

Utilisation des observations satellitaires en prévision numérique de temps opérationnelle

Jean-François Mahfouf
Météo-France/CNRS
CNRM-GAME
Toulouse

Atelier Trattoria 2015



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

Objectifs

- Expliquer l'importance des mesures de télédétection spatiale pour la prévision numérique du temps
- Expliquer comment ces mesures sont utilisées opérationnellement et les contraintes imposées aux codes de transfert radiatif dans ce contexte
- Illustrer les bénéfices des comparaisons entre les mesures spatiales et leur équivalent « modèle »
- Proposer une revue des besoins concernant l'évolution des codes de transfert radiatif pour :
 - Mieux utiliser les observations déjà disponibles
 - Préparer l'utilisation des nouveaux instruments

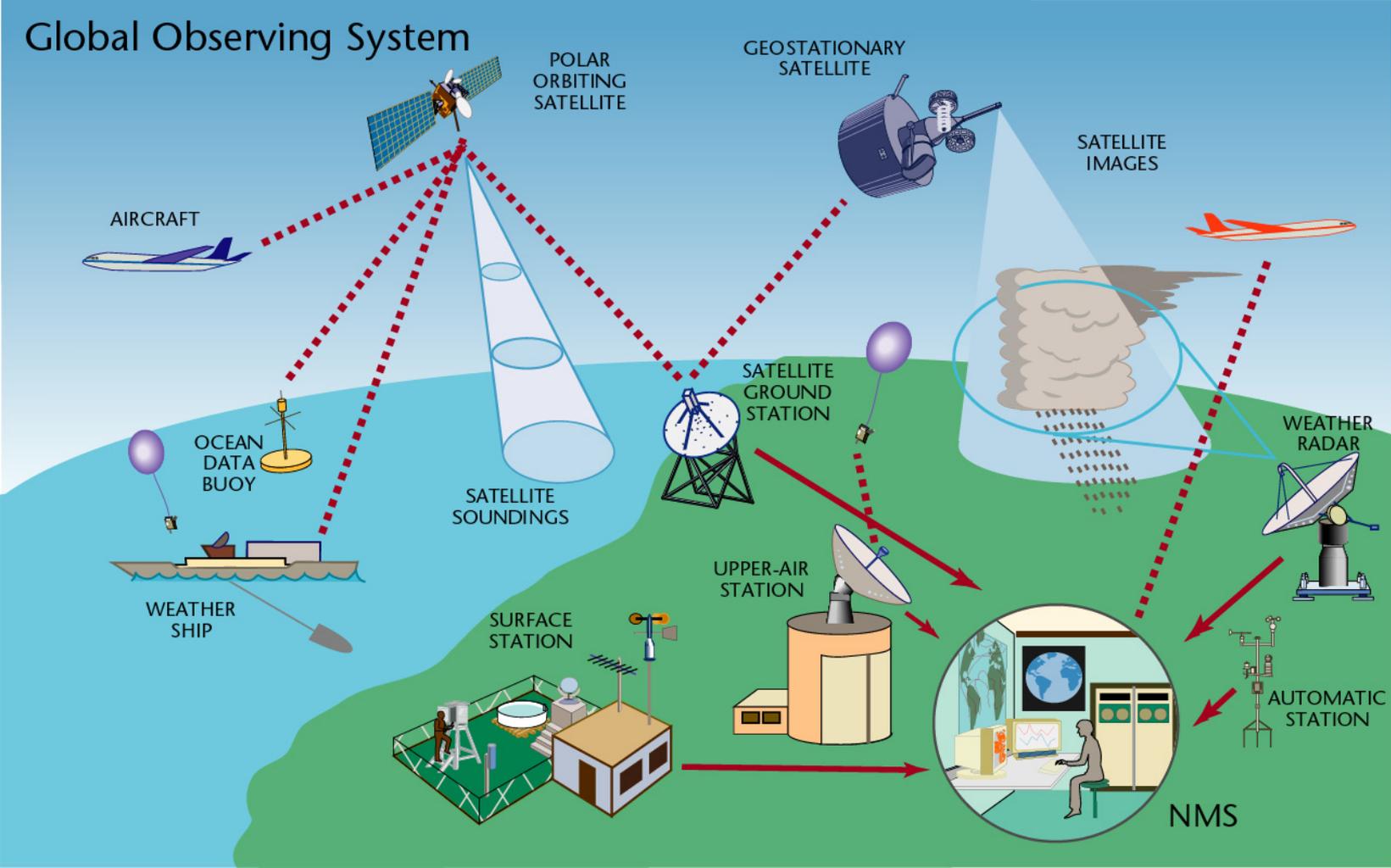
Plan de l'exposé

- La prévision numérique du temps
- Les systèmes d'assimilation de données
- Les observations satellitaires et la modélisation du transfert radiatif (avec RTTOV)
- Quelques illustrations dans un contexte opérationnel
- Les évolutions attendues des codes de transfert radiatif

Remarques initiales

- En prévision numérique, les observations servent à produire un état de l'atmosphère (le plus précis possible) comme *condition initiale* des modèles en vue de fournir une prévision (la plus précise possible)
- Assimilation de données : combinaison optimale (statistique) entre les observations et une prévision à courte échéance (ébauche)
- Optimalité => connaissance des erreurs aléatoires et systématiques (biais)
- Importance des contrôles de qualité et de la capacité du modèle à simuler l'observation (opérateur d'observation) => savoir rejeter les observations « inutiles »
- Variables atmosphériques d'intérêt : le champ de masse (Ps), de température (T), de vent (U,V) et de vapeur d'eau (q,RH)
- A l'avenir intérêt pour les autres phases de l'eau (nuages, pluie, eau du sol) et les constituants mineurs (CO₂, O₃,...)

Le système global d'observations

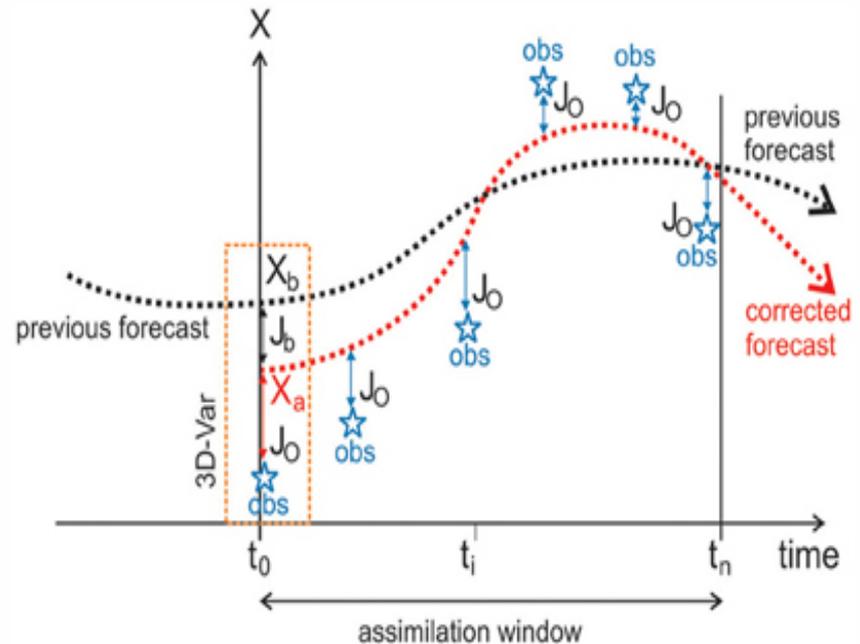


L'assimilation variationnelle de données

Formalisme mathématique : fonction coût à minimiser

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}[y - H(x)]^T R^{-1}[y - H(x)]$$

- x = état à analyser (température, composantes du vent, pression de surface, contenu en vapeur d'eau)
- x_b = ébauche (prévision courte échéance)
- y = observations disponibles
- H = opérateur d'observations
- B = matrice de covariances d'erreurs de l'ébauche
- R = matrice de covariances d'erreurs d'observations



Contraintes sur les observations pour l'assimilation

- Le modèle doit être capable de simuler assez précisément l'observation : observation trop loin du modèle => problème avec l'observation ou le modèle
- Les observations doivent être suffisamment précises et suffisamment nombreuses (dans le temps et/ou dans l'espace)
- Les observations doivent être complémentaires d'autres systèmes d'observation (mais la redondance reste utile)
- Les observations doivent être disponibles en temps quasi-réel (< 2h après la mesure)
- Les observations ne doivent pas être biaisées, ou doivent être débiaisées avant assimilation
- Les erreurs d'observations sont supposées décorréliées

Modélisation du transfert radiatif (1)

- Besoins de la prévision numérique du temps : code de transfert radiatif rapide, précis et flexible
 - Rapidité : des millions de radiances doivent être simulées pour réaliser une prévision numérique (coût)*
 - Précision : les erreurs de modélisation doivent être suffisamment faibles devant les erreurs de prévision
 - Flexibilité : le code doit pouvoir s'interfacer avec de nombreux modèles de PNT et pouvoir simuler une gamme importante d'instruments existants et s'adapter facilement aux instruments futurs
- Assimilation variationnelle de données : les versions linéarisées du code de transfert radiatif sont requises

* RTTOVSCAT : 500000 profils sur 60 niveaux pour 6 canaux du sondeur SAPHIR : 38 sec sur PC (Quad-core 3.1 GHz)

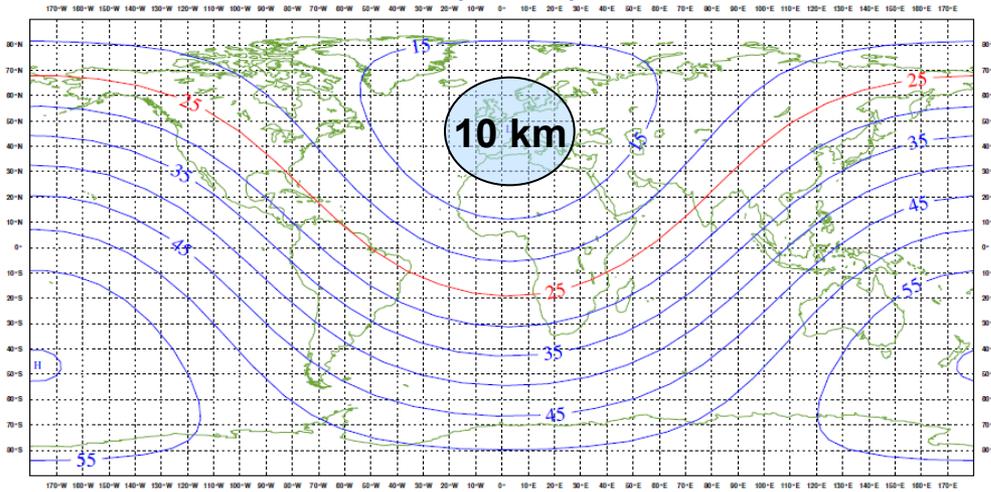
Modélisation du transfert radiatif (2)

- L'impact positif des données satellitaires dans les modèles de PNT s'est accru au cours du temps grâce à l'assimilation de quantités plus proches de la mesure (produits L2 -> radiances L1c -> radiances L1b)
- Améliorations dues à :
 - La capacité à ne pas assimiler les observations trop loin de l'équivalent « modèle » : données de mauvaise qualité ou incapacité du modèle à décrire certains processus
 - Une meilleure spécification des erreurs d'observations : instrument + transfert radiatif + représentativité
 - Une gestion dynamique des erreurs systématiques (cohérence avec les autres systèmes d'observations)

Les modèles opérationnels à Météo-France (1)

