

---

**Simplified physics,  
but is it simple?**

**Marta Janisková**

ECMWF

**Thanks to:** Philippe Lopez, Jean-François Mahfouf, François Bouyssel

**A Tribute to Jean-François Geleyn  
6 February 2020, Toulouse, France**

# Beginnings

Utilisation d'une physique simplifiée, différentiable et suffisamment réaliste dans une assimilation variationnelle incrémentale.

## Introduction :

Le but de l'assimilation variationnelle quadri-dimensionnelle (4D-Var) est de définir une trajectoire du modèle atmosphérique sur un intervalle de temps donné qui se rapproche "au mieux" des observations disponibles au cours de cette période. La méthode consiste à minimiser, dans l'espace des conditions initiales, une fonction coût mesurant l'écart entre les observations et l'état du modèle à différents instants. L'algorithme de minimisation requiert plusieurs calculs de la fonction coût et de son gradient (ou dérivée) par rapport aux conditions initiales, afin de trouver la solution minimisante.

Le résultat de l'assimilation est bien sûr conditionné par la qualité du modèle atmosphérique assimilateur. Malheureusement, un des facteurs néfastes à l'efficacité de la minimisation est la présence de phénomènes à seuil non différentiables dans le modèle (liés par exemple à une physique précise et donc complexe), qui sont des générateurs de minima secondaires.

La méthode incrémentale (Courtier et al. 1994) permet en principe de s'affranchir de ce dilemme de façon élégante. Cette méthode permet d'approximer le problème de minimisation complet et non différentiable par un problème quadratique résolu au voisinage d'une trajectoire aussi précise que possible. Dans ce contexte, le modèle sophistiqué n'est utilisé que pour obtenir (et rafraîchir de temps en temps) l'écart entre les observations et l'équivalent modèle, la minimisation étant réalisée à l'aide d'un modèle linéaire simplifié. Tous les degrés de liberté sont permis pour ce modèle simplifié. En particulier, le modèle peut être à plus basse résolution et disposer d'une physique différente du modèle complet. De plus, l'information issue de l'intégration avec physique complète pourrait permettre de calibrer certains des coefficients les plus cruciaux utilisés dans la physique simplifiée. Enfin, l'approche permet un raffinement progressif de cette physique au fur et à mesure que les diverses paramétrisations sont développées.

## Objectifs poursuivis :

La tâche préliminaire au 4D-Var incrémental proprement dit est d'imaginer et de développer dans le cadre d'ARPEGE/ALADIN une physique simplifiée et la plus dérivable possible, qui toutefois respecte les ordres de grandeur et les feed-back généraux des grands phénomènes physiques connus décrits par la physique "complète".

Le développement parallèle des opérateurs linéaire-tangent et adjoint de la physique simplifiée est également nécessaire pour une implantation progressive des nouveaux schémas dans le système ARPEGE/ALADIN.

La première validation de la méthode se fera probablement dans le cadre d'ARPEGE où les outils (en particulier le système incrémental) et l'expertise existent déjà, et où des expériences avec modèle simplifié adiabatique (i.e. sans forçage physique) ont déjà été effectuées. Cela permettra d'évaluer rapidement le gain potentiel apporté par une physique simple mais raisonnable. Cependant, le système incrémental se prête particulièrement à l'application de cette physique dérivable dans le cadre ALADIN, où cette fois ci, on peut envisager une minimisation avec modèle simplifié sur un domaine limité, le couplage étant par ailleurs effectué avec le modèle complet en profitant du caractère spectral des deux modèles pour se débarrasser du problème posé par une localisation géographique trop "brutale" de la transition entre les deux. Cette application concernerait bien sûr des échelles de temps et d'espace plus petites que dans le cadre global, à la limite de ce qu'on appelle la prévision immédiate, sujet d'importance cruciale pour bon nombre de problèmes sociaux-économiques à composante météorologique.

## Bibliographie :

Courtier, P., J.N. Thépaut and A. Hollingsworth, 1994. A strategy for operational implementation of 4D-Var. QJRM, 120, 1367-1387.

*Utilisation d'une physique simplifié, différentiable et suffisamment réaliste dans une assimilation variationnelle incrémentale*

A short description of objectives:



**EASIER TO BE DESCRIBED  
THEN TO BE DONE**



1994

**"Pre-marriage" Agreement.**

**Sign or not to sign ???**



# First documents to be studied

11-XI-94

By air mail  
Par avion



J.F. Geleyn  
(à l'attention de Martha dont j'ai oublié le nom)

CNRM / GMAP/D

Météo-France

42 avenue Coriolis

31057 Toulouse cedex

Jean-Noël Trépan  
European Centre for Medium Range Weather Forecasts  
Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, England.  
Telephone: U.K. (0734) 499000, International (44 734) 499000,  
Telex: 847908 ECMWF G. Telefax: (0734) 860450

FRANCE

JFG used as  
a postman.



JNT hopefully remembers my name now.

## Linearized models in NWP

- Different well-known applications:

- variational data assimilation ← *like incremental 4D-Var*
- singular vector computations ← *initial perturbations for EPS*
- sensitivity analysis ← *forecast errors*

- First applications with adiabatic linearized model

- Nowadays, the physical processes included in the linearized model

Including physical processes can in variational data assimilation:

- reduce spin-up
- provide a better agreement between the model and data
- produce an initial atmospheric state more consistent with physical processes
- allow the use of new observations (*rain, clouds, soil moisture, ...*)

# Simplifications of the linearized models for practical applications

- For important applications:

- *incremental 4D-Var* (ECMWF, Météo-France, ...),
- *simplified gradients in 4D-Var* (Zupanski 1993),
- *the initial perturbations computed for EPS* (ECMWF),

**linearized versions of forecast models are run at lower resolution**



**the linear model may not be “the exact tangent” to the full model**

*(different resolution and geometry, different physics)*



**simplified approaches as a way to include physical processes step-by-step in TL and AD models**

- **simplifications done with the aim to have a physical package:**

- **simple** – for the linearization of the model equations
- **regular** – to avoid strong non-linearities and thresholds
- **realistic enough**
- **computationally affordable**

## **SIMPLIFIED DOES NOT MEAN SIMPLE !!!**

- **Development** – requires substantial resources
- **Validation** – must be very thorough  
*(for non-linear, tangent-linear and adjoint versions)*
- **Computational cost** – may be very high when including physics or complex observation operators
- **Non-linear and discontinuous nature** of physical processes  
*(affecting the range of validity of the tangent-linear approximation)*

# Operational constraints

## Imply:

- **permanent testing of the validity of TL approximation and necessary adjustments:**
  - when the NL physics or dynamics changes significantly
  - higher horizontal and vertical resolutions, longer time-integrations
- **ensure robust stability of the linearized model:**
  - non-noisy behaviour in all situations and different model resolutions
- **code optimizations to reduce computational cost:**
  - ideally: TL is 2 times and AD is 2-3 times more expensive than the nonlinear model
- **fulfilling requirements for assimilation of observations related to the physical processes** (rain, clouds, soil moisture, ...):
  - ↓
  - finding best compromise between **complexity, linearity** and **cost**



# Designing simplified physical parametrizations (1)

$\epsilon$   $\tau$   
 $j$   $j-1$   
 $j+1$   $j$   
 $j+2$   $j+1$   
 $j+2$

$\tau_{j+1, j} = 1 - \epsilon_{j+1} = 1 - \epsilon_{j+1} \tau_{jj}$   
 $= 1 + a_{jj}^c$  why?

$\tau_{j+2, j} = \tau_{j+1, j} \cdot \tau_{j+2, j+1} = \tau_{j+1, j} \cdot (1 - \epsilon_{j+2})$   
 $= \tau_{j+1, j} \cdot (1 - \frac{\epsilon_{j+2} \tau_{j+1, j+2}}{\tau_{j+1, j+2}})$

$\tau_{j+1, j} = \tau_{j, j+1}$  why?  
 $= \tau_{j+1, j} - \epsilon_{j+2} \tau_{j+1, j}$   
 $= 1 + a_{jj}^c + a_{j, j+2}^c$

$\tau_{ij} = 1 + a_{jj}^c + \dots + a_{j, i-1}^c$

Hence  $(a^N)_{i, j-1} = N_j^* (1 - N_{ij}) (1 + \sum_{k=j}^{i-1} a_{jk}^c) + (1 - N_{ij}) (1 - N_j^*) a_{j, j+1}^c$   
 $= (1 - N_{ij}) [a_{ij, j-1}^c + N_j^* (1 - a_{ij, j+1}^c + \sum_{k=j}^{i-1} a_{jk}^c)]$

