

# Sensibilités adjointes des précipitations aux conditions initiales

Jean-François Mahfouf  
et  
Bernard Bilodeau

Le 16 juin 2006

- 
- Le matériel est tiré de l'article

Mahfouf, J.-F. and B. Bilodeau, «Adjoint sensitivity of surface precipitation to initial conditions »

soumis à Monthly Weather Review en mai 2006.

- Merci à Monique Tanguay, Stéphane Laroche, Yves Chartier, Mark Buehner, Luc Fillion et Godelieve Deblonde.

# Plan de la présentation

---

- Introduction
- Description des sensibilités adjointes
- Le modèle et les cas choisis
- « Perturbations optimales »
- Examen des sensibilités
- Validité de l'approximation linéaire tangente
- Conclusions
- Travaux en cours et développements possibles

# Introduction

---

- Pour assimiler des données de précipitation, il est nécessaire d'ajouter des versions linéarisées des schémas de convection et de condensation dans la définition de l'opérateur d'observation
- Difficultés :
  - Fortes non-linéarités
  - Seuils (ex. : déclenchement de la convection)  
=> problèmes de convergence dans la minimisation  
=> il est nécessaire de régulariser les schémas
- Pourtant, l'assimilation variationnelle des données de précipitations est faite de façon routinière à NCEP, JMA et à ECMWF
- 1D+4D-Var (Marécal et Mahfouf 2002) : 2 étapes
  - 1D-Var produit des incréments de vapeur d'eau intégrée (Deblonde et al. 2006)
  - assimilation de ces incréments dans le 4D-Var

# Objectifs

---

- Mieux comprendre l'assimilation variationnelle des précipitations de surface, dans le but d'améliorer les conditions initiales et les prévisions (« spin-up »)
- Quelles sont, parmi les variables analysées, celles qui sont le plus sensibles aux précipitations de surface?

Obtient-on la même hiérarchie des sensibilités que Errico et al.?

Errico, R.M., K.D. Raeder, and L. Fillion, 2003: Examination of the sensitivity of forecast precipitation rates to possible perturbations of initial conditions. *Tellus*, 55A, 88-105.

- Comment se comparent les sensibilités...
  - des précipitations convectives et stratiformes?
  - des précipitations instantanées et accumulées?

# Objectifs (suite)

---

- Quel est l'impact de la fermeture du schéma de convection sur les sensibilités adjointes?
- Quel est l'impact de considérer seulement les incréments d'humidité dans l'assimilation 1D-Var des précipitations?

# Plan de la présentation

---

- Introduction
- **Description des sensibilités adjointes**
- Le modèle et les cas choisis
- « Perturbations optimales »
- Examen des sensibilités
- Validité de l'approximation linéaire tangente
- Conclusions
- Travaux en cours et développements possibles

# Description des sensibilités adjointes

$$X_t = M(X_0)$$

Modèle GEM non-linéaire

$$P(x) = \begin{cases} x & (x \in \Omega) \\ 0 & (x \notin \Omega) \end{cases}$$

Opérateur de projection (masque)

$$J = \frac{1}{N_\Omega} \sum_{\Omega} P[R(X_t)]$$

$J$  : moyenne des précip. dans le domaine  $\Omega$

$R$  : taux des précipitations

$N_\Omega$  : nombre de points dans le domaine  $\Omega$

Sensibilités  
adjointes  
p/r aux  
conditions  
initiales

$$\frac{\partial J}{\partial X_0} = \frac{1}{N_\Omega} M^T [R^T \{P(I)\}]$$

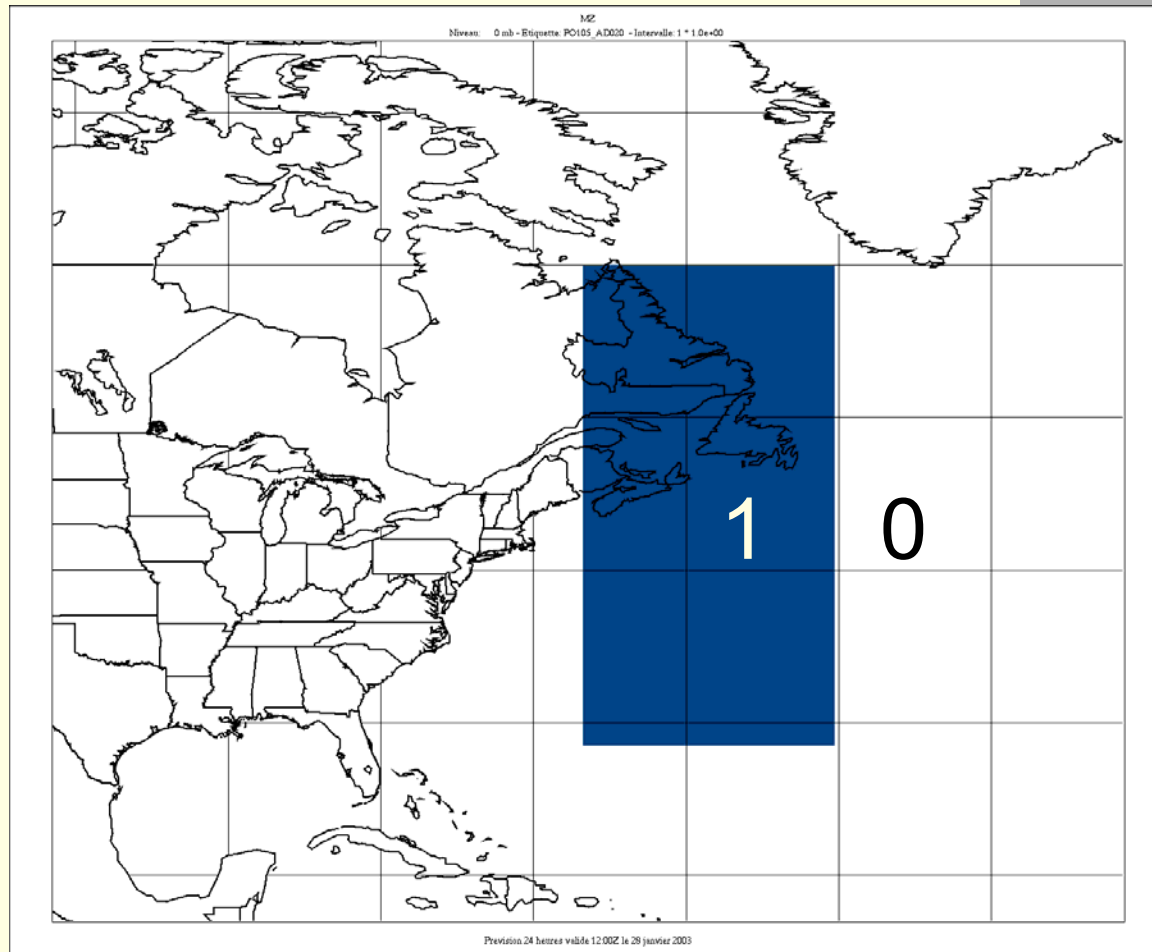
$I$  : vecteur identité (2D)

$R^T$  : adjoint de la physique humide

$M^T$  : adjoint de GEM



# Domaine $\Omega$ (masque)



Un poids égal est donné à tous les points dans la boîte

# Plan de la présentation

---

- Introduction
- Description des sensibilités adjointes
- **Le modèle et les cas choisis**
- « Perturbations optimales »
- Examen des sensibilités
- Validité de l'approximation linéaire tangente
- Conclusions
- Travaux en cours et développements possibles

# Le modèle

---

- GEM opérationnel  
(même configuration que dans la boucle interne du 4D-Var)
- Grille 240 x 120 (1.5°), 28 niveaux
- $\Delta t = 30$  min
- Physique du modèle global opérationnel :
  - Rayonnement solaire et IR
  - Surface : force-restore
  - Diffusion verticale implicite
  - Convection restreinte (CONRES)
  - Gravity wave drag + blocage atmosphérique
  - Convection et condensation :
    - OLDKUO
    - NEWSUND
- Physique du modèle adjoint :
  - Diffusion verticale (coefficients K recyclés de la trajectoire NL)
  - Gravity wave drag + blocage atmosphérique
  - Convection et condensation :
    - CONDS
    - KUOSYM

# Fermeture du schéma de Kuo symétrique

- Fermeture en humidité :

$$R'_{c1} = \int_{pb}^{pt} \left( \frac{\partial q'}{\partial t} \right)_{LS} \frac{dp}{g}$$

