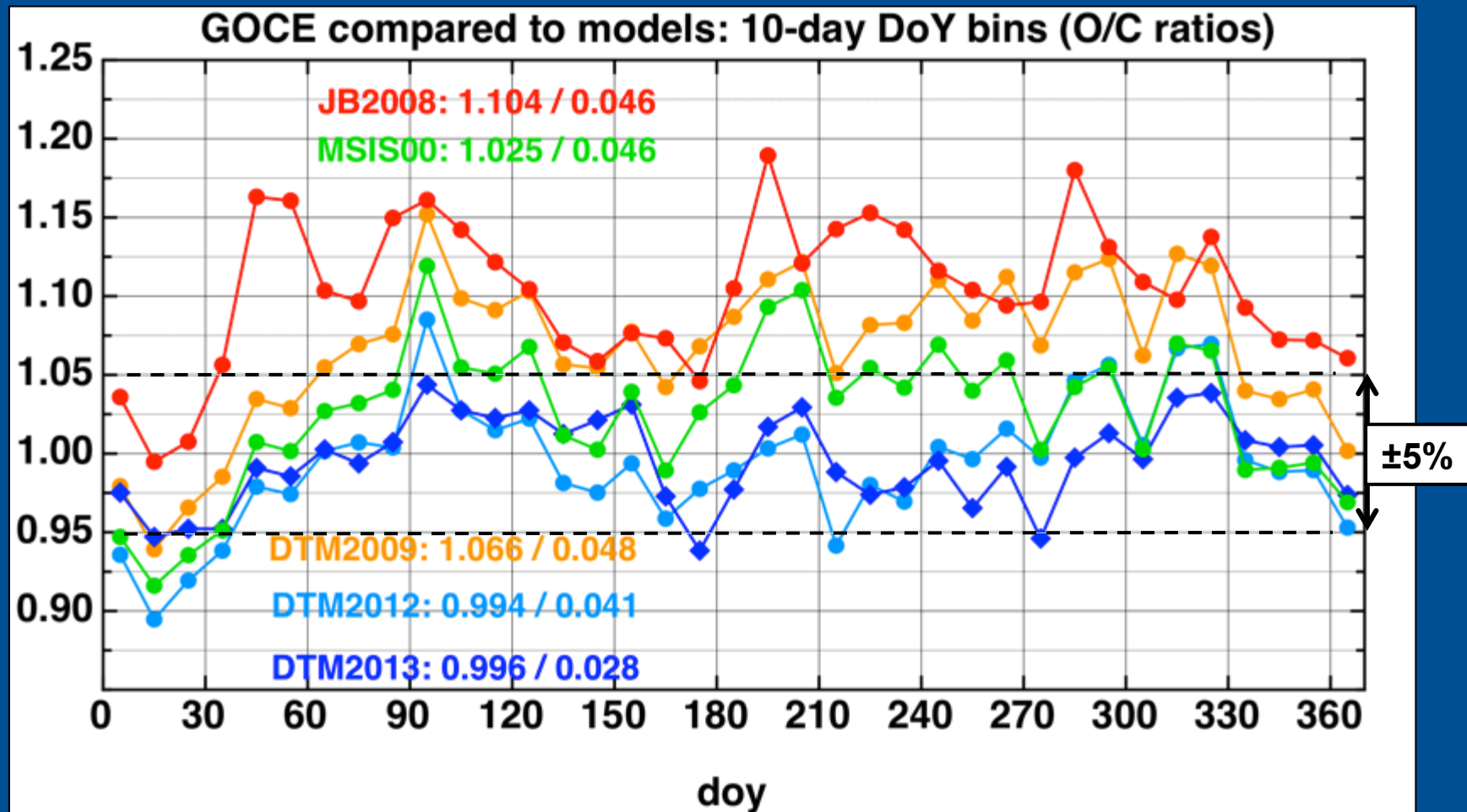
Lancement: 17 mars 2009 (Plesetsk), rentré 11 Novembre 2013

