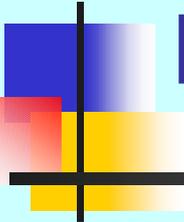


L'analyse de surface au CEPMMT

Jean-François Mahfouf

Centre Européen pour les Prévisions
Météorologiques à Moyen Terme

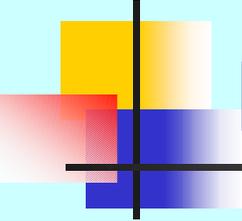


L'analyse de surface au CEPMMT

Jean-François Mahfouf
Service Météorologique du Canada
MRB/RPN

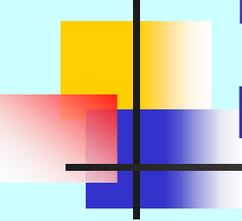


Merci
Gilbert !



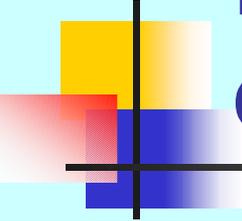
Plan de la présentation

- Introduction : importance du problème au travers de quelques exemples
- Analyse de l'eau du sol : comparaison de deux méthodes
 - Description
 - Evaluation à l'échelle locale (FIFE 87)
 - Evaluation dans le système opérationnel
- Autres analyses de surface : température dans le sol et neige
- Améliorations possibles (ici et là-bas)



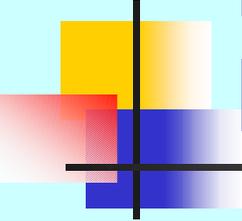
Les variables de surface en prévision numérique

- Condition limite inférieure modèles atmosphériques : échanges de chaleur, humidité et quantité de mouvement entre le sol et l'atmosphère
- Flux turbulents de chaleur et d'humidité fonction des conditions de surface (température et contenu en eau des sols et/ou de la végétation)
- Variables pronostiques dans le sol pour T et θ
- Besoin de spécifier : $T(t=0)$ et $\theta(t=0)$



Problèmes spécifiques aux surfaces continentales

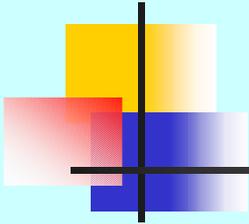
- Echelles de temps : > 1 semaine pour T et θ profonds (pourrait accroître la prédictabilité atmosphérique)
- Forte variabilité spatiale (hétérogénéités des surfaces continentales et des précipitations)
- Absence de mesures directes à l'échelle globale en routine



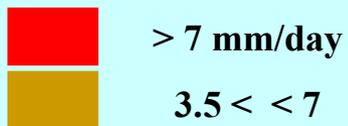
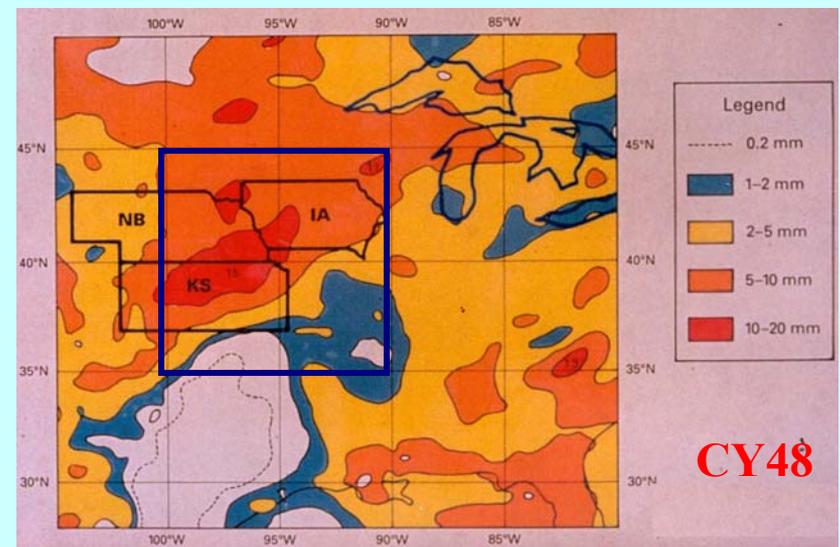
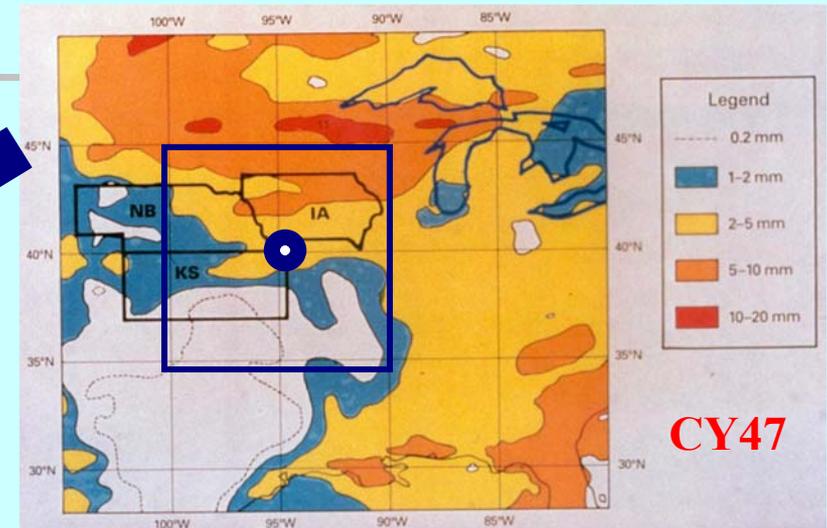
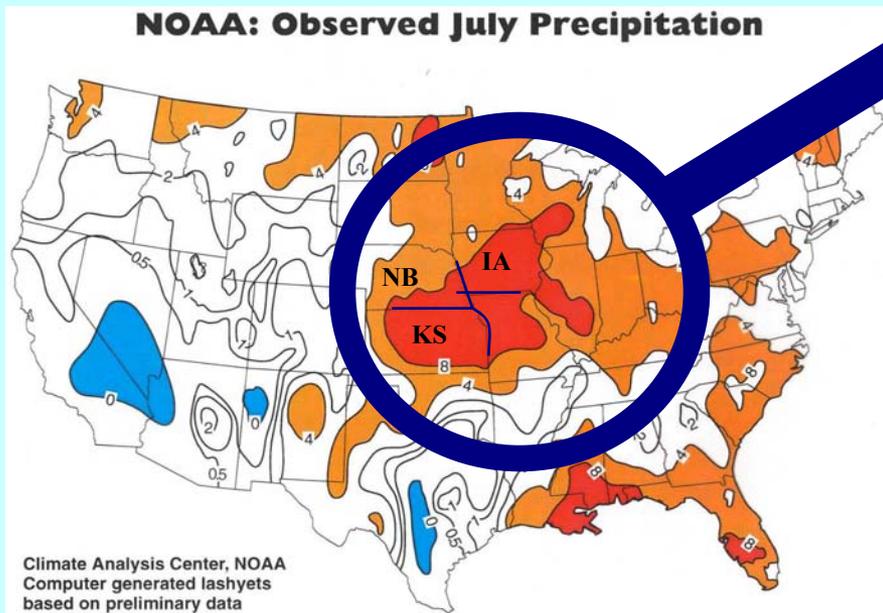
Les approches les plus simples et leurs faiblesses

- Effectuer une relaxation plus ou moins forte des variables dans le sol vers une climatologie (incertaine):
 - état initial = climatologie
- Ne pas effectuer d'initialisation spécifique dans le sol:
 - état initial = prévision à courte échéance

Juillet 1993 sur les Etats Unis



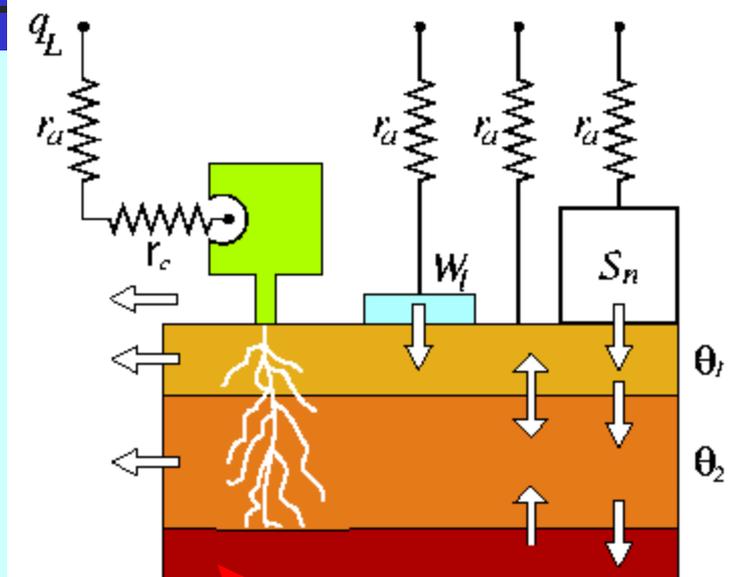
Model day 3 precipitation 9-25/7



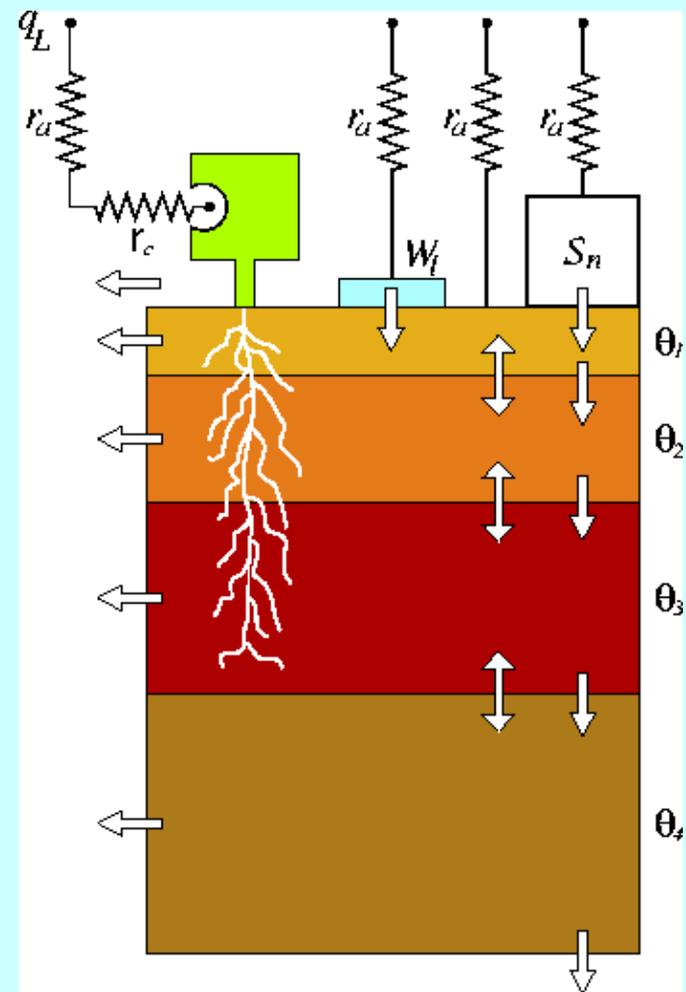
Beljaars, Viterbo, Miller and Betts, 1996:
Mon. Wea. Rev., 124, 362-383.

Les schémas de surface au CEPMMT

CY47 bilan hydrique



CY48 bilan hydrique



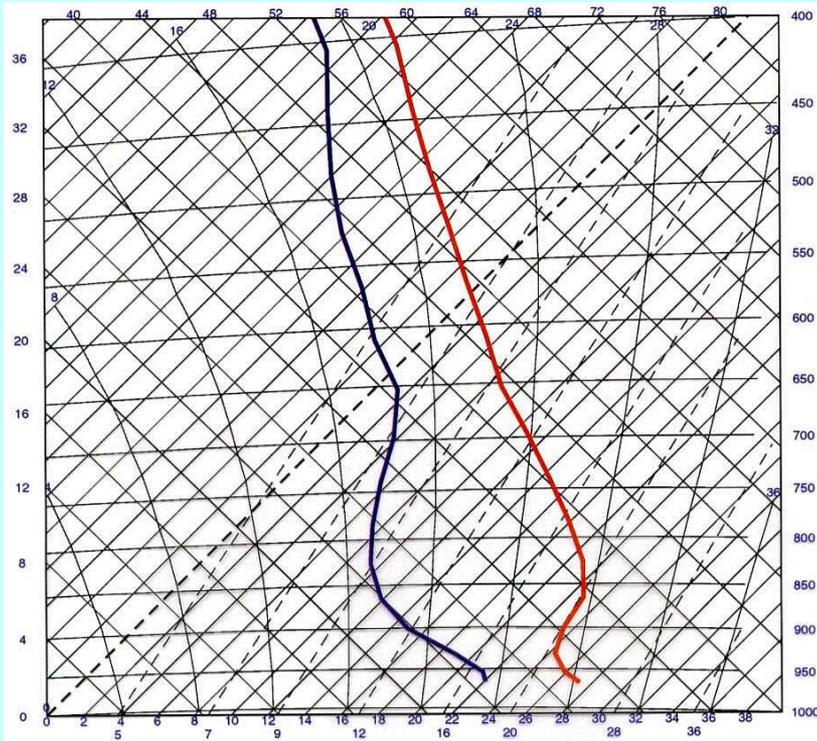
Climatologie : source (ou puits) d'eau

Averaged values on 10x10 degree box

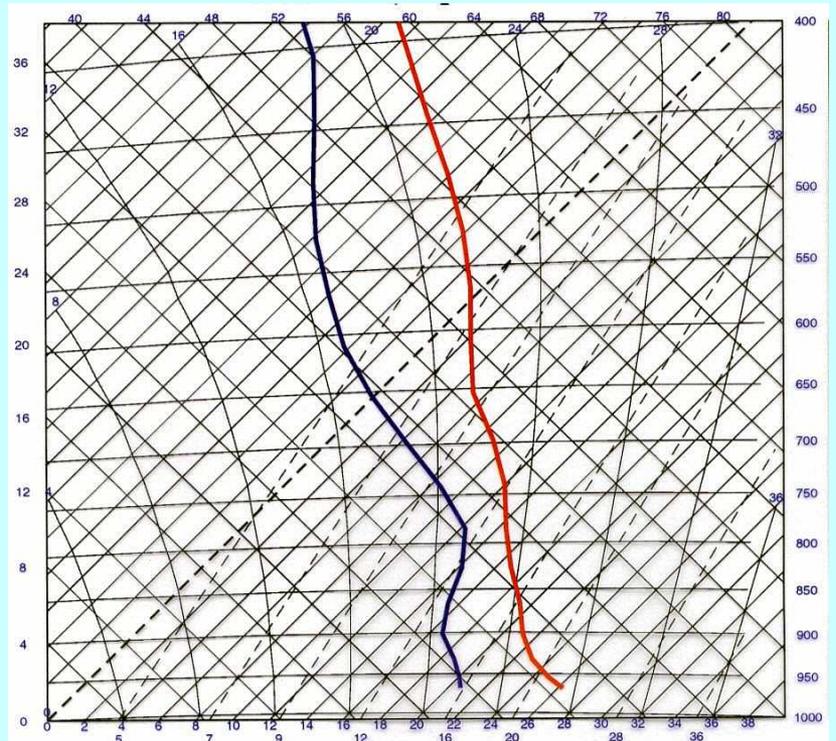
	Forecast	Precipitation	Evaporation
CY47	Day 1	6.4	4.4
	Day 3	2.6	4.6

	Forecast	Precipitation	Evaporation
CY48	Day 1	6.6	4.4
	Day 3	5.6	4.5

Profile 40 N 95 W CY47



Profile 40 N 95 W CY48



All results time averaged 9-25 July

Mean back-trajectories ending at 40 N 95 W

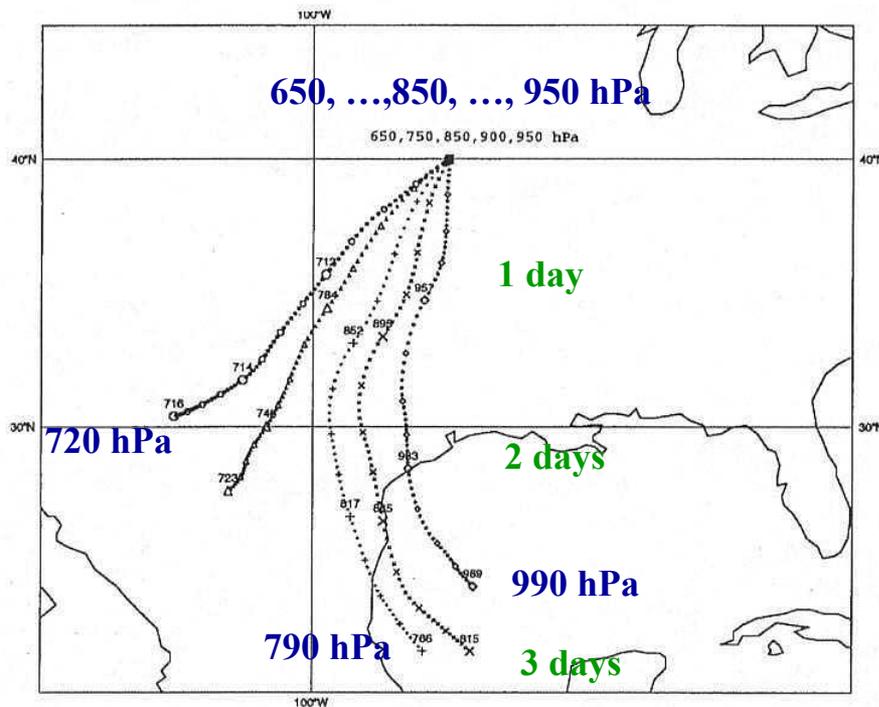


FIG. 5. Three-day backward trajectories from location 40°N, 95°W at the levels 950, 900, 850, 750, and 650 hPa. The fields at successive forecast ranges 72, 66, 60, . . . , 12, 6, 0 h, averaged between verifying dates 9 to 25 July, have been used for the computation of these trajectories. The printed numbers along the trajectories indicate the pressure height at one-day intervals.