in case  $i=j$   $(a^N)_{i, j-1} = N_j^* + (1 - N_j^*) a_{i, j-1}^c$

**Radiation scheme:**  
**JFG's favourite subject.**

→ simplifying the full radiation scheme used in the forecast model

**APPROACH A**

→ a lot of pages written and questions asked (why?) before getting it right



# Designing simplified physical parametrizations (2)

```

C
C PZIPB : INVERSE DE LA PRESSION A LA BASE DE LA COUCHE.
C PZIPH : INVERSE DE LA PRESSION AU SOMMET DE LA COUCHE.
C PZDQ : CORRECTION DE  $\rho$  POUR PASSER A L'EQUILIBRE SATURE.
C
DO 410 JLN=KIDIA,KFDIA
PZIPB(JLN)=1./PAPRS(JLN,JLEV) → on a besoin de  $\rho$  car l'équation de
PZDQ(JLN)=PQHI(JLN,JLEV)-PQI(JLN,JLEV)
PZFTB(JLN)=AMAX1(0.,PZFPFH(JLN)-PZPOIDI(JLN,JLEV)*PZDQ(JLN)
à saturation ( $q \rightarrow$ )
410 CONTINUE
C
C CALCULS COMPLETS D'EVAPORATION ET FONTE/IGEL) SI ZSIGMA > 0.
C CALCUL DE ZSIGMA ET INITIALISATION EVENTUELLE DE LA PROPORTI
C NEIGEUSE DU FLUX DANS LE CAS CONTRAIRE.
C
> IF (ZSIGMA.GT.0.) THEN
DO 420 JLN=KIDIA,KFDIA
ZRPFB(JLN)=SQRT(AMAX1(PZFPFH(JLN),PZFTB(JLN)))
ZRPFB(JLN)=AMAX1(0.,ZRPFB(JLN))
PZFTB(JLN)=AMAX1(PZFPFH(JLN),ZRPFB(JLN)**2)
C
C CALCULS DE CHANGEMENT DE LA PROPORTION NEIGEUSE (NOUVELLES
C PRECIPITATIONS GENEREES ET FONTE/IGEL) DANS L'OPTION "NEIGE"
C
> IF (LNEIGE) THEN
ZDELTA=AMAX1(0.,SIGN(1.,RTT-PTI(JLN,JLEV)))
ZRMIT=ZDELTA+(PZRMII(JLN)-ZDELTA)*PZFPFH(JLN)/AMAX1(ZEPS
+PZFPFH(JLN),PZFTB(JLN))
PZRMII(JLN)=AMAX1(0.,AMINI(1.,ZRMIT+FONTE*(RTT-PTI(JLN,JL
*(PZIPHI(JLN)-PZIPB(JLN))/AMAX1(ZEPS2,0.5
*(ZRPFB+ZRPFB)))
> ELSE
PZRMII(JLN)=0.
> ENJIF
420 CONTINUE
> ELSE
ZSIGMA est une case
C
C CALCUL, PAR SOMMATION EXPLICITE, DE ZSIGMA.
C
ZSIGMA=0.
DO 430 JLN=KIDIA,KFDIA
ZSIGMA=ZSIGMA+PZFTB(JLN)
430 CONTINUE
C
DO 440 JLN=KIDIA,KFDIA
DANS LE CAS "NEIGE" ET ZSIGMA > 0 INITIALISATION DE LA PROPORT
NEIGEUSE.
> IF (LNEIGE.AND.(ZSIGMA.GT.0.)) THEN
ZDELTA=AMAX1(0.,SIGN(1.,RTT-PTI(JLN,JLEV)))
PZRMII(JLN)=ZDELTA
> ELSE
PZRMII(JLN)=0.
> ENJIF
440 CONTINUE
> ENJIF

```

l'équation s'écrit  $\sqrt{\rho} dp = \frac{K}{p^2} (1 - q_w)$  (et  $dp/p = -d(1/p)$ ). On a aussi parfois besoin de  $\rho/p$  en haut de modèle car il ne faut y associer d'humidité dans la phase liquide (il faut qu'il y ait une précipitation au préalable). 0 m est  $z_{siga} = 0$  qui plus haut.  
 flux qui ne s'écoulerait en aucun cas exactement dans les cas (condensation ou évaporation des précipitations). On le garde dans le cas condensation et on l'a vu comme être minimum dans le cas évaporation. Le flux ne peut en fait pas devenir négatif.  
 du vecteur ZSIGMA sur des cas de m au lieu de tester que détermine la d'ice condensation  
 une fois qu'il y a eu condensation en un mois, on peut le second, passe au MAX  
 la condensation en fonction de la pression, si condensation le second, passe au MAX  
 on ne change que dans le cas évaporation ( $PZDQ > 0$ ) et alors on utilise la formule ci-dessus.  
 la même cause du flux n'est à ne pas oublier à devenir négative  
 utilisation de la fonction "BORN" de PZFTB dans le cas évaporation. densité des 2 valeurs dans le cas condensation  
 la température par rapport à celle du point triple  $T > T_0 \rightarrow 0$   $T \leq T_0 \rightarrow 1$   
 on ne peut pas même ne faire que la formule initiale que ZANE ou change pas  
 dans le cas évaporation et est négative en cas de  $T_0 > T_0$  et diminue en cas de  $T > T_0$   
 et ce dans la physique correspondant à l'injection de nouvelles précipitations  
 sous forme respectivement solide ou liquide dans le cas  $PZFTB > PZFPFH$   
 ZDELTA est positif par  $PZFTB - PZFPFH$  et négatif par  $PZFPFH$  dans le cas contraire  
 l'équation s'écrit  $\frac{d\rho_m}{dp} = \frac{K'}{\sqrt{\rho}} (T - T_0)$  et il faut garder PZRMII dans  $[0, 1]$  donc on

## Convection scheme:

→ trying to base it on a simple parametrization scheme used in the past.

**APPROACH B**

**Explanation written by JFG.**

→ not only trying to understand the code, but also the French text 😊

# Validation of tangent-linear and adjoint models

## Tangent-linear (TL) and adjoint (AD) model:

- **classical validation** (TL - Taylor formula, AD - test of adjoint identity)
- **examination of the accuracy of the linearization**

### Comparison:

finite differences (FD) ↔ tangent-linear (TL)  
integration

$$M(\mathbf{x}_{an}) - M(\mathbf{x}_{fg}) \leftrightarrow M'(\mathbf{x}_{an} - \mathbf{x}_{fg})$$

(*an = analysis, fg = first guess*)

### Diagnostics:

- **relative errors:**  $\frac{\varepsilon_{\text{EXP}} - \varepsilon_{\text{REF}}}{\varepsilon_{\text{REF}}} \cdot 100\%$

where

- **mean absolute errors:**

$$\varepsilon = \left| \left[ M(\mathbf{x}_{an}) - M(\mathbf{x}_{fg}) \right] - M'(\mathbf{x}_{an} - \mathbf{x}_{fg}) \right|$$

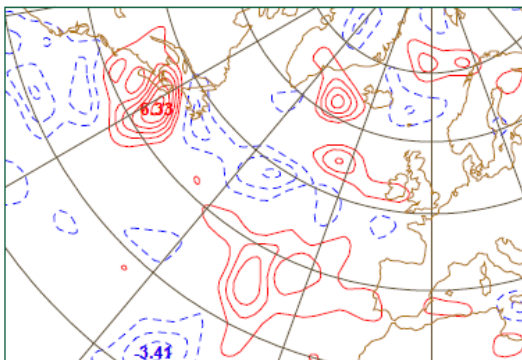
## Singular vectors:

- Computation of singular vectors to find out whether the new schemes do not produce spurious unstable modes.

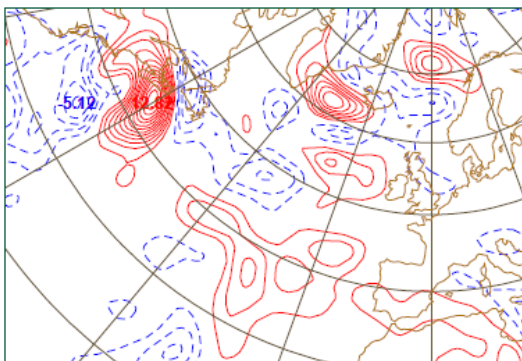
## Zonal wind increments at model level 31 (~ 1000 hPa) – 24-hour integration

FD

L:31 - U\* 15/3/99 12h t+24 - finite diff. [cont. interval: 1]  
 min=-17.8855 max=10.2375 mean=-0.300678  
 rms=1.01222 stdev=0.96653

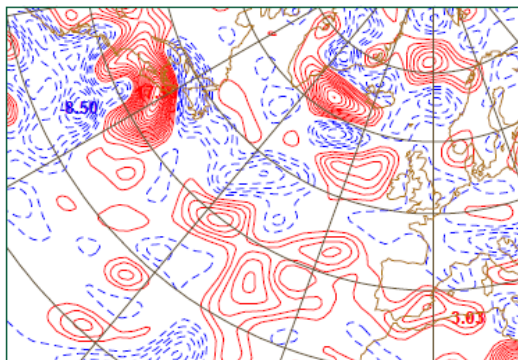


L:31 - U\* 15/3/99 12h t+24 - evol. of perturb. (adiabsvd)  
 min=-18.1040 max=12.7837 mean=-0.026824  
 rms=1.27768 stdev=1.27739



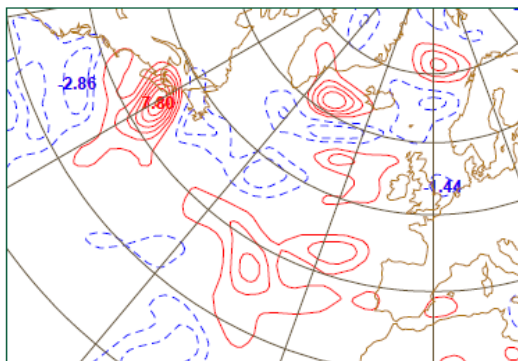
TL<sub>ADIABSV D</sub>

L:31 - U\* 15/3/99 12h t+24 - evol. of perturb. (adiab)  
 min=-30.1891 max=17.3899 mean=0.380328  
 rms=2.90740 stdev=2.88242



TL<sub>ADIAB</sub>

L:31 - U\* 15/3/99 12h t+24 - evol. of perturb. (wsphys)  
 min=-15.4296 max=11.1993 mean=-0.158065  
 rms=1.08662 stdev=1.07506



TL<sub>WSPHYS</sub>

**GREAT !!!**  
**TL<sub>WSPHYS</sub>**  
**better than**  
**TL<sub>ADIAB</sub>**

TL<sub>ADIAB</sub> – adiabatic TL model

TL<sub>ADIABSV D</sub> – TL model with very simple vertical diffusion (*Buizza 1994*)

TL<sub>WSPHYS</sub> – TL model with the whole set of simplified physics

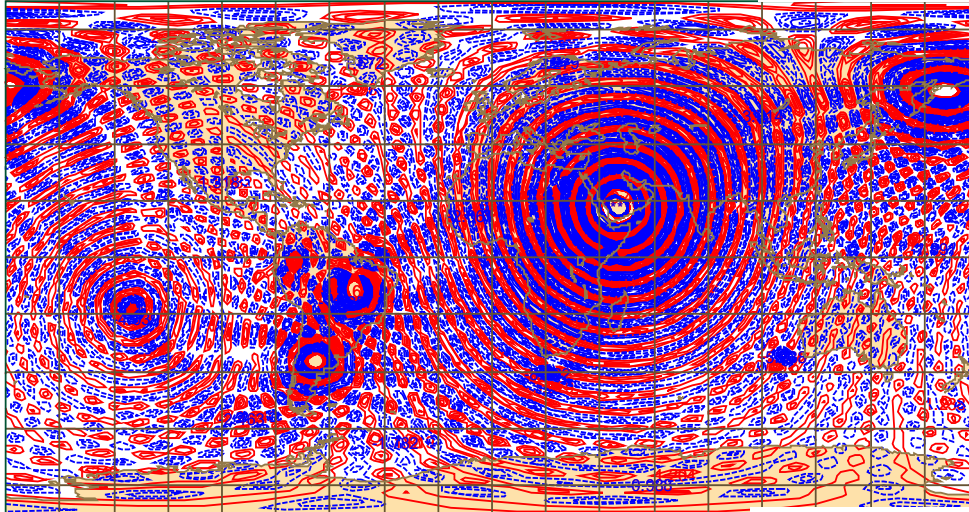
(*Mahfouf 1999, Janisková et al 1999*)



WHY REGULARIZATION IS IMPORTANT



lv31 T\* 1999-03-15 12h fc t+6 - TL with vdif (no regularization applied) Cont.int: 0.5e+07



**BAD NEWS !!!**  
Unless one wants to use model for generating modern art. 😊

Without any treatment of most serious threshold processes, the TL approximation can turn to be useless.