Altitude : 255 km / inclinaison 96.5°

**Densités déduites
des accéléromètres
et la poussée
(avril 2011)**

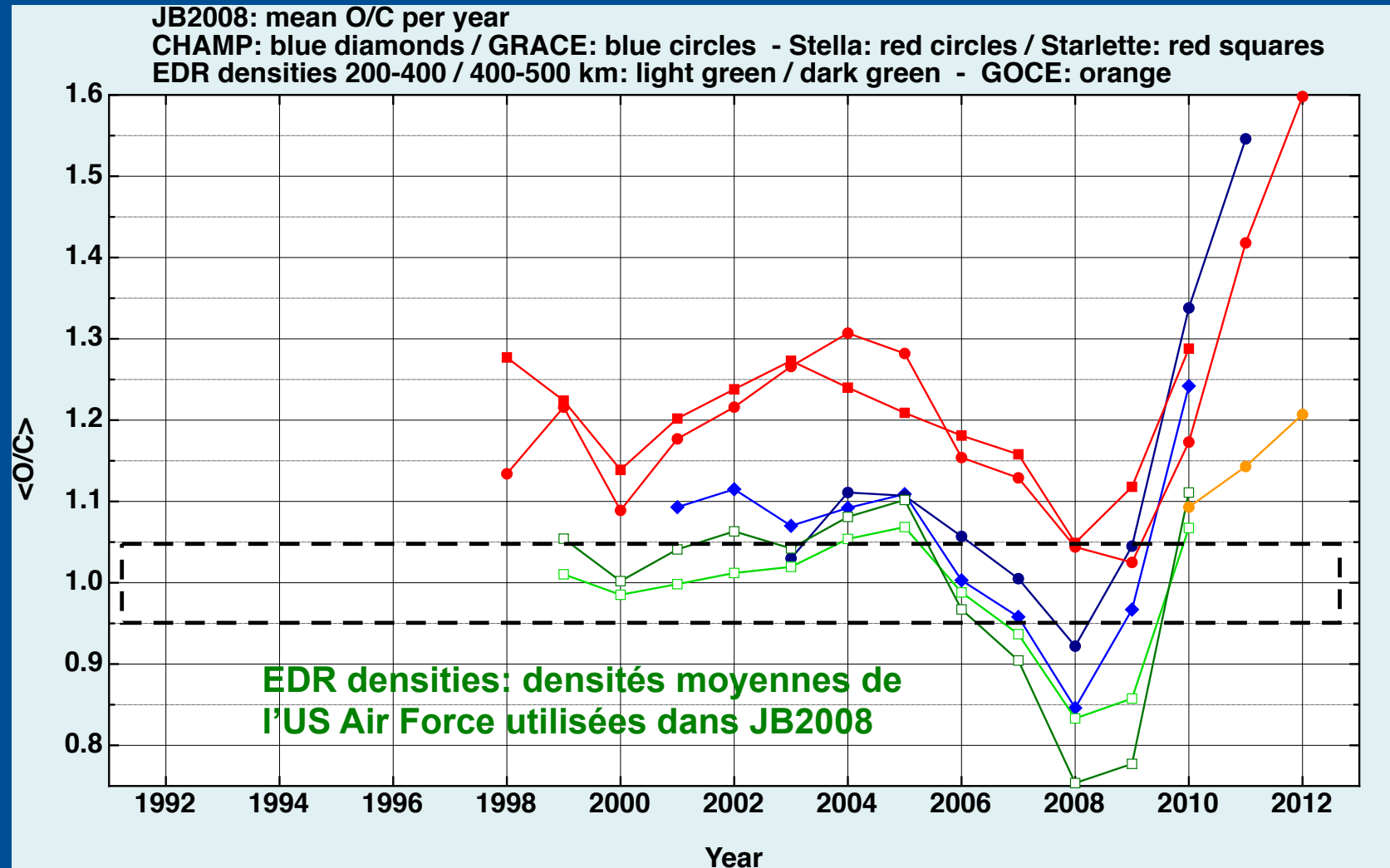


Binning data per 10 days-of-year: errors in the seasonal modeling

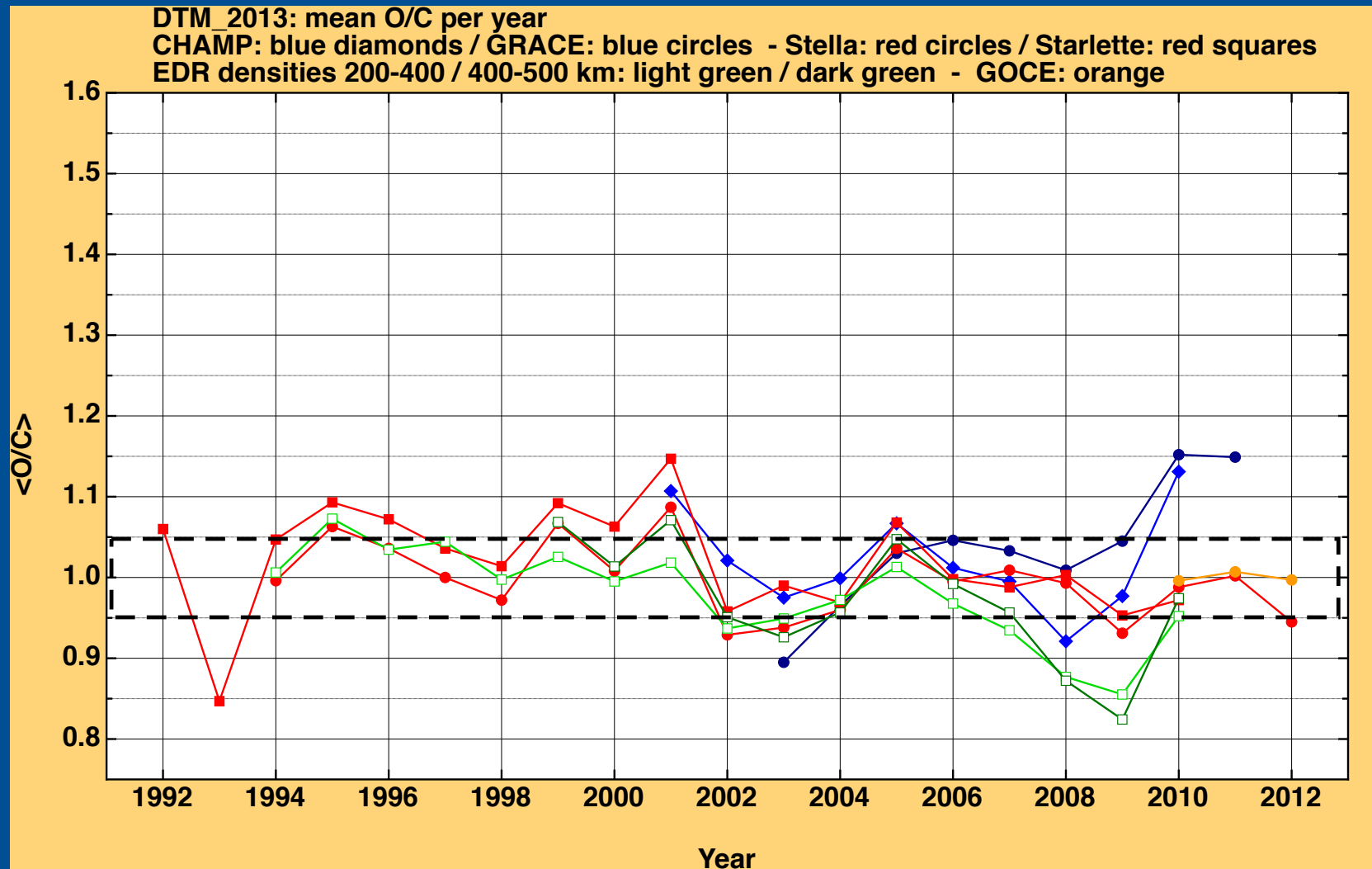


$O/C = \text{densité observée} / \text{densité modèle} \longrightarrow \text{biais} = O/C - 1$

Evaluation des modèles : JB2008



Evaluation des modèles : DTM2013



- **Le calcul du freinage atmosphérique nécessite :**
 - ✓ **modèle du satellite**
 - ✓ **modèle de la thermosphère**
 - ✓ **modèle de l'interaction satellite – atmosphère**
 - ✓ **des indices solaires et géomagnétiques (observés et *prédits*)**
 - ✓ **position et vitesse du satellite**
- **Les calculs d'estimation de durée de vie ne sont pas précis à cause des prédictions de l'activité solaire**
- **les modèles de thermosphère ont des précisions de l'ordre de 10-15%, *mais un biais systématique (modèle C_d)***