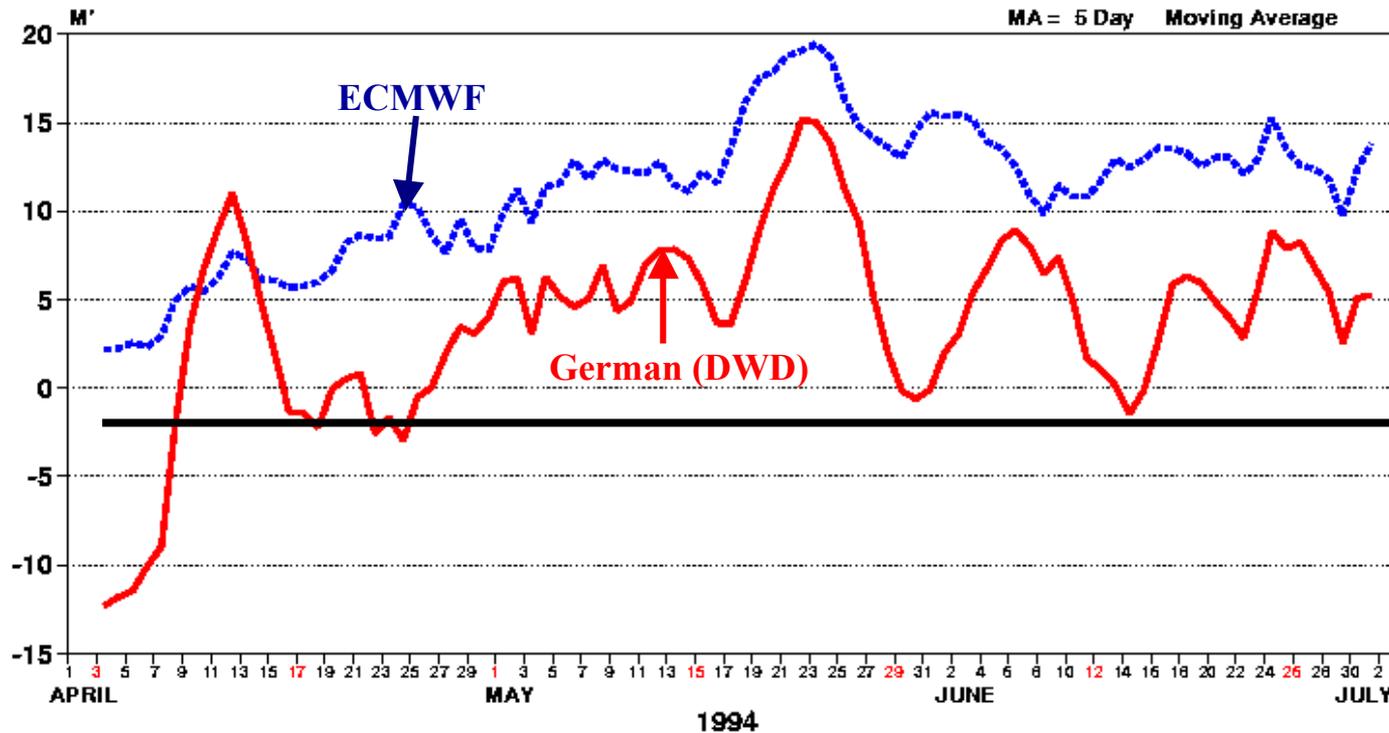
- Deux descriptions différentes des surfaces (CY47 et CY48) produisent des prévisions très différentes du champ de précipitations à courte échéance, tout en produisant la même évaporation locale.
- Cette différence s'explique par la description de l'évaporation en amont de la zone de maximum de précipitation; Dans le CY47, de l'air plus chaud et plus sec est advecté du S/SO conduisant à la formation d'une inversion thermique

Etude de cas: Europe, Mai-Juin 1994

FORECAST VERIFICATION
500hPa GEOPOTENTIAL
MEAN ERROR FORECAST
EUROPE LAT 35.000 TO 75.000 LON -12.500 TO 42.500

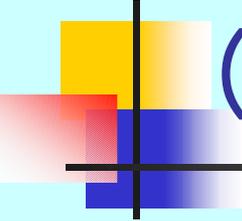
Day 2 forecasts

----- ECMWF 12UTC T+ 48 MA
----- OFFNB 12UTC T+48 MA



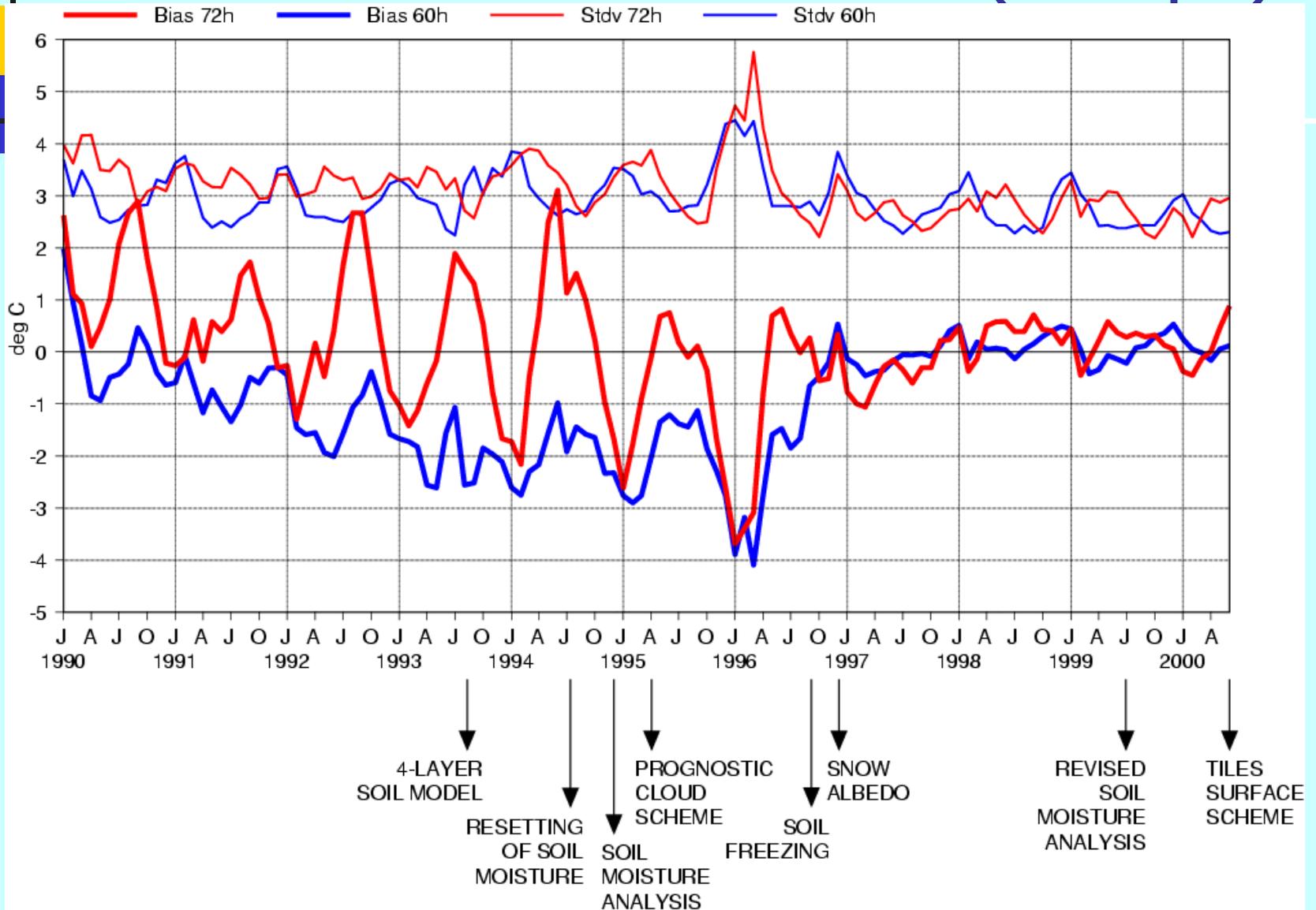
Etude de cas: Europe, Mai-Juin 1994

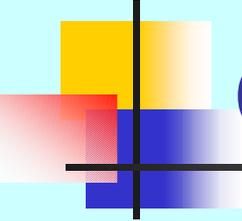
(2)



- Les observations indiquent que le modèle ne simule pas suffisamment de nuages bas => apparition d'un biais chaud et sec près de la surface
- Dans le système d'assimilation de données de l'époque les observations étaient uniquement utilisées pour modifier l'état de l'atmosphère. Les conditions initiales pour les variables de surface (e.g. l'eau du sol) étaient issues de prévisions à courte échéance. Elles reflétaient ainsi les erreurs dans le forçage de surface (précipitations, rayonnement et nuages) .
- Une "prévision libre" de l'eau du sol conduira ainsi une évolution temporelle incorrecte même avec un schéma de surface parfait.

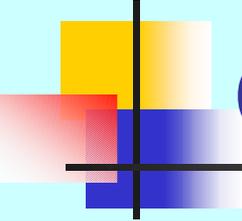
Erreurs de T2m au CEPMMT (Europe)





Conclusion partielle

- Nécessité de développer des techniques d'analyse des variables dans le sol en assimilant des observations informatives sur ces paramètres
- Procédure d'initialisation doit pouvoir contrôler d'éventuelles dérives dans le modèle atmosphérique produites par l'évolution lente des variables du sol (= > introduction de rétroactions négatives)

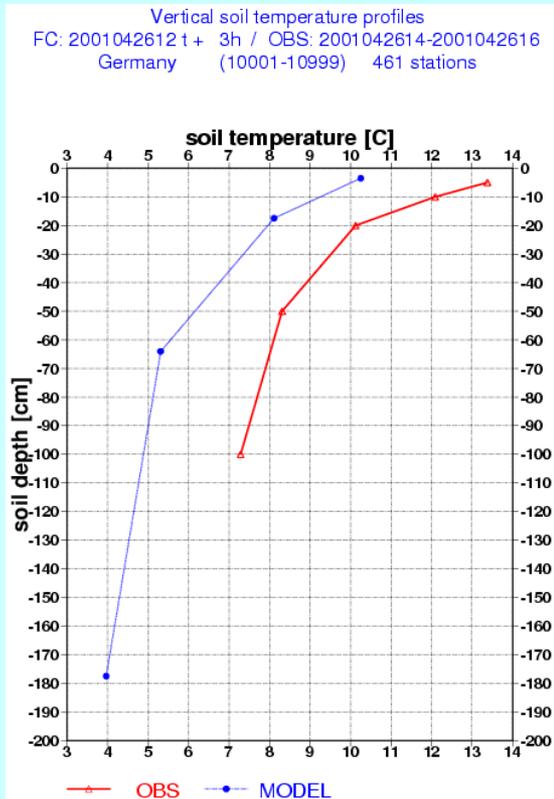


Observations utiles

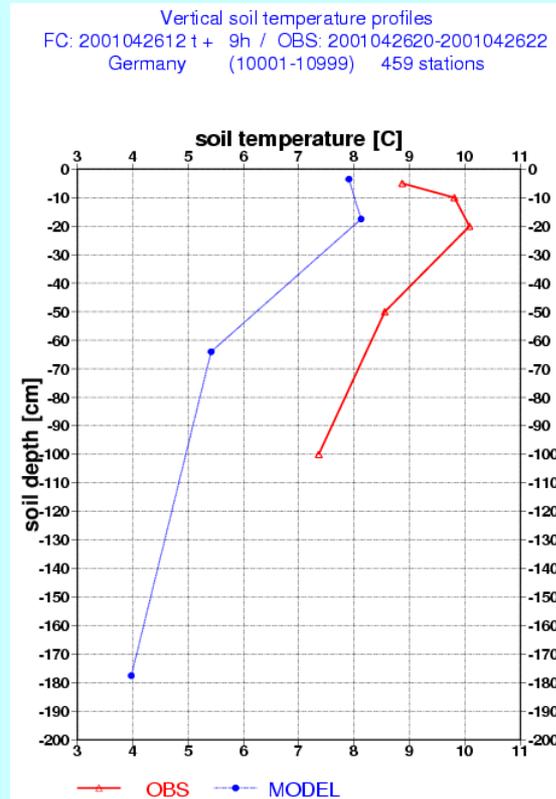
- Données conventionnelles : T2m, q2m, Précipitations, **Nébulosité** (SYNOP)
- Mesures satellitaires : Température de surface dans les domaines IR (GOES, Meteosat) et micro-ondes (AMSR, TMI, SSM/I)

Températures dans le sol (mesures)

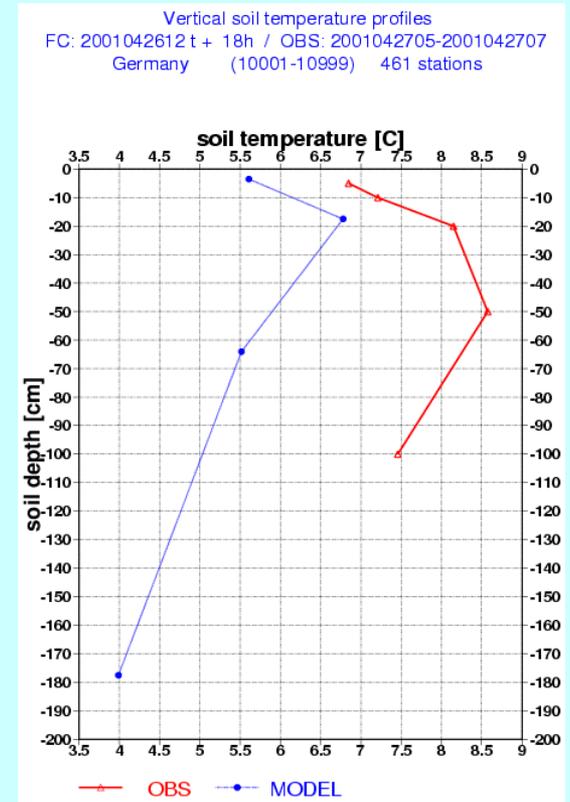
Averaged over Germany stations 26 April 2001



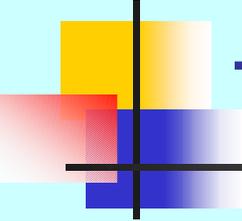
Verifying at 15 UTC



Verifying at 21 UTC

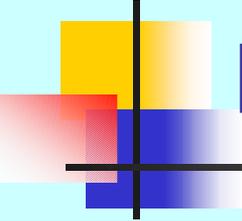


Verifying at 06 UTC



Techniques possibles

- Nudging
- Interpolation optimale
- Approche variationnelle (2D-Var)
- Filtres de Kalman (étendu ou d'ensemble)



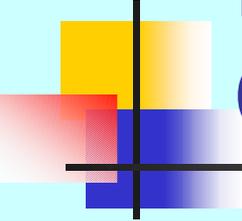
ECMWF 1994-1999: Nudging

- Incréments d'eau du sol :

$$\theta_a - \theta_b = C_v D \Delta t (q_a - q_b)$$

C_v = fraction de végétation, $\Delta t = 6h$ et q = humidité spécifique au dernier niveau atmosphérique

- Le coefficient D est tel qu'un incrément d'humidité spécifique de 1.5 g/kg remplira un réservoir de 150 mm d'eau en 9 jours (24 jours pour ERA15)
- Exceptions : neige, $\theta > \theta_{cap}$ et $\theta < \theta_{pwp}$
- Opérationnel au CEPMMT entre 1994 et 1999. Utilisé dans ERA15

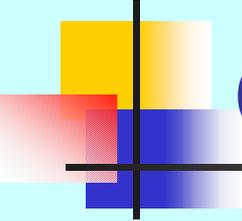


ECMWF 1999-200? : Interpolation Optimale

- Incréments d'eau du sol:

$$\theta_a - \theta_b = \alpha(T_o - T_b) + \beta(RH_o - RH_b)$$

- T et RH sont les températures et humidité relatives à 2 mètres
- La spatialisation des observations est faite lors d'une analyse à 2 mètres préalable (i.e. $T_o \rightarrow T_a$; $RH_o \rightarrow RH_a$)
- Les coefficients "optimaux" α et β sont fonction des statistiques d'erreur de prévision



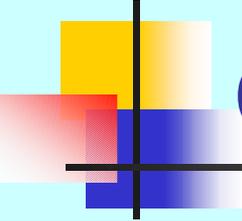
Coefficients optimaux (1)

$$\alpha = \frac{\sigma_{\theta}^b}{\Phi \sigma_T^b} \left[\left(1 + \left\{ \frac{\sigma_{RH}^a}{\sigma_{RH}^b} \right\}^2 \right) \rho_{T\theta} - \rho_{T,RH} \rho_{\theta,RH} \right] F_1 F_2$$

avec

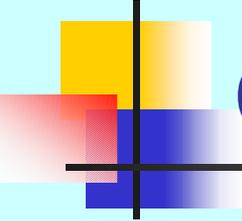
$$\Phi = \left[1 + \left\{ \frac{\sigma_T^a}{\sigma_T^b} \right\}^2 \right] \left[1 + \left\{ \frac{\sigma_{RH}^a}{\sigma_{RH}^b} \right\}^2 \right] - \rho_{T,RH}^2$$

- Calculés pour ISBA sur HAPEX-MOBILHY par une méthode de Monte-Carlo avec un modèle colonne (Mahfouf, 1991)
- Formulation analytique fonction de l'heure locale et des propriétés de surface proposée par Bouttier et al. (1993) et révisée par Giard et Bazile (2000) [utilisée au CMC dans le modèle régional]



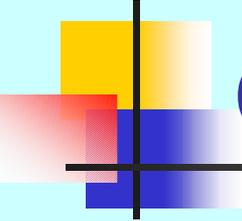
Coefficients optimaux (2)

- Monte-Carlo = situation de ciel clair avec un forçage radiatif important (impact maximum de la surface sur la couche limite)
- Distribution statistique de l'eau du sol (uniforme entre pwp et cap) – Lien très non-linéaire entre la surface et l'atmosphère
- Besoin de réduire les coefficients optimaux dans des situations où T et RH sont non informatifs sur la surface : $F1 = F1(\mu)$ et $F2 = F2(R_g)$



Coefficients optimaux (3)

- Corrélations ρ_{xy} estimées par une méthode de Monte-Carlo (100 intégrations d'un modèle colonne avec différentes conditions initiales pour l'eau du sol) – [Physique de l'interface]
- Ecart-types d'erreurs de prévision pour l'eau du sol = Methode NMC sur le bilan hydrique (P-E-R)
- Ecart-types d'erreurs de prévision pour les variables atmosphériques = examen des statistiques d'erreur (O-P)



Coefficients optimaux (4)

- Quelques chiffres :

$$\sigma_{\theta} = 0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$$

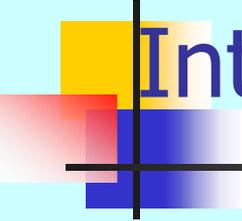
$$\sigma_{RH}^b = 5 \%$$

$$\sigma_T^b = 1.5 \text{ K}$$

$$\rho_{T,\theta} \in [-0.80, -0.90]$$

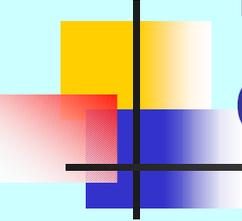
$$\rho_{RH,\theta} \in [0.80, 0.90]$$

$$\rho_{RH,T} \approx -1.0$$



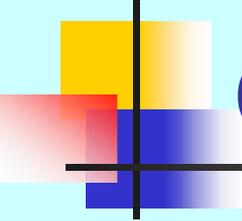
Interpolation optimale vs. Nudging

- Utilisation de l'information sur la température et l'humidité relative (*au lieu de simplement l'humidité spécifique*) – [Informativité des corrélations d'erreurs entre T et RH]
- Les incréments d'eau du sol sont liés de façon plus optimale aux incréments de T et RH (*au lieu d'un coefficient empirique global*) – [Corrélations d'erreurs sol/atmosphère issues du schéma de surface]
- Les incréments sont fortement réduits dans des situations non informatives : faible angle zénithal, vent élevé, précipitations, nébulosité, neige, sol gelé (*au lieu d'une valeur constante*)



Evaluation locale des méthodes d'analyse de l'eau du sol

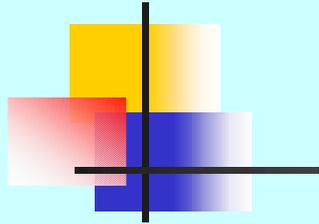
- Campagne de mesures FIFE 1987 (Konza prairie, Kansas)
- 130 jours de simulations avec un modèle colonne (1 Juin – 9 Octobre) avec un cycle d'assimilation de 6 heures : atmosphère réinitialisée par les analyses du CEPMMT (ERA15) et l'eau du sol initialisée par nudging ou interpolation optimale (utilisant T, RH et q à 2 mètres observés durant la campagne)
- Flux radiatifs LW et SW descendants et précipitations observés imposés en surface