LS : large scale

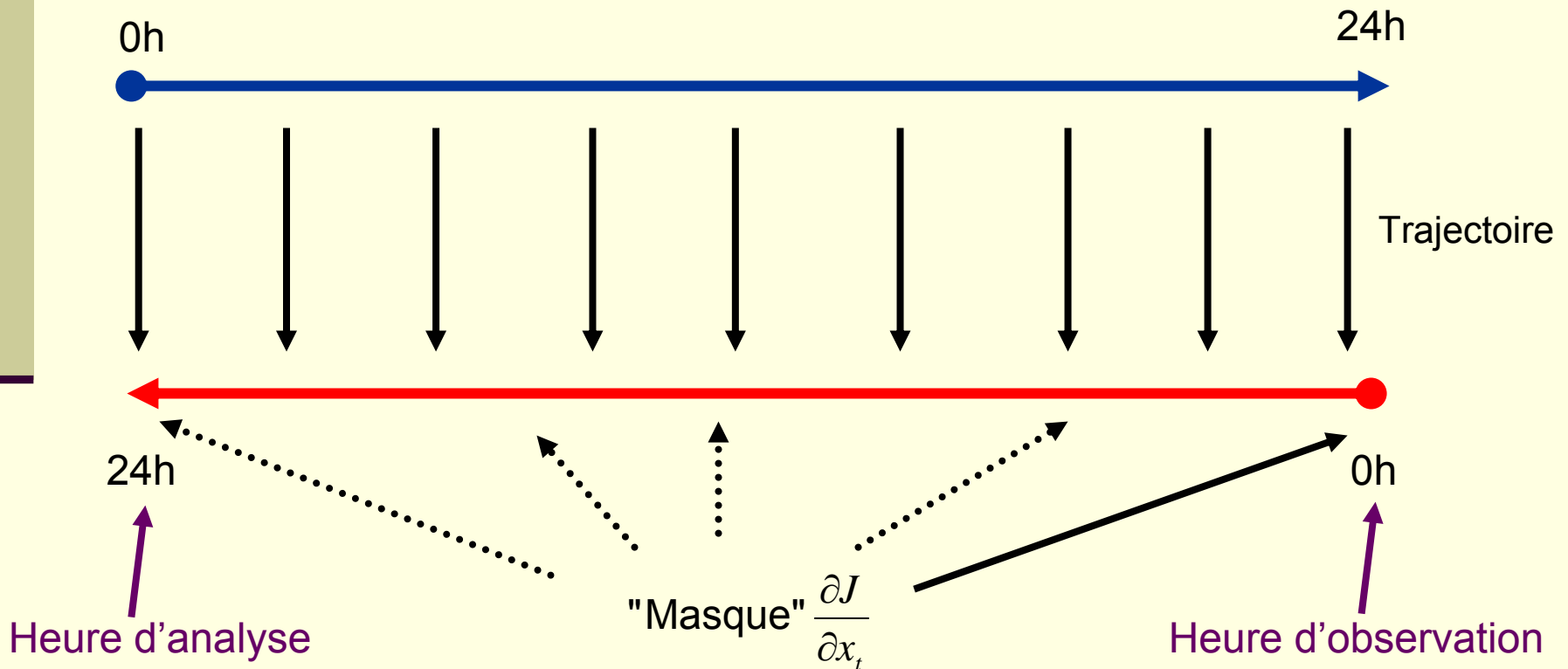
- Fermeture en température :

$$R'_{c2} = -\frac{C_p}{L} \int_{pb}^{pt} \left( \frac{\partial T'}{\partial t} \right)_{LS} \frac{dp}{g}$$

# Intégrations numériques

Modèle non-linéaire

Modèle adjoint



# « Forçage » des sensibilités de l'adjoint

$$\frac{\partial J_{conv}}{\partial \mathbf{x}_t} = \delta_{ij} \quad \swarrow \text{(masque)}$$

Préc. instantanées : forçage initial slt

$$\frac{\partial J_{strat}}{\partial \mathbf{x}_t} = \delta_{ij}$$

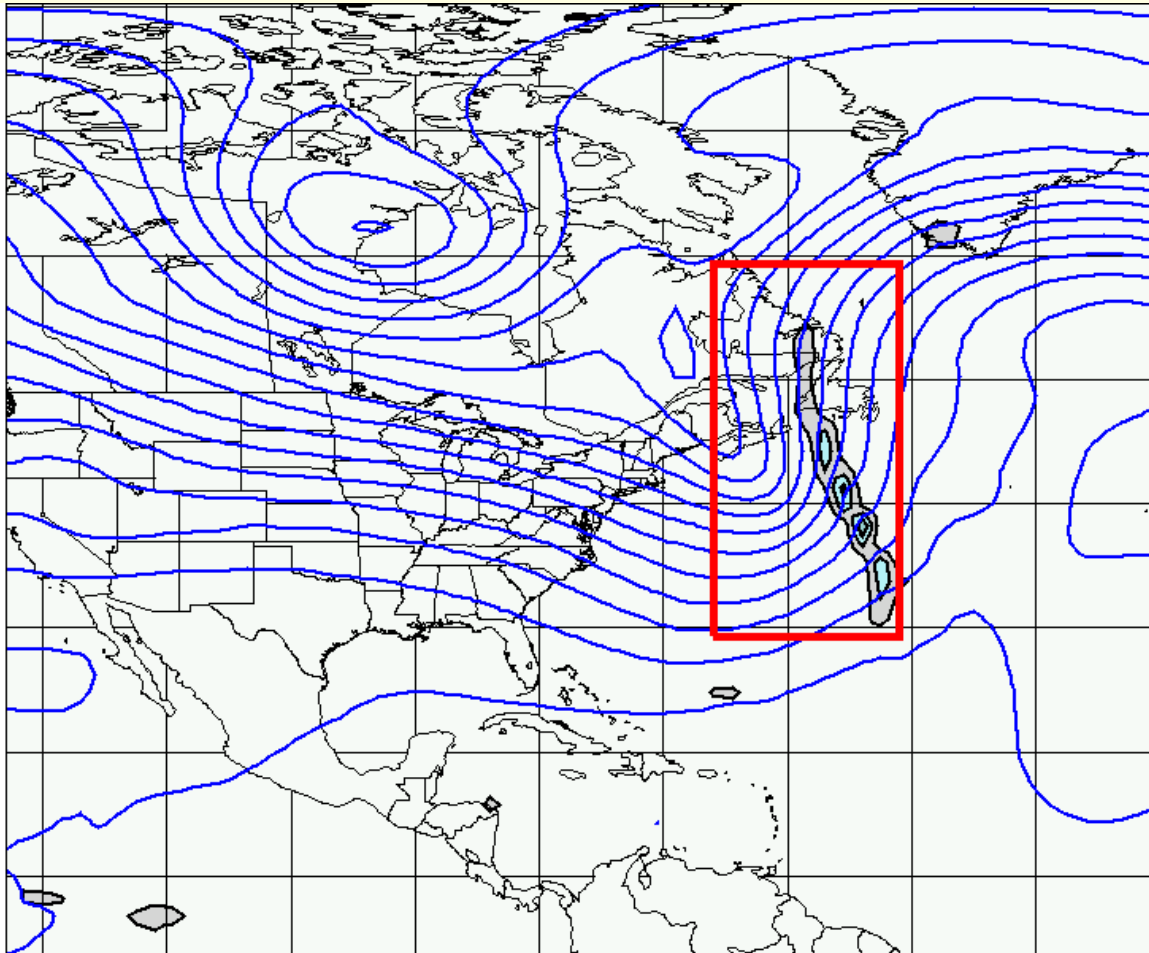
Préc. accumulées : à tous les pas de temps