Wednesday 6 October 2004 15UTC ECMWF Forecast t+1 VT: Wednesday 6 October 2004 16UTC Model Level 45 temperature



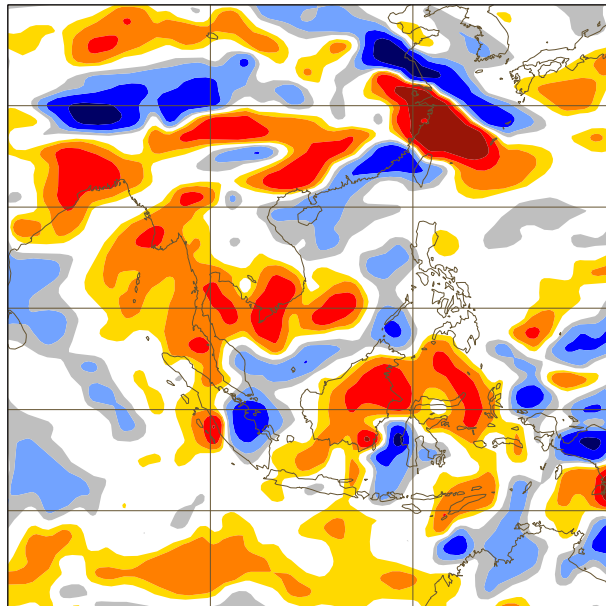
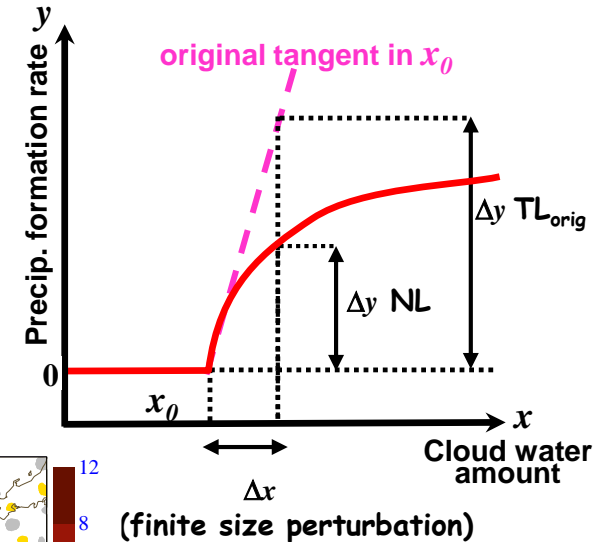
# Importance of the regularization of TL model (1)

- physical processes are characterized by:

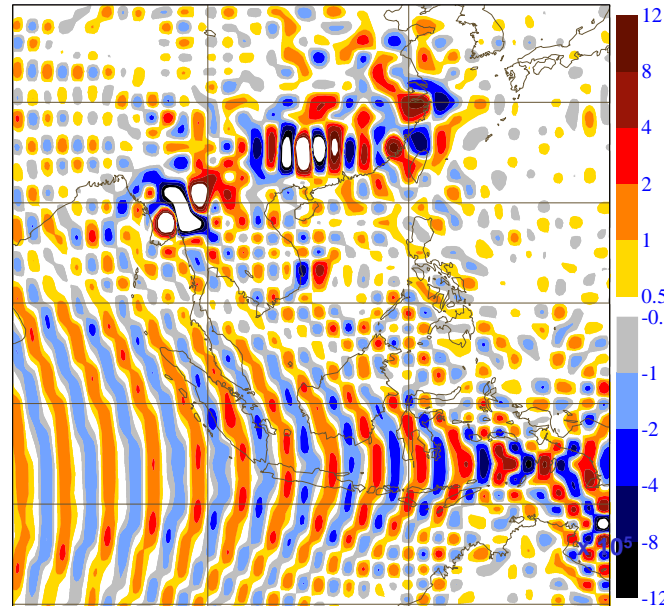
- \* threshold processes:

- discontinuities of some functions describing the physical processes (*some on/off processes*)
- discontinuities of the derivative of a continuous function

- \* strong nonlinearities



finite difference (FD)



TL integration without regularization

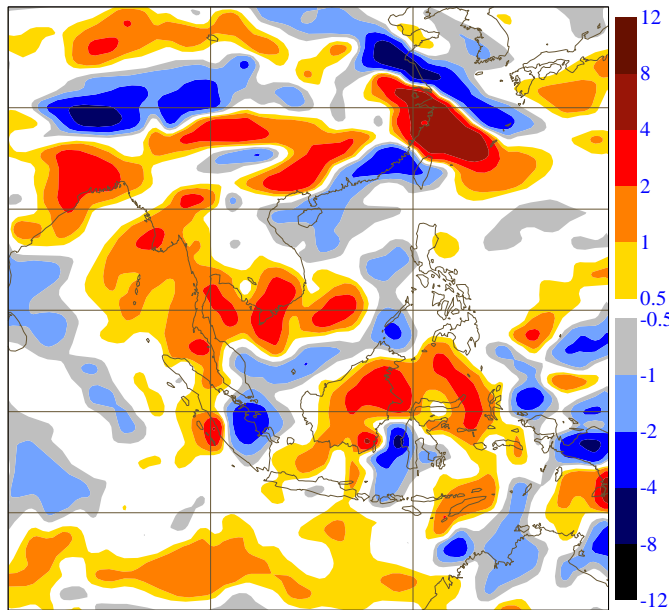
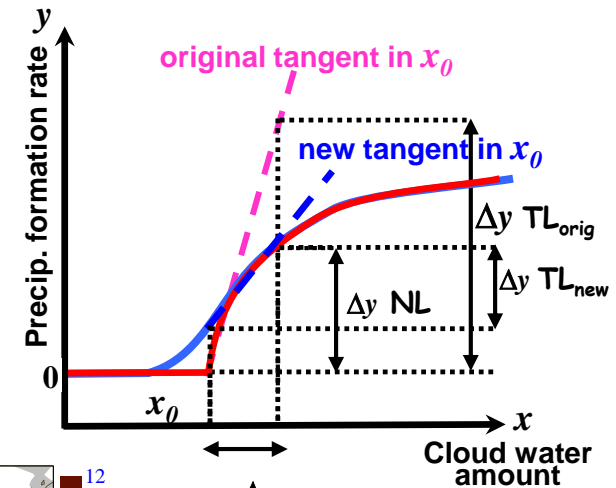
u-wind increments  
fc t+12, ~700 hPa

## Importance of the regularization of TL model (2)

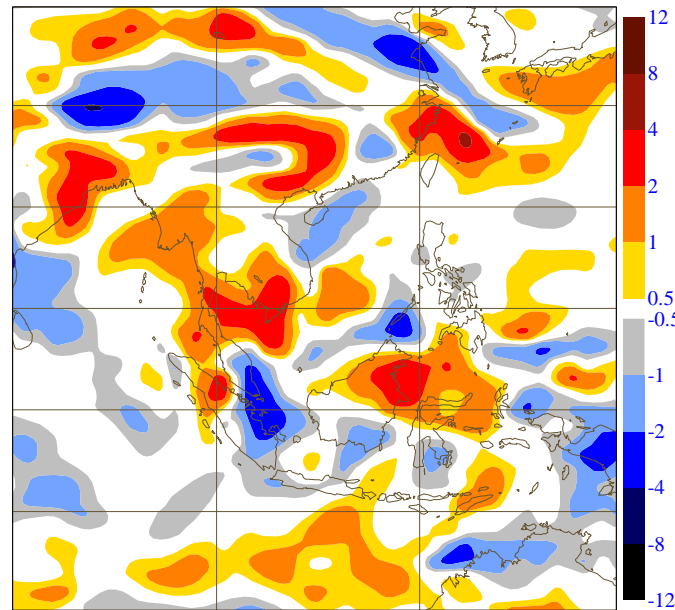
- regularizations help to remove the most important threshold processes in physical parametrizations effecting the range of validity of TL approximation

- after solving the threshold problem

clear advantage of the diabatic TL evolution of errors compared to the adiabatic evolution



finite difference (FD)