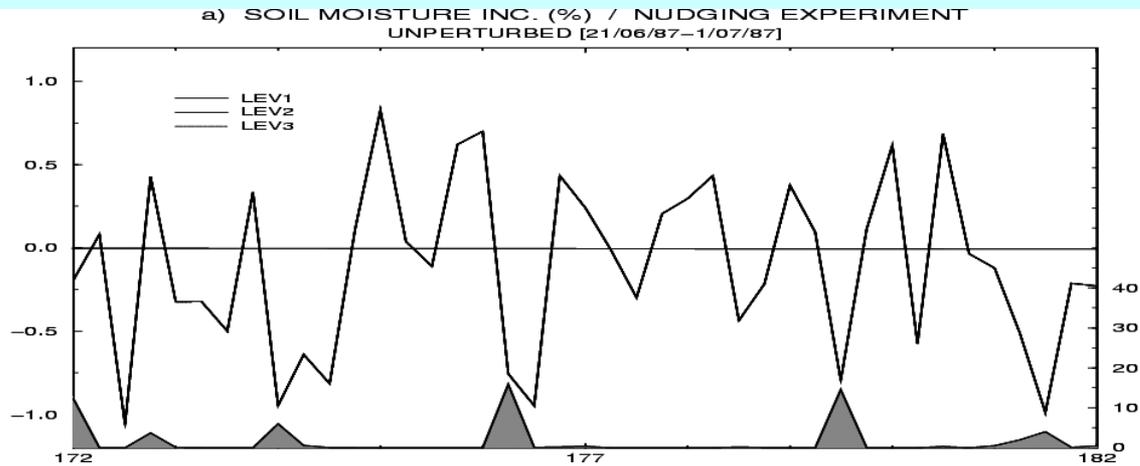
Objectif de l'étude

- Evaluer la capacité des méthodes d'initialisation de l'eau du sol à restituer une eau dans le sol (et des flux turbulents de surface) proche des mesures de la campagne en assimilant des observations atmosphériques à 2 mètres

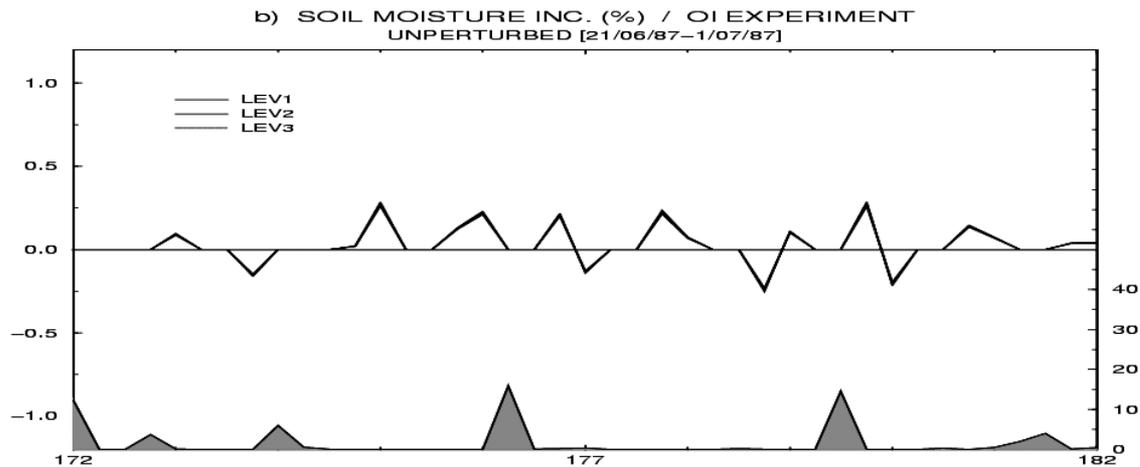
Incréments d'eau du sol



Nudging



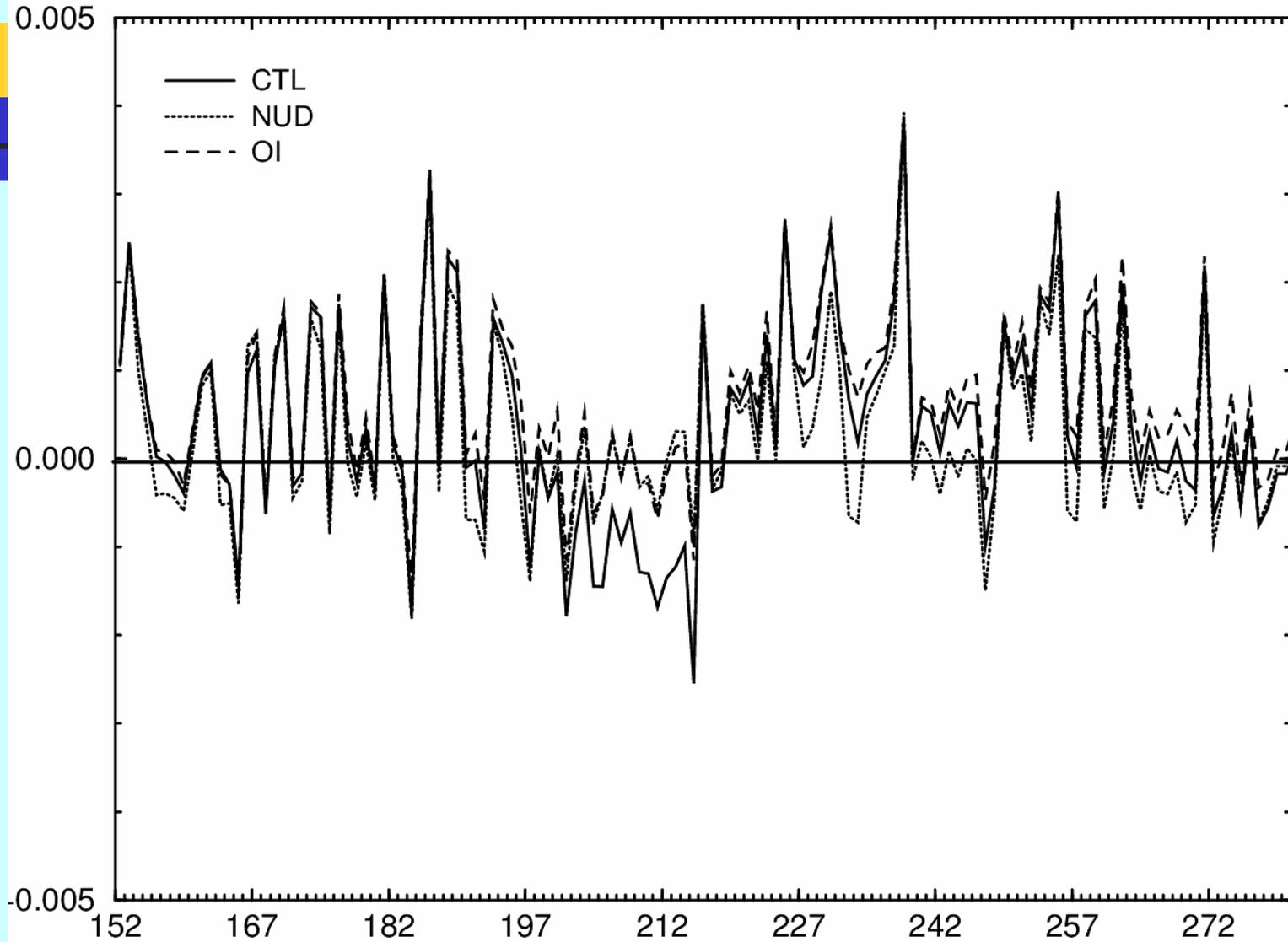
OI



Douville et al 2000

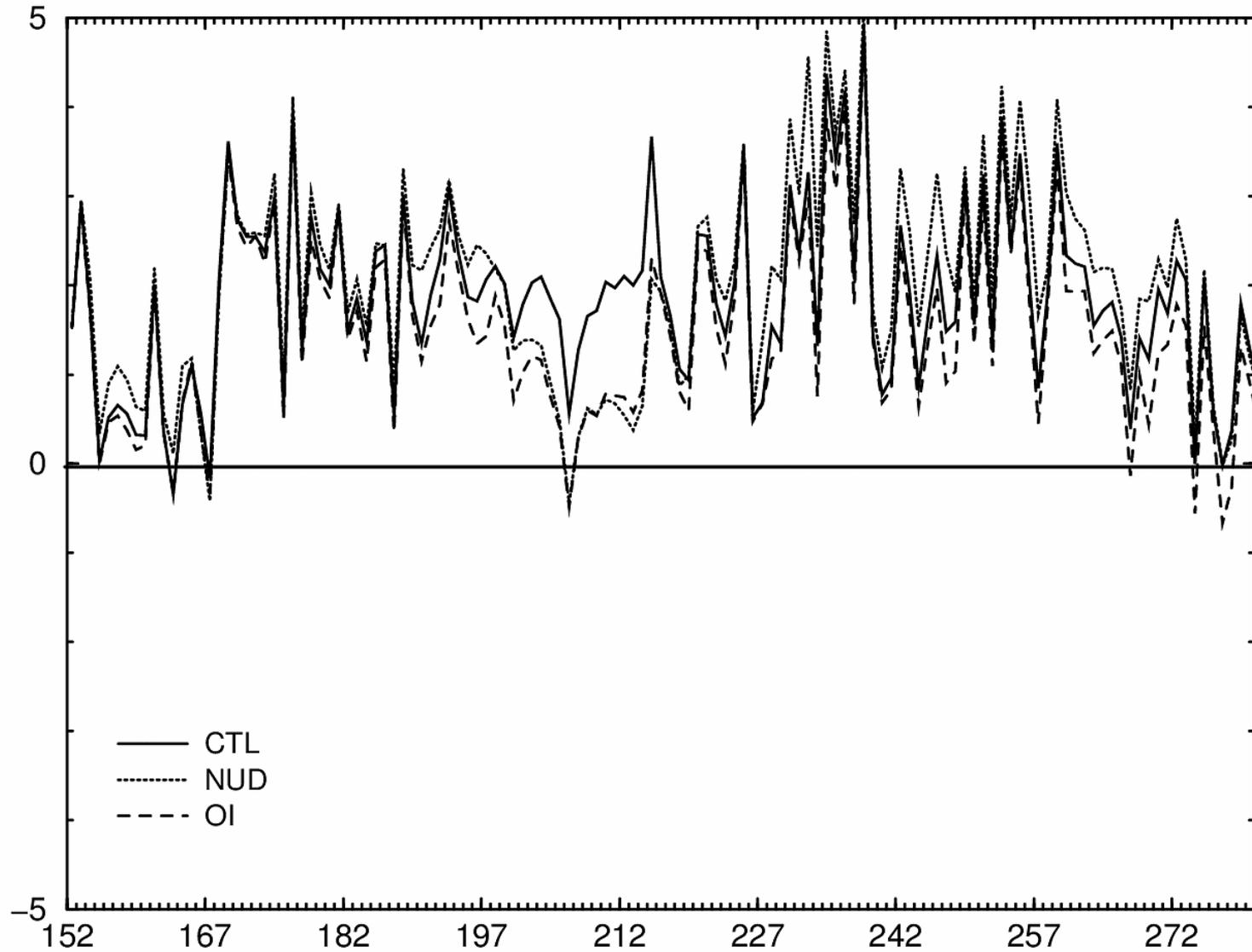
Figure 3: Volumetric soil moisture increments (%) every 6 hours produced by the unperturbed analysis experiments between day 172 and day 182 with: a) nudging, b) OI. Precipitation (*mm*) accumulated over 6 hour intervals is shown by the shaded curve.

DAILY MEAN 2M SPECIFIC HUMIDITY ERROR (KG/KG) UNPERTURBED [1/06/87-9/10/87]



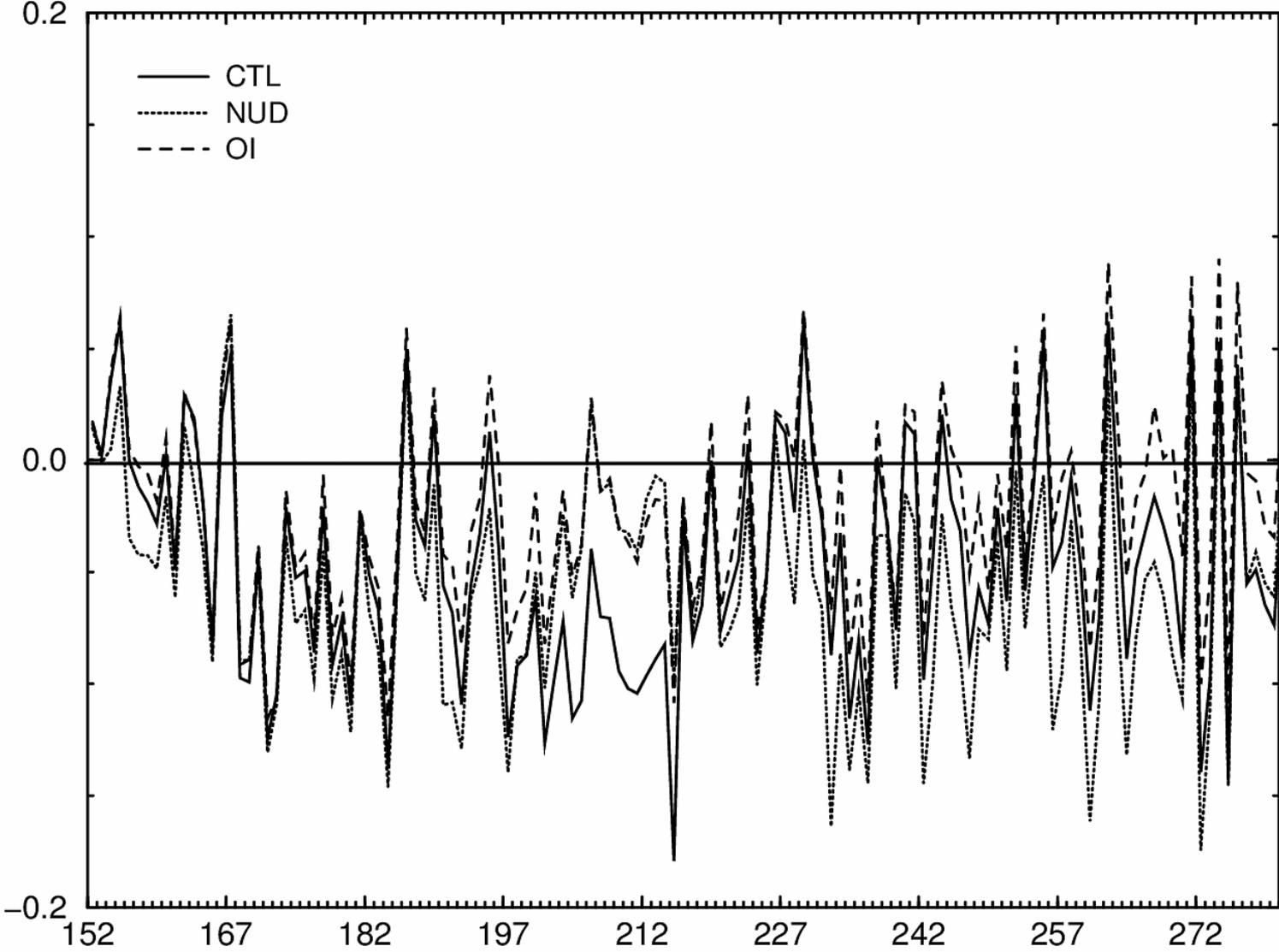
DAILY MEAN 2M TEMPERATURE ERROR (K)

UNPERTURBED [1/06/87-9/10/87]



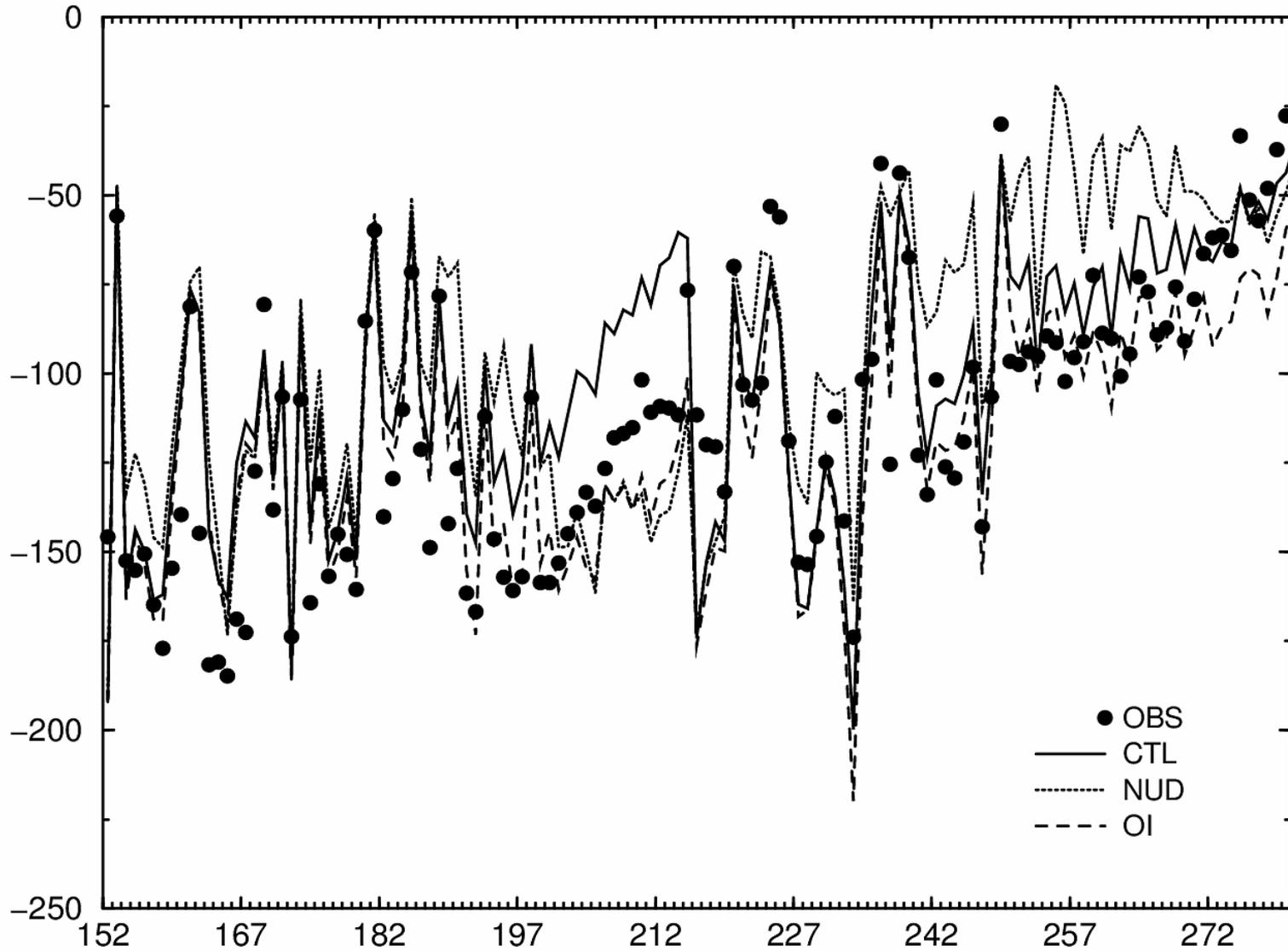
DAILY MEAN 2M RELATIVE HUMIDITY ERROR

UNPERTURBED [1/06/87-9/10/87]