- On doit faire une intégration adjointe pour chaque type d'expérience :

convectif		accumulé		6 heures
stratiforme		instantané		24 heures

# Cas extratropical

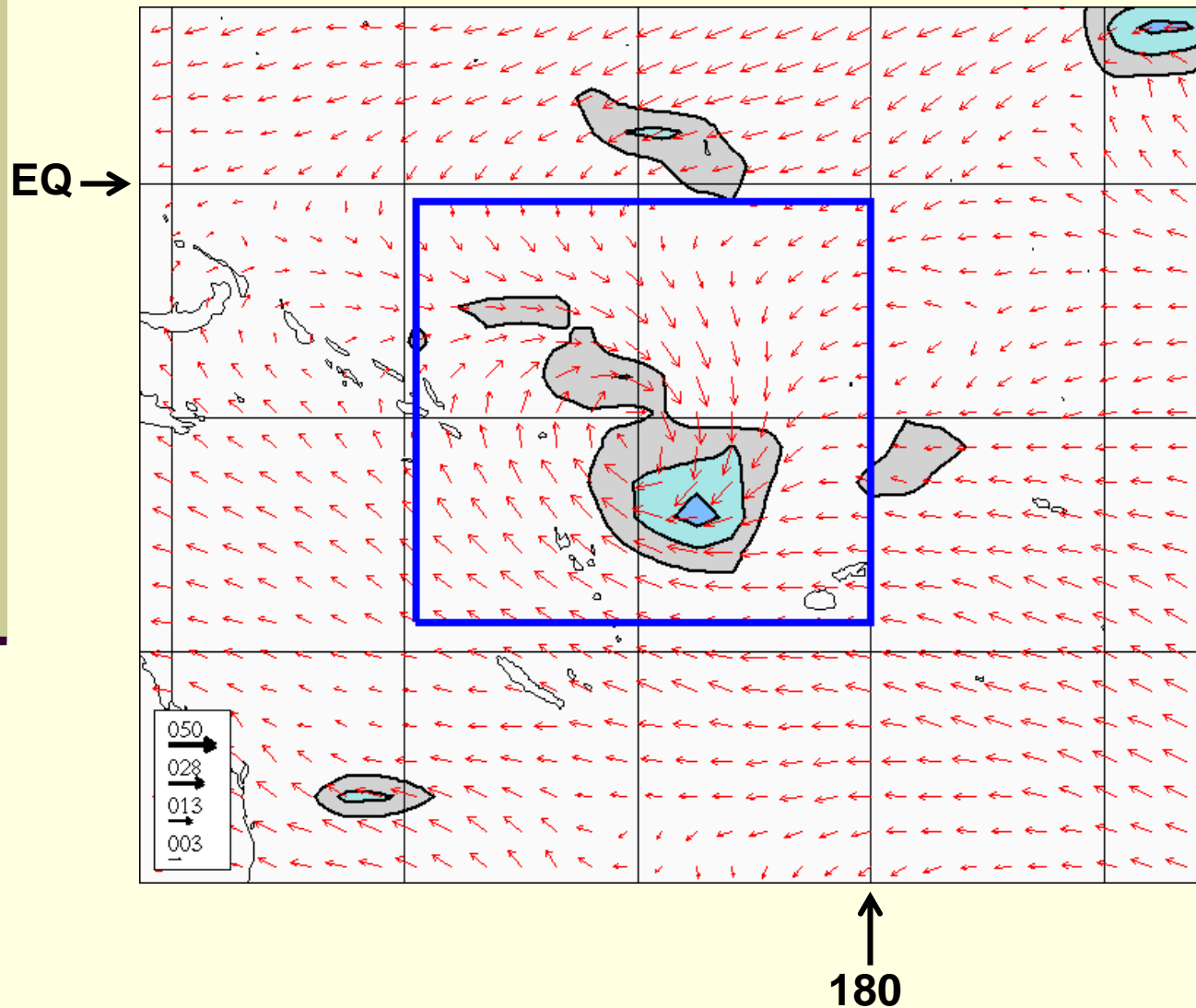
27 janvier 2003 12 UTC



Prév. 24h  
GZ500  
+  
Taux pcp tot  
(contour 2 mm/h)

# Typhon ZOE

26 décembre 2002 00 UTC



Prév. 24h

Vents à 10 m

Taux de pcp  
(contour 2 mm/h)



# Plan de la présentation

---

- Introduction
- Description des sensibilités adjointes
- Le modèle et les cas choisis
- « **Perturbations optimales** »
- Examen des sensibilités
- Validité de l'approximation linéaire tangente
- Conclusions
- Travaux en cours et développements possibles

# Comment comparer les sensibilités?

$J$  représente la moyenne des taux des précipitations dans un domaine  $\Omega$ .

$\frac{\partial J}{\partial x_0}$  est le gradient de  $J$  par rapport aux conditions initiales (sortie de l'adjoint).

$$x_0 = (T, q, u, v, p_s)$$

$$\frac{\partial J}{\partial T} \quad (\text{m/s})/\text{K}$$

$$\frac{\partial J}{\partial q} \quad (\text{m/s})/(\text{kg/kg})$$

$$\frac{\partial J}{\partial u} \quad (\text{m/s})/(\text{m/s})$$

$$\frac{\partial J}{\partial v} \quad (\text{m/s})/(\text{m/s})$$

$$\frac{\partial J}{\partial p_s} \quad (\text{m/s})/\text{Pa}$$

# “Perturbations optimales” (Errico et al.)

On maximise

$$J' = \left[ \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} \right]^T \bullet \mathbf{x}' = \sum_{i,j,k} \left[ \frac{\partial J}{\partial u_{ijk}} u'_{ijk} + \frac{\partial J}{\partial v_{ijk}} v'_{ijk} + \frac{\partial J}{\partial T_{ijk}} T'_{ijk} + \frac{\partial J}{\partial q_{ijk}} q'_{ijk} \right] + \sum_{i,j} \frac{\partial J}{\partial p_{sij}} p'_{sij}$$

sous la contrainte  $\mathbf{x}'^T W \mathbf{x}' = 1$

et on obtient :

$$J'_{max} = \left\{ \left[ \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} \right]^T W^{-1} \left[ \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} \right] \right\}^{1/2}$$