Modèle global ARPEGE

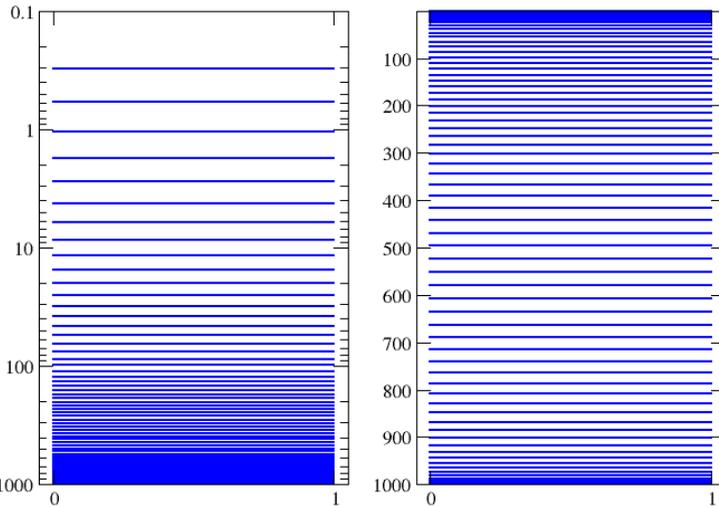
Résolution horizontale entre 10 et 60 km



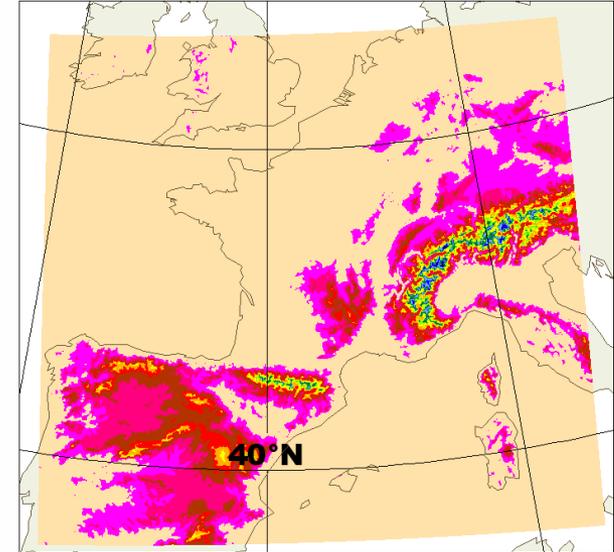
70 niveaux verticaux

logarithmic pressures

linear pressures



FC+102



0°

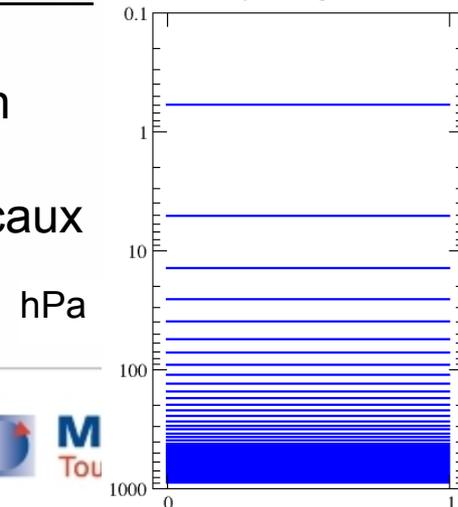
Modèle aire limitée

AROME

2.5 km résolution
horizontale

60 niveaux verticaux

logarithmic pressures



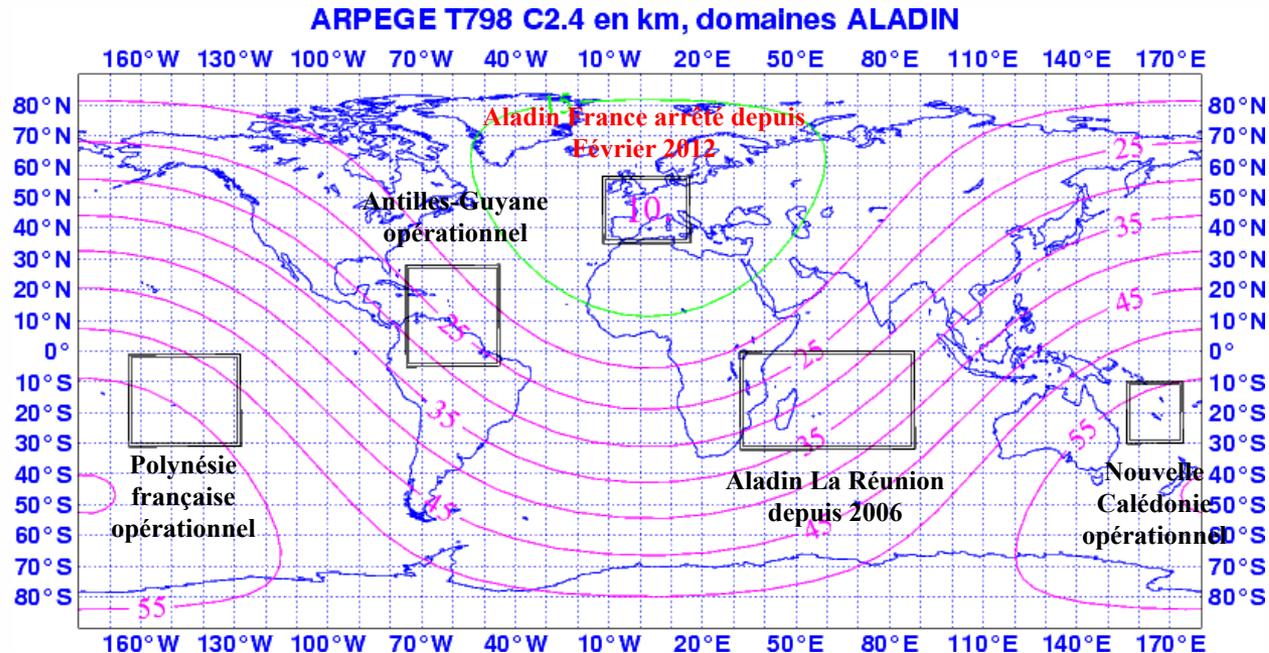
hPa

FC+30



Les modèles opérationnels à Météo-France (2)

- Modèles spectraux à aire limitée : ALADIN « Outre-mer »
- 70 niveaux - résolution horizontale 7.5 km
- Domaines opérationnels actuels :



Les systèmes d'assimilation

- **ARPEGE** : 4D-Var 6 heures (avec 7 fenêtres temporelles) + assimilation d'ensemble 4D-Var « basse résolution » (6 membres)
 - Observations : satellites (radiances MW + IR, vents, angle de réfraction GPS-RO) + conventionnelles (surface, radiosondages, profileurs, avions) + GPS-Sol
- **AROME** : 3D-Var 3 heures
 - Observations = observations ARPEGE - données GPS-RO + données RADAR (Z+Vr) + radiances brutes SEVIRI/MSG (5 canaux)
- **ALADIN-OM** : 3D-Var 6 heures
 - Observations = observations ARPEGE + données de bogus de vent pour les cyclones

Le code de transfert radiatif RTTOV (1)

- Code proposé par J. Eyre dans les années 90 au CEPMMT/ MetOffice en lien avec les développements autour de l'assimilation de données variationnelle, initialement pour les instruments HIRS et MSU (TOVS), puis étendu à une large gamme d'instruments (spectres MW et IR)
- Code rapide, précis et disposant des versions linéaire-tangente et adjointe
- Code communautaire développé et maintenu par le SAF NWP d'EUMETSAT (consortium européen : <https://nwpsaf.eu/>) avec des interactions fortes avec la communauté internationale au sein de l'international TOVS Working Group : <https://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/>

Le code de transfert radiatif RTTOV (2)

- Résolution de l'équation de transfert radiatif en atmosphère non diffusante, sans contribution solaire, en atmosphère claire plan parallèle (homogène horizontalement) et une surface spéculaire :

$$R_\nu(\mu) = \varepsilon_\nu(\mu)\tau_{tot}(\mu)B_\nu(T_s) + \int_{\tau_{tot}}^1 B_\nu(T)d\tau + [1 - \varepsilon_\nu(\mu)]\tau_{tot}^2(\mu) \int_{\tau_{tot}}^1 \frac{B_\nu(T)}{\tau^2} d\tau$$

- Code très rapide car les épaisseurs optiques δ pour les différents constituants atmosphériques sont calculées par des régressions linéaires multiples (K prédicteurs) – Développement en série de Taylor du rapport entre les transmittances de deux couches adjacentes (McMillin et Fleming, 1976) :

$$\delta_{abs,i,j} = \delta_{abs,i,j-1} + \sum_{k=1}^K a_{i,j,k} X_{i,k} \quad \tau(\mu) = \exp(-\delta/\mu)$$

Le code de transfert radiatif RTTOV (3)

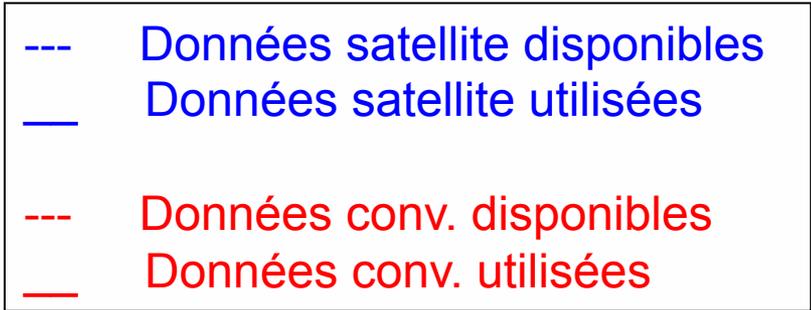
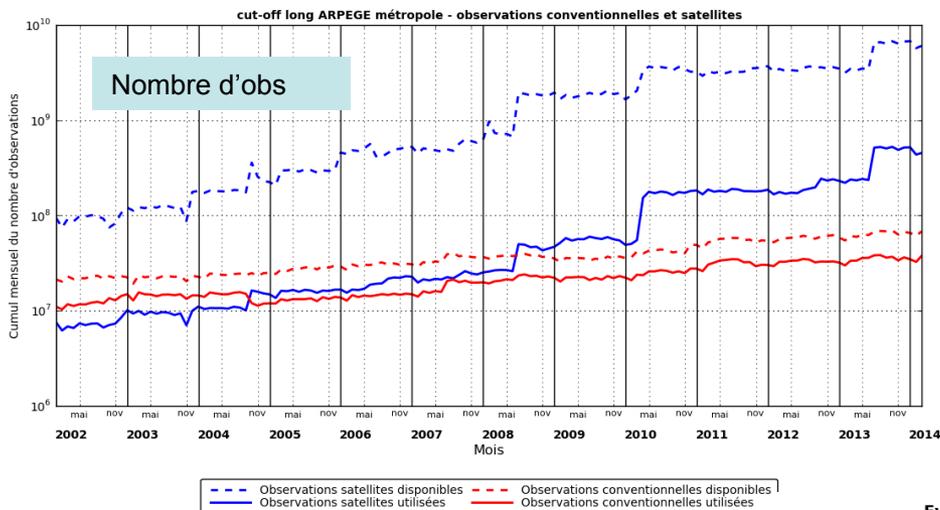
- Coefficients $a_{i,j,k}$ (43 / 51/ 54 niveaux) => base de profils atmosphériques (83 - CEPMMT) + bases de données spectroscopiques + transmittances d'un modèle « raie par raie » + réponse spectrale des instruments
- Validations « ciel clair » avec des modèles « raie par raie » :
 - Différences : 0.25 K pour les TBs IR et 0.1 K pour les TBs MW
 - Accord entre les modèles « raie par raie »: entre 0.05 et 0.15 K
- Validation avec des données in-situ (ARM site) : accord à 0.1 K entre les modèles mais différences d'environ 1 K avec AIRS
- Comparaisons des Jacobiens entre les modèles « raie par raie » et rapides : détection de problèmes liés aux interpolations verticales

Le code de transfert radiatif RTTOV (4)