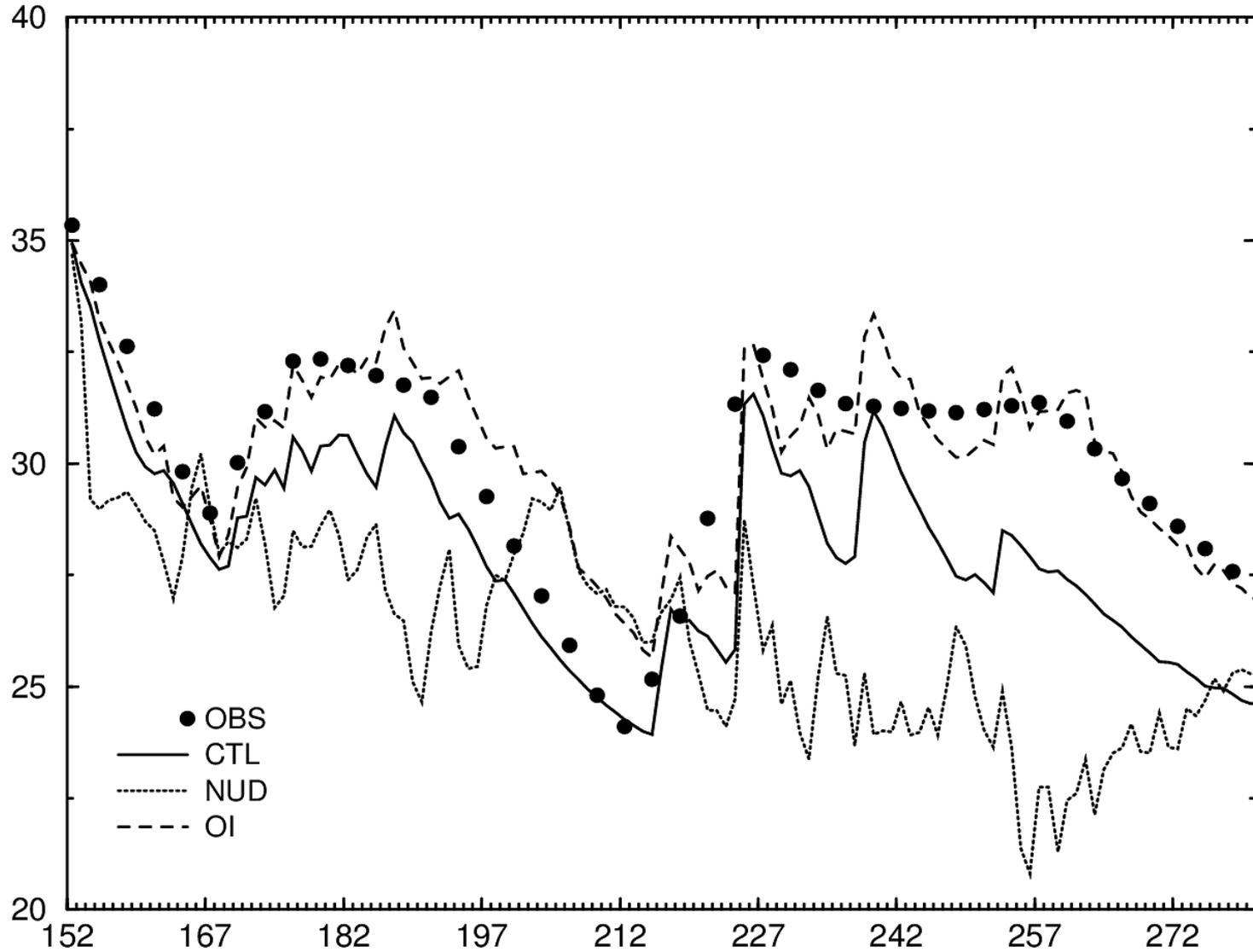
DAILY MEAN LATENT HEAT FLUX (W/M2)

UNPERTURBED [1/06/87-9/10/87]



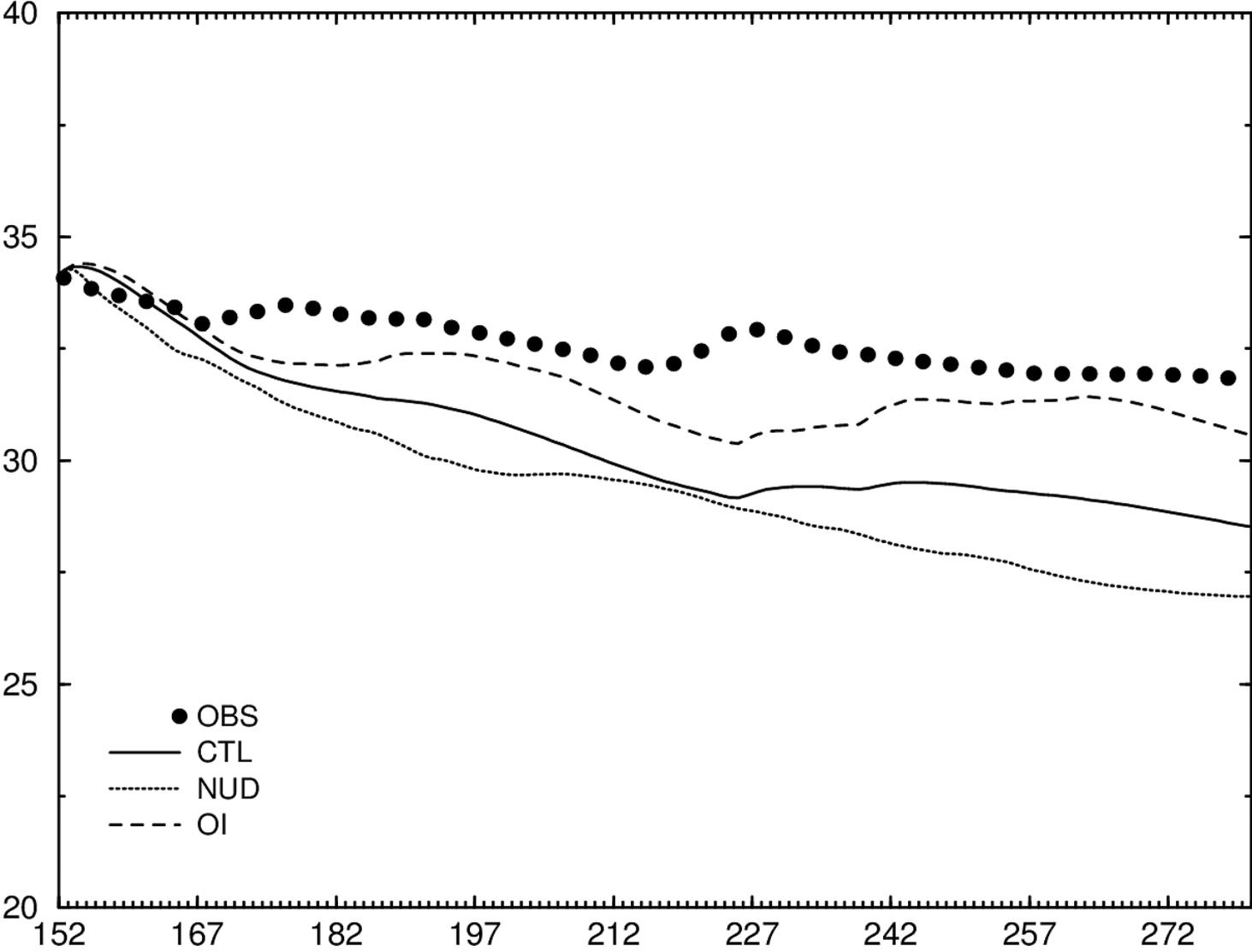
DAILY MEAN ROOT ZONE SOIL WETNESS (%)

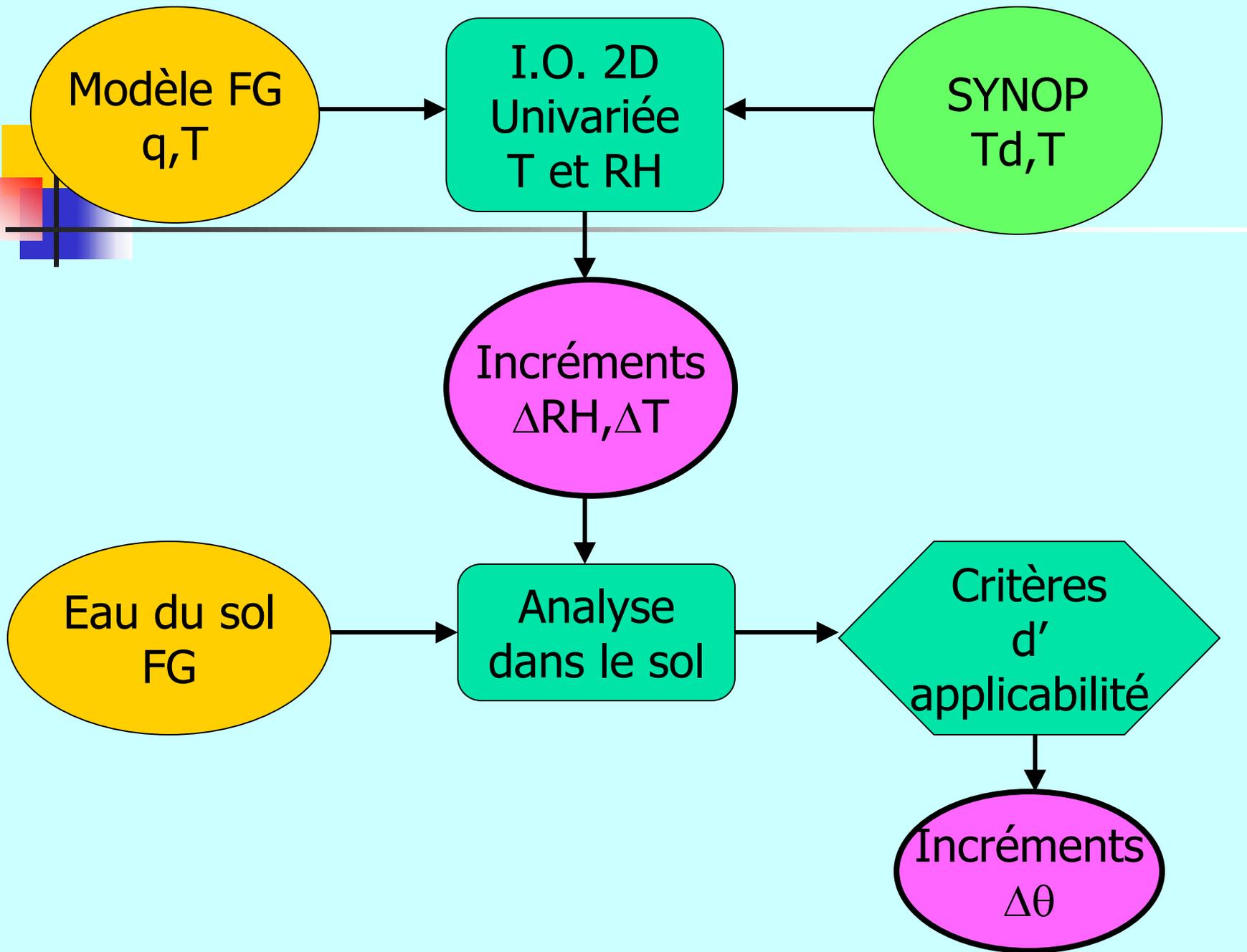
UNPERTURBED [1/06/87-9/10/87]



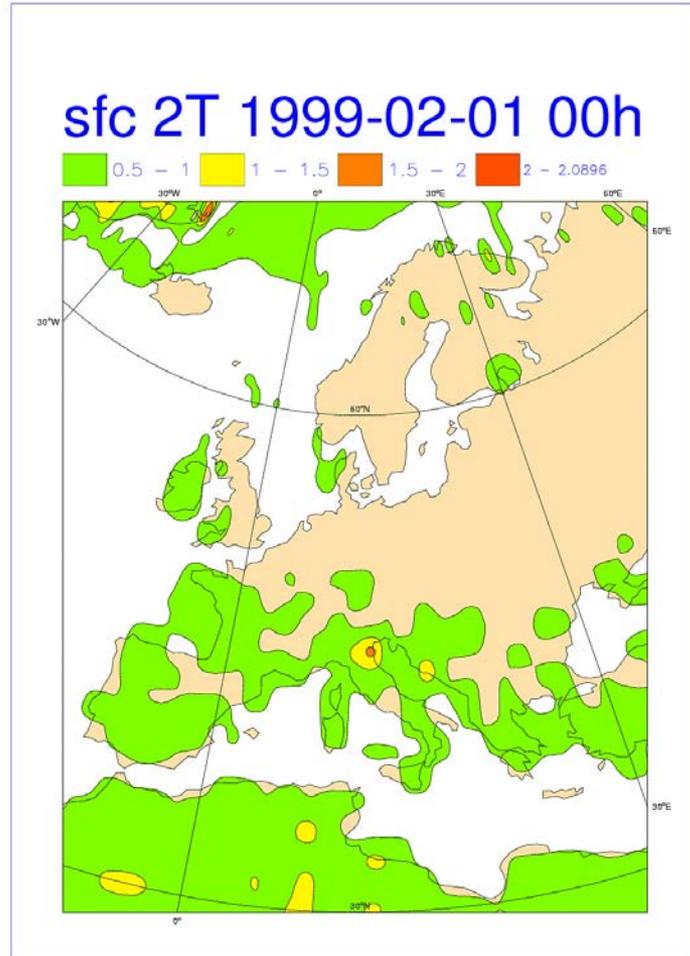
DAILY MEAN LEV4 SOIL WETNESS (%)

UNPERTURBED [1/06/87-9/10/87]

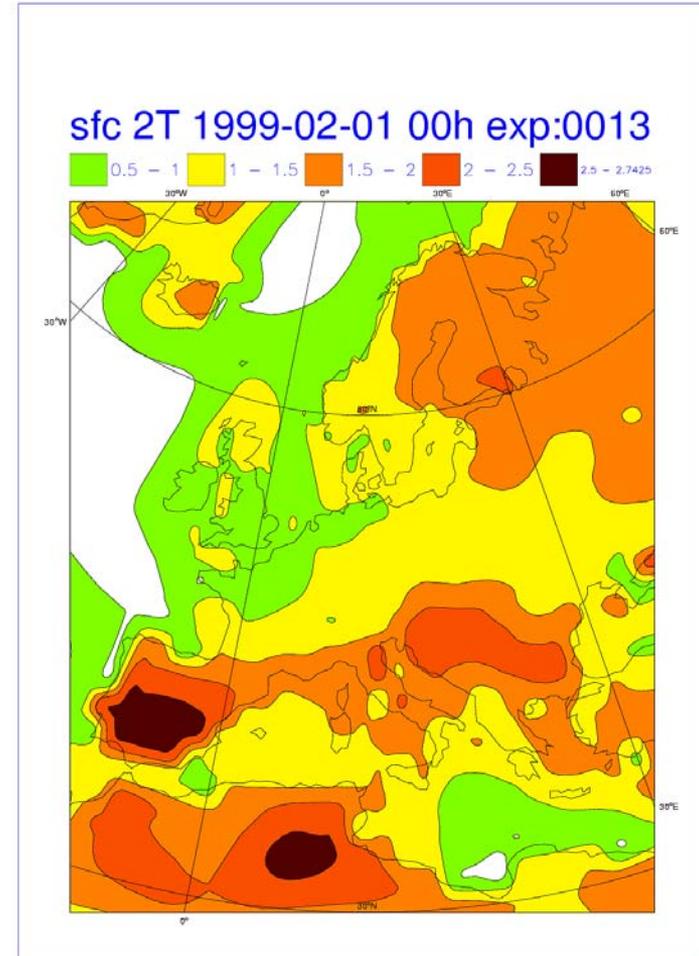




Moyenne quadratique des incréments d'analyse T2m (Février 1999)

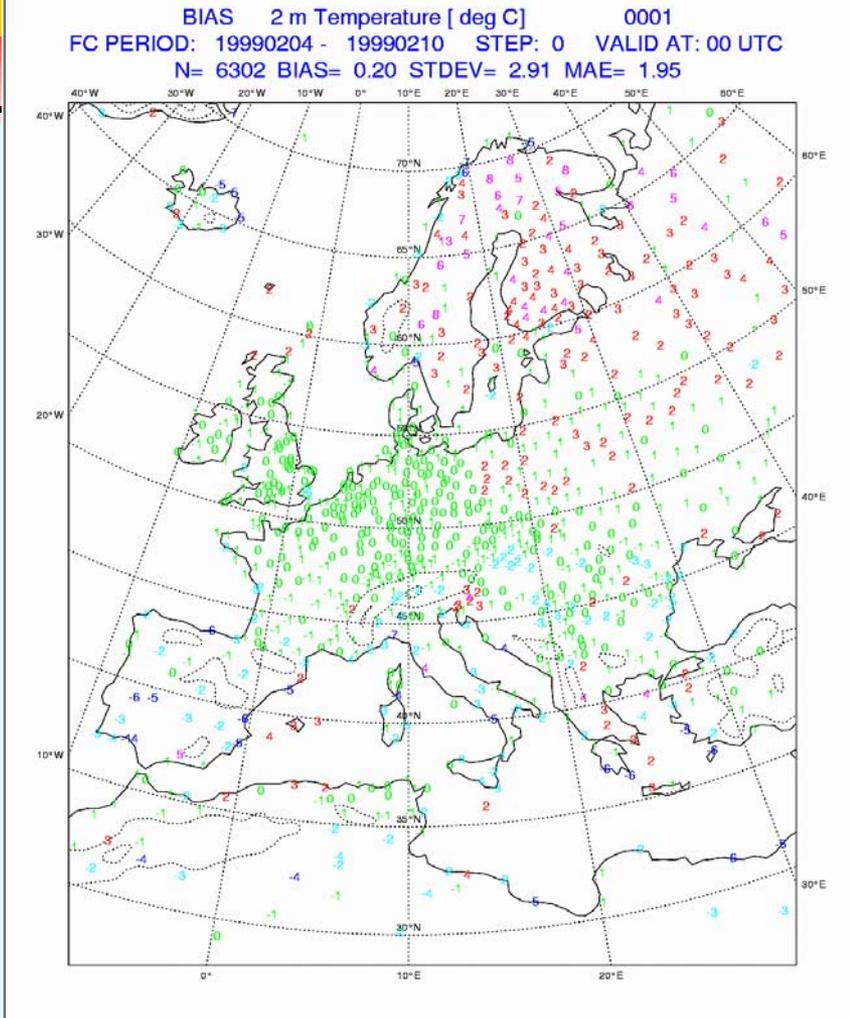


Ancien système

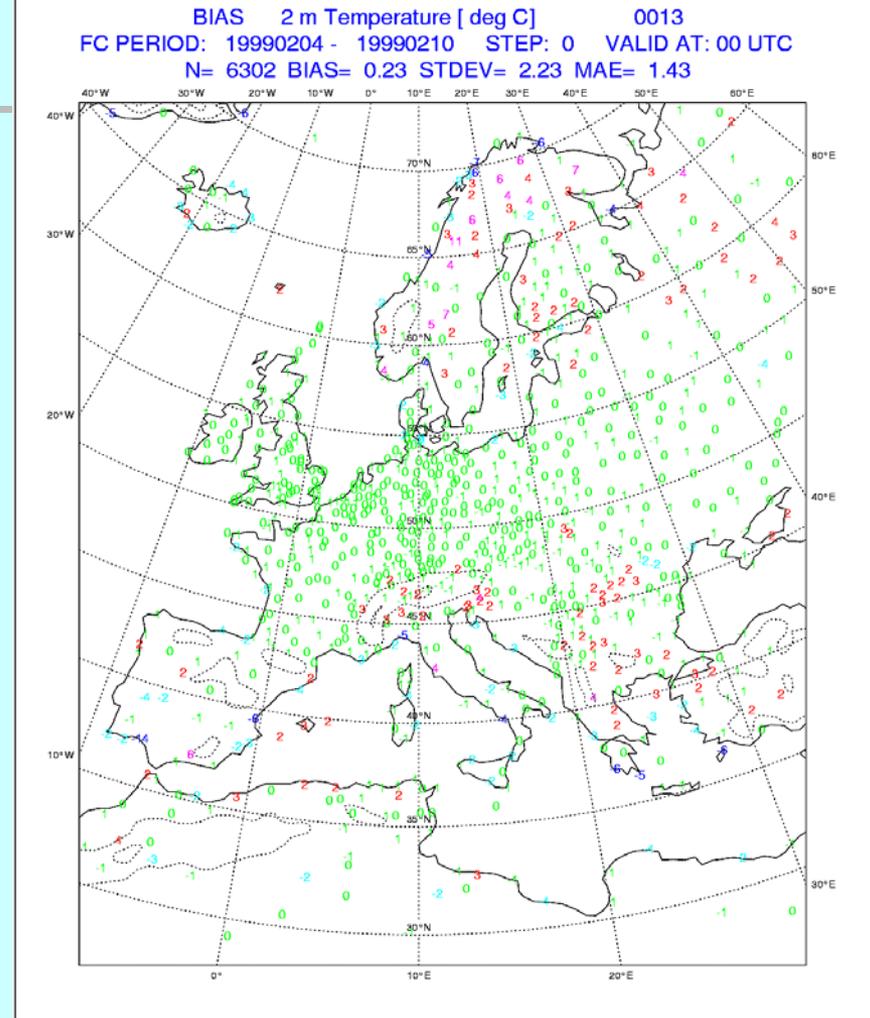


Nouveau système

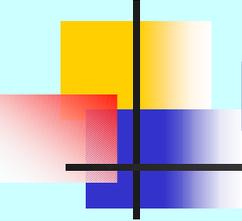
Différences entre analyse et observations de T2m (Fev 99)