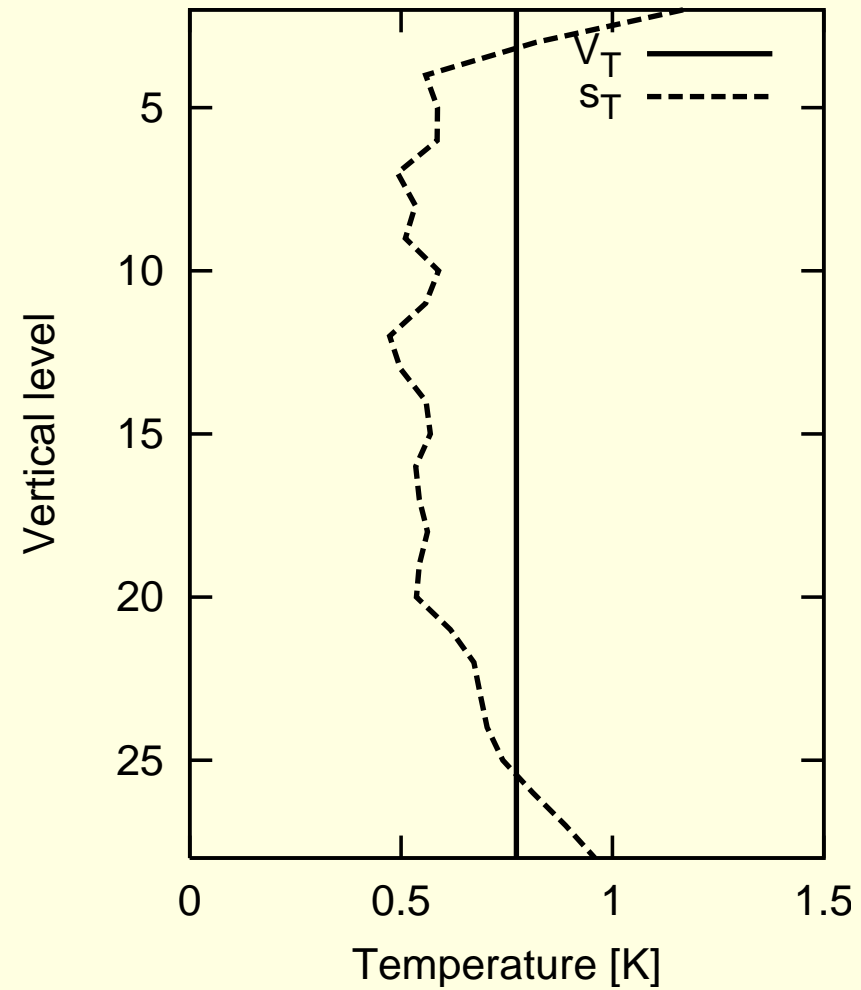
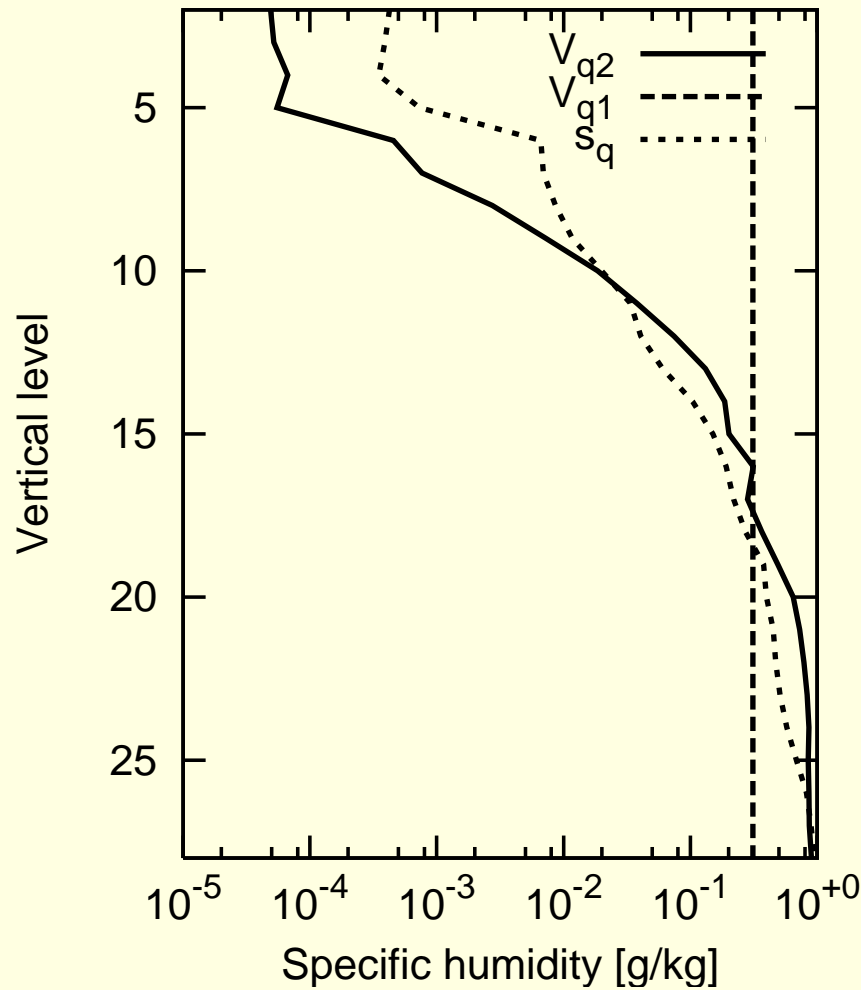
avec  $W^{-1}_u = W^{-1}_v = 2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$   $W^{-1}_T = 0.6 \text{ K}^2$   $W^{-1}_q = W^{-1}_T \times \left[ \frac{\partial q_s}{\partial T} \cdot \frac{q}{q_s} \right]^2 \text{ kg}^2 \text{ kg}^{-2}$   $W^{-1}_{ps} = 0.7 \text{ hPa}^2$

# Justification du choix des poids

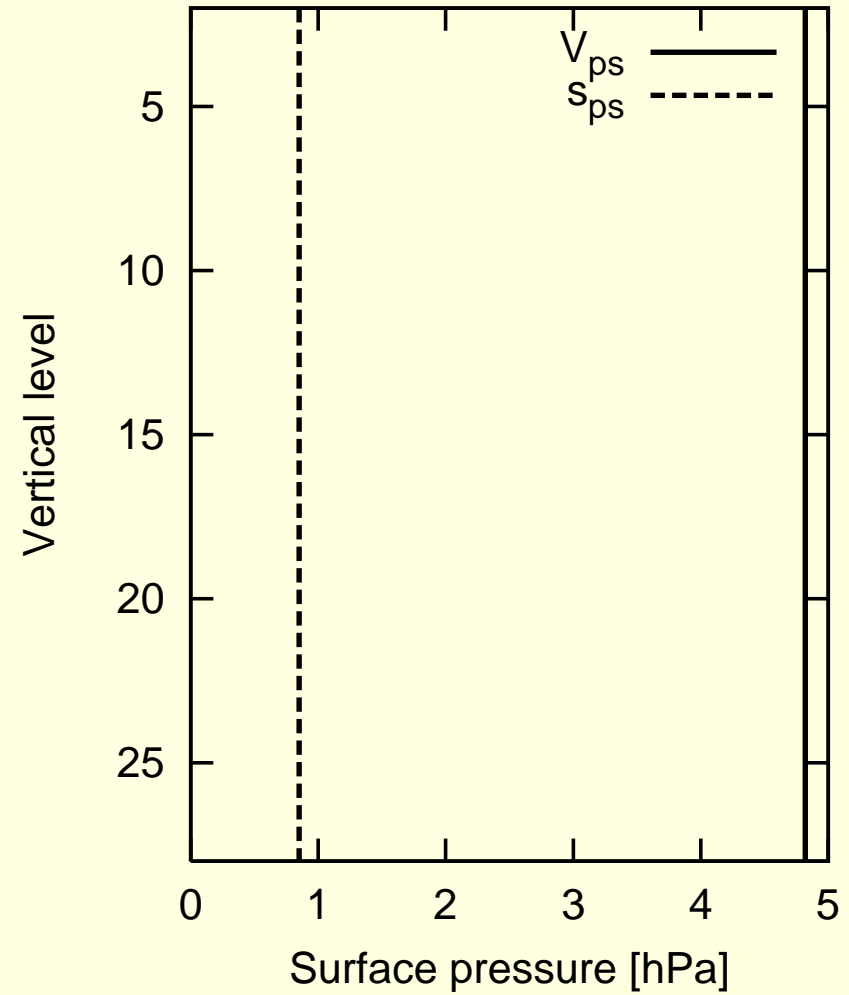
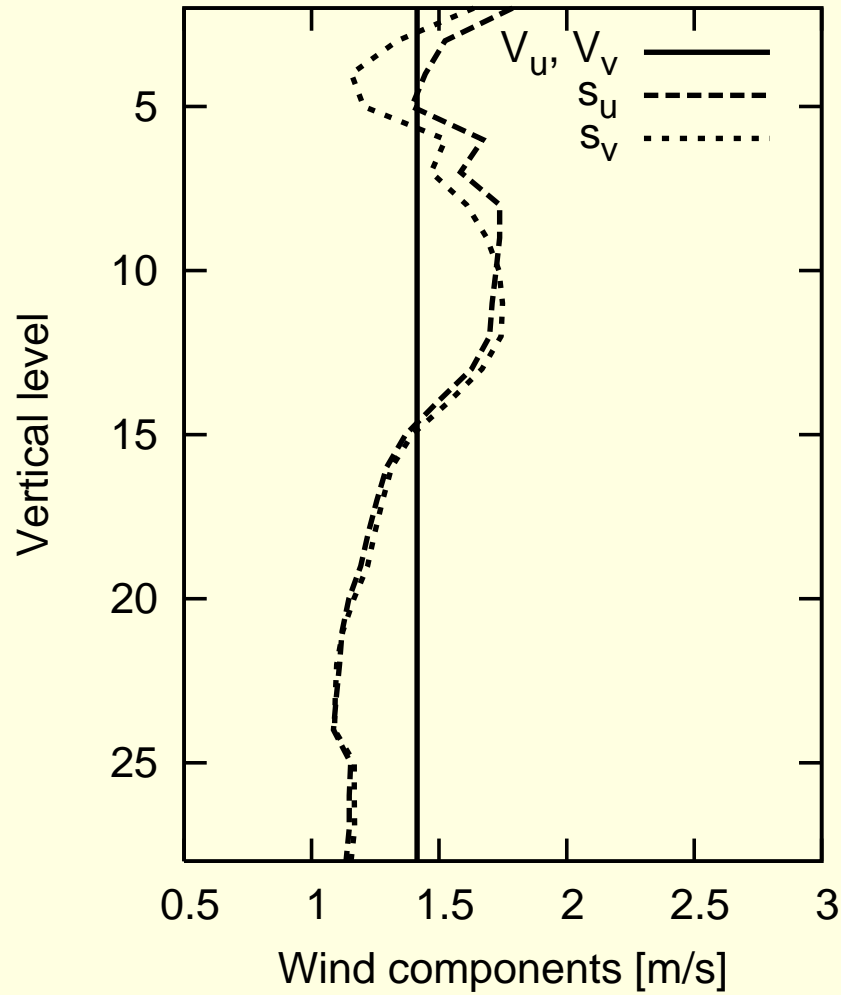
---