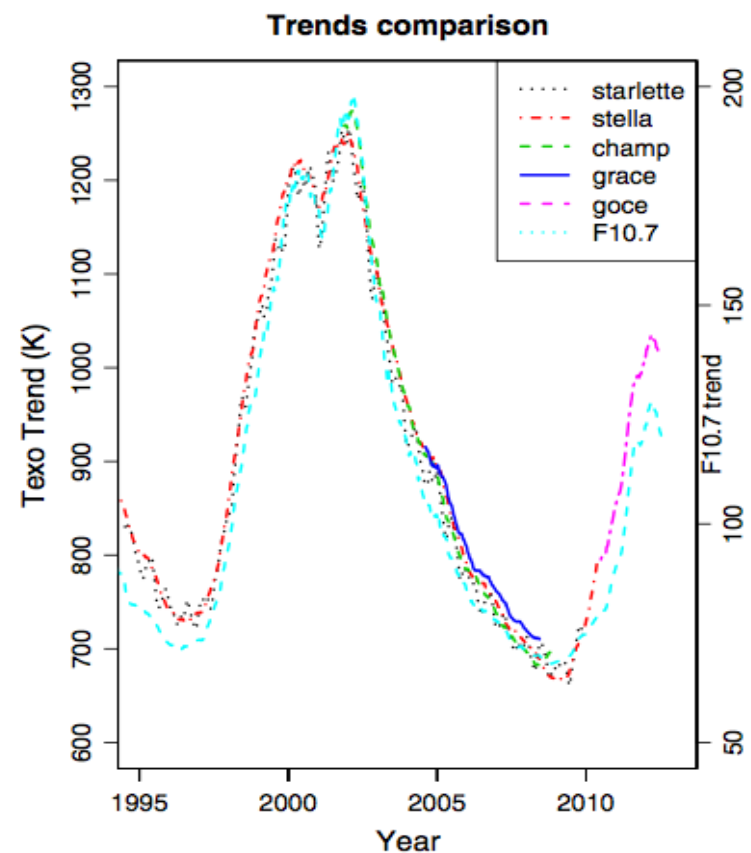
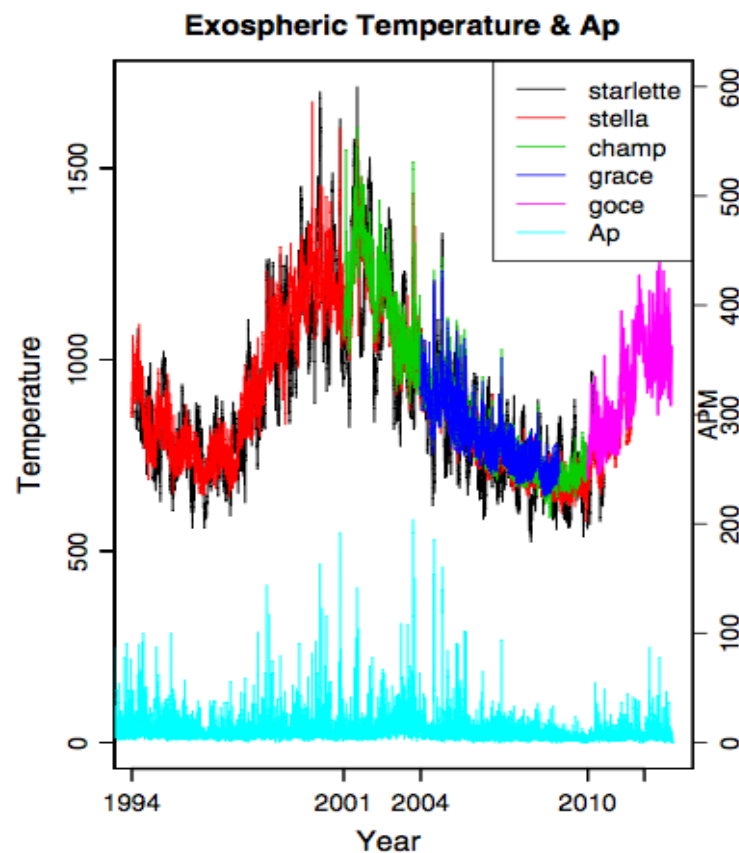
Le modèle DTM_nrt

Corriger le biais du modèle de densité en temps réel :

1. Ajustement d'orbite
2. Calculer une correction de la température exosphérique modélisée
3. Appliquer la correction dans le modèle de thermosphère