TL integration

u-wind increments  
fc t+12, ~700 hPa

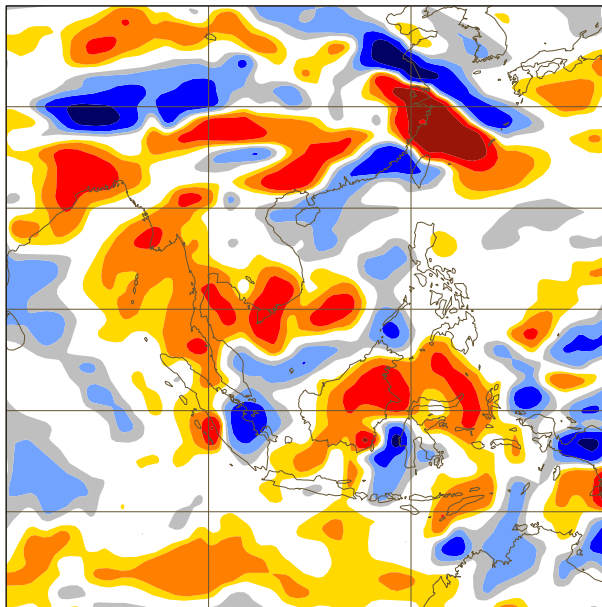
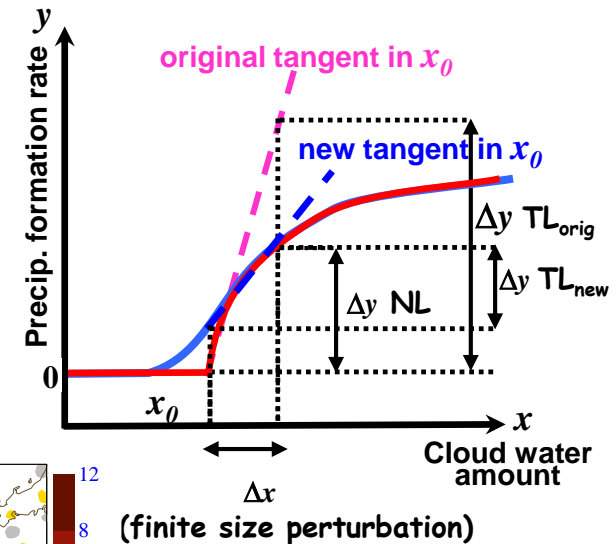


## Importance of the regularization of TL model (2)

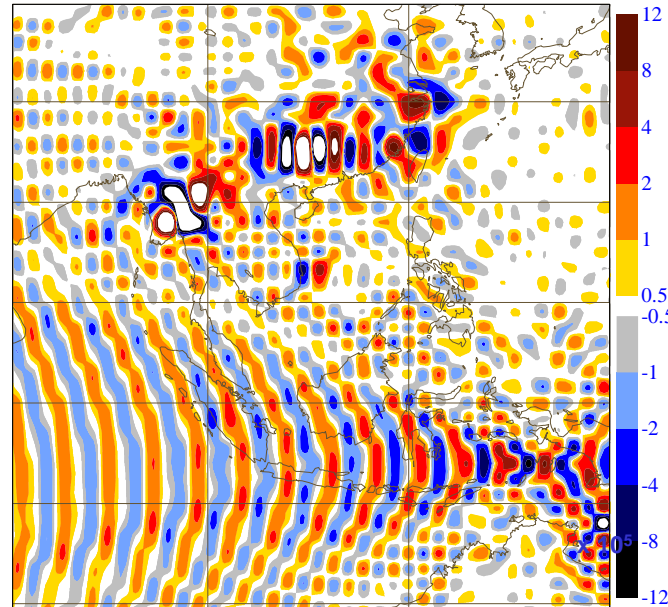
- regularizations help to remove the most important threshold processes in physical parametrizations effecting the range of validity of TL approximation

- after solving the threshold problem

clear advantage of the diabatic TL evolution of errors compared to the adiabatic evolution



finite difference (FD)



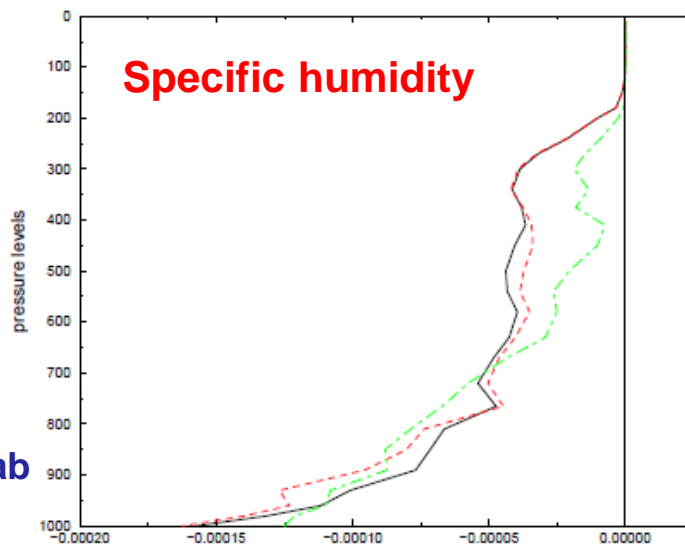
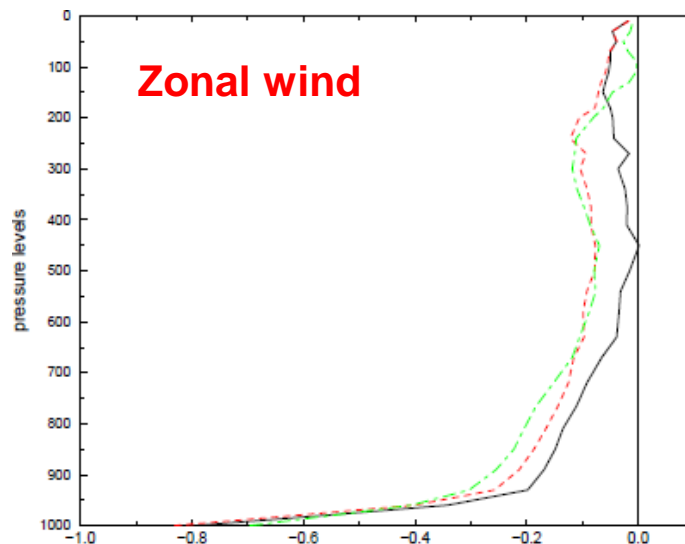
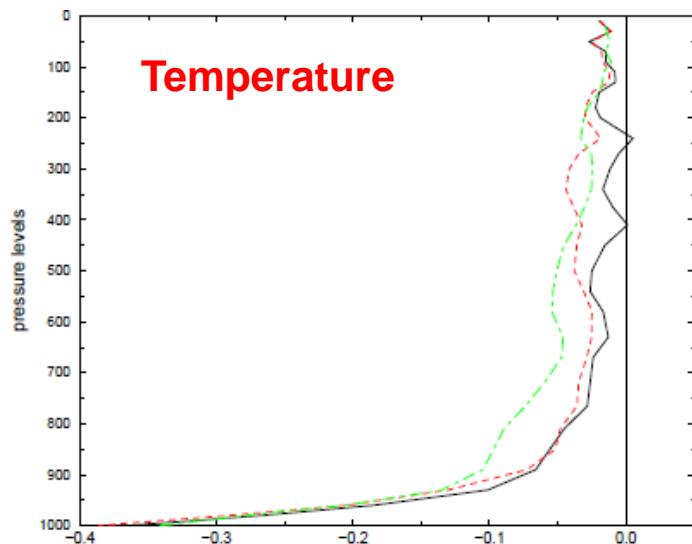
TL integration

u-wind increments  
fc t+12, ~700 hPa



# Impact of the linearized physics on TL approximation (1)

## Comparison ECMWF – MF (as in 1999)



Comparison done with F. Bouysse: the same date, the same resolution.

MF physics beating ECMWF physics for temperature and wind, but worse for spec.humidity:



that was down to better radiation, but worse convection at MF

Global values of:  
 $|TL_{exp} - FD| - |TL_{ref} - FD|$   
15/03/1999 12h t+24

- ECMWF: wsphys – adiab
- - - ECMWF: wsphys\_norad – adiab
- . - MF: wsphys - adiab

# Impact of linearized physics on TL approximation (2)

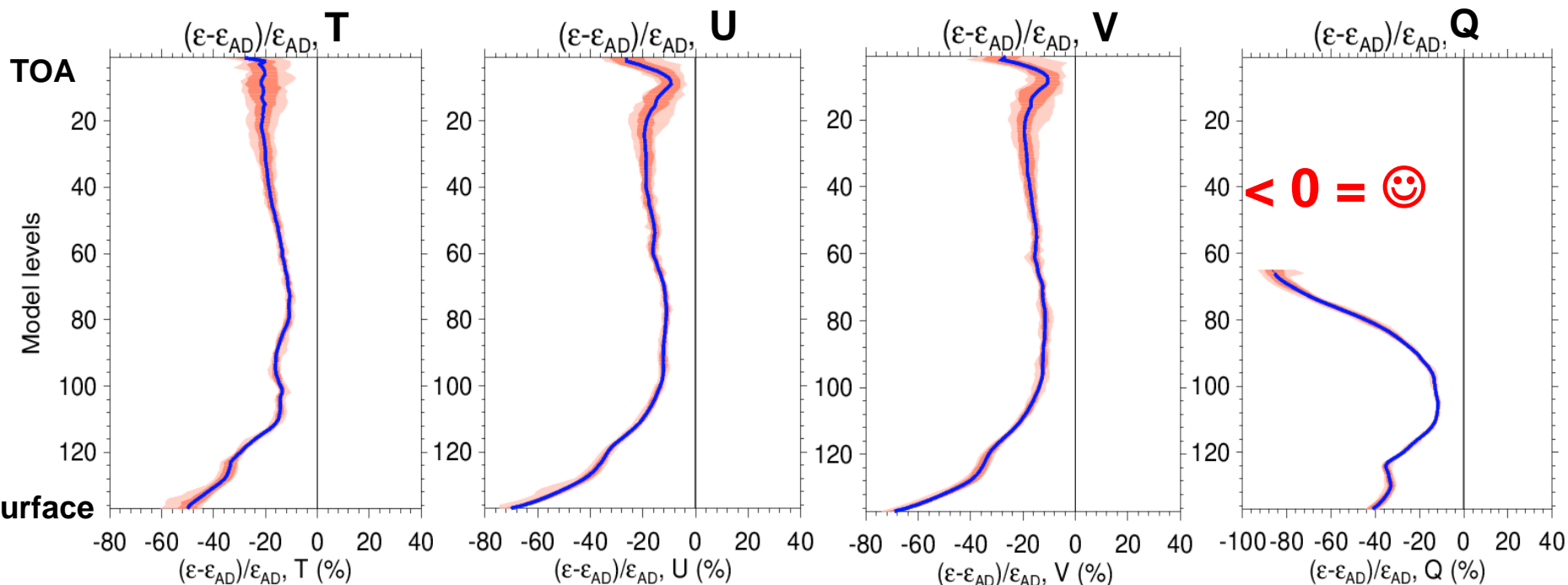
State at ECMWF as in ~ 2016

$$\frac{\varepsilon_{\text{EXP}} - \varepsilon_{\text{REF}}}{\varepsilon_{\text{REF}}} \cdot 100\%$$

where  $\varepsilon = \overline{\left| \left[ M(\mathbf{x} + \delta\mathbf{x}) - M(\mathbf{x}) \right] - M'(\delta\mathbf{x}) \right|}$