- Les poids découlent de la norme énergie humide
- Les poids permettent la comparaison des sensibilités entre elles
- Ils dépendent uniquement de la verticale (simplicité)
- Les poids sont représentatifs des variances d'erreur d'analyse pour le cas météorologique choisi  
(27 janvier 2003 12 UTC)

# Poids vs écarts-types des incréments d'analyse



# Poids vs écarts-types des incréments d'analyse

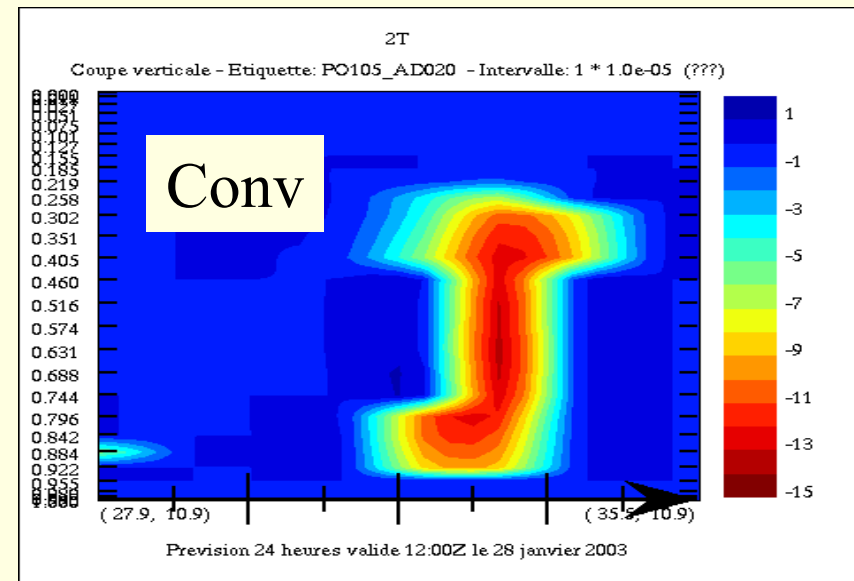
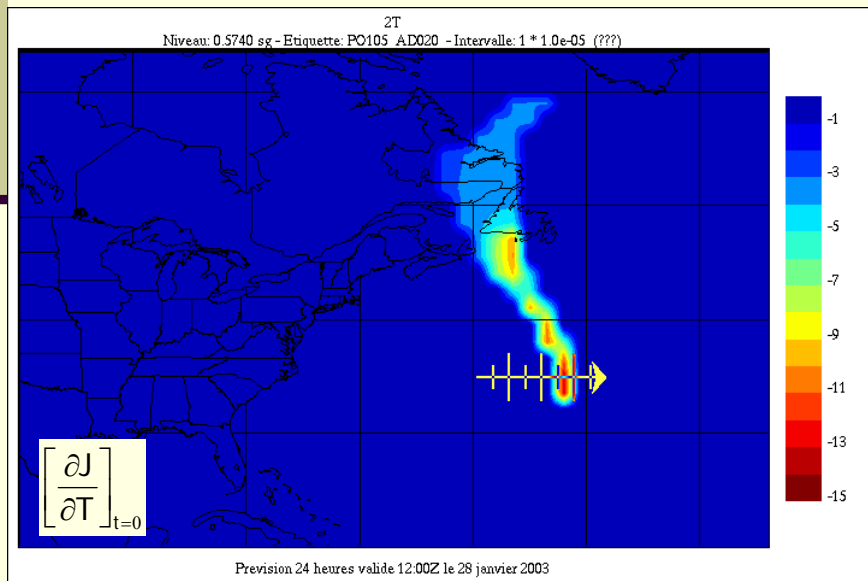
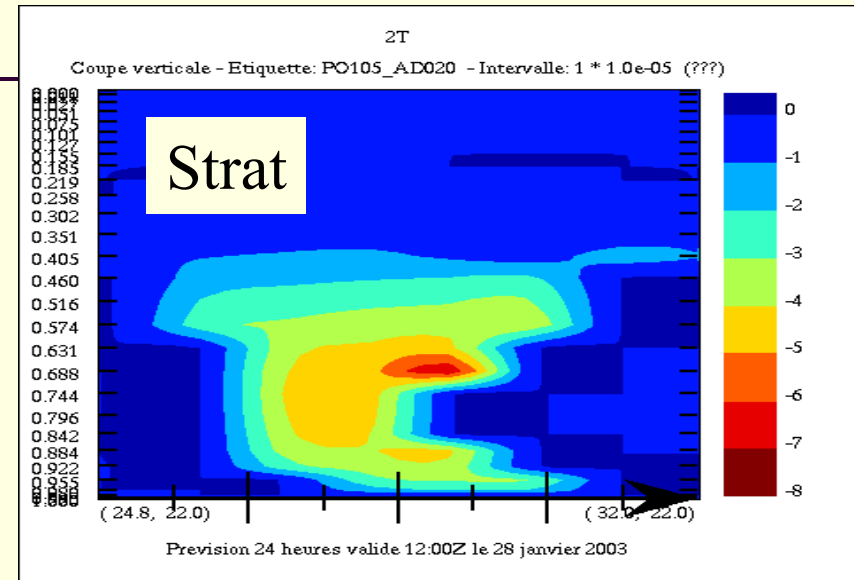
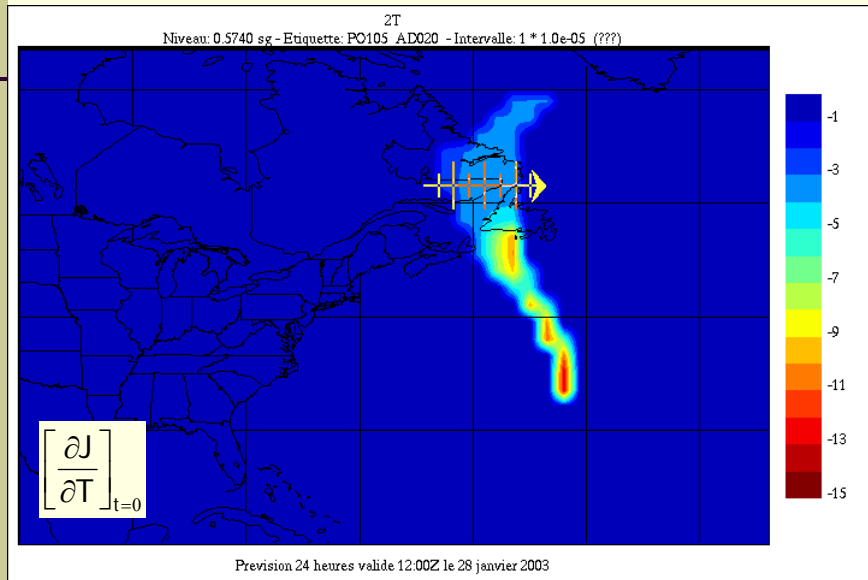


# Plan de la présentation

---

- Introduction
- Description des sensibilités adjointes
- Le modèle et les cas choisis
- « Perturbations optimales »
- **Examen des sensibilités**
- Validité de l'approximation linéaire tangente
- Résumé et conclusions
- Travaux en cours et développements possibles