Ancien système



Nouveau système



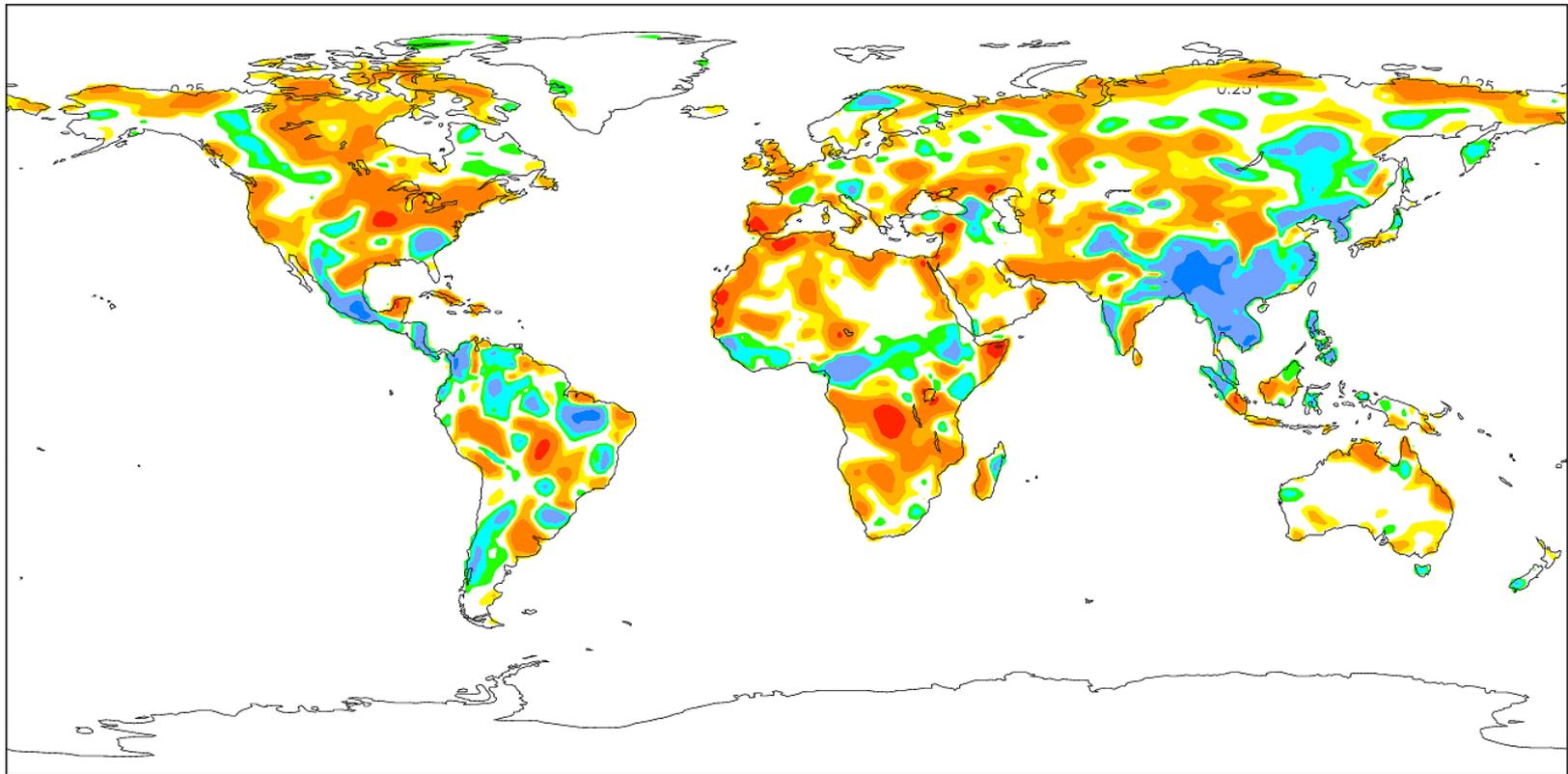
Faiblesses identifiées du nudging

- Diagnostiques effectués par A. Betts dans la réanalyse ERA15 (FIFE87 + Bassin de l'Arkansas-Red River)
 - Corrections de l'eau du sol = terme important du bilan hydrique global
 - Cycle diurne marqué des incréments (négatifs en début de journée / positifs en fin de journée)
 - Cycle saisonnier marqué des incréments (négatifs en hiver / positifs en été)

Incréments moyens (Août 87) Nudging

MEAN SOIL MOISTURE INCREMENTS (mm/day)

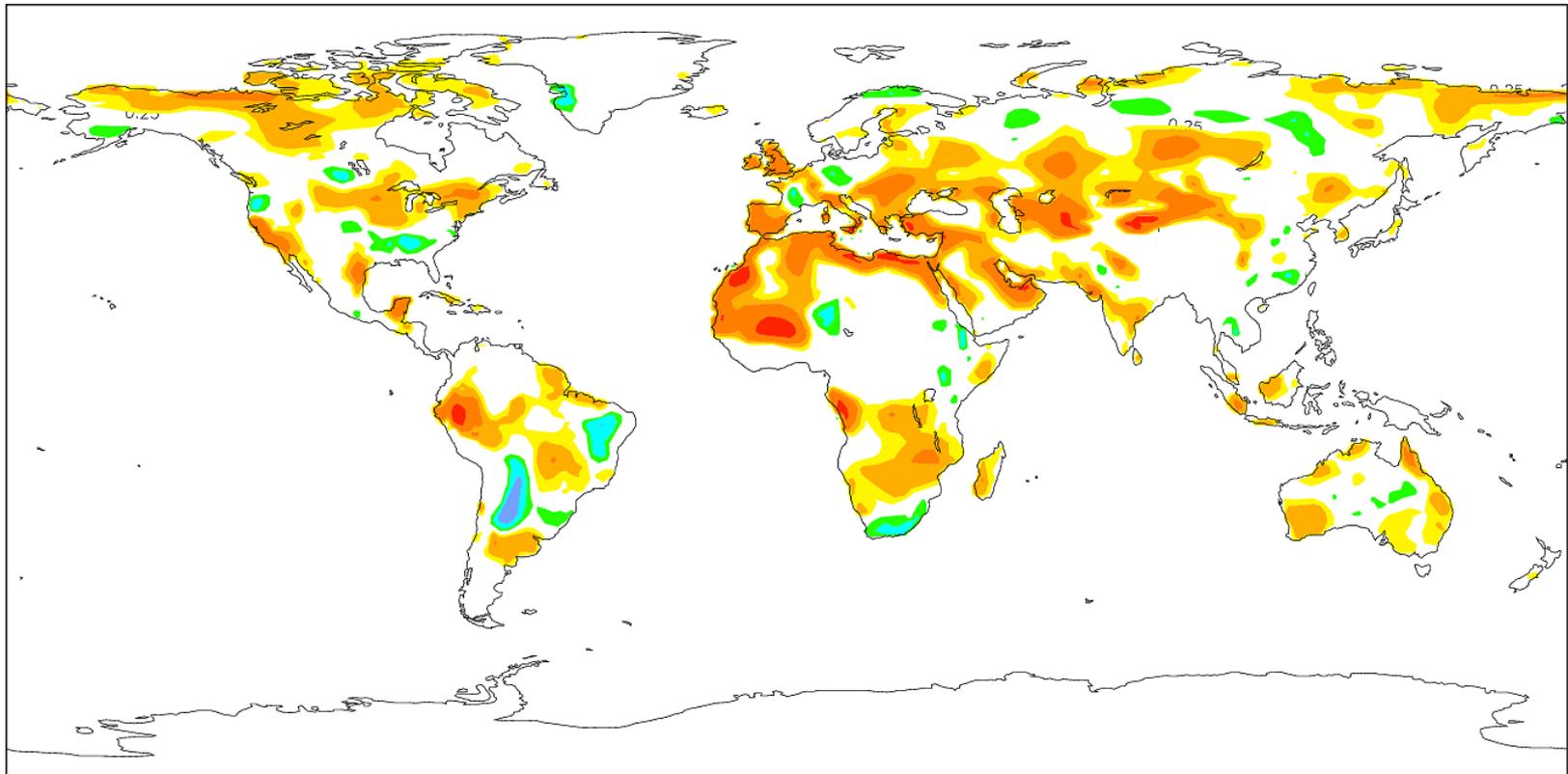
August 1987 (Nudging)



Incréments moyens (Août 87) O.I.

MEAN SOIL MOISTURE INCREMENTS (mm/day)

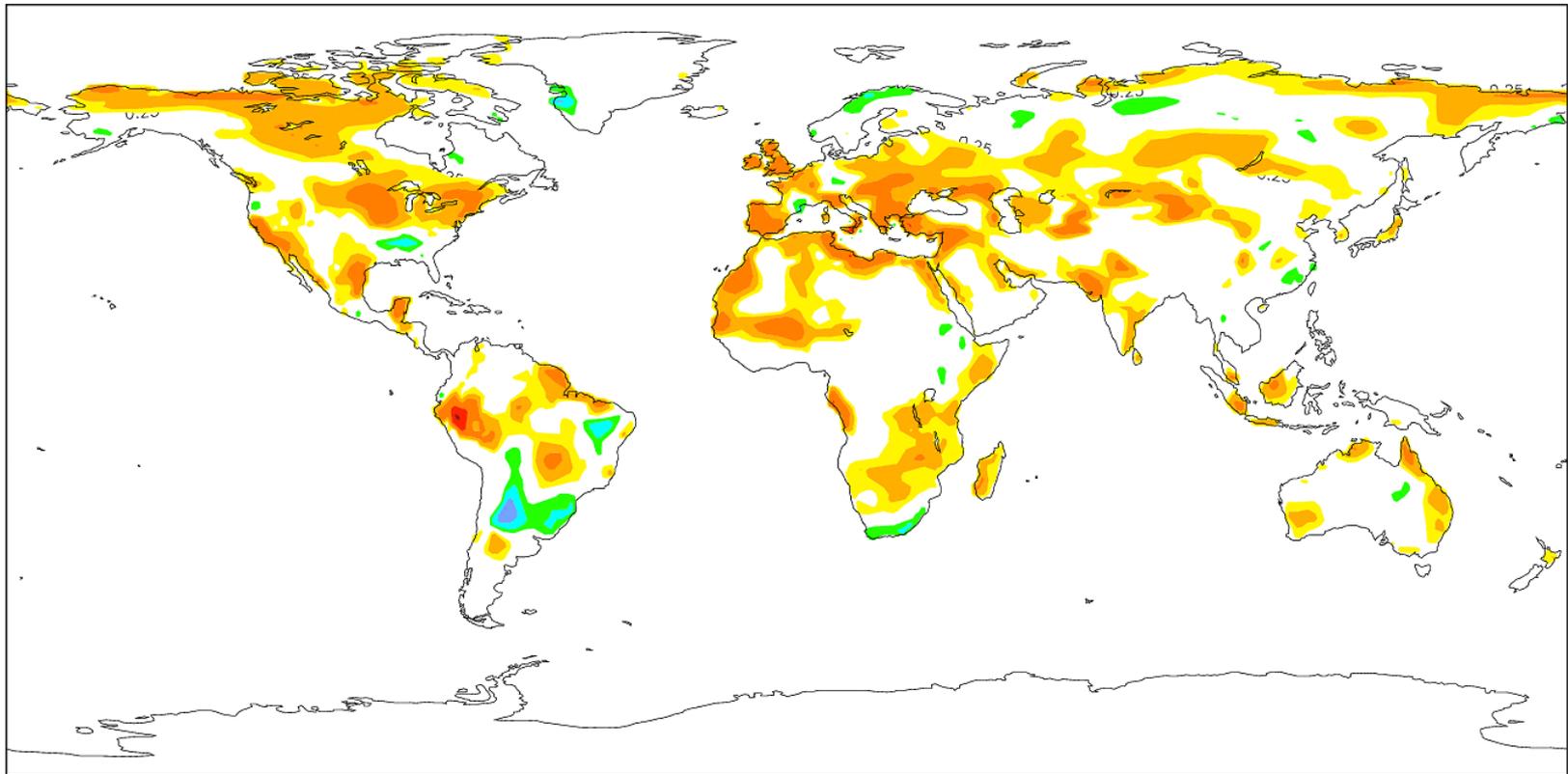
August 1987 (OI)



Incréments moyens (Août 87) O.I. + new physics

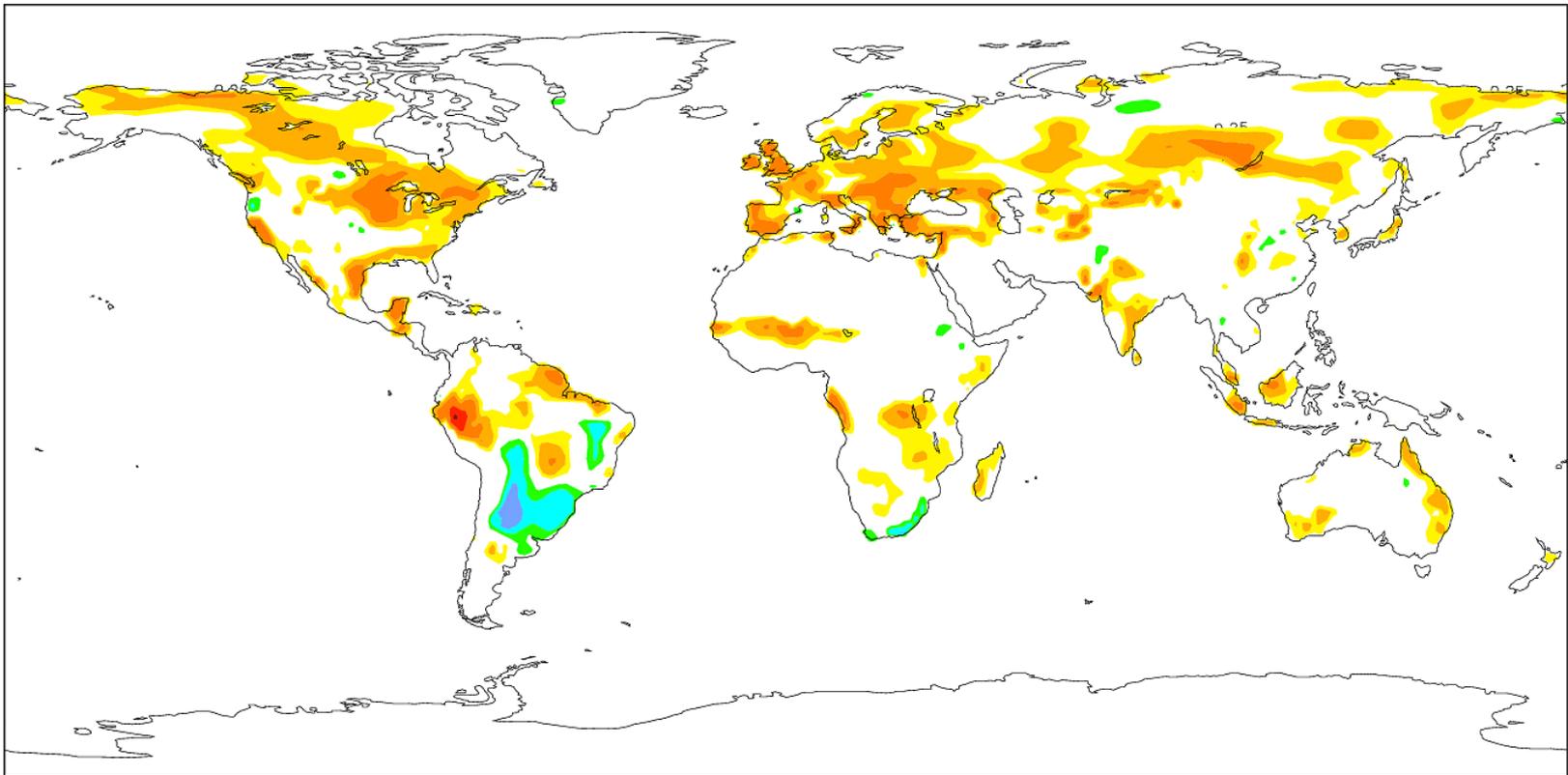
MEAN SOIL MOISTURE INCREMENTS (mm/day)

August 1987 (OI-CY21r4)