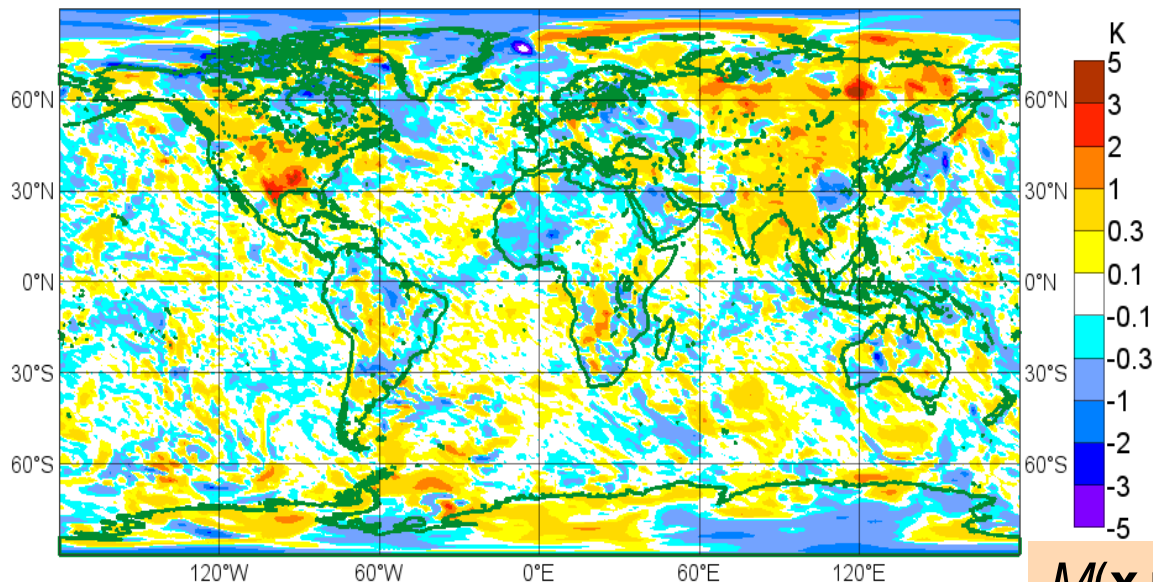
non-linear (NL) difference  $\leftrightarrow$  tangent-linear (TL) integration

Mean vertical profile of change in TL error when full linearized physics included in TL. Relative to adiabatic TL run (50-km resolution; twenty runs, 12h integ.)



**Inclusion of linearized physics leads to better TL approximation.**

# TL approximation - how far we can go?

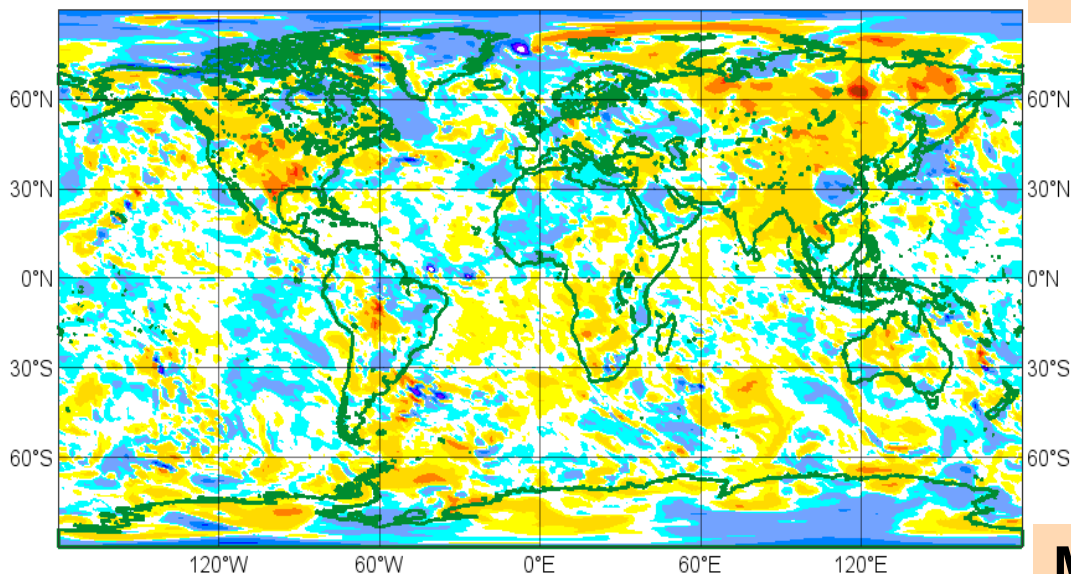


**High resolution (~ 16 km)**

**Temperature** at level 125 (~950 hPa) on 20140105 at 12Z.

Comparison of NL difference  $M(x+\delta x) - M(x)$  with perturbation evolved using the TL model  $M'\delta x$  after 12h of integration.

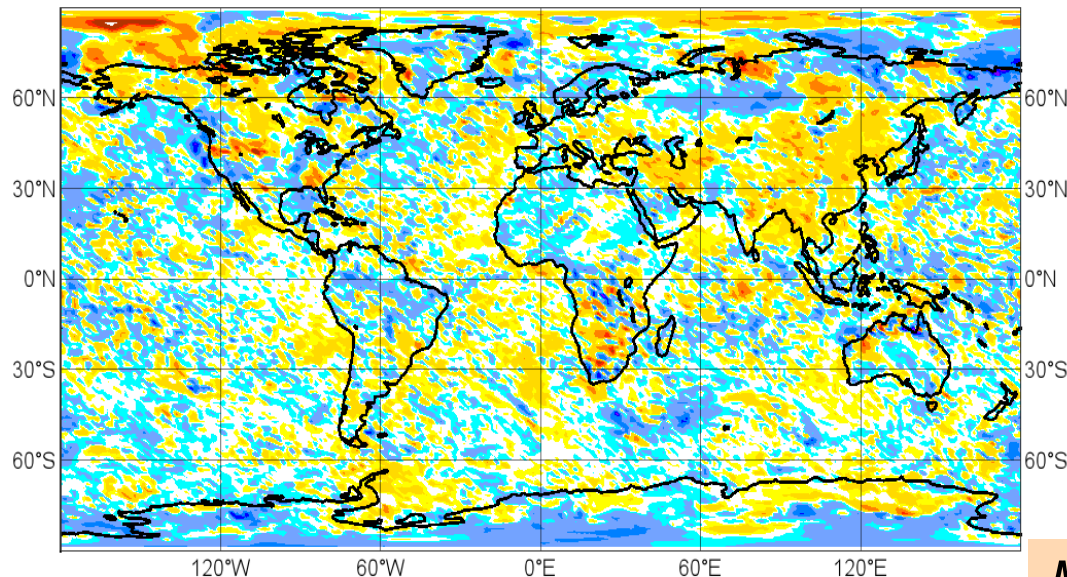
$M(x+\delta x) - M(x)$



Thanks to stabilization of both the dynamics and the physics in the TL model, resolutions as fine as 16 km might be considered in 4D-Var minimizations, provided some (minor) sources of noise can be eliminated.

$M'\delta x$

# TL approximation - how far we can go?

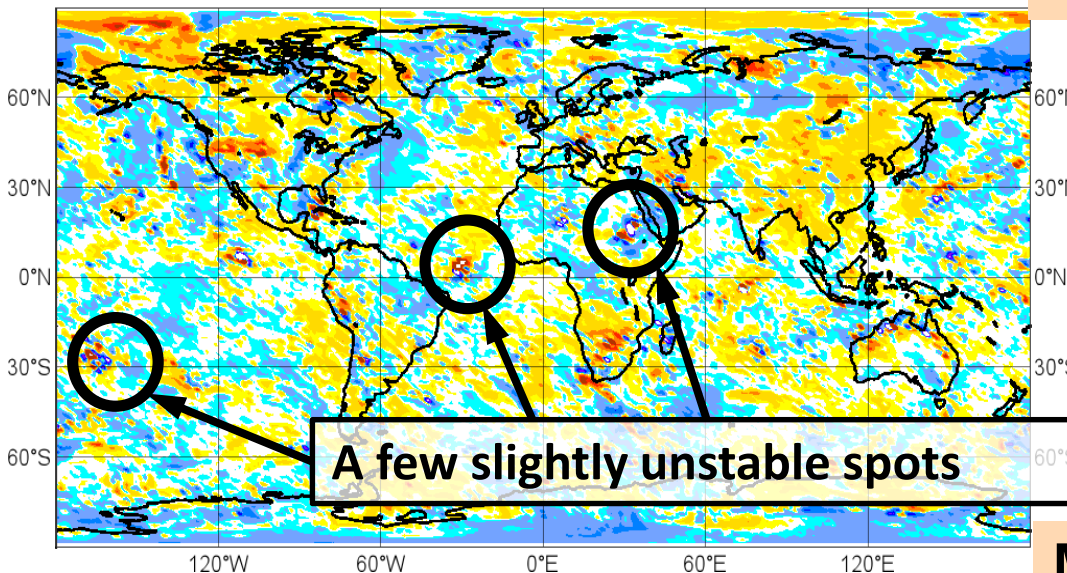


**Very high resolution (~ 9 km)**

**Temperature** at level 129  
(~980 hPa) on 20140105 at 12Z.

Comparison of NL difference  $M(x+\delta x) - M(x)$  with perturbation evolved using the TL model  $M'\delta x$  after 12h of integration.