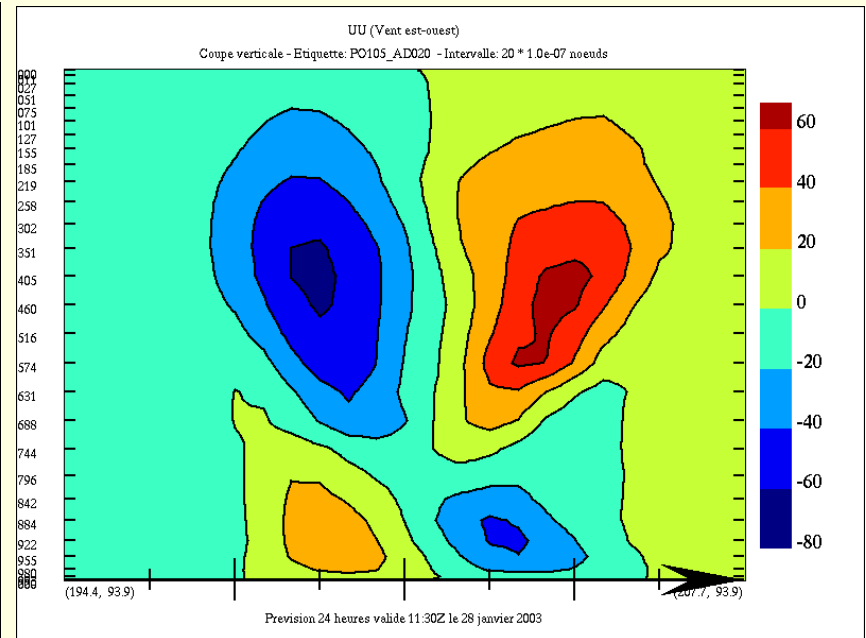
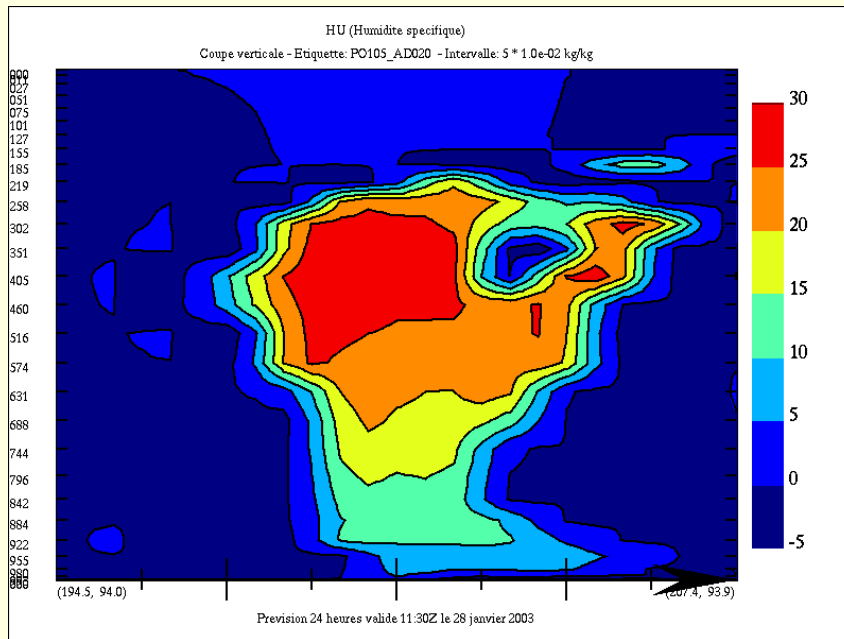
# $\frac{\partial J}{\partial T}$ au temps initial ( $t_0$ ) pour les précipitations instantanées





$$\frac{\partial J}{\partial q} \text{ et } \frac{\partial J}{\partial u} \text{ au temps initial } (t_0)$$

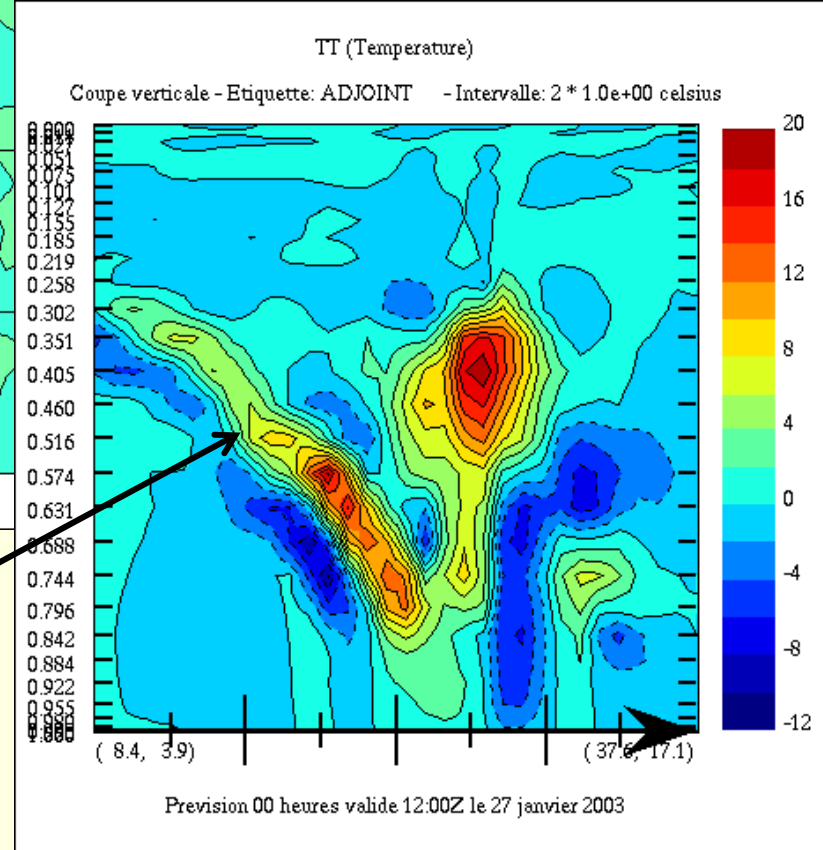
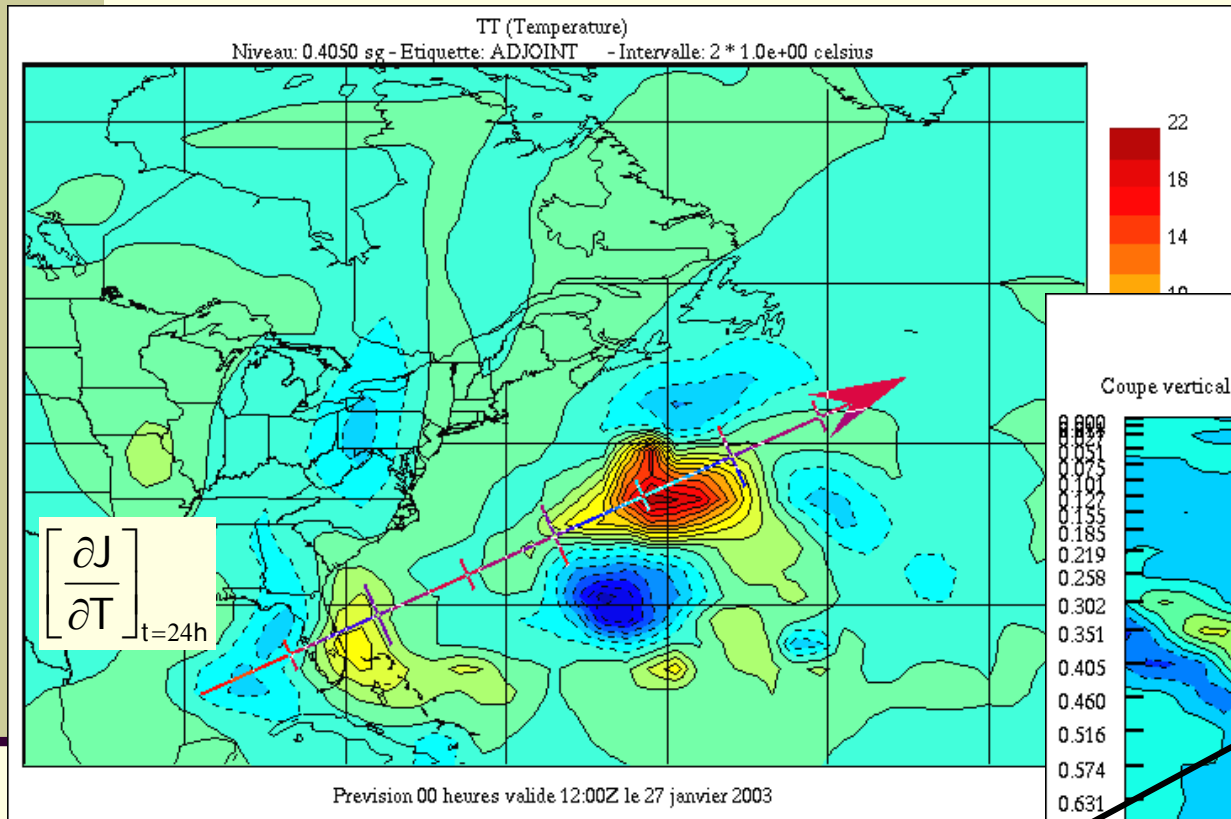
## Coupes verticales faites le long de 50°N