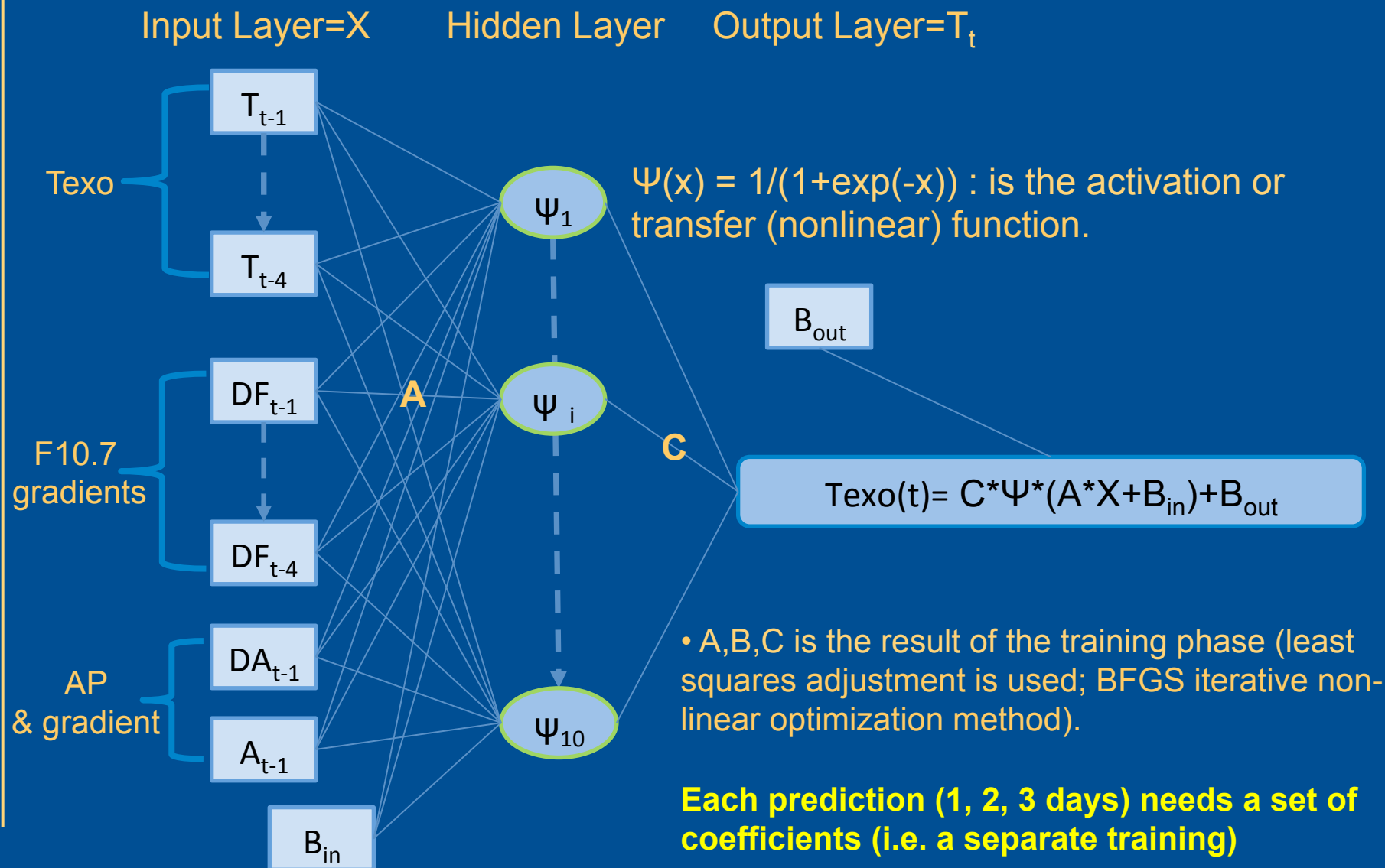
Data: exospheric temperatures

	Altitude (km)	eccentricity	inclination	Time frame
GOCE	270	0.002	97°	1/2010 – 12/2012
CHAMP	450 – 350	0.001	87°	5/2001 – 12/2009
GRACE	490 – 460	0.002	89°	4/2003 – 12/2009
<i>Starlette</i>	<i>815</i>	<i>0.021</i>	<i>50°</i>	<i>1/1994 – 12/2009</i>
Stella	800	0.001	99°	1/1994 – 12/2009



Forecast models: neural network

- Number of neurons for input layers results from ARIMAX analysis.
- Number of hidden layers comes from the tuning phase.



Different satellites:

Comparison of 24 h predictions (RMS error in K) using naive approach, the DTM2009 model with perfect proxies, and artificial neural network (ANN) with the validation data.

	CHAMP	GRACE	Starlette	Stella
Naive	24.9	22.3	22.4	24.1
DTM2009	29.2	18.4	40.8	26.1
ANN	17.9	13.3	18.0	15.9

Note that Starlette gives good results whereas it is not included in the training base (it has a different behavior due to its eccentricity and inclination).