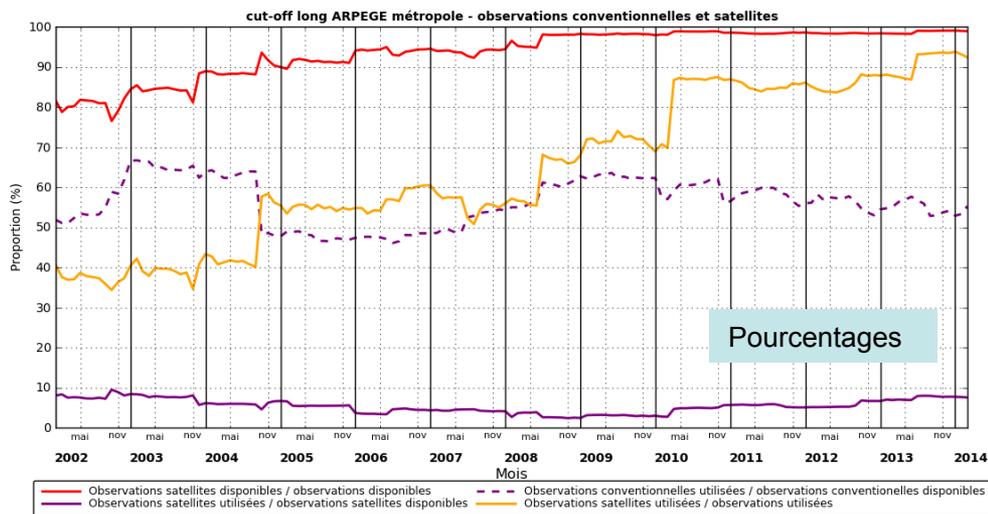
- Améliorations de la spécification des émissivités de surface sur terre (atlas) et sur mer (modèle FASTEM)
- Prise en compte des nuages et des précipitations
 - Version initiale : nuage opaque monocouche (corps gris) : N , P_{top}
 - Améliorations : introduction des effets de diffusion par les hydrométéores dans les micro-ondes (approximation delta Eddington) (RTTOV-SCATT) et de nuages multi-couches (émission puis diffusion) par les hydrométéores dans l'infra-rouge (RTTOV-CLOUD), meilleure prise en compte des recouvrements nuageux
- Simulation des réflectances bidirectionnelles dans le spectre solaire (atmosphère non diffusante)
- Généralisations : prise en compte des effets de NLE, de l'effet Zeeman, de la contribution solaire dans le proche infra-rouge, simulation de « PC scores » (composantes principales)

Evolution du nb d'observations dans ARPEGE

Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations disponibles et utilisées pour l'analyse



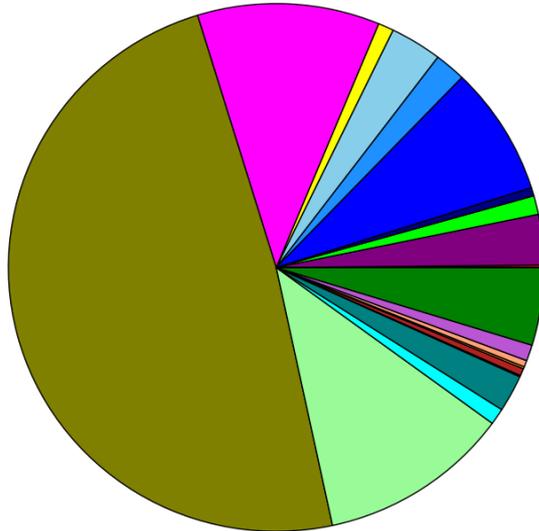
Evolution mensuelle des proportions de nombre d'observations disponibles et utilisées



Répartition des observations par types

Proportions des nombres d'observations utilisées par type d'obs
analyses cut-off long - ARPEGE metropole oper
observations conventionnelles et satellites

cumul du nombre d'observations utilisées sur la période 2013122700 - 2013122718 : 17618260



GPS ground	0.15%	AIRS	11.00%	SHIP	0.13%
GPS sat	3.09%	IASI	48.63%	PILOT/PRF	0.40%
SATOB	1.15%	CRIS	11.57%	TEMP	0.98%
ATOVS HIRS	0.51%	SEVIRI	1.00%	AIRCRAFTS	4.76%
ATOVS AMSU-A	7.91%	SCATT	2.26%	RADAR Vr	0.00%
ATOVS AMSU-B	1.88%	BUOY	0.08%	RADAR Hur	0.00%
ATMS	3.12%	SYNOP/SYNOR/RADOME	0.44%	BOGUS	0.00%
SSMIS	0.94%				

Nombre total d'observations assimilées
(4 analyses sur une journée) :

17.6 millions

Sondeurs imageurs MW : 14 %

**Sondeurs IR -> IASI 49 % + AIRS
11 % + CrIS 12 % => 72 %**

GPS- RO : 3 %

Vents SCAT : 2 %

Vents SATOB : 1 %

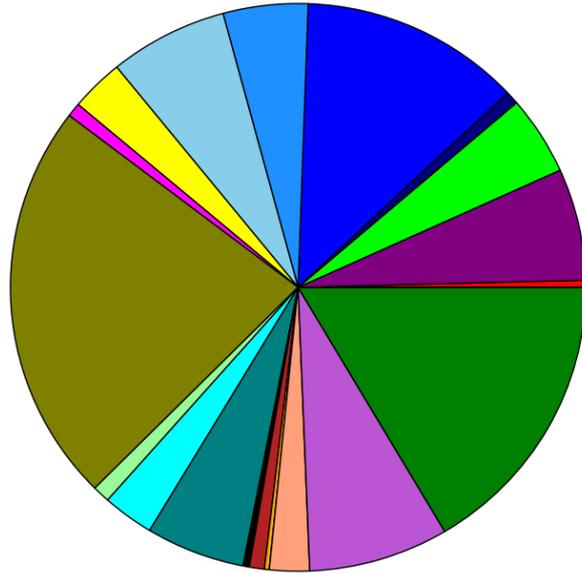
Données d'avions : 5 %

TEMP : 1 %

Modèle ARPEGE – 27/12/2013

Contenu en information : DFS

Part des DFS par type d'obs
analyses cut-off long - ARPEGE metropole oper
observations conventionnelles et satellites
cumul du DFS sur la période 2013122700 - 2013122718 : 233933



DFS : fonction du nombre d'observations, de la précision des observations et de leur « projection » sur les variables à analyser (T,q,U,V,Ps)

Sondeurs imageurs MW : 27 %

Sondeur IR IASI : 22 %

Données d'avions : 16 %

TEMP+PILOT : 10 %

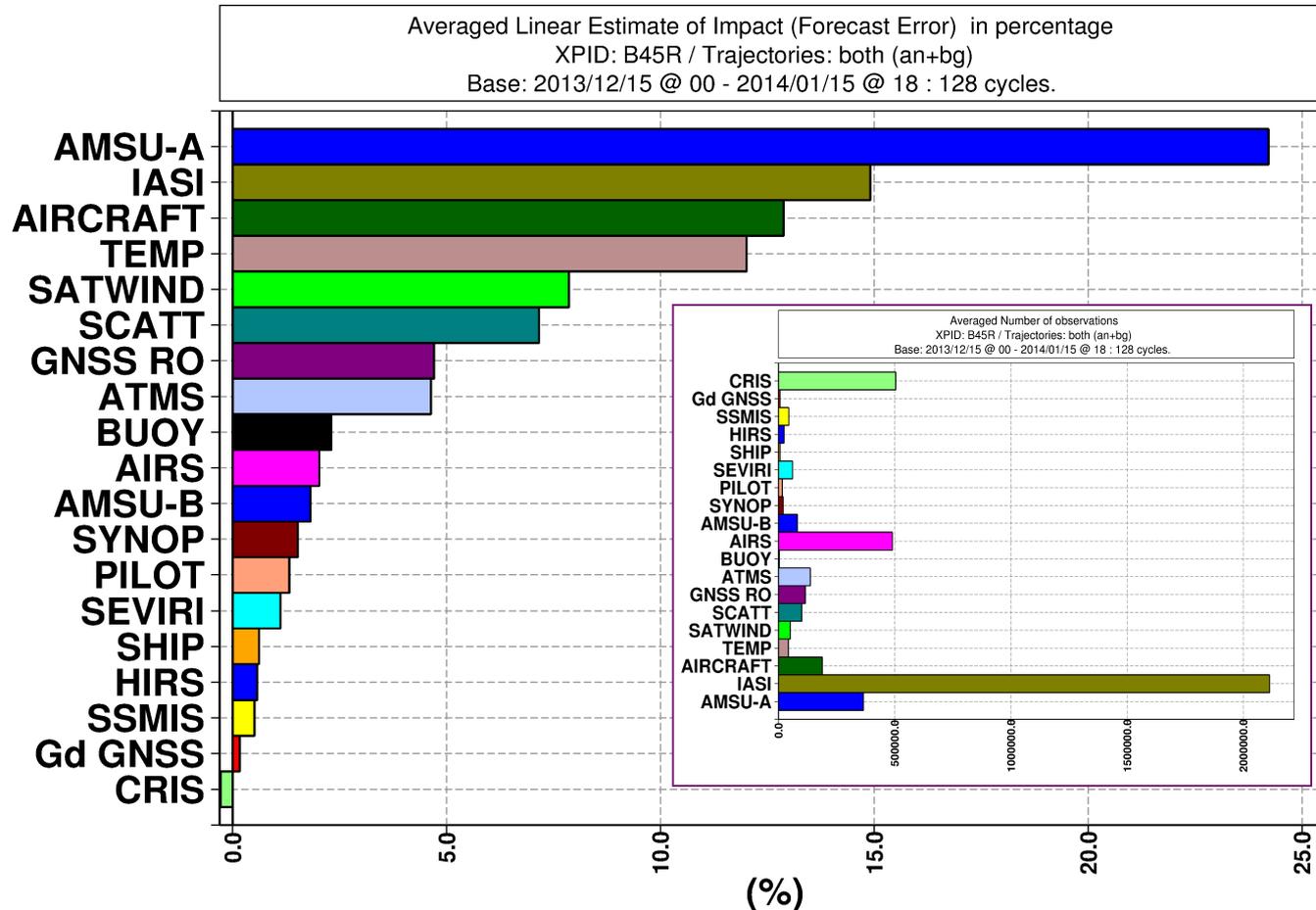
GPS- RO : 6 %

Vents SCAT : 5 %

Vents SATOB : 5 %

DFS (Degree of Freedom for Signal)
: capacité d'un système d'observation
à réduire l'erreur a priori

Capacité des observations à réduire une erreur de prévision (24h)

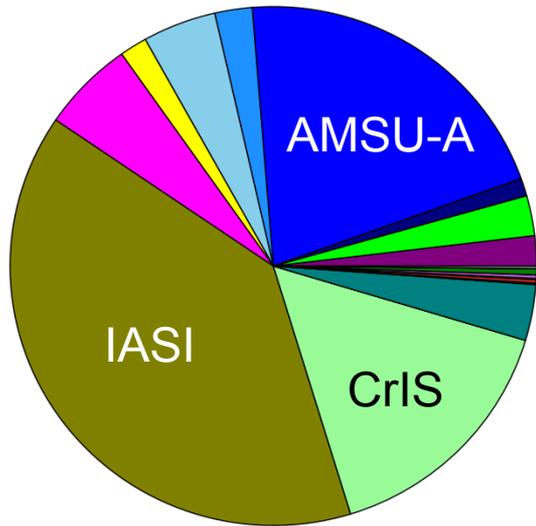


Pourcentage de réduction d'erreur
 par type d'observation

ALADIN-Réunion (Tropiques)

Proportions des nombres d'observations utilisées par type d'obs
analyses cut-off long - ALADIN Réunion oper
observations conventionnelles et satellites
cumul du nombre d'observations utilisées sur la période 2014020800 - 2