$$\frac{\partial J}{\partial q}$$

$$\frac{\partial J}{\partial u}$$

# Évolution de $\frac{\partial J}{\partial T}$ après 24 heures

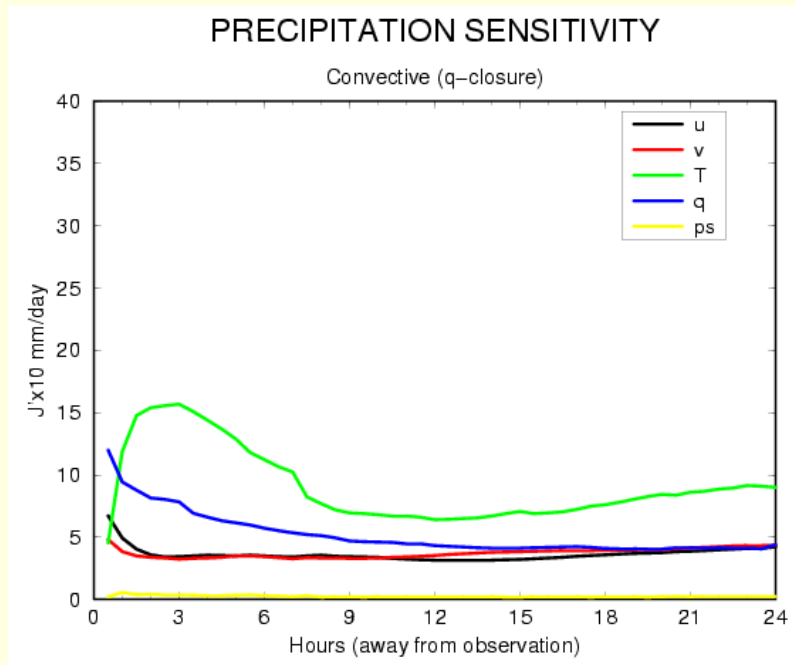


Structures baroclines

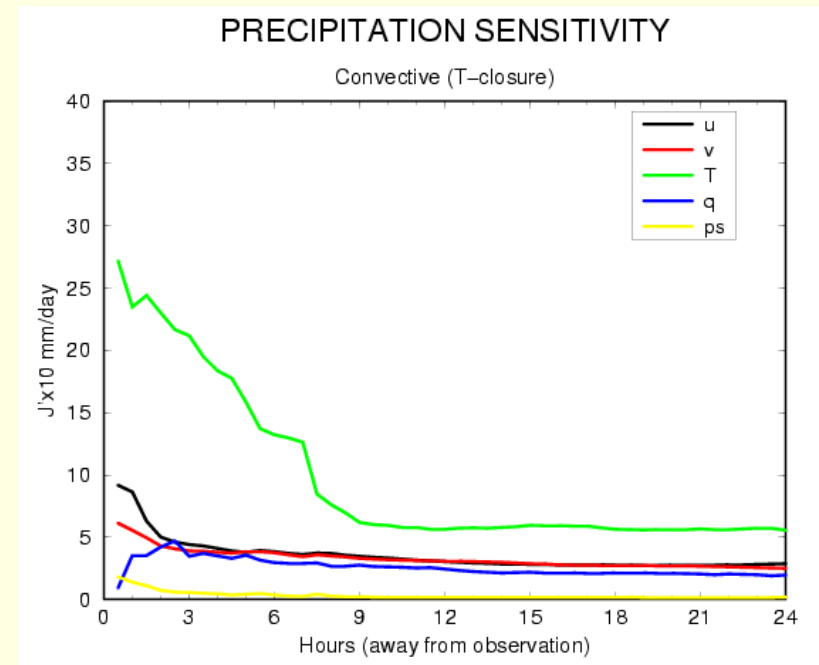
# Évolution temporelle de $J'_{\max}$

Cas extratropical

Précipitations instantanées



Convectif (q)

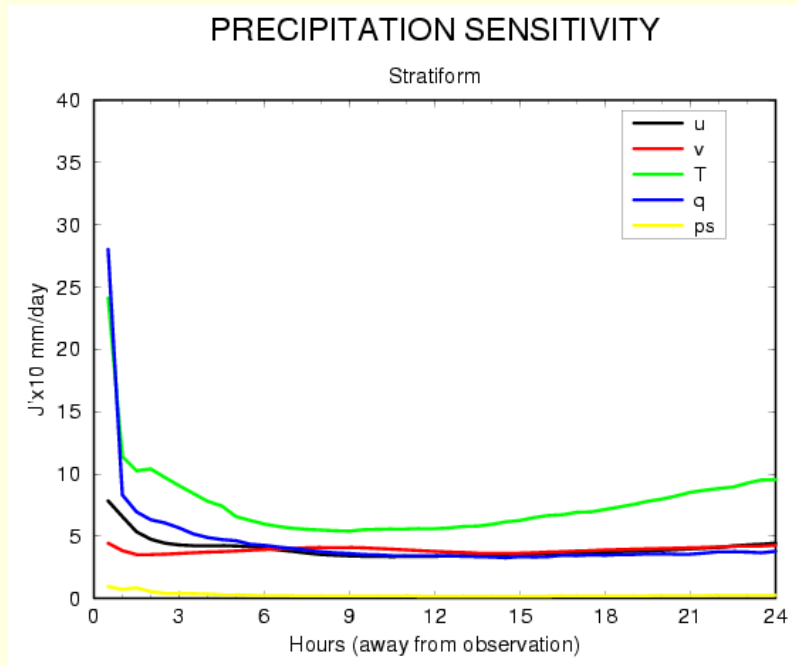


Convectif (T)

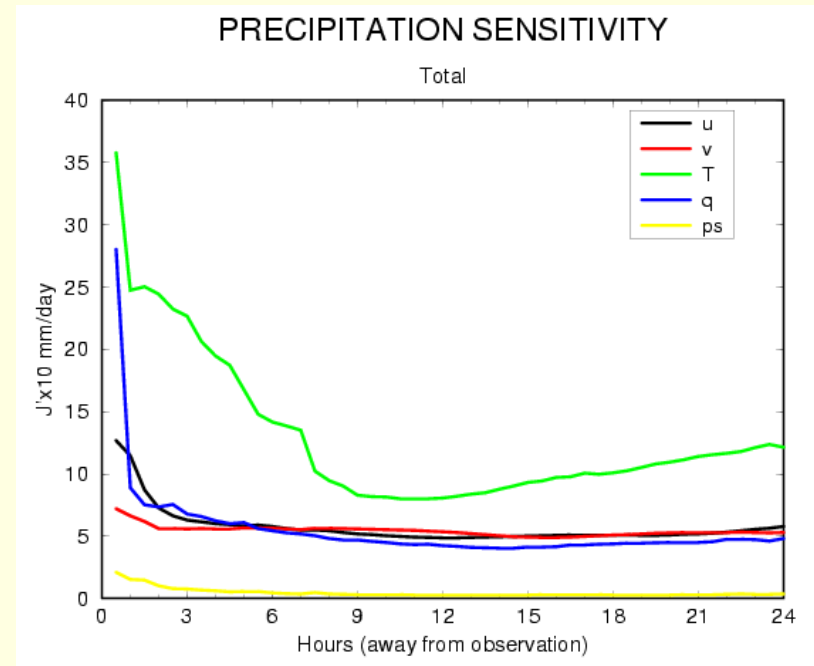
# Évolution temporelle de $J'_{\max}$

Cas extratropical

Précipitations instantanées



Stratiforme

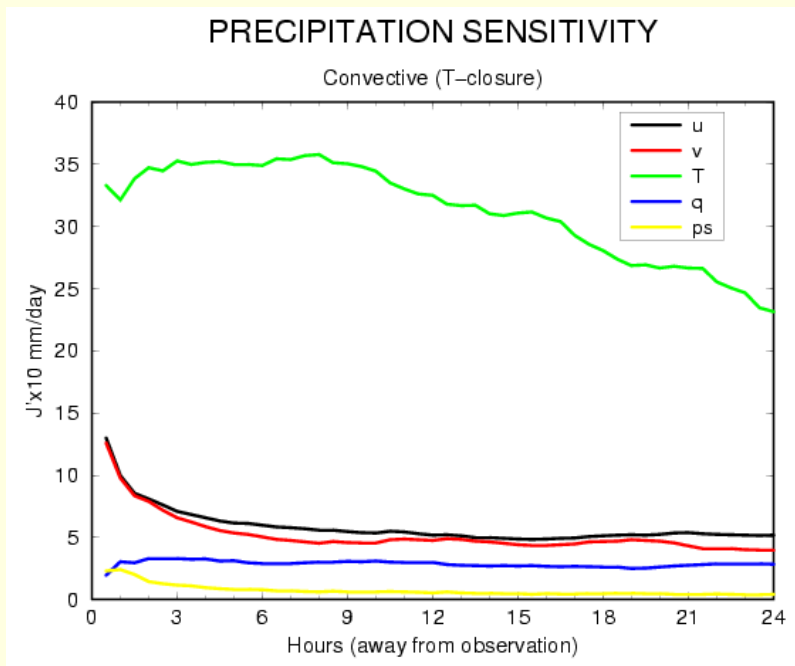


Total  
(T)