**Training:
Stella 1994-2007**

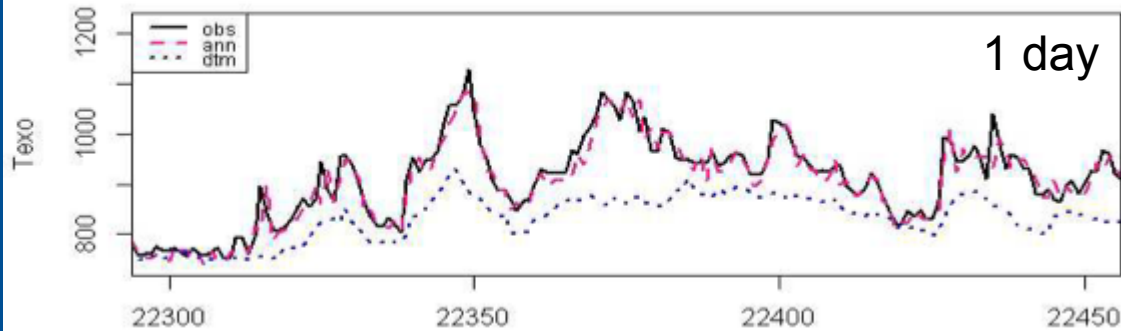
Different periods: GOCE, which is far from the training period

Comparison of 24 h predictions (RMS error in K) using DTM2009 and DTM2012 models with observed proxies, and artificial neural network (ANN).

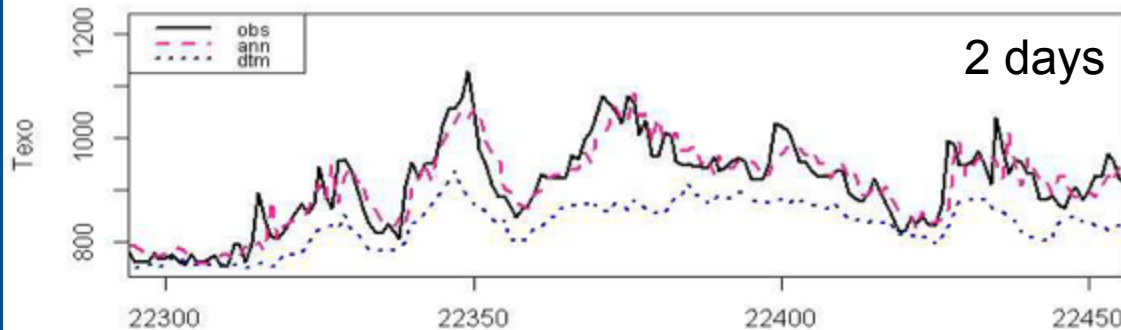
	GOCE 2010	GOCE 2011	GOCE 2012
DTM2009	71.5	92.3	88.9
DTM2012	37.2	48.5	42.1
ANN	21.6	26.6	27.3

Results – 24, 48, 72h forecasts

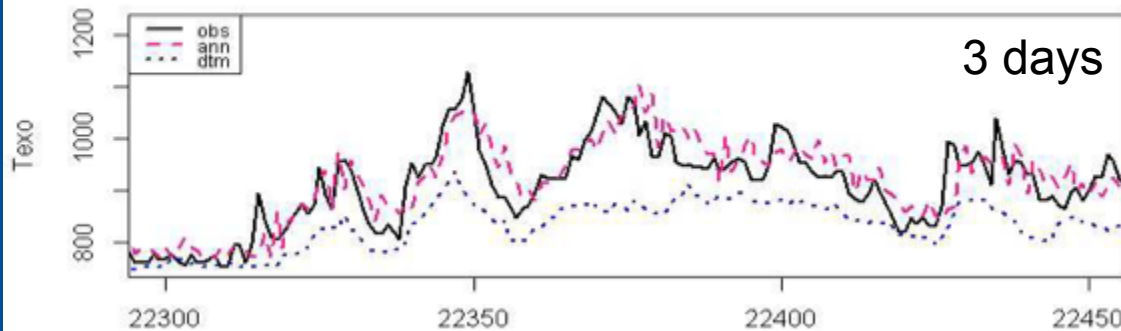
1 day forecasts with ANN on GOCE 2011 - trained on Stella



2 days forecasts with ANN on GOCE 2011 - trained on Stella



3 days forecasts with ANN on GOCE 2011 - trained on Stella



Differences & delays
get bigger

However,
the predictions
are closer
to the observations
than DTM2009

**Note that the training
phase was done with Stella
(1994-2007).**