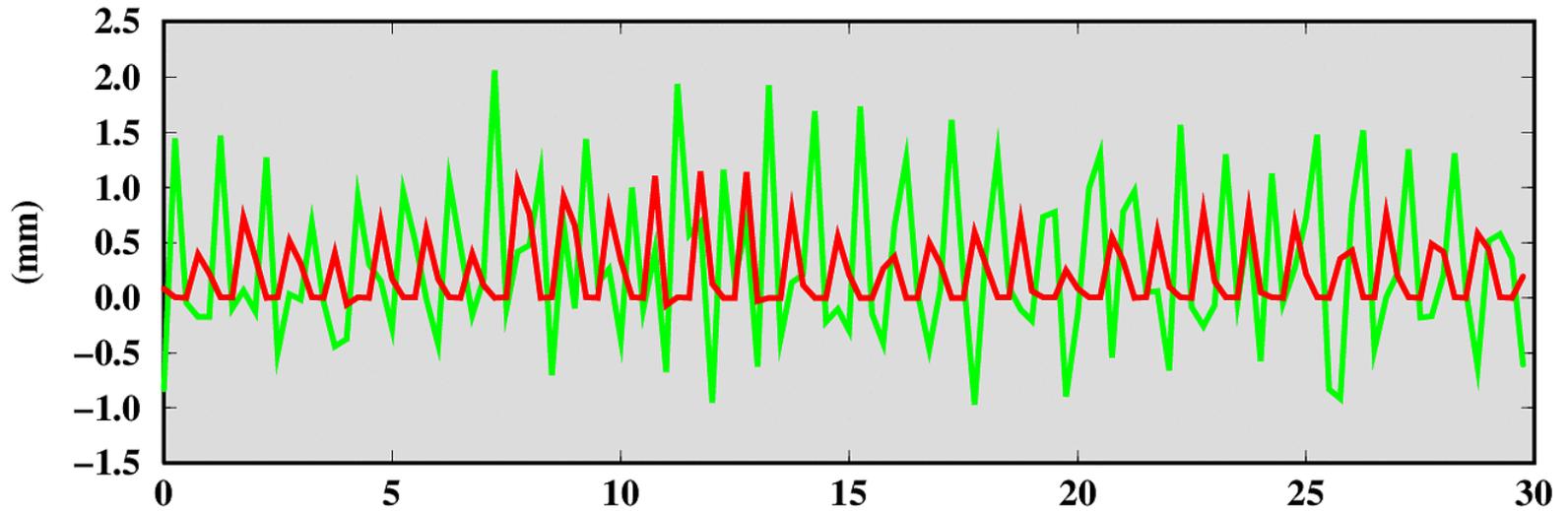
MEAN SOIL MOISTURE INCREMENTS (mm/day)

August 1987 (OI-CY21r4+Tiles)



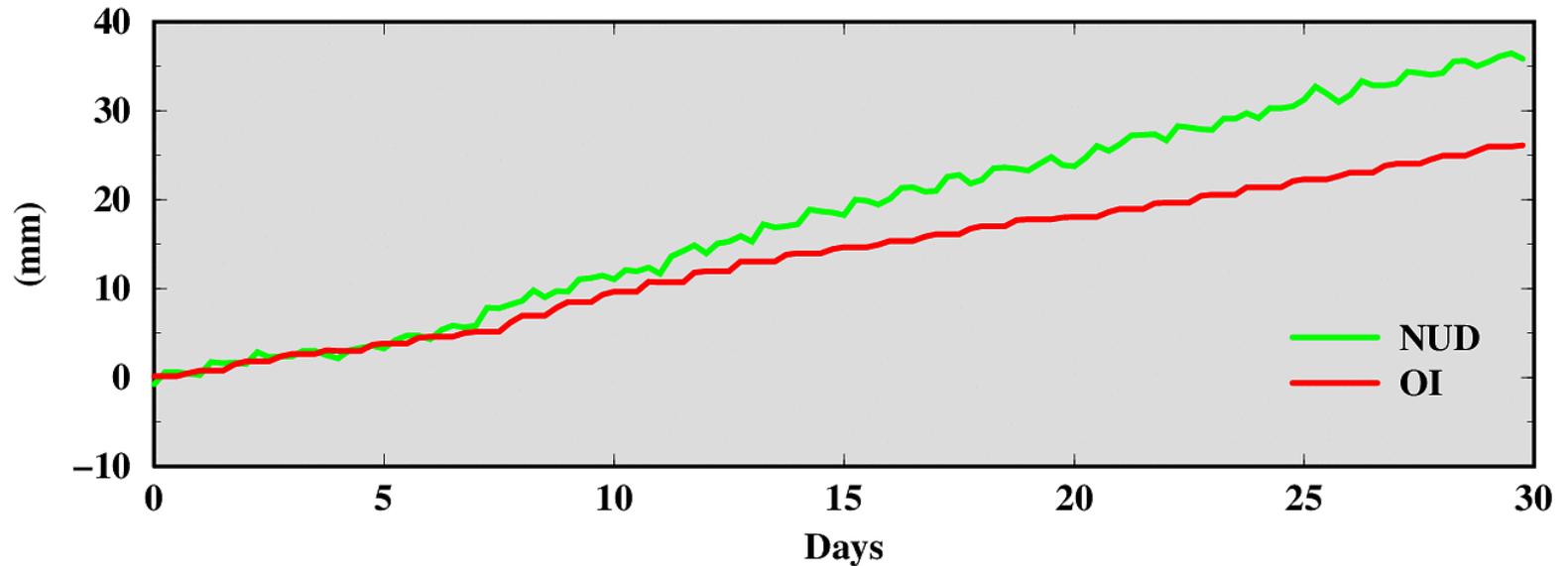
Soil moisture increments

USA (June 1988)



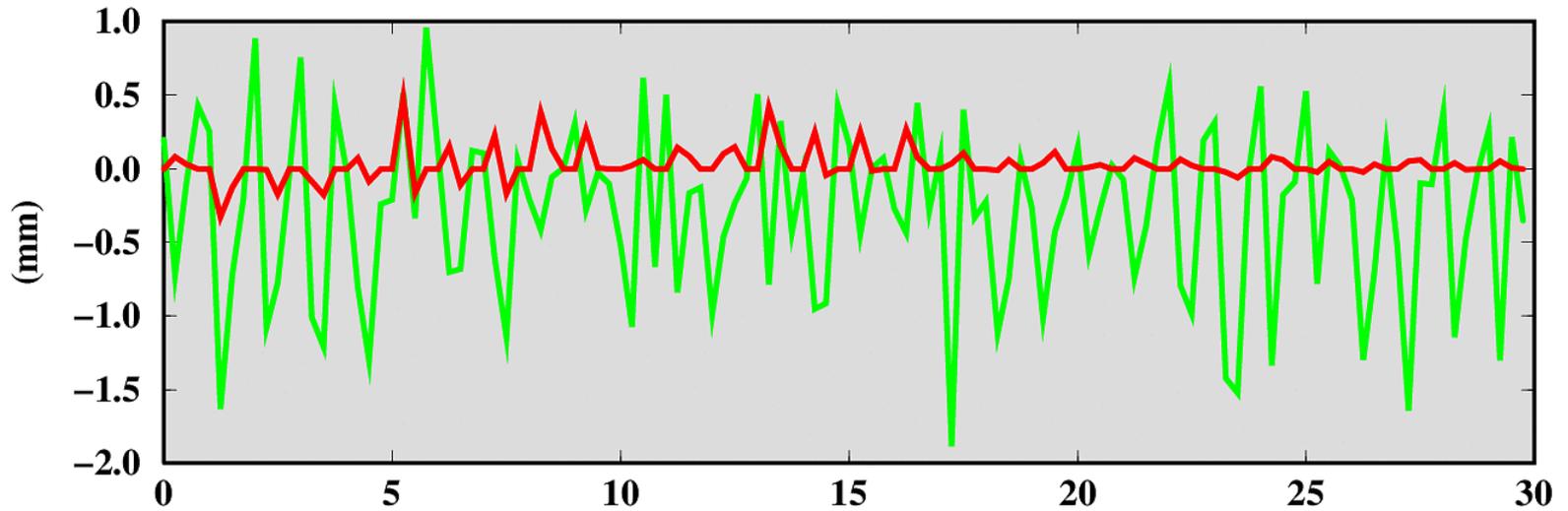
Soil moisture accumulated increments

USA (June 1988)



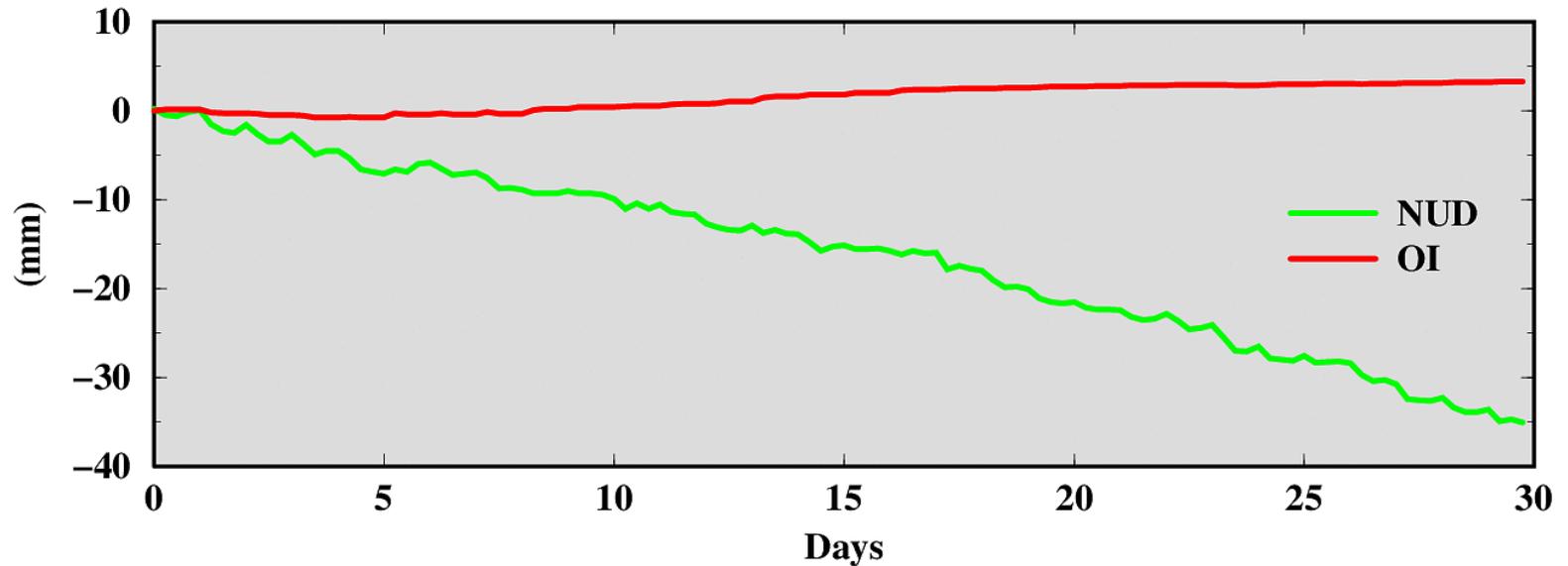
Soil moisture increments

South East Asia (June 1988)



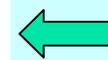
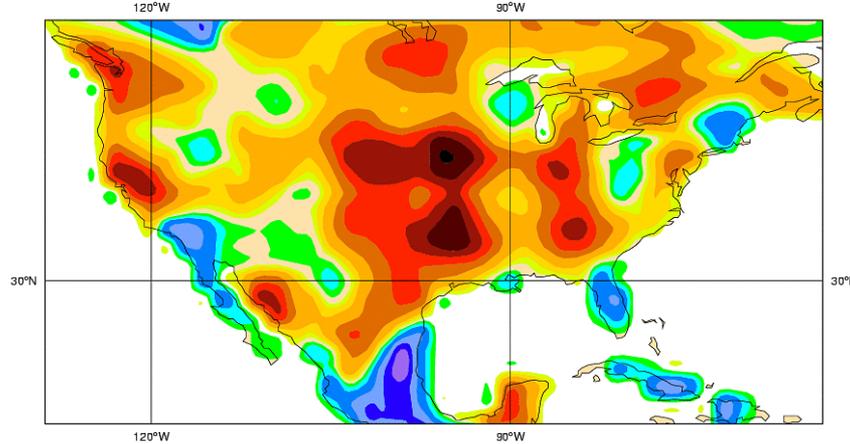
Soil moisture accumulated increments

South East Asia (June 1988)



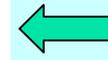
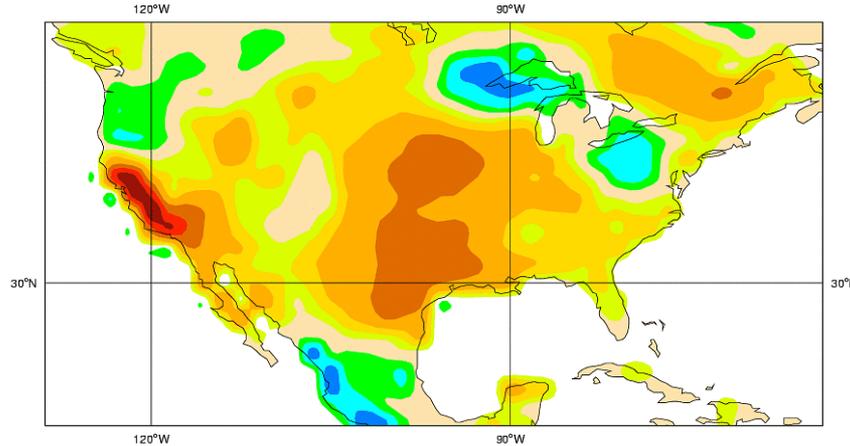
Différence d'incrément moyens (en mm) (Juillet 87-Janvier 88)

Soil moisture increments in mm (July 1987 minus January 1988) [Nudging scheme]

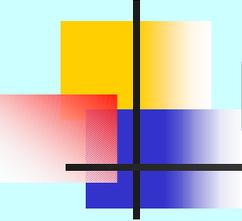


Nudging

Soil moisture increments in mm (July 1987 minus January 1988) [OI scheme]

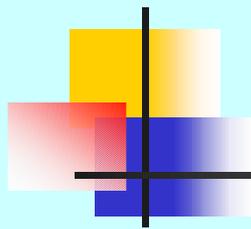


Interpolation
optimale



L'analyse de neige

- Juin 2000 : introduction d'un nouveau schéma de surface TESSEL incluant une description plus réaliste du manteau neigeux (bilan énergétique propre, densité et albedo comme variables pronostiques)
- Révision de l'analyse de neige afin d'inclure de l'information "modele" dans l'ébauche



Observations
Snow depth
SYNOP

Snowfall analysis
+
Melting formula

Constant
Snow
density

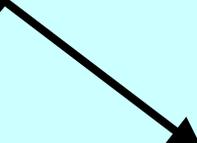
Observations
Snow water
equivalent

First-guess
Snow water
equivalent

Old snow
climatology

Cressman analysis

Analysis
Snow water equivalent



Nouvelle analyse de neige

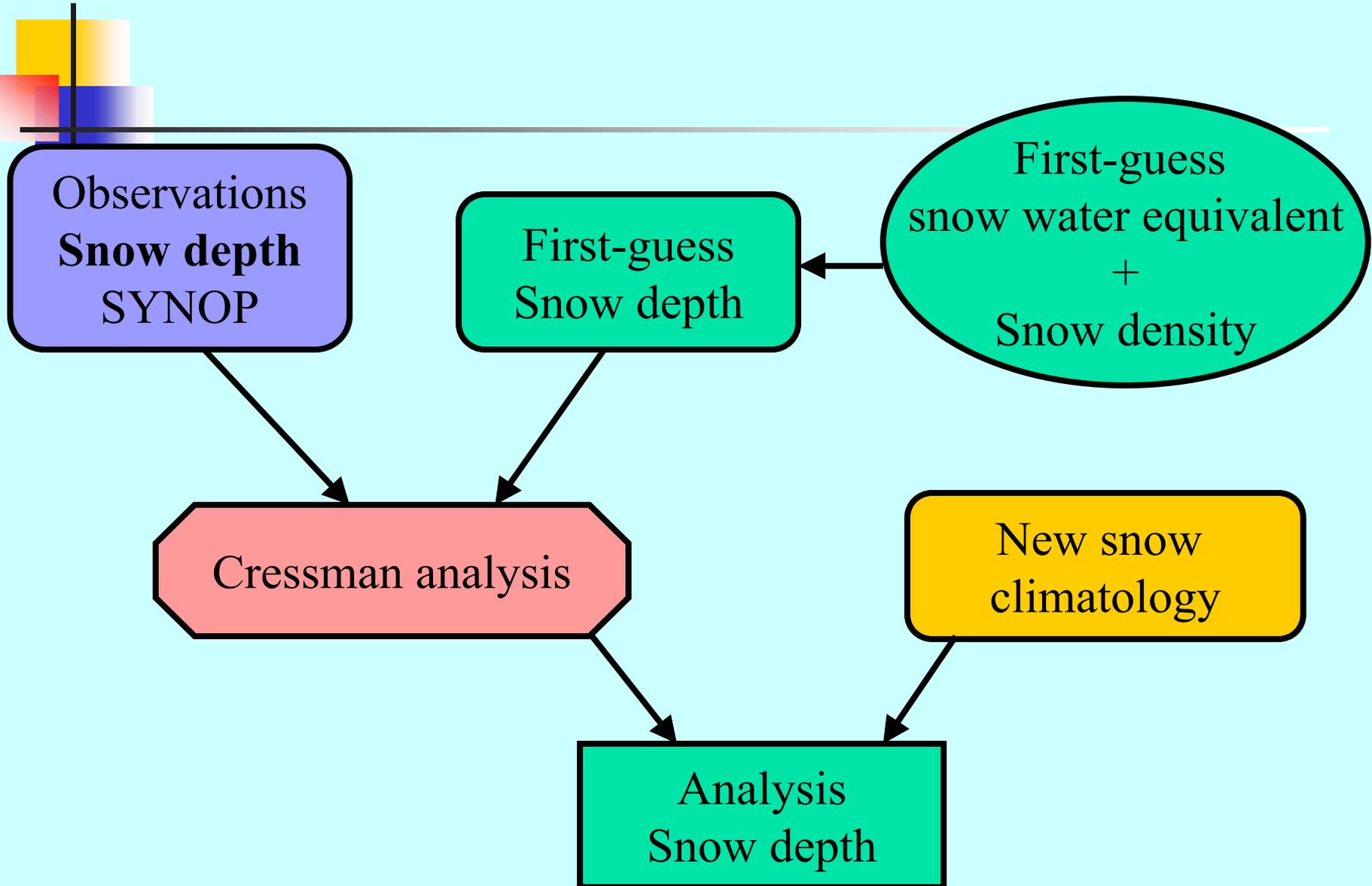
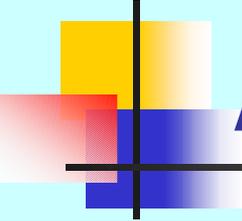


Table 1: Comparative features of snow analysis schemes at ECMWF and CMC

Features	Old ECMWF scheme	Revised ECMWF scheme	CMC scheme (Brasnett, 1998)
Method	Cressman analysis	Cressman analysis	Optimum interpolation
Horizontal structure function	Radius of influence : 250 km	Radius of influence : 250 km	Horizontal length scale : 120 km
Vertical structure function	Maximum influence distance : 300 m (if Z_obs < Z_mod and melting)	Maximum influence distance: 300 m (if Z_obs < Z_mod and melting)	Vertical length scale : 800 m
Observations	SYNOP Snowfall, snowdepth, T2m	SYNOP Snow depth	SYNOP Snow depth, T2m
Climatology	Brankovic and Van Maanen (1985) 5x5 Degrees	USAF 1x1 Degrees	None
Snowfall	Cressman analysis from SYNOP	Model first-guess (6-h forecast)	Model first-guess
Snow density	250 kg/m3	Model first-guess (6-h forecast) Versegby (1991) 100 - 300 kg/m3	Versegby (1991) 100 - 300 kg/m3 Increase during snowmelt (up to 550 kg/m3)
Melting	$0.025 \times (T2m - T00) ^ 3$ (mm of water equivalent per 6 hour) using T2m from model first-guess	Model first-guess (6-h forecast)	$0.9 \times (T2m - T00)$ (mm of water equivalent per 6 hour) using T2m from screen level analysis
Quality controls	H_obs < 140 cm if T_obs < 10 C H_obs < 70 cm if T_obs > 10 C abs (H_obs - H_bg) < 50 cm abs (Z_obs - Z_mod) < 500 m 0.04 cm < H_ana < 140 cm	H_obs < 140 cm if T_obs < 10 C H_obs < 70 cm if T_obs > 10 C abs (H_obs - H_bg) < 50 cm abs (Z_obs - Z_mod) < 500 m 0.04 cm < H_ana < 140 cm	H_persistence = 0 and T2m > 0 abs (H_obs - H_bg) < 55 cm H_obs - H_bg < 40 cm
Snow depth (first-guess)	(1-w_c)*(persistence+snowfall-melting) + w_c*climatology with w_c=0.02 (12.5-day time scale)	6-h forecast	persistence+snowfall-melting