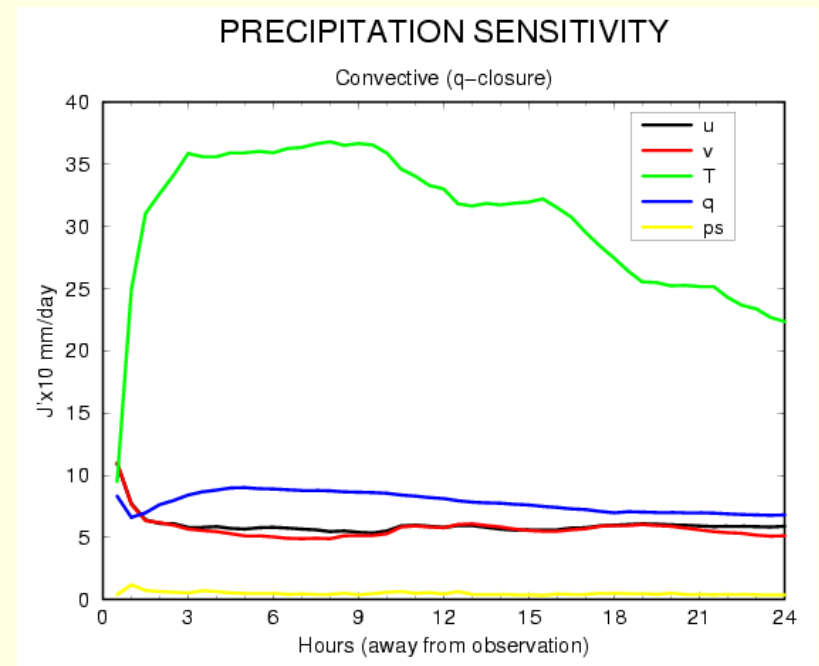
# Évolution temporelle de $J'_{\max}$

Typhon Zoe

Précipitations instantanées



Convectif (T)



Convectif (q)

# Validité de l'approximation LT : méthode

$$\Delta J = J(\mathbf{x}_0 + \mathbf{x}'_0) - J(\mathbf{x}_0) \quad \mathbf{x}'_0 : \text{incréments d'analyse}$$

intégrations du modèle non linéaire

$$J' \approx \left[ \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}_0} \right]^T \bullet \mathbf{x}'_0$$

Intégration du modèle adjoint

$$\frac{\Delta J}{J'} \approx 1$$

# Validité de l'approximation LT

## Cas extratropical

### Précipitations instantanées

Précipitations	Heure	$\Delta J$ (NL)	$J'$ (AD)	quotient
Inst. strat.	6	-247 (-164)	-195	1.3 (0.8)
Inst. conv.	6	-97 (-561)	-22	4.5 (25.7)
Inst. total	6	-345 (-725)	-217	1.6 (3.3)
Inst. strat.	24	190 (65)	-88	-2.2 (-0.7)
Inst. conv.	24	-52 (134)	-226	0.2 (-0.6)
Inst. total	24	138 (199)	-314	-0.4 (-0.6)

# Validité de l'approximation LT

## Cas extratropical

### Précipitations accumulées

Précipitations	Heure	$\Delta J$ (NL)	$J'$ (AD)	quotient
Acc. strat.	6	-55 (39)	-36	1.5 (1.1)
Acc. conv.	6	-72 (125)	-11	6.4 (11.0)
Acc. total	6	-127 (-164)	-47	2.7 (3.5)
Acc. strat.	24	-35 (-72)	-78	0.5 (0.9)
Acc. conv.	24	-249 (-176)	-197	1.3 (0.9)
Acc. total	24	-285 (-248)	-275	1.0 (0.9)



# Validité de l'approximation LT

## Cas tropical

### Précipitations instantanées et accumulées

---

Précipitations	Heure	$\Delta J$ (NL)	$J'$ (AD)	quotient
Inst. total	6	251 (-539)	123	2.0 (-4)
Inst. total	24	284 (928)	237	1.2 (3.9)
Acc. total	6	146 (-97)	23	6.4 (-4.3)
Acc. total	24	441 (157)	211	2.1 (0.8)

# Plan de la présentation

---

- Introduction
- Description des sensibilités adjointes
- Le modèle et les cas choisis
- « Perturbations optimales »
- Examen des sensibilités
- Validité de l'approximation linéaire tangente
- **Résumé et conclusions**
- **Travaux en cours et développements possibles**

# Résumé et conclusions

---

- La méthodologie dite des « perturbations optimales » de Errico et al. (2003) a été utilisée pour comparer la sensibilité des précip. aux variables d'analyse. Résultats généralement en accord.
- 2 situations météo ont été considérées : cyclone extratropical et typhon
- Les sensibilités au temps d'observation ( $t_0$ ) sont très différentes de celles estimées (par le modèle adjoint) à des temps ultérieurs
- Température : c'est la variable dominante
  - influence locale à  $t_0$
  - domine sur  $q$  après 3h
  - influence en amont après 12h (instabilité barocline)

# Résumé et conclusions (suite)

---

- Humidité spécifique :
  - importante à  $t_0$  pour Strat. et Conv. (fermeture en  $q$ )
  - confirme les travaux sur le 1D-Var (incréments  $q$  vs  $T$ )
- Vents :
  - moins importants que  $T$
  - importance comparable à  $q$
  - leur impact initial est maximal via un rehaussement de la convergence à bas niveau et de la divergence à haut niveau
- Pression de surface : faible impact (mais non négligeable)
- Fermeture du schéma de convection :
  - a un impact important dans les 3 premières heures
  - impact accru pour fermeture en  $q$  (instabilité barocline)

# Résumé et conclusions (suite)

---

- L'approximation LT demeure acceptable pour les précipitations accumulées
- 1D+4D-Var : génère des incréments de vapeur d'eau intégrée au-dessus des océans, de façon instantanée. Les incréments de température sont négligés.
  - validité de l'approximation LT (précipitations instantanées)?
  - sensibilités à  $q$  diminuent rapidement!
  - permet d'assécher des zones de précipitations fictives et de réduire le « spin-down » (ECMWF)
- Nécessité d'inclure T dans la stratégie d'assimilation des données pluvieuses :
  - 4D-Var
  - couplage explicite du réchauffement diabatique avec les variables de contrôle à travers la matrice B (Fillion 2004)

# Travaux en cours

---

- Tester 2 schémas de convection :
  - Schéma simplifié
    - dérivé de KUOSYM
    - utilisable avec tout schéma de convection NL
    - se nourrit de la trajectoire du code NL  
(déclenchement, base et sommet des nuages)
  - Kain-Fritsch (méthode des perturbations)
  - Étude de la validité de l'approximation linéaire tangente
  - Examen des sensibilités adjointes

# Développements possibles

---

1) Notre étude : maximiser les précipitations

$$J(\mathbf{x}_0) = \mathbf{R}(\mathbf{x}_0)$$

2) Minimiser l'écart des précipitations prévues à une analyse de précipitations

$$J(\mathbf{x}_0) = [\mathbf{R}(\mathbf{x}_0) - \mathbf{R}_a]^2$$

3) Études de sensibilités

$$J(\mathbf{x}_0) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_t^a)^\top \mathbf{W}^{-1}(\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_t^a) + \beta[\mathbf{R}(\mathbf{x}_0) - \mathbf{R}_a]^2$$