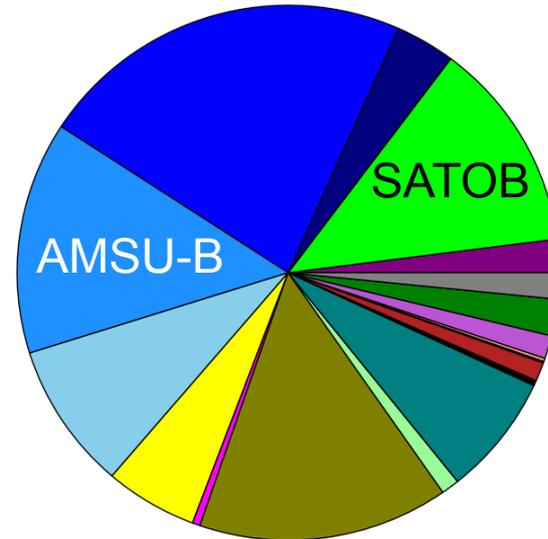
Nb d'obs



GPS ground	0.00%	AIRS	5.71%	SHIP	0.02%
GPS sat	1.88%	IASI	39.26%	PILOT/PRF	0.03%
SATOB	2.49%	CRIS	12.74%	TEMP	0.23%
ATOVS HIRS	1.11%	SEVIRI	0.00%	AIRCRAFTS	0.37%
ATOVS AMSU-A	20.80%	SCATT	3.48%	RADAR Vr	0.00%
ATOVS AMSU-B	14.05%	BUOY	0.08%	RADAR Hur	0.00%
ATMS	4.51%	SYNOR/SYNOR/RADOME	0.24%	BOGUS	0.17%
SSMIS	1.69%				

Part des DFS par type d'obs
analyses cut-off long - ALADIN Réunion oper
observations conventionnelles et satellites
cumul du DFS sur la période 2014020800 - 2014020818 : 26348

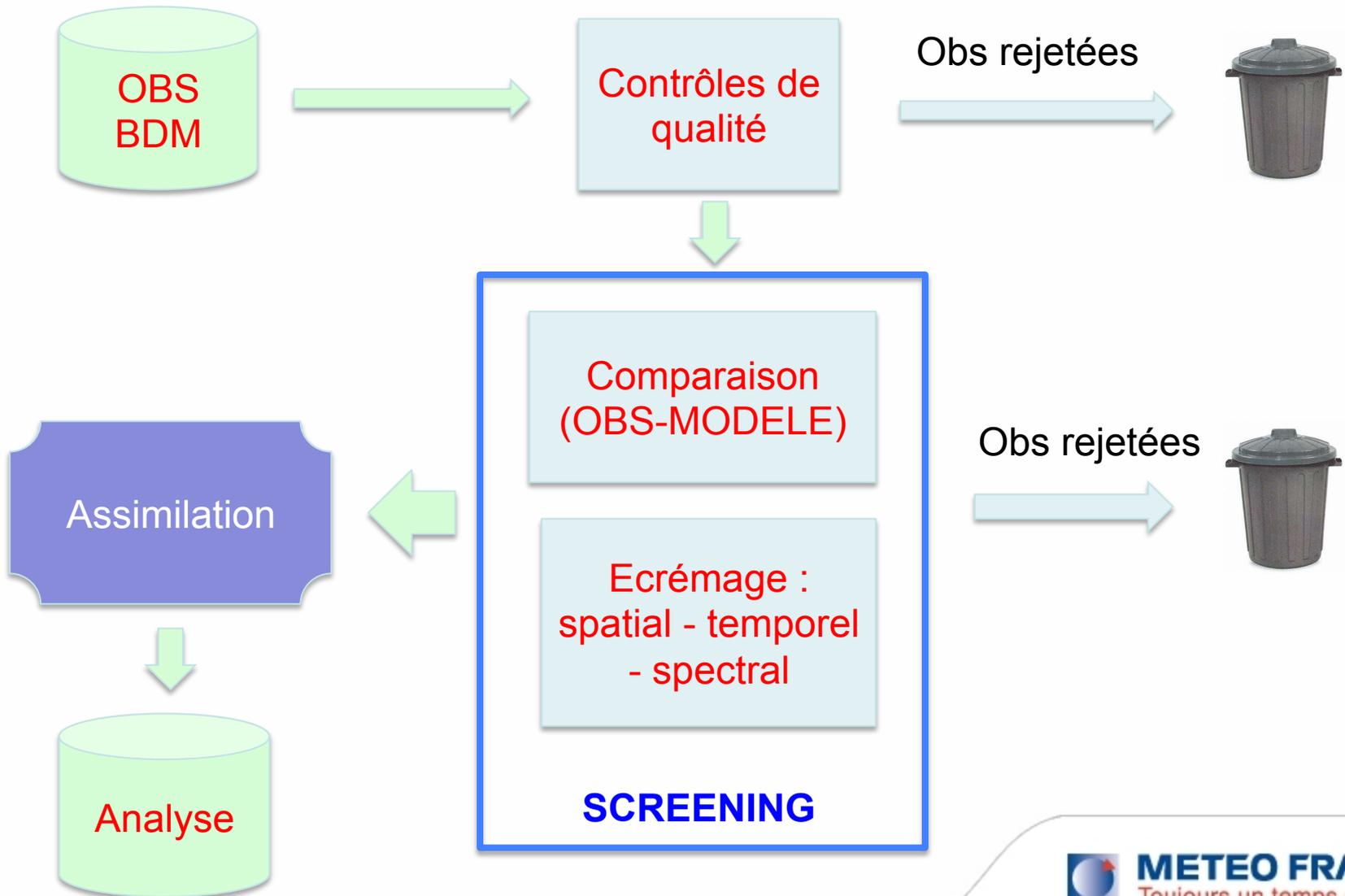
DFS



GPS ground	0.00%	AIRS	2.02%	SHIP	0.46%	PILOT/PRF	0.09%
GPS sat	1.88%	IASI	14.95%	PILOT/PRF	0.20%	TEMP	1.39%
SATOB	12.74%	CRIS	1.08%	TEMP	1.21%	AIRCRAFTS	0.00%
ATOVS HIRS	3.57%	SEVIRI	0.00%	RADAR Vr	0.00%	RADAR Hur	1.58%
ATOVS AMSU-A	22.47%	SCATT	7.32%	BOGUS	0.33%		
ATOVS AMSU-B	14.05%	BUOY	0.33%				
ATMS	8.88%	SYNOR/SYNOR/RADOME	1.14%				
SSMIS	5.52%						

Dominance des observations satellite
à la fois en nombre et en contenu en
information

Les observations pour l'assimilation

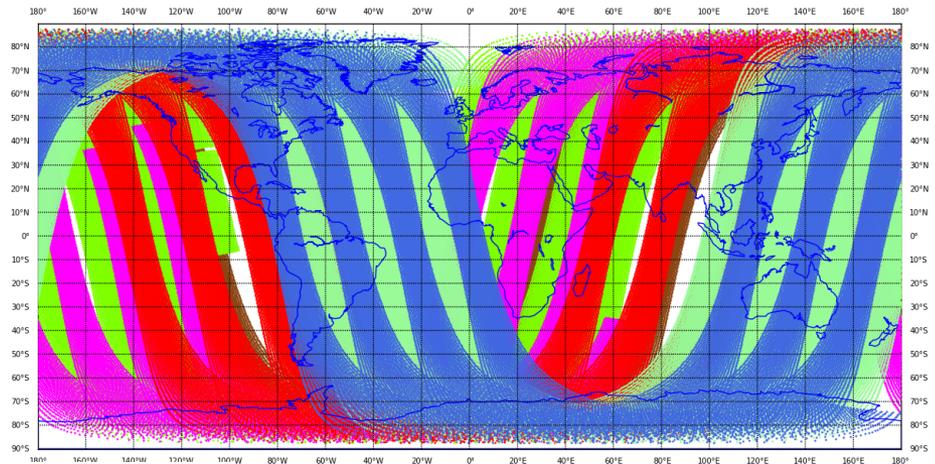


ARPEGE : les radiances AMSU-A

Avant
screening
391964

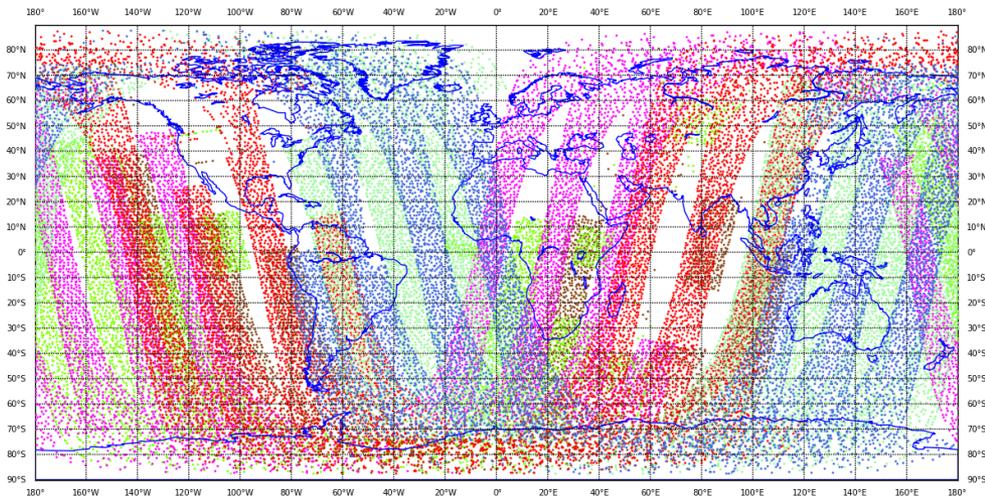
METEO-FRANCE couverture de donnees - ATOVS AMSU-A - 2015/03/11 00H UTC cut-off long
Nombre total d'observations avant screening : 391964

08107 NOAA-15
63683 NOAA-18
67470 NOAA-19
61360 AQUA
0 MEGHA-T
64560 METOP-A
64584 METOP-B



METEO-FRANCE couverture de donnees - ATOVS AMSU-A - 2015/03/11 00H UTC cut-off long
Nombre total d'observations apres screening : 49228

10083 NOAA-15
3952 NOAA-18
3723 NOAA-19
8262 AQUA
0 MEGHA-T
9377 METOP-A
9831 METOP-B

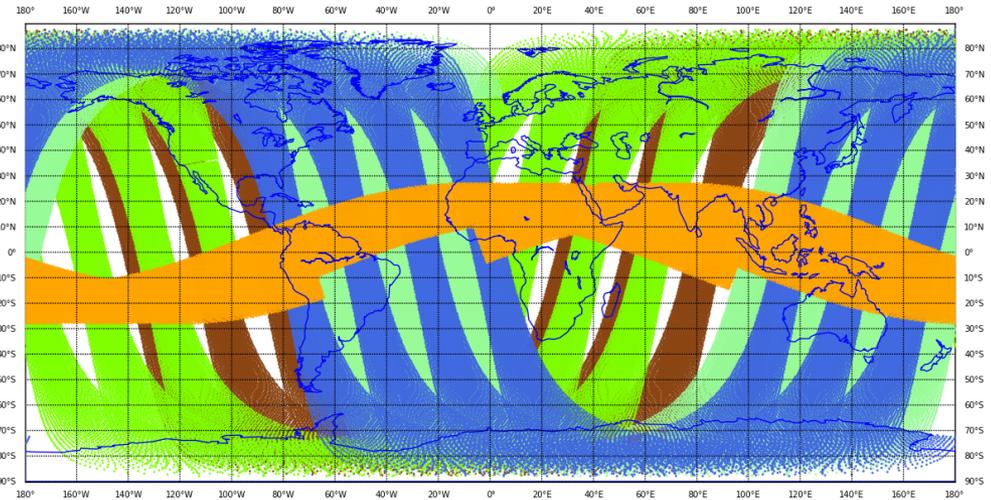


Après
screening
49228

ARPEGE : les radiances AMSU-B/MHS

METEO-FRANCE couverture de donnees - ATOVS AMSU-B - 2015/03/11 00H UTC cut-off long
Nombre total d'observations avant screening : 363046

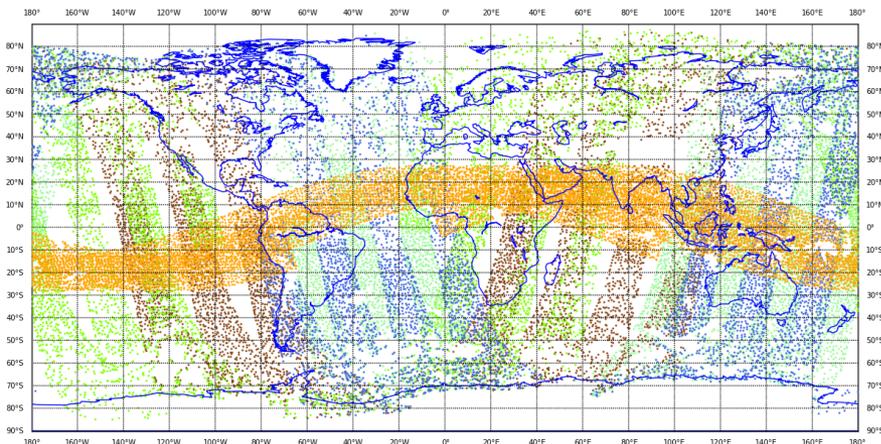
0 NOAA-15
73998 NOAA-18
76068 NOAA-19
0 AQUA
67504 MEGHAT
72720 METOP-A
72756 METOP-B