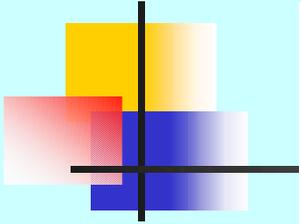


Analyse de la température dans le sol

- Corrections pour la première couche de sol (7cm) et pour la couche de neige :

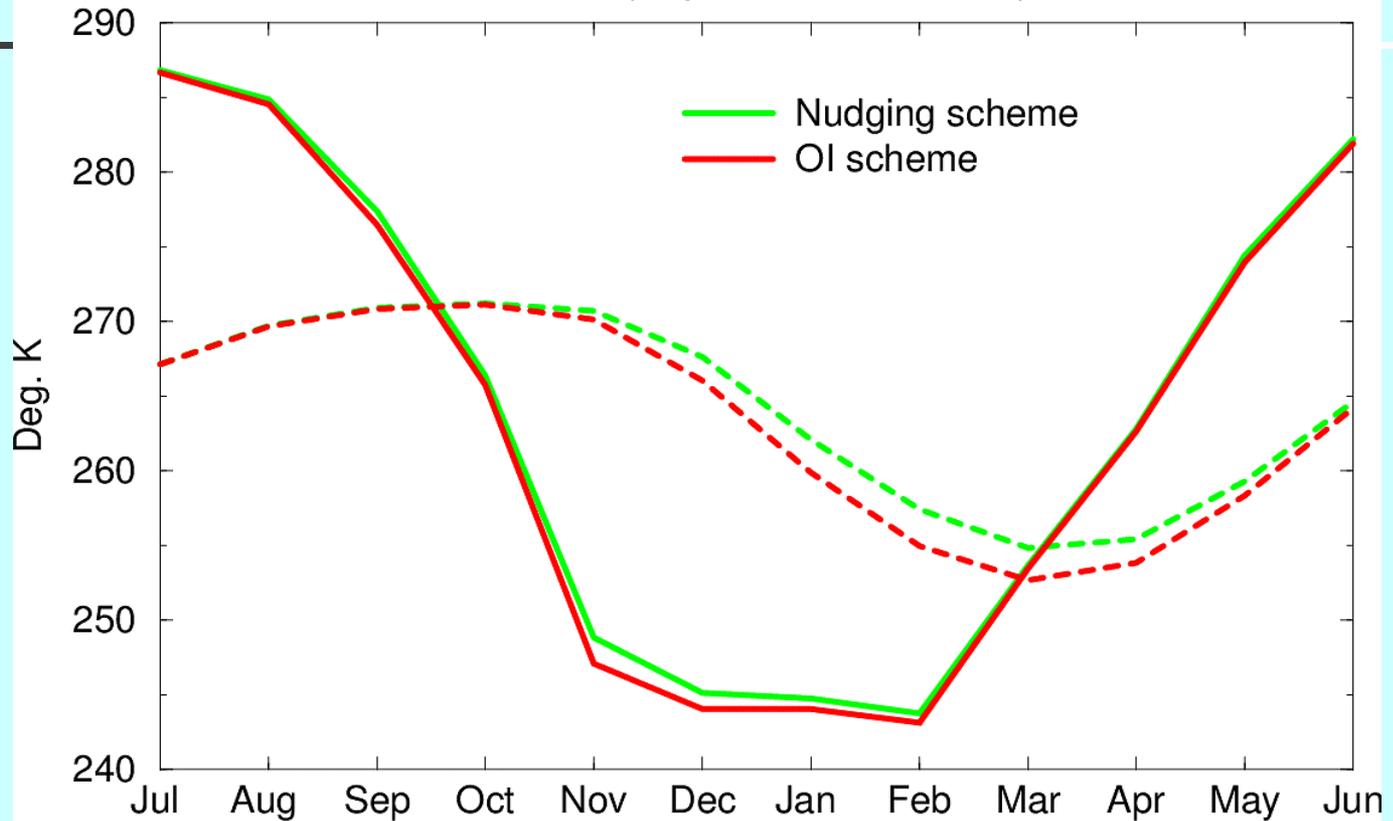
$$T_s^a - T_s^b = (1 - F_2) \Delta T_{2m}$$

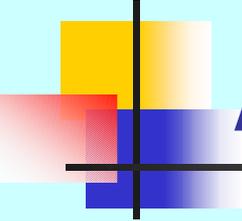
- Complémentarité de l'utilisation des erreurs de T à 2m pour corriger l'eau du sol ou la température



SOIL TEMPERATURE

Siberia (July 1987 – June 1988)





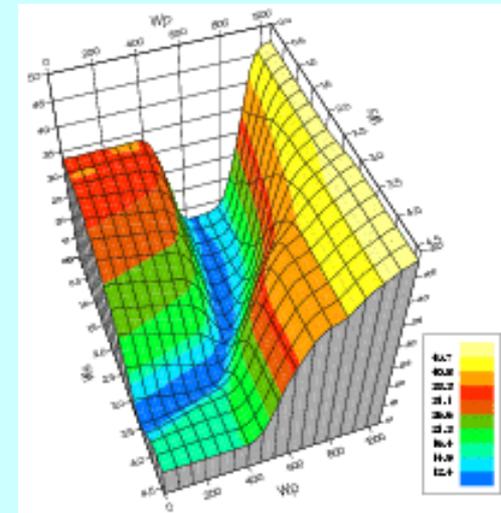
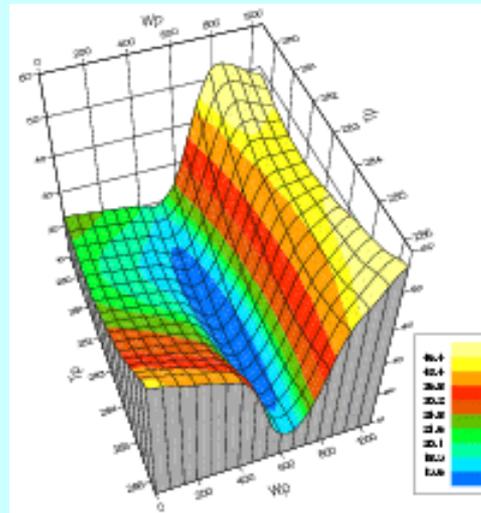
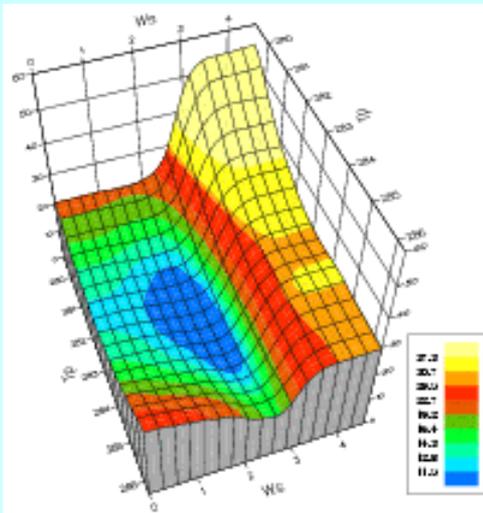
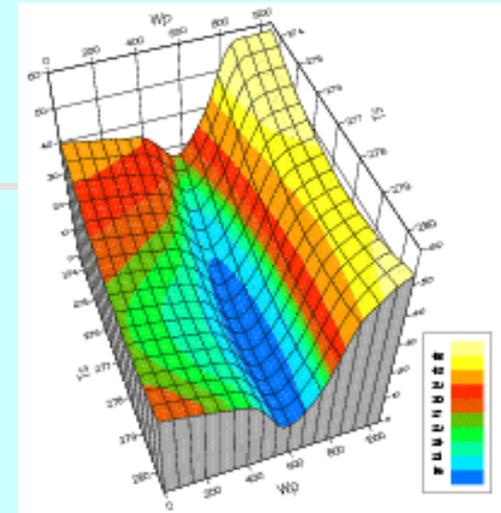
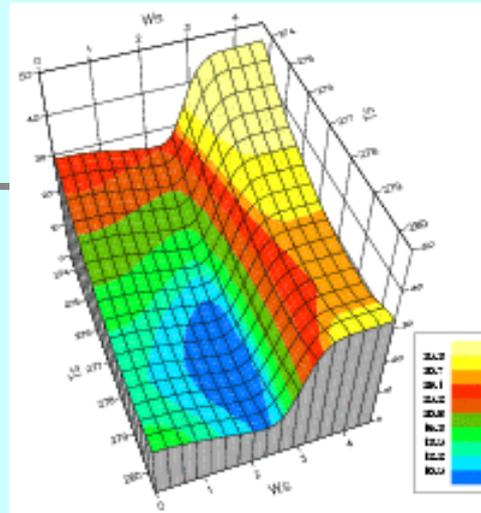
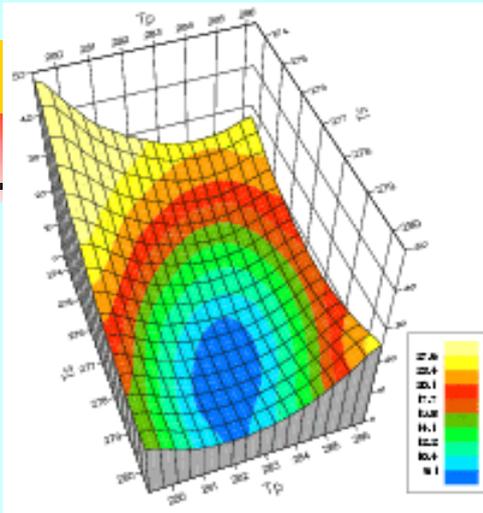
Assimilation variationnelle

- Minimisation d'une fonction-coût:

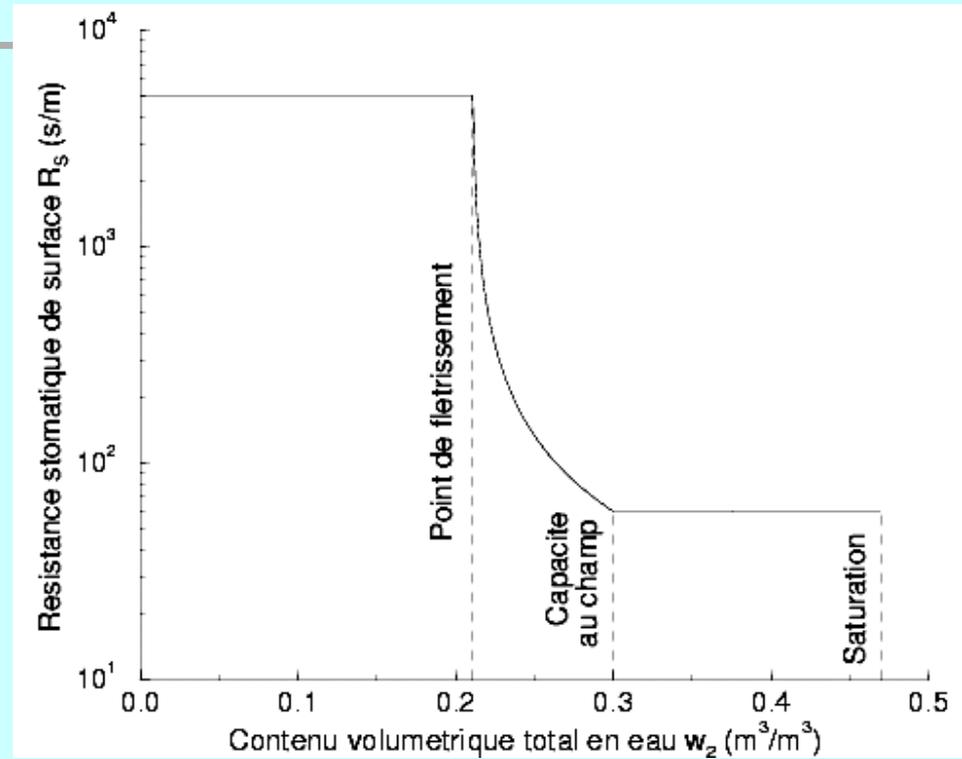
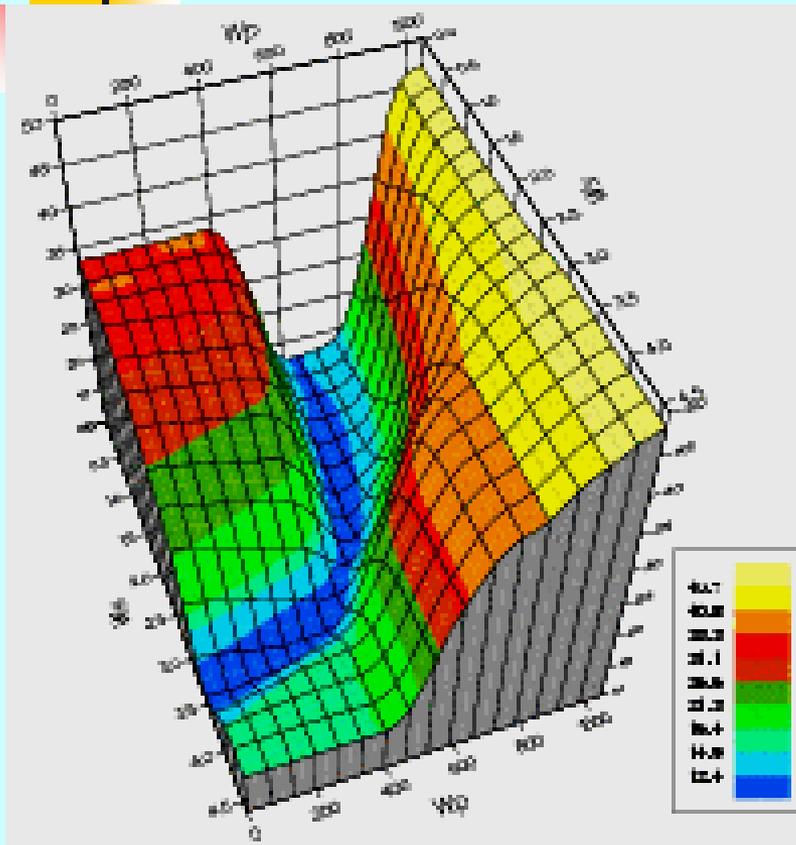
$$J(\theta) = \frac{1}{2} (\theta - \theta_b)^T B^{-1} (\theta - \theta_b) + \sum_i \left[\frac{T^i(\theta) - T^i_o}{\sigma^{T_o}} \right]^2 + \sum_i \left[\frac{RH^i(\theta) - RH^i_o}{\sigma^{RH_o}} \right]^2$$

- Etudes de faisabilité : Mahfouf (1991) [Jb=0], Bouyssel et al. (1998) [matrice B diagonale, inclusion de Ts, Tp dans la variable de contrôle], Rhodin et al. (1999), Hess (2001) [opérationnel au DWD]

Topologie du terme d'écart aux observations (Jo)



Topologie du terme d'écart aux observations (Jo)



Bouyssel *et al.* (1999)

Problèmes de convergence

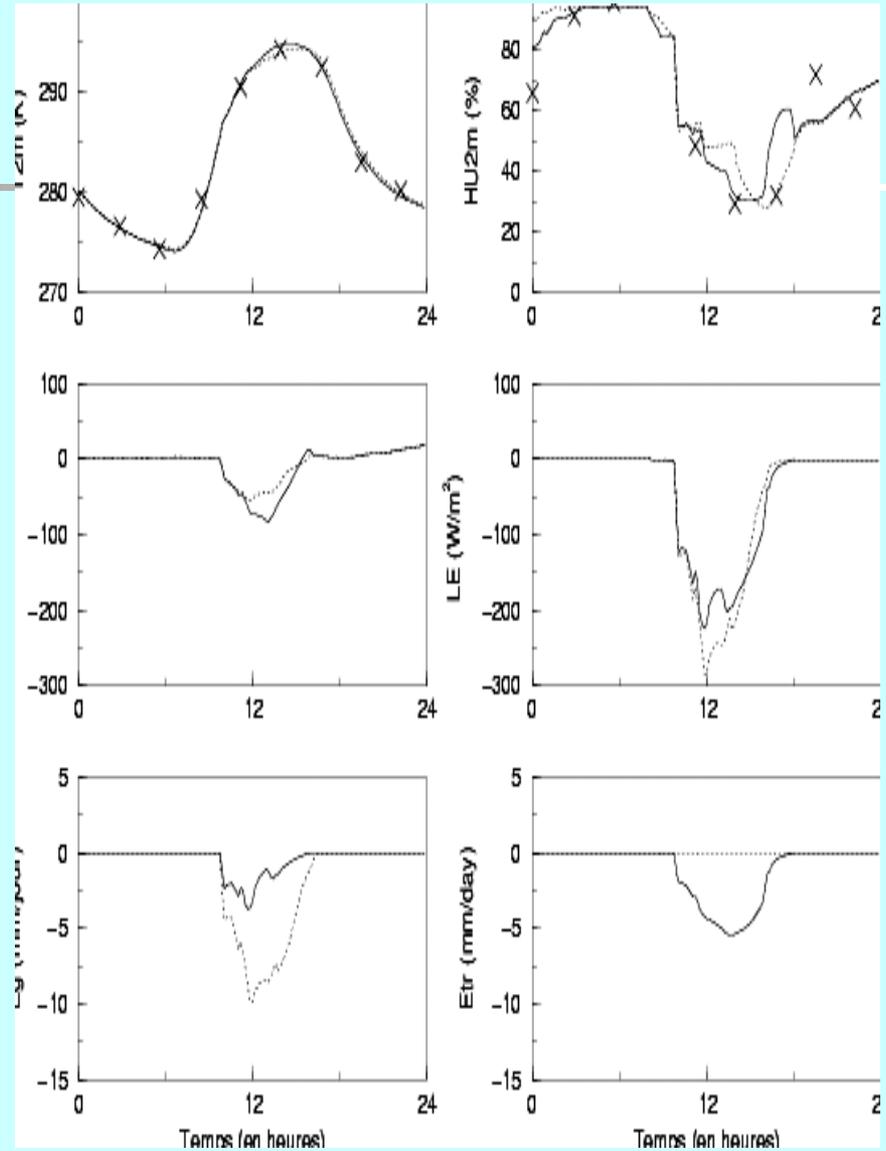
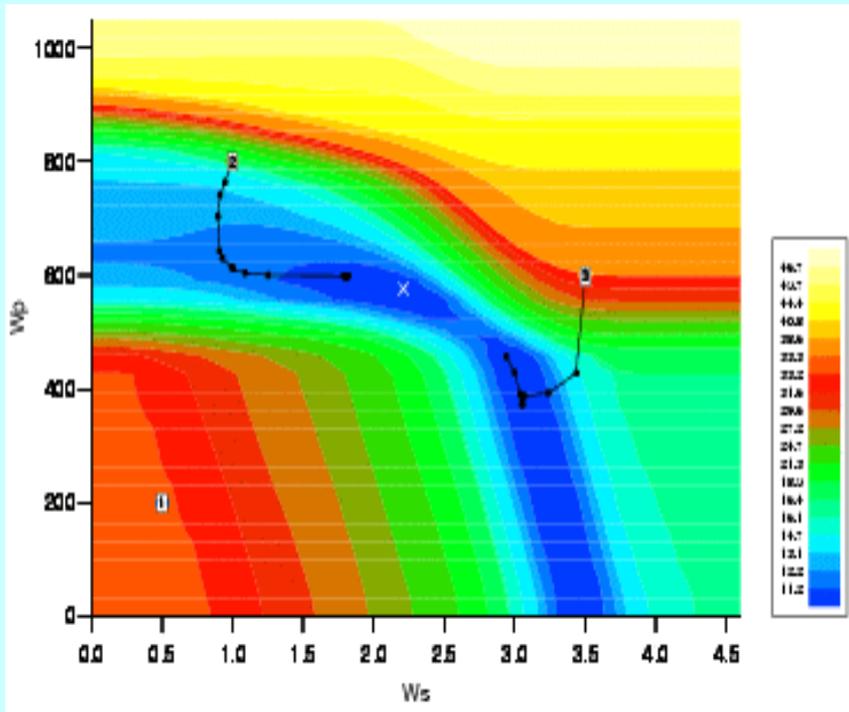
Situation anticyclonique