$M(x+\delta x) - M(x)$



**First time our TL model tested at such high resolution and the results surprisingly encouraging.**

(Note: this single run required 320 nodes)

**A few slightly unstable spots**

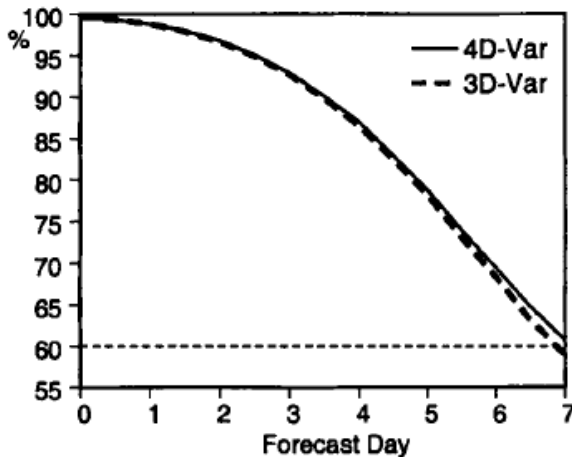
$M'\delta x$



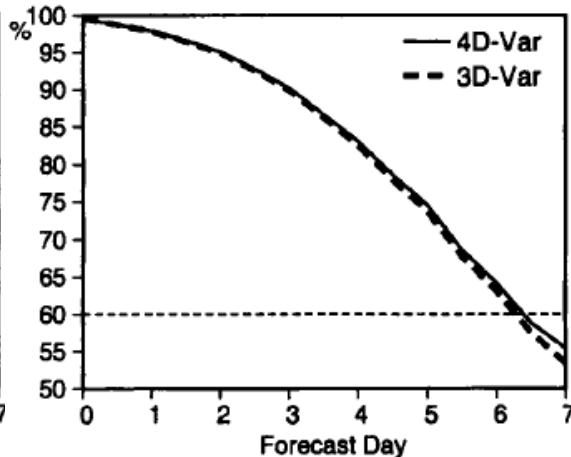
# Impact of linearized physics on forecast scores (1)

## State at ECMWF as in 1998

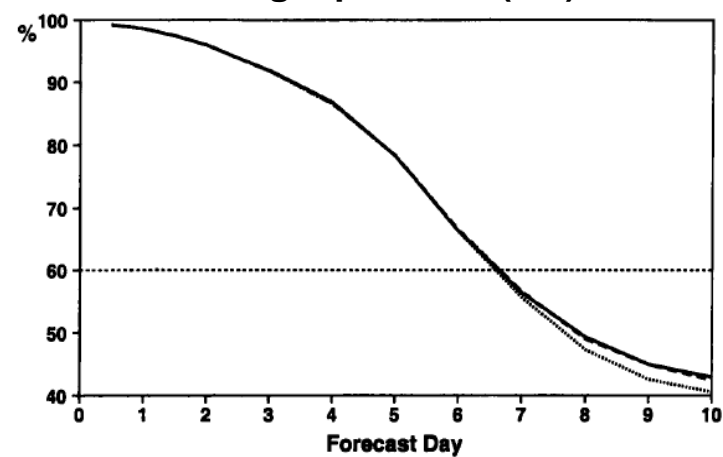
500 hPa geopotential (NH)



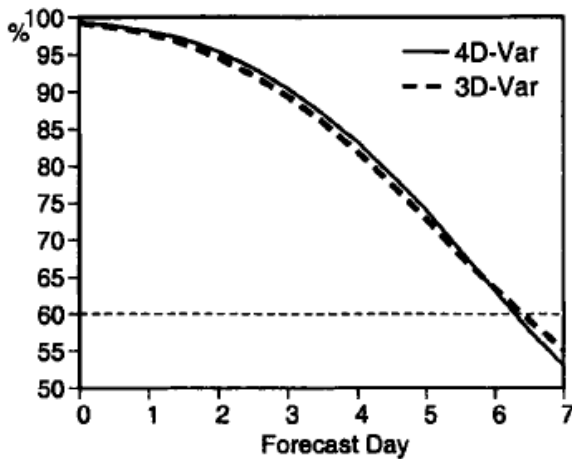
1000 hPa geopotential (NH)



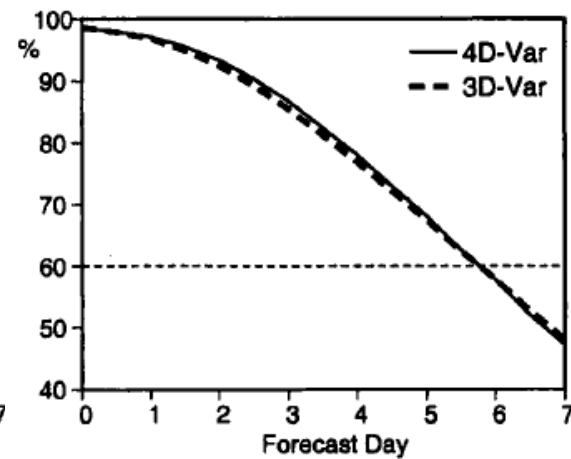
1000 hPa geopotential (NH)



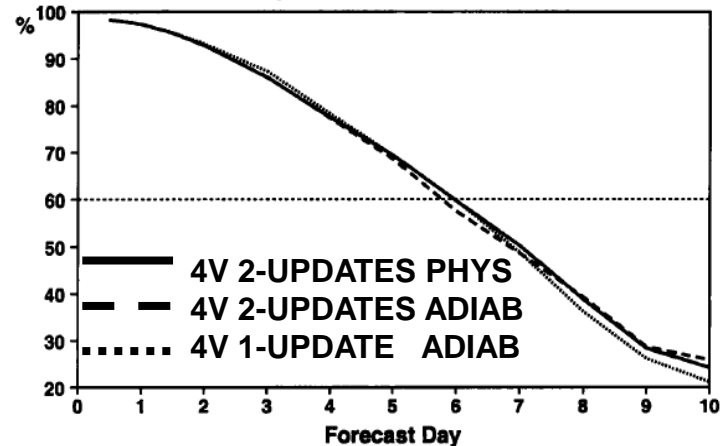
500 hPa geopotential (SH)



1000 hPa geopotential (SH)



1000 hPa geopotential (SH)



Averaged over 12 weeks

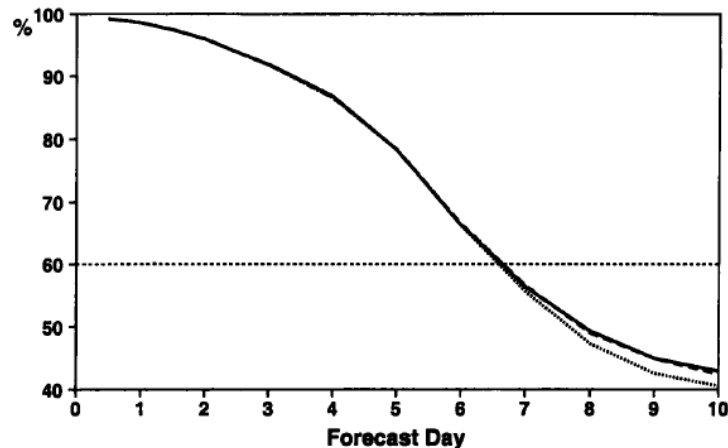
Averaged over 14 forecasts

From Rabier et al. 2000 and Mahfouf et al. 2000

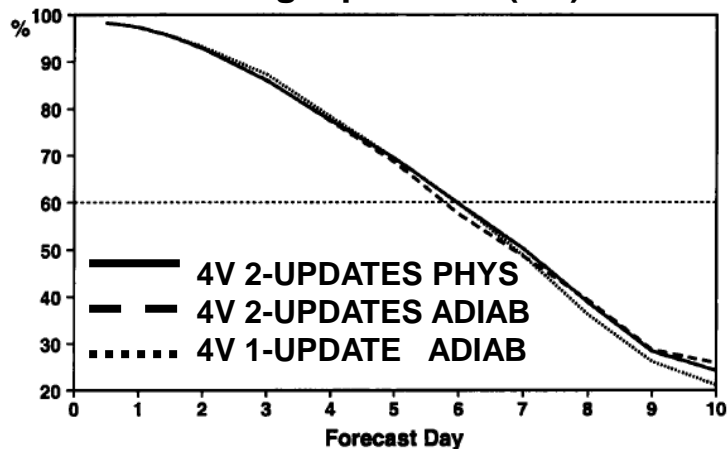
# Impact of linearized physics on forecast scores (2)

## State at ECMWF as in 1998

1000 hPa geopotential (NH)



1000 hPa geopotential (SH)