Avant
screening
363046

METEO-FRANCE couverture de donnees - ATOVS AMSU-B - 2015/03/11 00H UTC cut-off long
Nombre total d'observations apres screening : 38040

0 NOAA-15
6701 NOAA-18
6387 NOAA-19
0 AQUA
10980 MEGHAT
6718 METOP-A
7054 METOP-B



Après
screening
38040

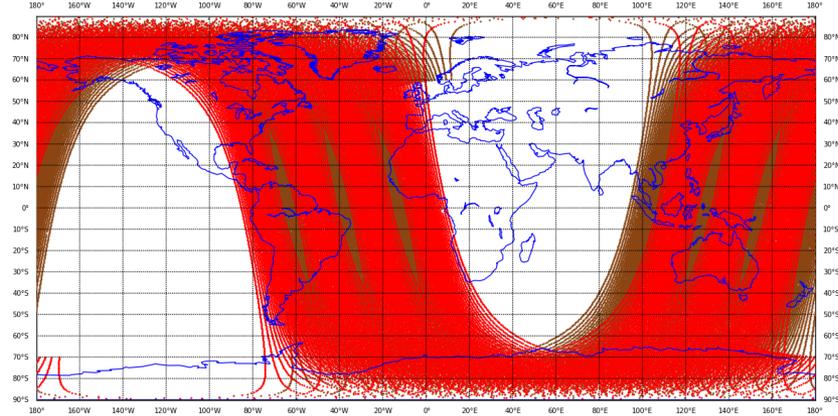
ARPEGE : les radiances IASI

Avant
screening
161373

METEO-FRANCE couverture de donnees - IASI - 2015/03/11 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 161373

80674 METOP-A
80699 METOP-B

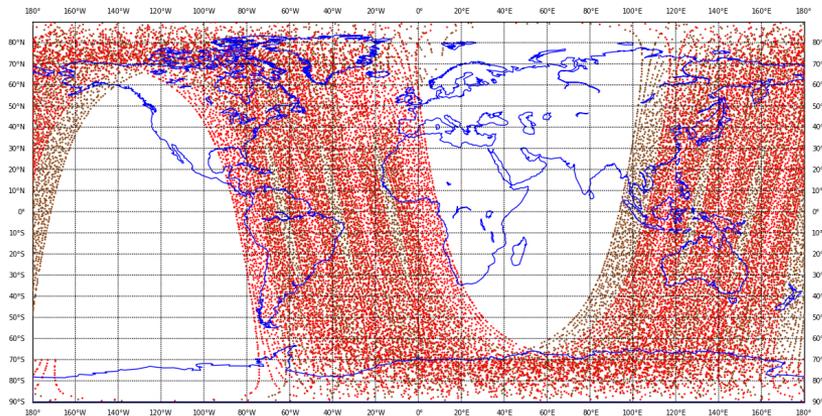


ARPEGE dbf

METEO-FRANCE couverture de donnees - IASI - 2015/03/11 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations apres screening : 32621

16318 METOP-A
16103 METOP-B

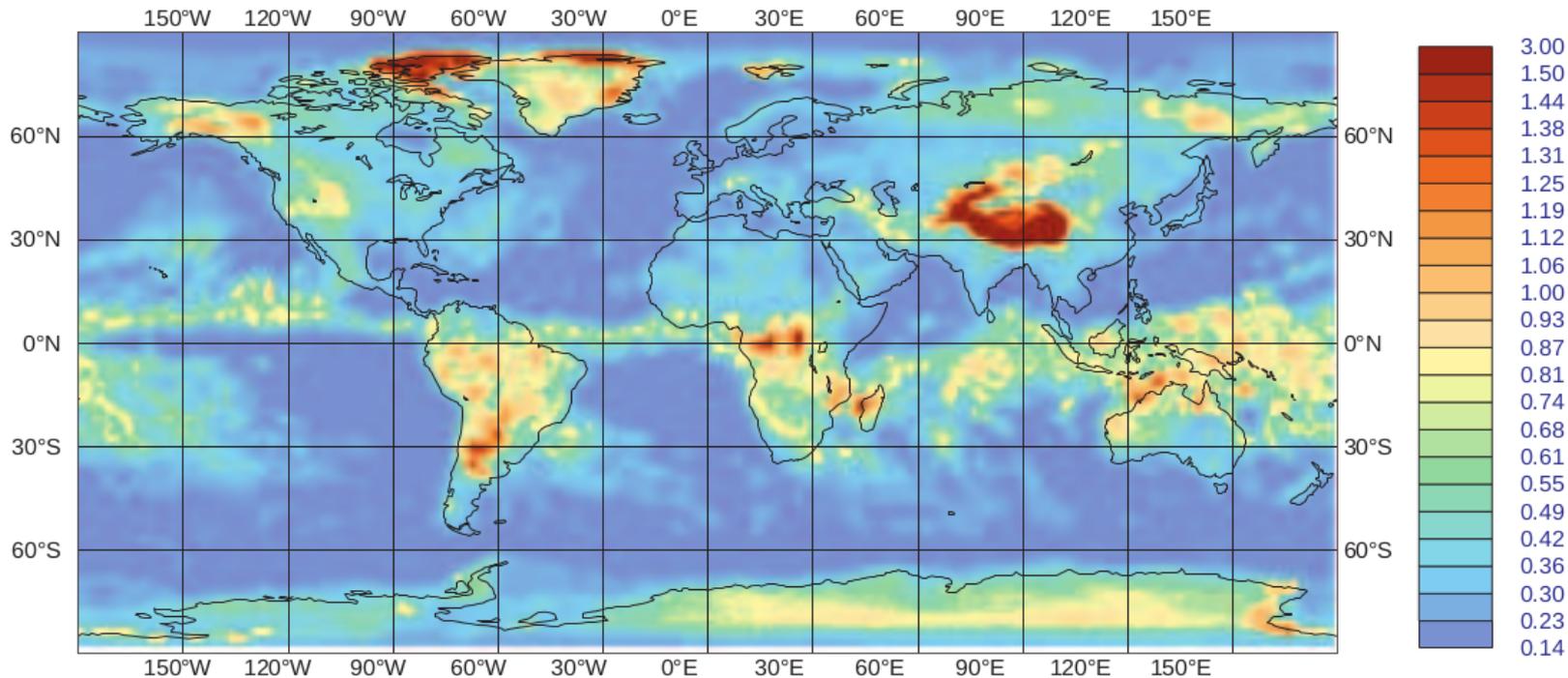


ARPEGE dbf

Après
screening
32621

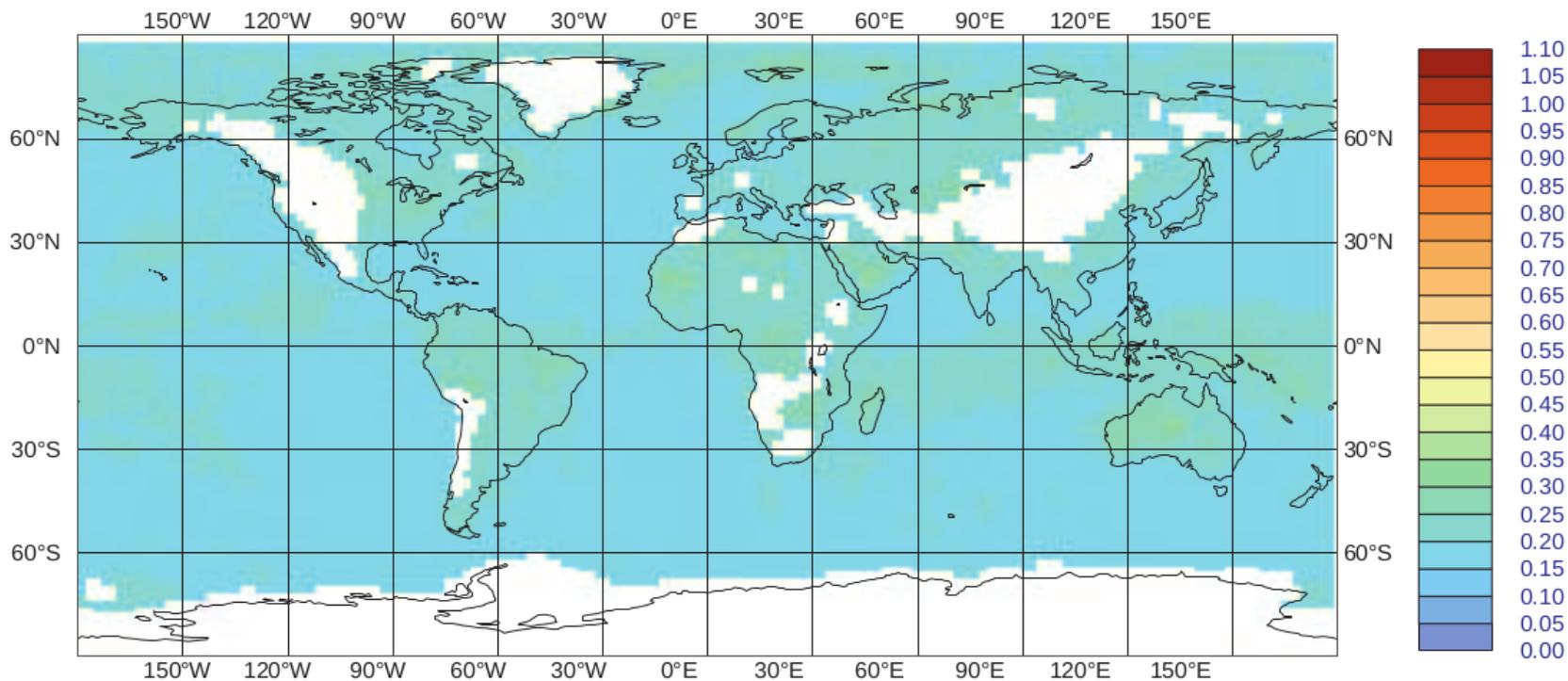
Canaux sur terre : non affectées par la surface

AMSU-A canal 5 METOP-B std (O-B)