Obs simulées et bruitées (1° , 10%)

Fréquence des observations = 3h

Période d'assimilation = 24h

$J=J_0$



Contexte expérimental

< **Campagne expérimentale MUREX** : Météo-France, CESBIO, LTHE
Terrain en jachère situé dans le sud de la France (alt:240m)
3 années : 85, 86, 87

< **Mesures effectuées** :

- ⇒ Precip, Ra, Rg, H, G, P_s, T_{2m}, q_{2m}, V_{10m} 30 min
- ⇒ Humidité du sol profond (1.30m / 10cm) hebdomadaire
- ⇒ Humidité superficielle du sol (5cm / 1cm) 2 POI / 30 min
- ⇒ Température de surface à 1cm et infra-rouge 30 min

d_2	Profondeur du sol	1.35 m
p_{arg}	Pourcentage d'argile	27.7 %
p_{sab}	Pourcentage de sable	13.7 %
veg	Pourcentage de végétation	95 %
w_{wilt}	Teneur en eau au point de flétrissement	0.20 $m^3 m^{-3}$
w_{fc}	Teneur en eau à la capacité au champ	0.34 $m^3 m^{-3}$
w_{sat}	Teneur en eau à la saturation	0.48 $m^3 m^{-3}$
A	Albedo	20 %
ϵ_s	Emissivité	97 %
r_{smin}	Résistance stomatique minimale	50 sm^{-1}
LAI	Indice foliaire (paramètre observé)	$\sim 2.0 m^2 m^{-2}$
z_0	Longueur de rugosité dynamique (observé)	$\sim 0.04 m$
z_0/z_{0h}	Rapport des longueurs de rugosité	10
C_v	Coefficient thermique de la végétation	$4.10^{-5} Km^2 J^{-1}$

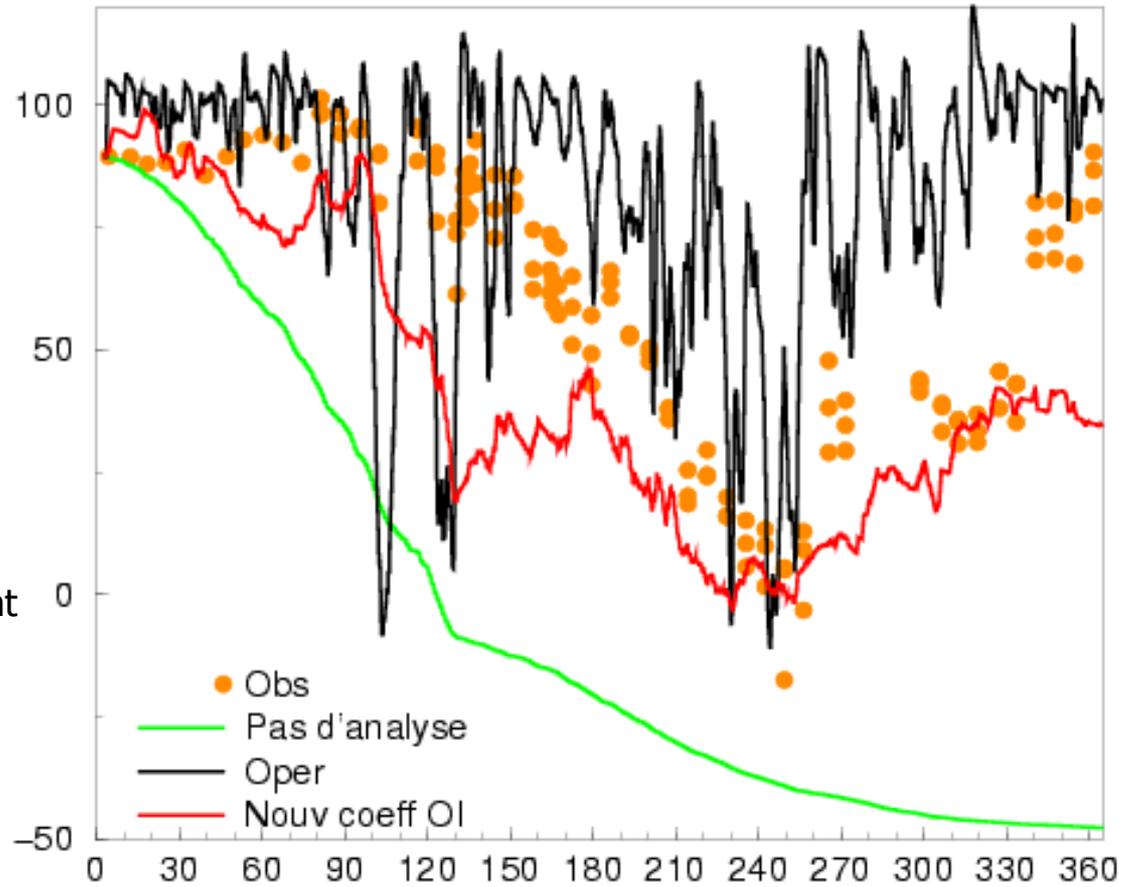


Observations réelles (MUREX): Interpolation Optimale

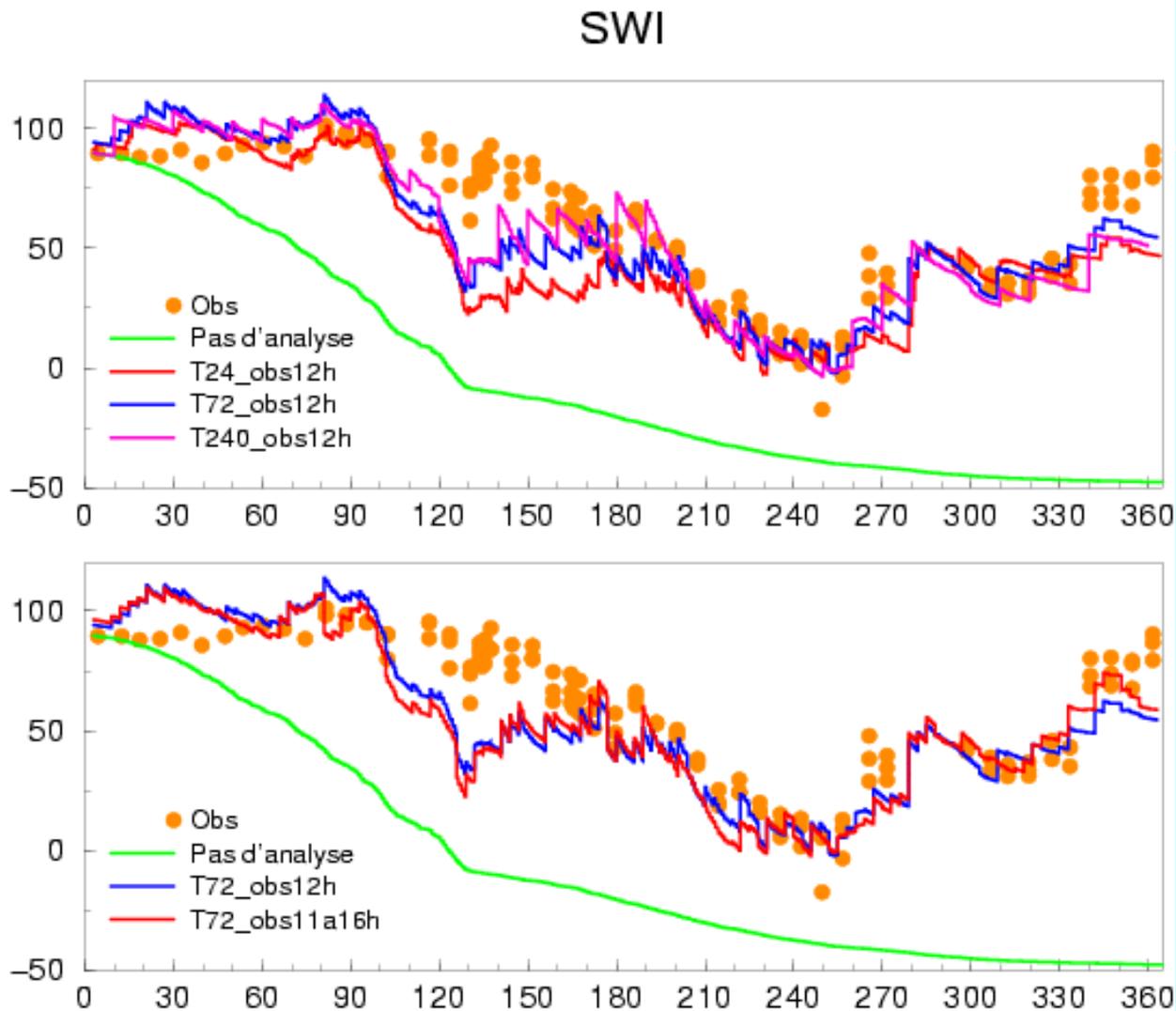
(SWI) Soil Wetness Index

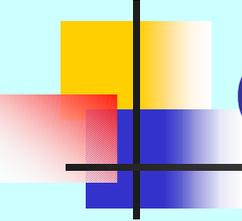
Capacité
au champ

Point de
fletrissement



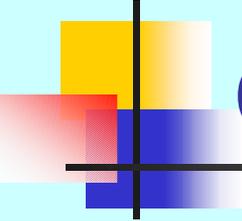
Observations réelles (MUREX): Analyse Variationnelle





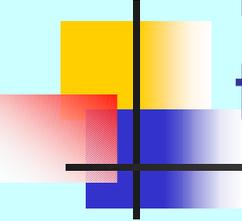
Conclusions

- Nécessité d'initialiser les variables dans le sol pour la prévision numérique (échelles de temps > 1 semaine)
- Approches opérationnelles : semi-empiriques (nudging, IO)
- Problème des biais dans le modèle atmosphérique (corrections de l'eau du sol pour de mauvaises raisons)
- Besoin de développer des méthodes plus optimales pour assimiler des types d'observations variés
- Difficultés : non-linearités des opérateurs d'observation
- Avantages : faible dimension de la variable de contrôle (problème séparable)



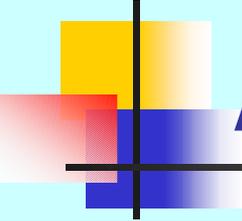
Challenges futurs

- Assimilation des radiances satellitaires (sondeurs IR) dans des canaux sensibles à la surface (caractérisation et modélisation de T_s)
- Assimilation de données micro-ondes basses fréquences (SMOS, HYDROS) sensibles à l'eau superficielle uniquement
- Utilisation de données satellites pour l'analyse de neige (couverture spatiale, contenu en eau équivalente)
- Validation de l'eau du sol des modèles atmosphériques (couplage avec des modèles hydrologiques pouvant simuler des débits mesurables)
- Assimilation de réflectances VIS/NIR caractérisant la biomasse (veg, LAI,...)



Devéloppements possibles à court terme à RPN

- Evaluation de l'IO utilisée pour le modèle global avec ISBA (amplitude des incréments)
- Estimation dynamique des coefficients optimaux (méthode de perturbations) et comparaison avec la méthode statique
- Mise en place d'une assimilation variationnelle (avec cyclage de B) dans la version off-line de ISBA + évaluation avec des observations simulées (eau du sol, température de surface)
- Définition d'une stratégie pour assimiler des observations à 2 mètres dans un système off-line (couplage du module sol avec la CLP)
- Collaborations avec CMC : amélioration de la spécification des champs géophysiques, utilisation de l'ébauche de hauteur de neige dans l'analyse.



Améliorations possibles (1)

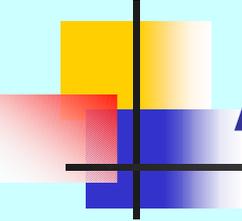
- Amélioration de l'interpolation optimale (estimation dynamique des coefficients optimaux):

$$\theta_a - \theta_b = \mathbf{B}\mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} [\mathbf{Y}_o - \mathbf{H}(\theta)]$$

- Possibilité d'estimer H en différences finies (Hess, 2001):

$$\mathbf{H}(\theta) = \left[\frac{\partial \mathbf{T}^i(\theta)}{\partial \theta}, \frac{\partial \mathbf{R}\mathbf{H}^i(\theta)}{\partial \theta} \right] \approx \left[\frac{\mathbf{T}^i(\theta + \Delta\theta) - \mathbf{T}^i(\theta)}{\Delta\theta}, \frac{\mathbf{R}\mathbf{H}^i(\theta + \Delta\theta) - \mathbf{R}\mathbf{H}^i(\theta)}{\Delta\theta} \right]$$

- Coût : (1 intégration de référence) + 1 intégration avec une eau du sol perturbée (avec $\theta + \Delta\theta$)

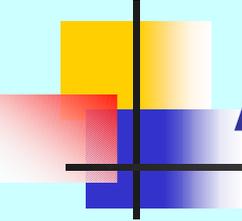


Améliorations possibles (2)

- Sélection dynamique des situations atmosphériques pour lesquelles l'analyse de l'eau du sol doit être réduite
- Dans de telles situations : $\frac{\partial T}{\partial \theta}, \frac{\partial RH}{\partial \theta} \rightarrow 0$
- Possibilité de cycler la matrice B (filtre de Kalman étendu):

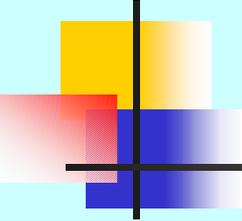
$$B(t) = MB(0)M^T + Q$$

avec
$$M_{ij} \approx \frac{\theta_i^t[\theta_j^0] - \theta_i^t[\theta_j^0 + \Delta\theta_j^0]}{\Delta\theta_j^0}$$

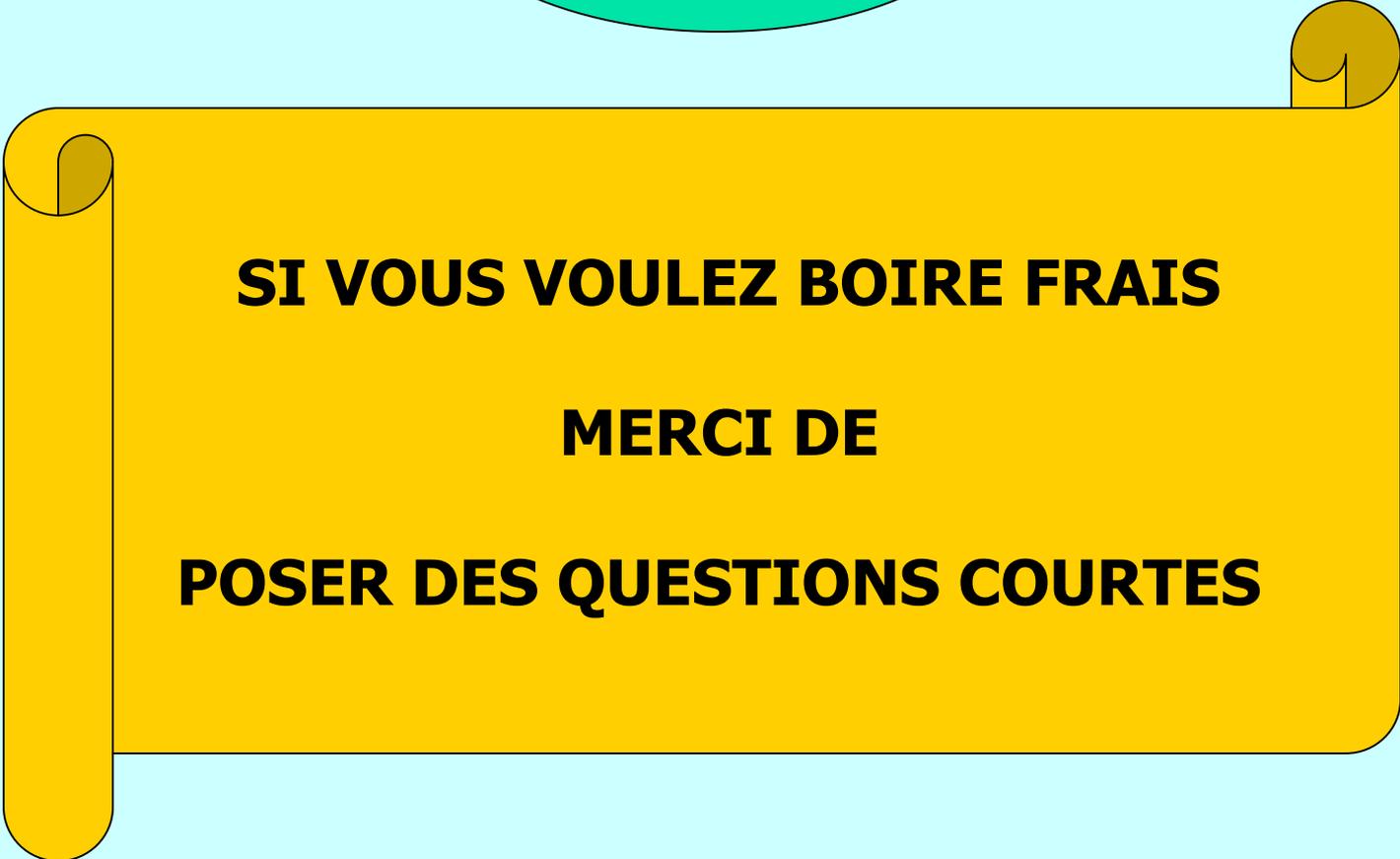


Améliorations possibles (3)

- **Méthodes off-line** (forcées près de la surface) : OK pour assimiler des observations satellitaires sur des domaines régionaux où la qualité des champs de précipitation (et radiatifs) est suffisante. Techniques d'assimilation coûteuses possibles (2D-Var/EnKF) [US-LDAS]
- **Méthodes on-line** (utilisation des erreurs atmosphériques pour corriger la surface) : Indispensable pour assimiler des observations comme T2m, RH2m ou RR. Applicable à l'échelle globale. Difficile d'utiliser des méthodes coûteuses (sans adjoint). Assimilation séquentielle [EU-LDAS]
- Possibilité de combinaison des deux approches (?)



**FIN
DE
L'EXPOSE**



**SI VOUS VOULEZ BOIRE FRAIS
MERCI DE
POSER DES QUESTIONS COURTES**