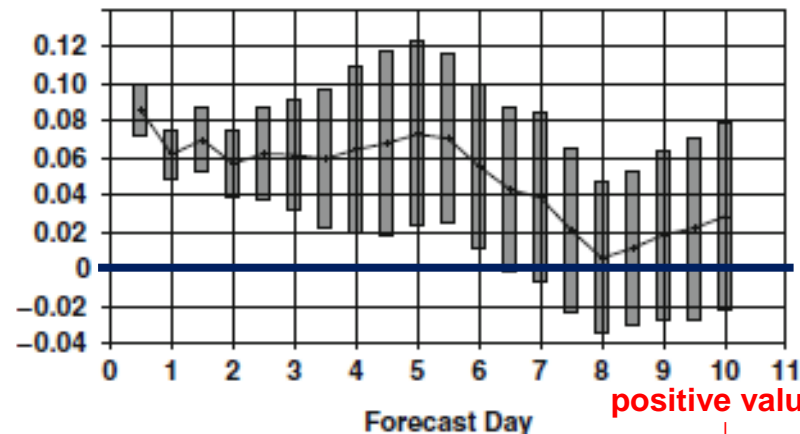


Averaged over 14 forecasts

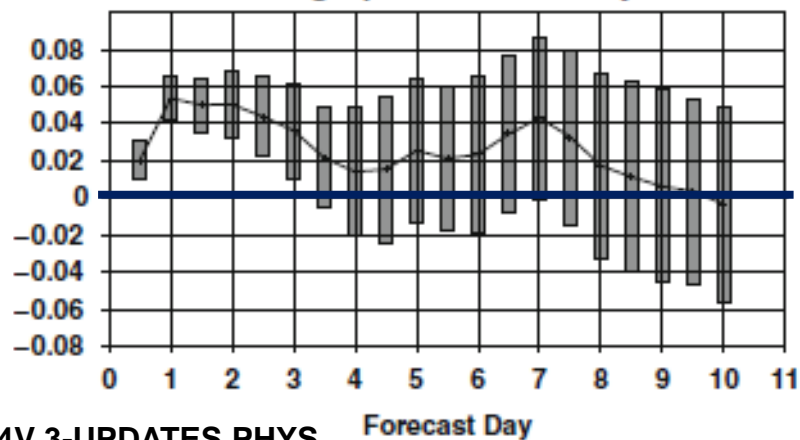
From Mahfouf et al. 2000

## State at ECMWF as in 2012

a NHem: 500hPa geopotential - Anomaly correlation



e SHem: 500hPa geopotential - Anomaly correlation



4V 3-UPDATES PHYS

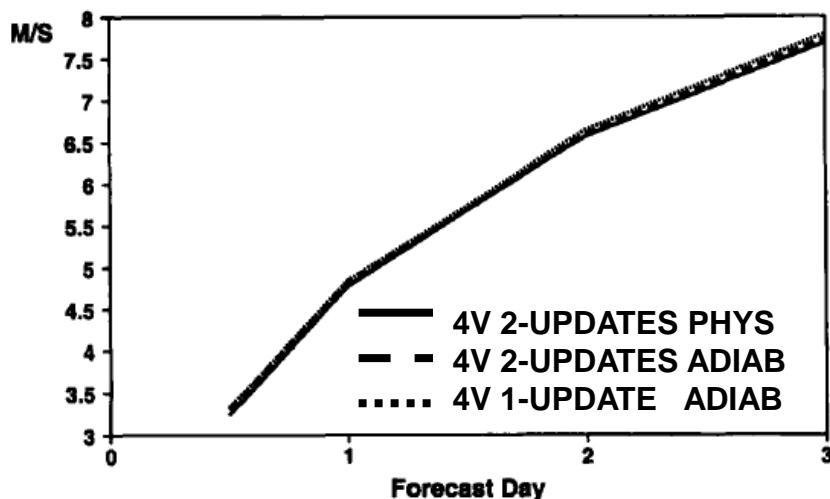
Averaged over 3 months

From Janisková & Lopez 2013

# Impact of linearized physics on forecast scores (3)

## State at ECMWF as in 1998

Tropics: 200 hPa vector wind – rms

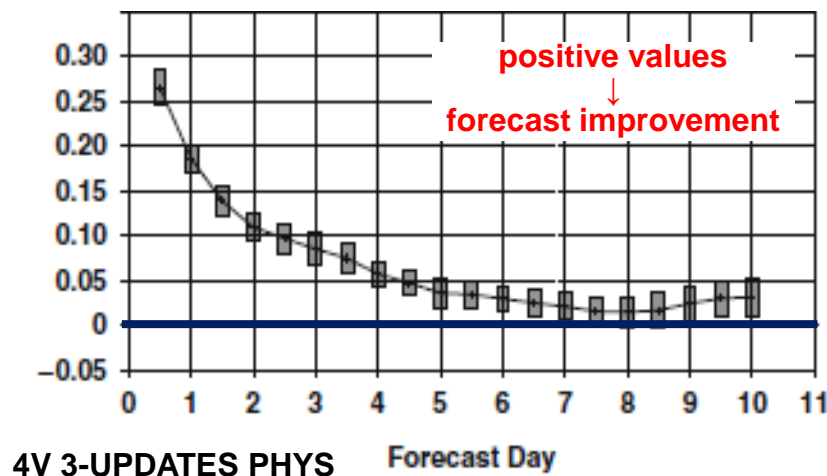


Averaged over 14 forecasts

From Mahfouf et al. 2000

## State at ECMWF as in 2012

Tropics: 200 hPa vector wind – anomaly correlation



Averaged over 3 months

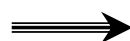
From Janisková & Lopez 2013

**BRAVE DECISION OVER 20 YEARS AGO**

**WITH A BIG VISION FOR THE FUTURE**



Accepting such results when cost increased significantly !!!



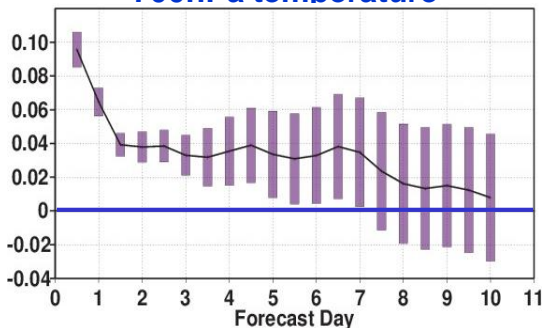
**GRADUALLY REALLY PAID OFF !!!**



# Direct relative improvement of forecast scores from linearized physics

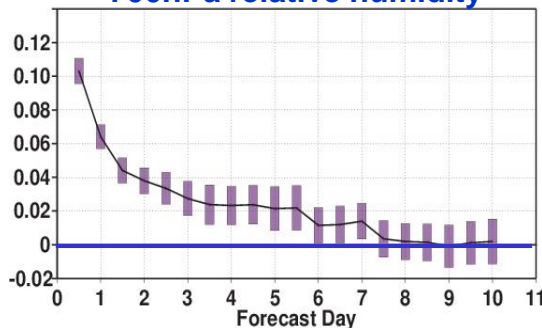
Coming just from including the ECMWF linearized physics in 4D-Var (Janisková & Lopez, 2013)

700hPa temperature

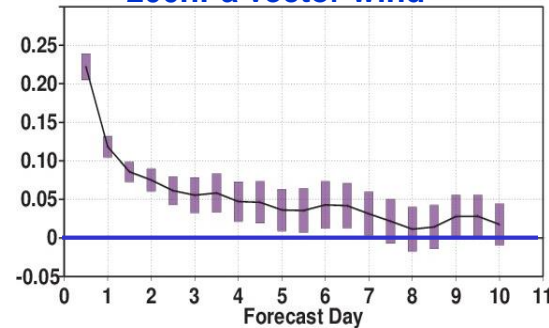


NHem

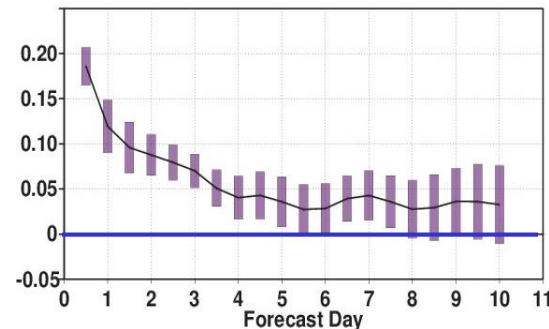
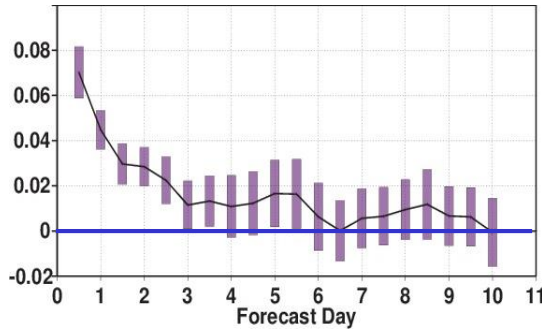
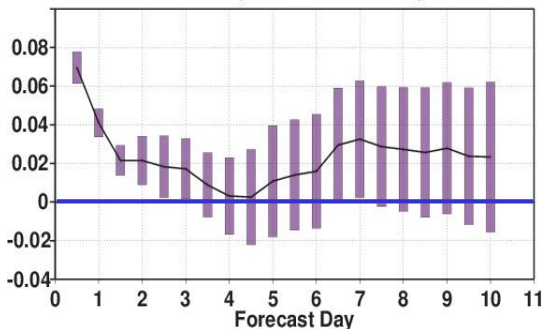
700hPa relative humidity



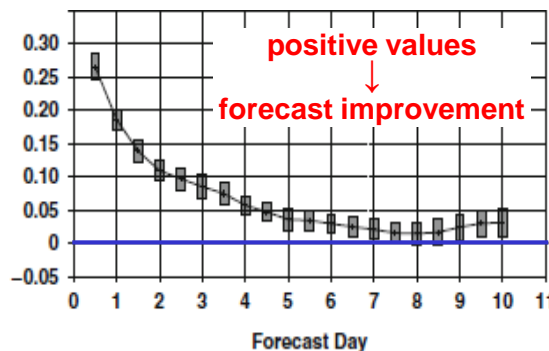
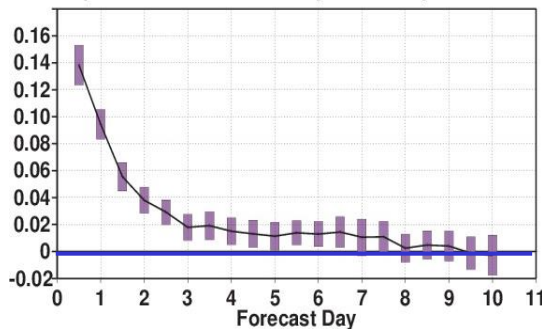
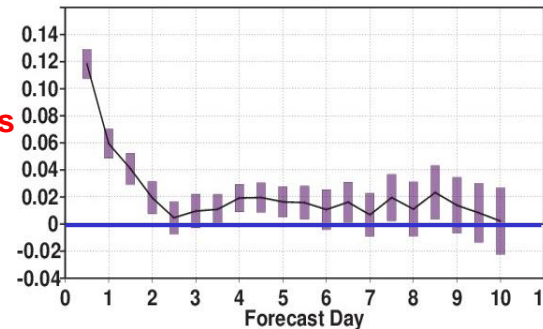
200hPa vector wind



SHem



Tropics

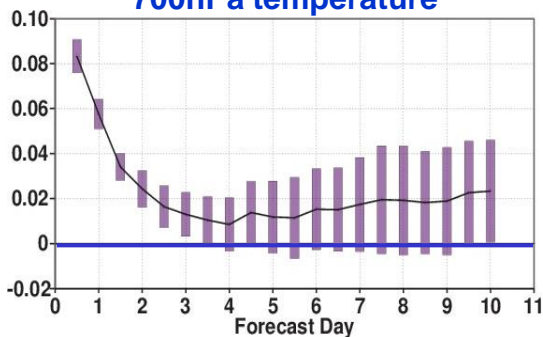


Anomaly correlation – July-Sept. 2011: bars indicate significance at 95% confidence level

# Indirect relative improvement of forecast scores from ECMWF linearized physics

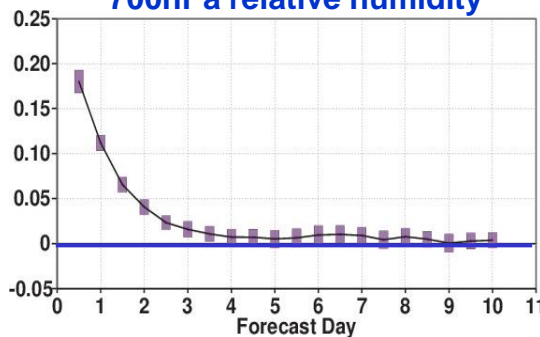
Using observations directly related to the physical processes (e.g. rain, clouds,...)