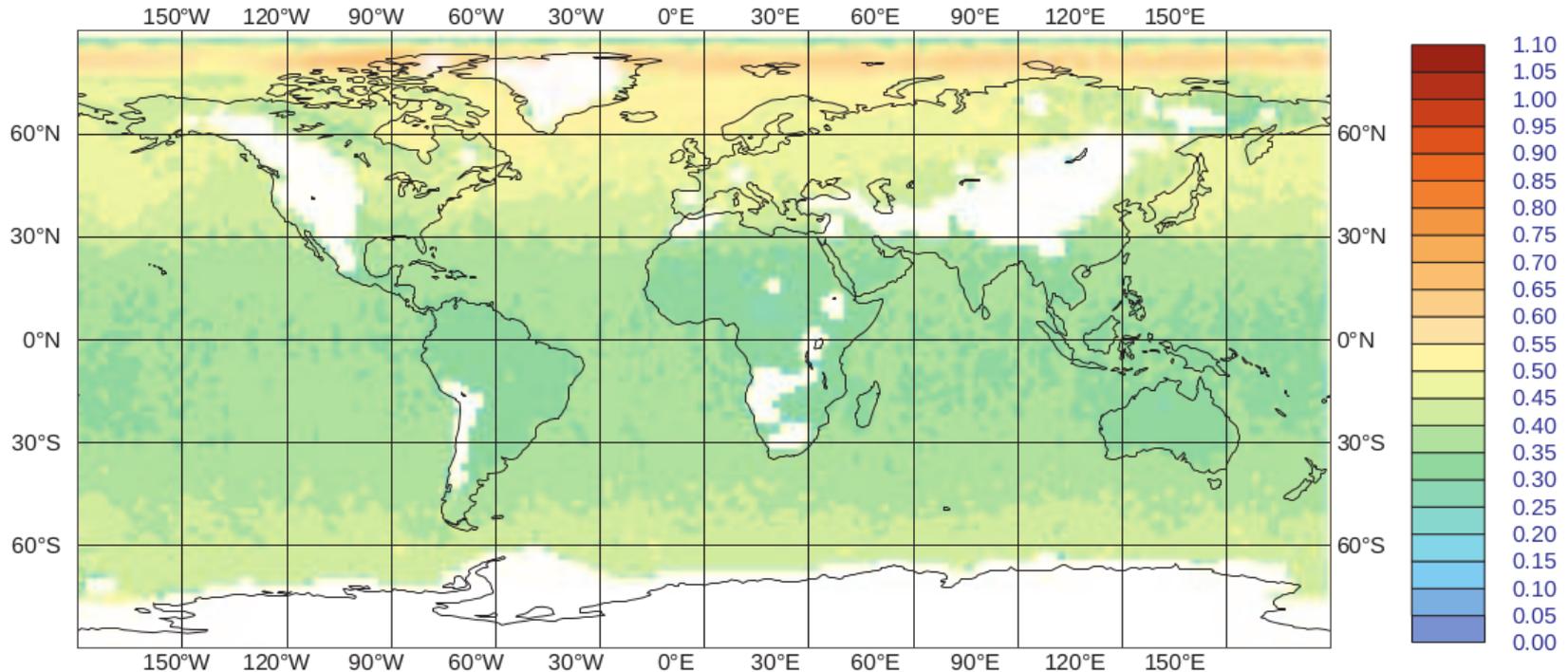
Toutes les observations

AMSU-A canal 5 METOP-B std (O-B)



Observations utilisées

AMSU-A Canal 5 METOP-B bias corr



$$J(x, \beta) = J_b + (y - H(x) - b)^T R^{-1} (y - H(x) - b) + (\beta - \beta_b)^T B_\beta^{-1} (\beta - \beta_b) \quad b = \sum \beta_i p_i(x)$$

Prédicteurs ($p_i(x)$) : constante, épaisseurs Z, angle solaire, FOV, paramètres de surface, ...

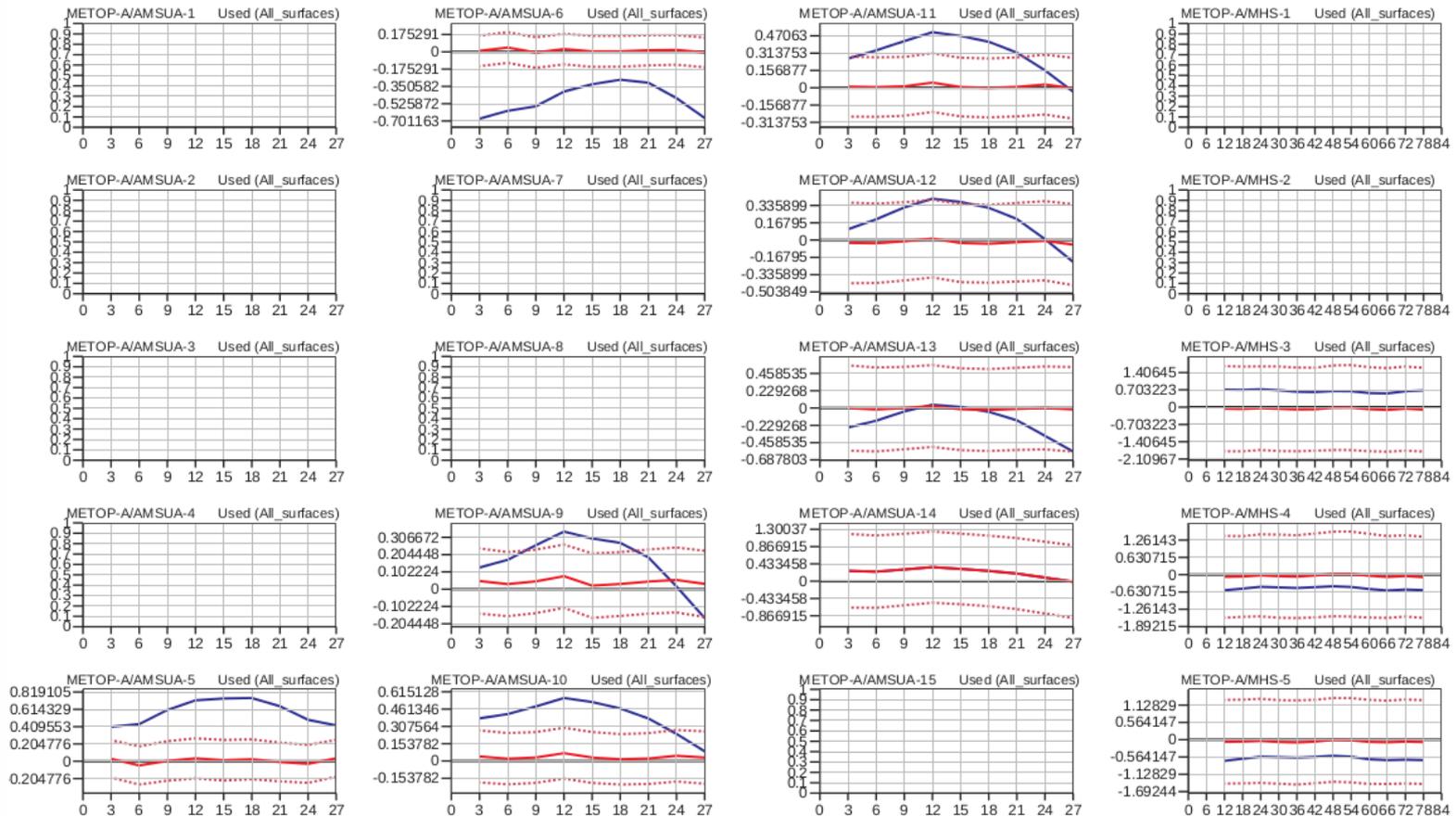
Correction de biais : dépendance angulaire

Scan dependent statistics for RADIANCES from METOP-A/AMSUA (Global) & METOP-A/MHS (Global)

Area: lon_w= 0.0, lon_e= 360.0, lat_n= -90.0, lat_s= 90.0

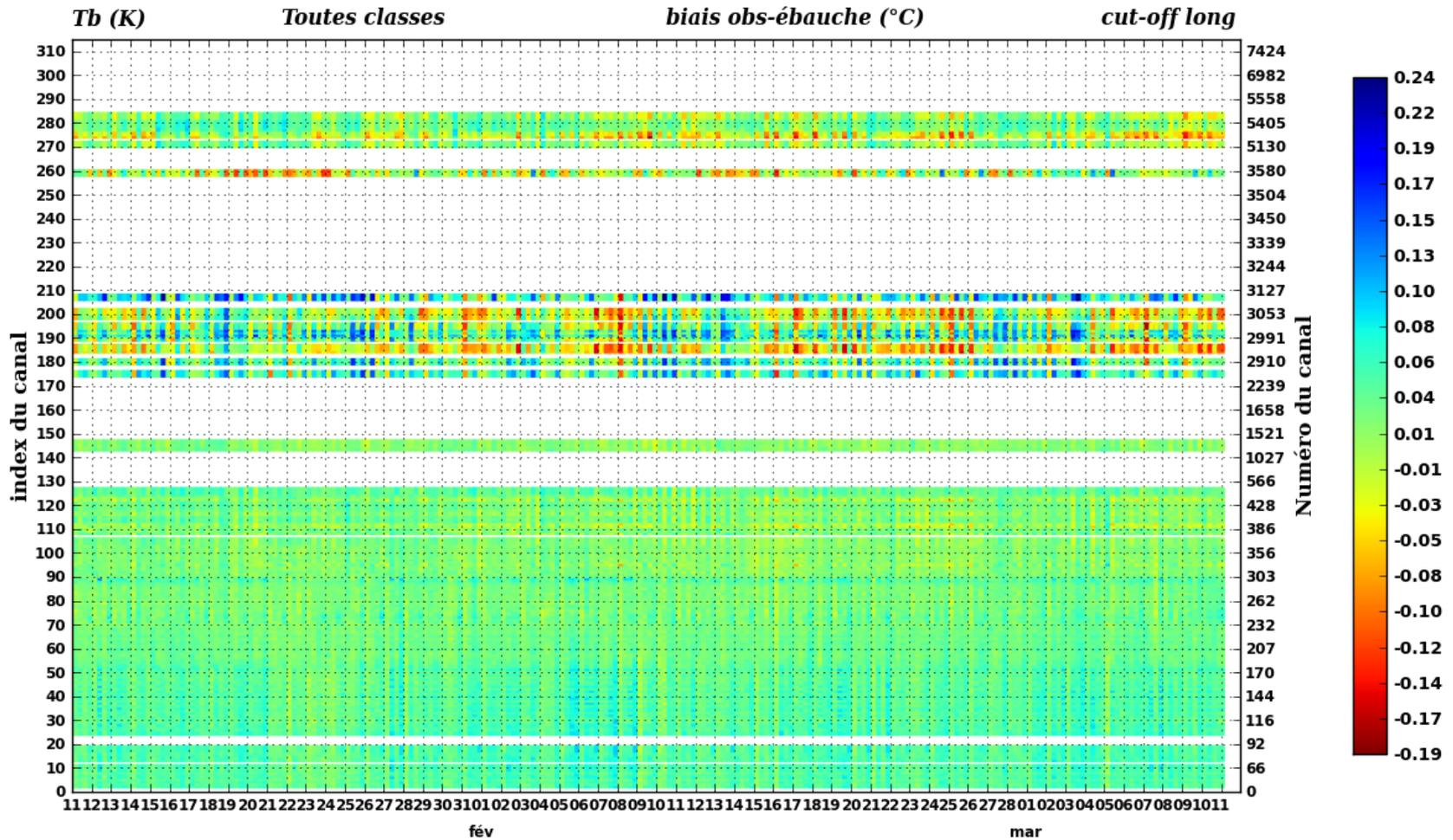
Operational Suite (0001), 20 Feb - 11 Mar 2015

Departures: blue = uncorrected, red = bias corrected +/- SD (dots) [scan pos in x-axis]



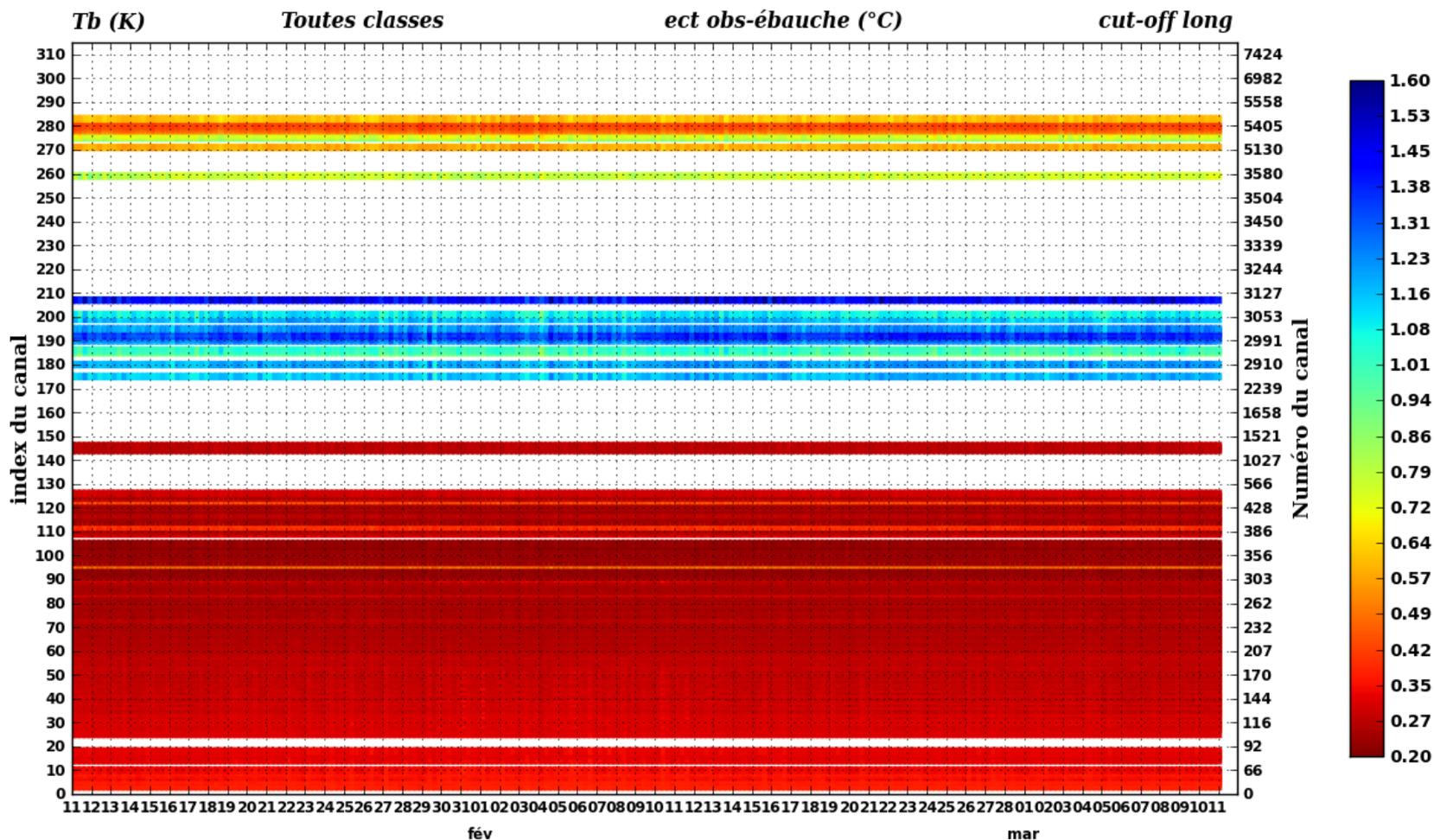
IASI METOP-B mean (O-B)

IASI METOP BARPEGE oper du 11-JAN-2015 au 11-MAR-2015



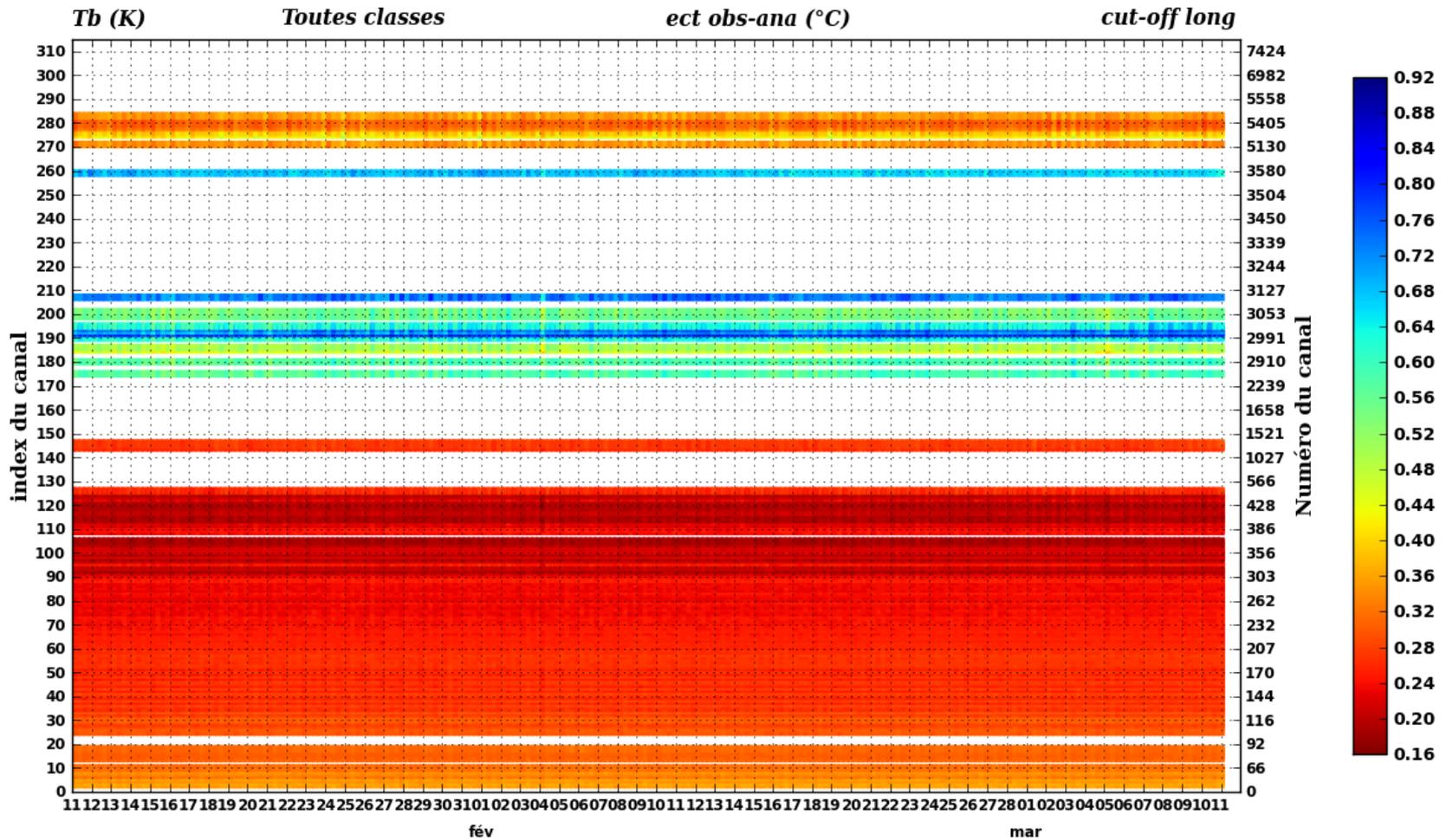
IASI – METOP-B std (O-B)

IASI METOP BARPEGE oper du 11-JAN-2015 au 11-MAR-2015



IASI METOP-B std (O-A)

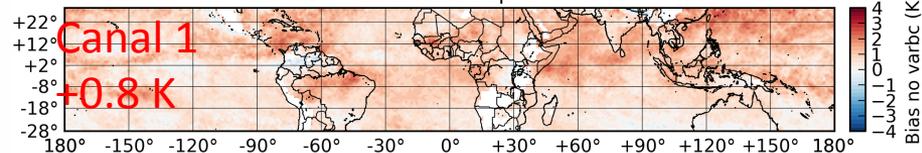
IASI METOP BARPEGE oper du 11-JAN-2015 au 11-MAR-2015