700hPa temperature

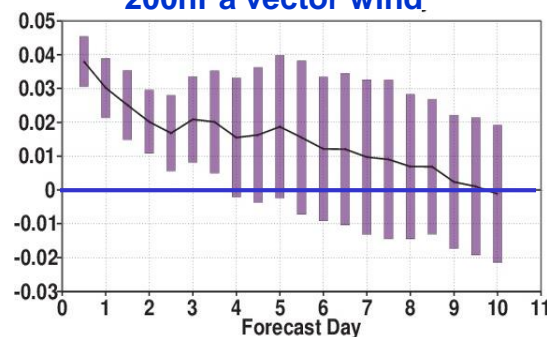


NHem

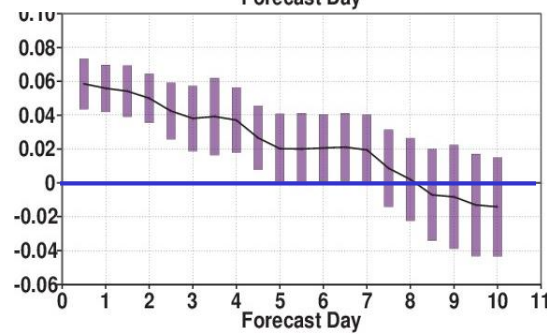
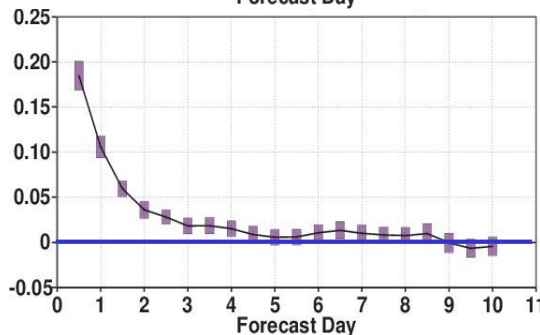
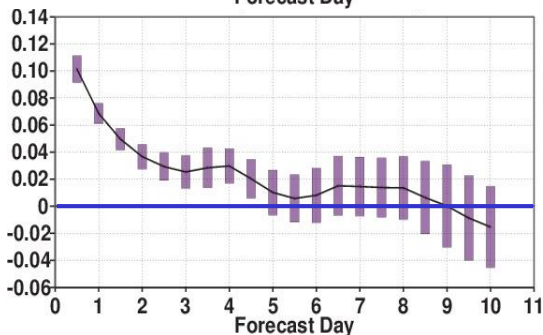
700hPa relative humidity



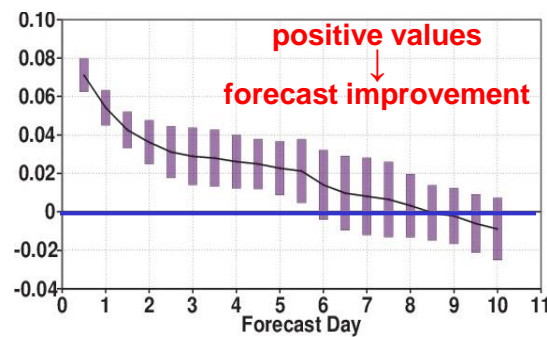
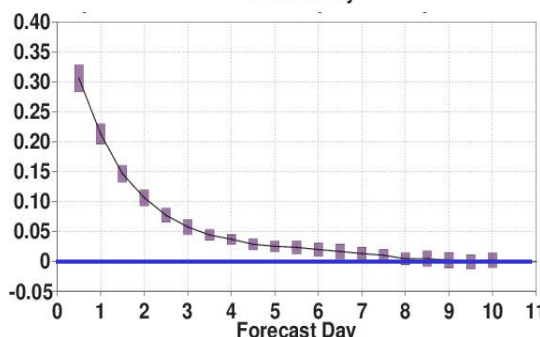
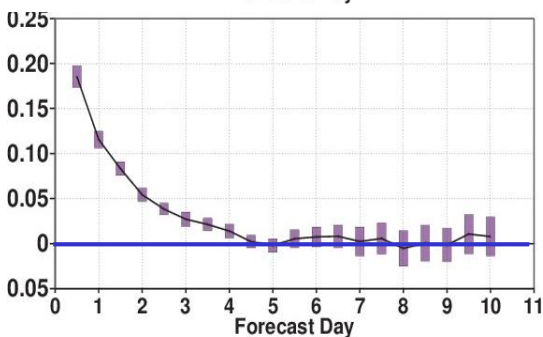
200hPa vector wind



SHem



Tropics

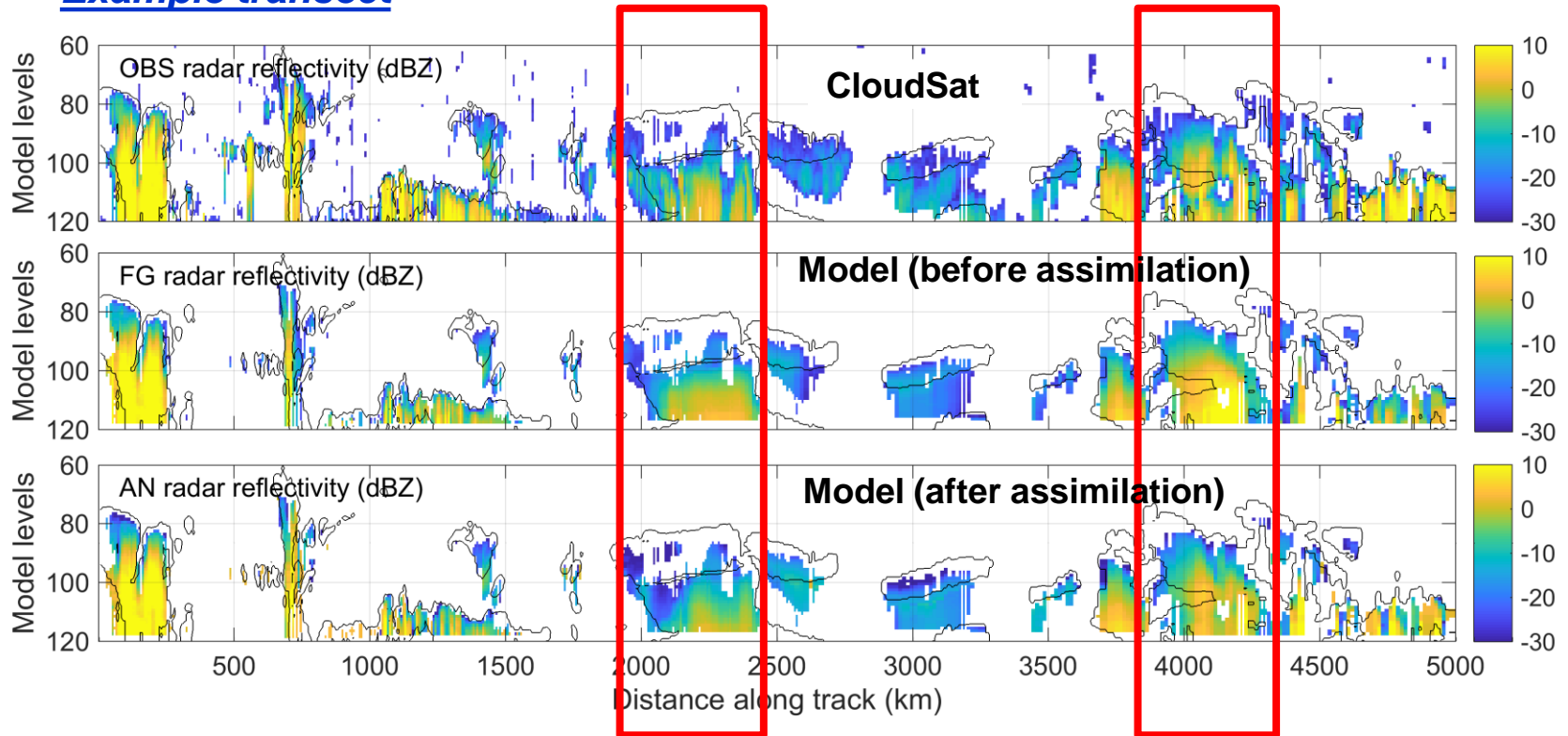


Anomaly correlation – June-Aug. 2014: bars indicate significance at 95% confidence level

# Feasibility of direct assimilation using CloudSat and CALIPSO observations

- Experiments assimilating Cloudsat radar reflectivity (94 GHz) and CALIPSO lidar backscatter (532 nm)

## Example transect



**Situation: 20070731 21:00 UTC – 20070801 09:00 UTC**

## Summary

- **Positive impact from including physical parametrization schemes into the linearized model has been demonstrated.**
- **Physical parametrizations become important components in current variational data assimilation systems:**
  - positive impact on analysis and subsequent forecast
  - enabling to assimilate observations related to physical processes (rain, clouds, ...)
- **Including linearized physical parametrization schemes into singular vector computations can lead to:**
  - more of the SVs structures associated directly with some atmospheric processes
  - better spread in EPS
- **Adjoint of physical processes used for sensitivity studies can provide:**
  - more flow-dependent and more realistic sensitivities
  - different tool for the validation of parametrization schemes  
*(sensitivity to all governing parameters obtained at minimal computational cost)*
  - diagnostic tool for:
    - analyzing sensitivity of a forecast error to initial conditions
    - monitoring the observation impact on short-range forecasts