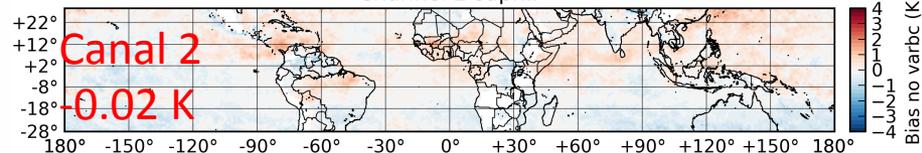
Monitoring des radiances SAPHIR

SAPHIR

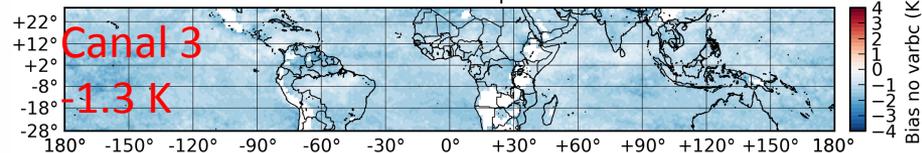
Channel 1 sapnir



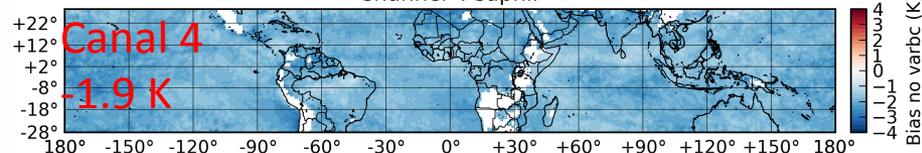
Channel 2 sapnir



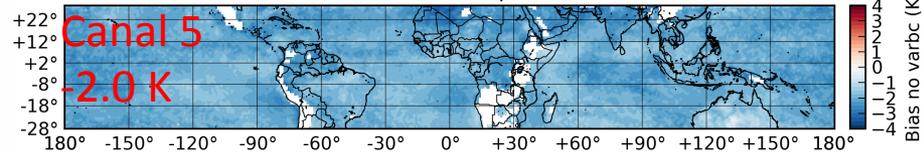
Channel 3 sapnir



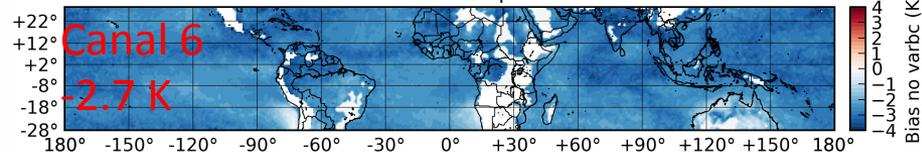
Channel 4 sapnir



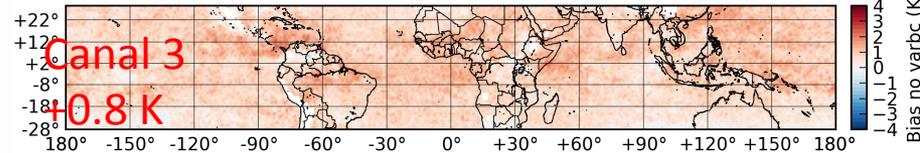
Channel 5 sapnir



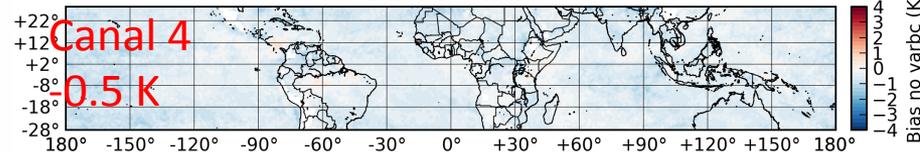
Channel 6 sapnir



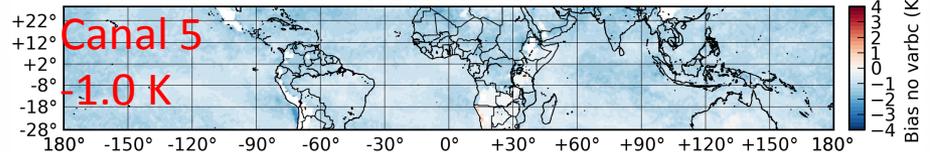
Channel 3 tovsu



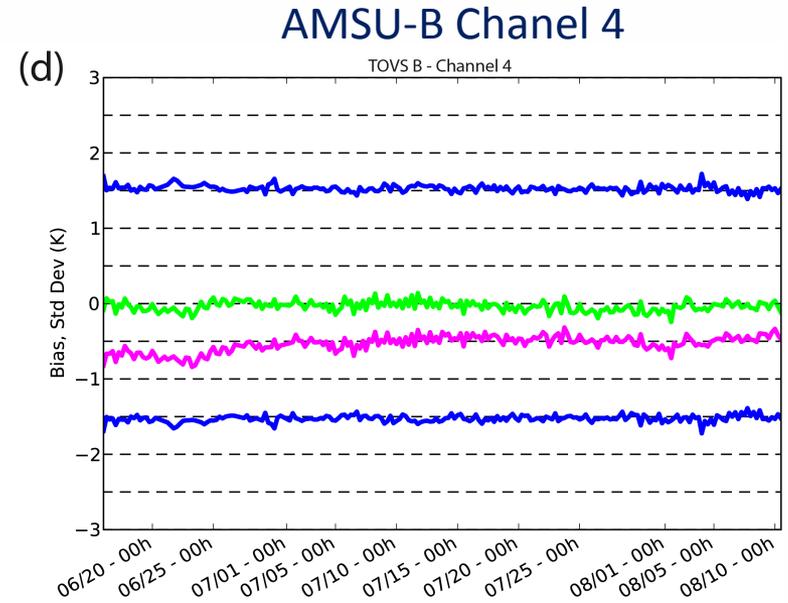
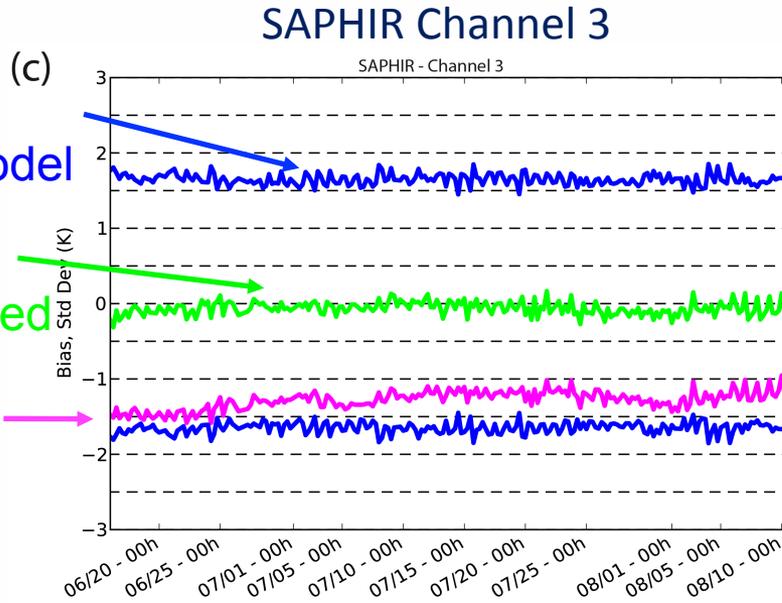
Channel 4 tovsu



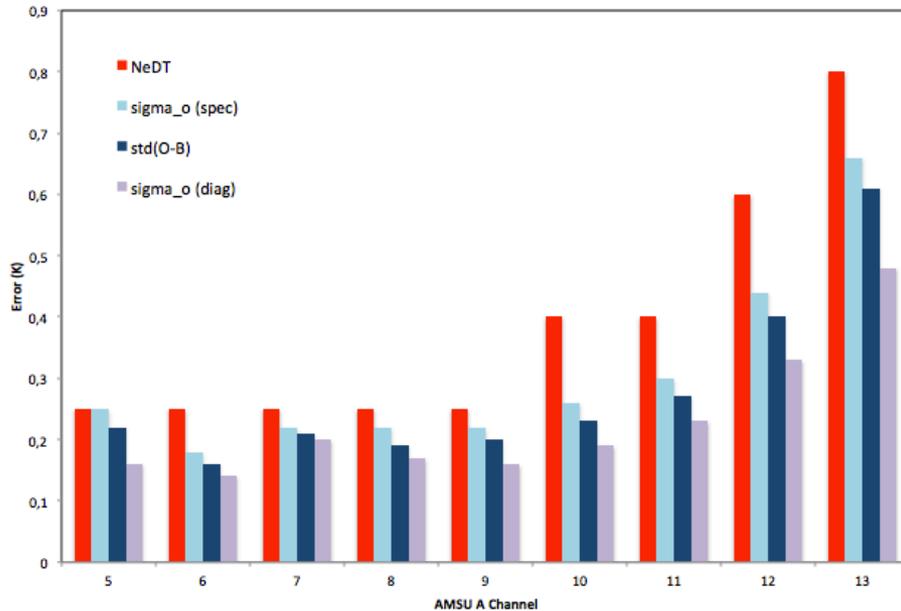
Channel 5 tovsu



Monitoring des radiances SAPHIR

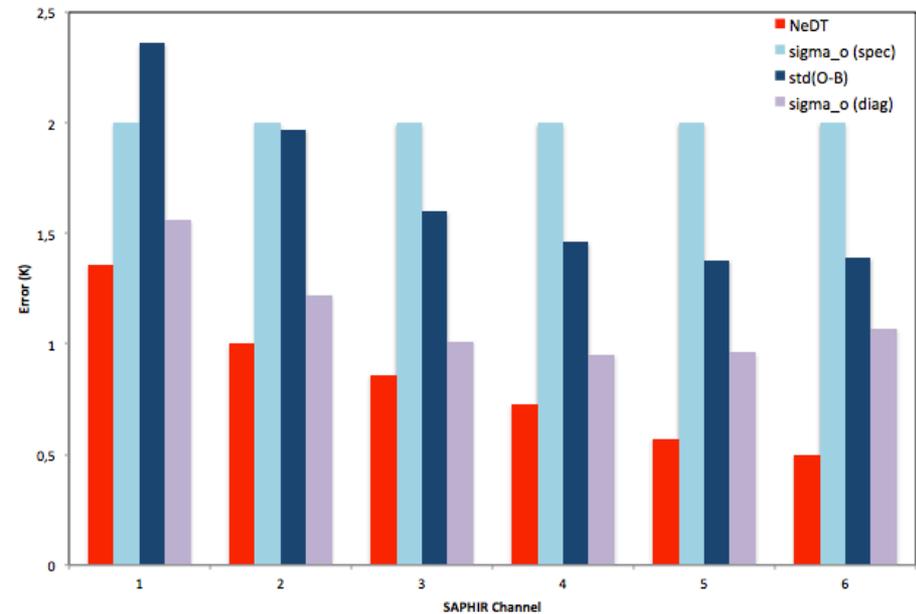


Erreurs d'observations vs bruit radiométrique



SAPHIR

AMSU-A



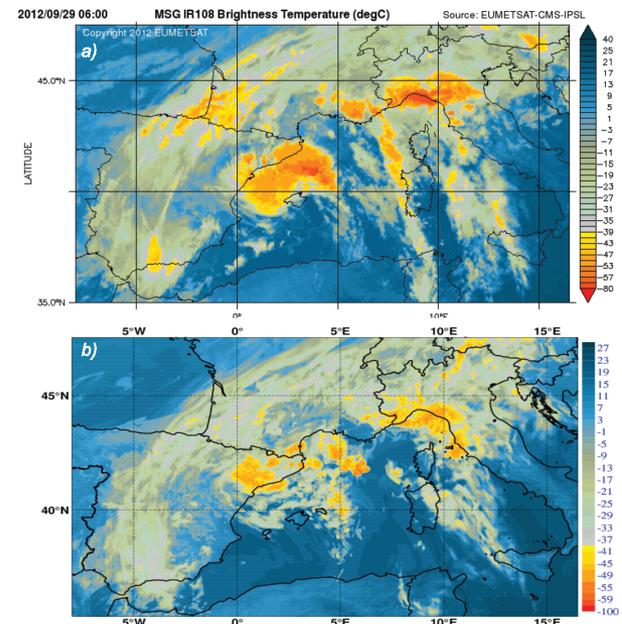
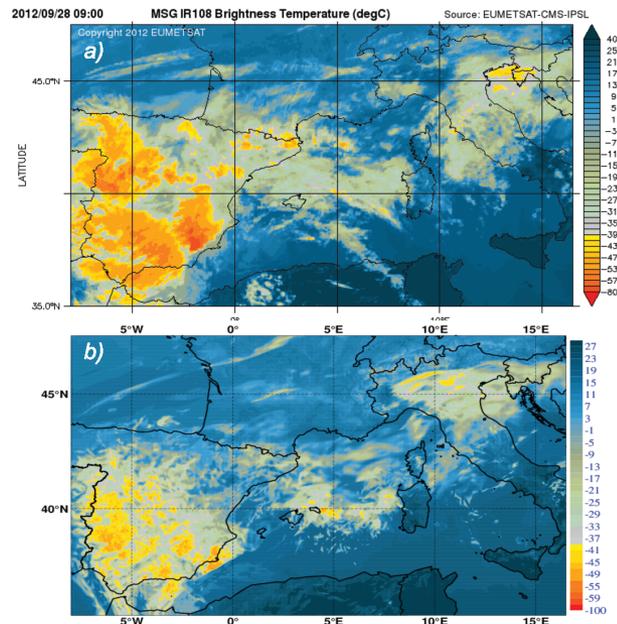
Statistiques d'erreurs (obs– modèle) : a priori, a posteriori

Autres applications des codes de TR en PNT

- Les réanalyses (ERA-40, ERA-Interim, ERA Clim) : besoin de pouvoir simuler les radiances d'instruments anciens (e.g. VTPR) et de corriger certaines dérives instrumentales.
- Le post-traitement des prévisions : comparaison dans l'espace des observations (validation de la modélisation de la dynamique, de la vapeur d'eau et des nuages)

MSG Tb
10.8 μm

AROME
FC+9h



Evolutions envisagées en PNT à Météo-France

- Les modèles :
 - AROME-France et AROME « Prévision Immédiate » à 0.5 km de résolution et 120 niveaux verticaux – échéances entre 12h et 36h
 - ARPEGE global à résolution 2.5 km/12.5 km et 120 niveaux verticaux – échéances à 102 h
- Les systèmes d'assimilation (approches ensemblistes) :
 - ARPEGE : 4D-EnVar 6 heures à 33 km et 115 niveaux – 160 membres
 - AROME : 4D-EnVar 3 heures à 2.5 km et 105 niveaux – 50 membres
- Vers des modélisations et des assimilations couplées : couplages envisagés avec les surfaces continentales, océaniques et la chimie atmosphérique

Evolutions attendues pour les observations

- Données satellite : préparation des futurs instruments infra-rouge hyperspectraux sur EPS-SG (IASI-NG) et sur MTG (IRS), utilisation accrue des radiances sur terre et dans les zones nuageuses
- Les radiances du sondeur infra-rouge IRS sur MTG : toutes les 30 min (température, humidité, vent ?)
- Les radiances du sondeur infra-rouge IASI-NG sur EPS-SG : 2 fois par jour (température, humidité, nuages)
- Les données des sondeurs micro-ondes (MWI, MWS, ICI) sur EPS-SG : 2 fois par jour (température, humidité, nuages, précipitation)
- Instruments similaires à bord de satellites américains (série JPSS) et de satellites chinois (série FY-3)

Développements nécessaires

- Utilisation des radiances (hyperspectraux IR) sous forme de composantes principales : assimilation de radiances reconstituées ou sous forme de « PC scores » ?
- Assimilation des radiances dans les régions nuageuses et pluvieuses (micro-ondes et infra-rouge)
- Prise en compte des corrélations d'erreurs (spectrales dans un premier temps) dans l'assimilation
- Utilisation du transfert radiatif avec des profils réalistes pour les constituants mineurs (CO₂, O₃, aérosols)
- Utilisation d'informations plus réalistes pour les émissivités de surface (modèles de vagues, modèle de banquise, schéma de sol-végétation) – meilleure prise en compte de la spécularité
- Conséquences de l'augmentation en résolution spatiale des modèles de prévision numérique :
 - Taille des pixels satellitaires >> Maille des modèles
 - Hypothèse de plan parallèle homogène : effets 3D

Evolutions attendues des codes RTM

- RTTOV pour les nouveaux instruments (MTG, EPS-SG)
- Généralisation de PC-RTTOV (surfaces continentales, nuages)
- Améliorations des propriétés optiques nuages / précipitations (aussi du côté microphysique des modèles : classes d'hydrométéores, schémas à 2 moments)
- Traitement de la diffusion par les nuages et les aérosols dans le visible
- Amélioration des bases spectroscopiques (vapeur d'eau)
- Transfert radiatif depuis la surface : réseaux de radiomètres sol
- Intérêt pour les instruments actifs : lidars, radars, diffusiomètres, signaux GNSS (réflectométrie)

Merci de votre attention !

