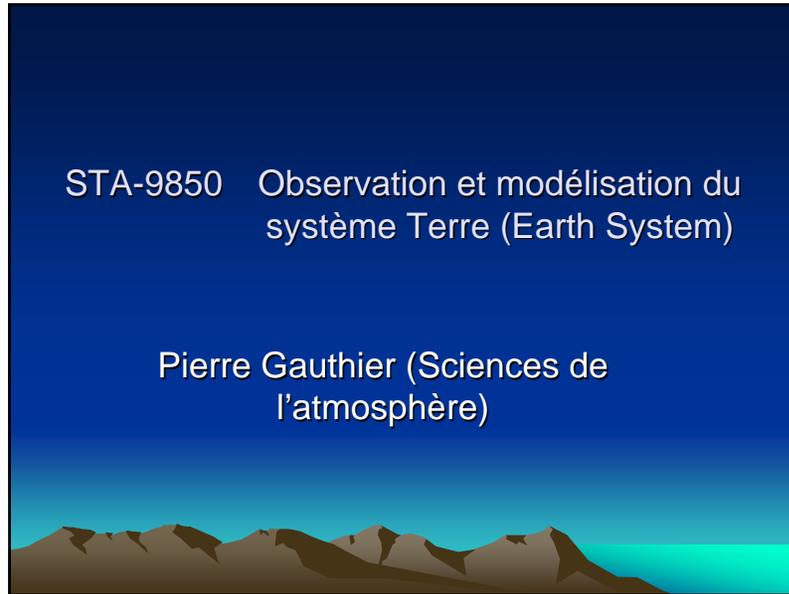


STA-9850 Observation et modélisation du système Terre (Earth System)

Pierre Gauthier (Sciences de l'atmosphère)



Plan de cours

• Introduction

- * Motivation et origine (video)
- * Le Système Terre: définition des différentes composantes et leurs interactions
- * Observation de la Terre: le réseau global d'observations

• Modélisation et observation du système Terre

- * Validation des systèmes de prévision météorologique

• Couplage d'un modèle dynamique à une chimie atmosphérique complexe

• Autres exemples

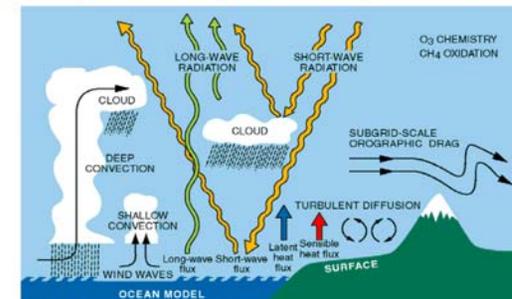
- Atmosphère et océans
- Atmosphère, hydrologie et surface

Evaluation

- Travail de 10 à 15 pages traitant du rôle et de l'impact de l'une des composantes du système
- Présentation de 15 à 20 minutes suivie de discussions
 - * 16 et 17 décembre, assistance de tous est obligatoire
 - * Evaluation basée sur le travail, la présentation et la participation aux discussions

ECMWF MODEL / ASSIMILATION SYSTEM

ATMOSPHERE	STRATOSPHERE	DYNAMICS-RADIATION-SIMPLIFIED CHEMISTRY		
	TROPOSPHERE	DYNAMICS-RADIATION-CLOUDS-ENERGY & WATER CYCLE		
OCEAN	OCEAN	LAND HYDROSPHERE	LAND BIOSPHERE	
LAND	OCEAN SURFACE WAVES OCEAN CIRCULATION SIMPLIFIED SEA ICE	SNOW ON LAND SOIL MOISTURE FREEZING	LAND SURFACE PROCESSES SOIL MOISTURE PROCESSES SIMPLIFIED VEGETATION	



(Hollingsworth, 2004)

Modélisation du système Terre

- **Différentes composantes de ce système**
 - * Modèle atmosphérique, dynamique et physique
 - * Modèle océanique
 - * Modèle de surface et hydrologique
 - * Modèle de chimie atmosphérique
 - * Etc...
- **Objectif est de coupler ces différentes composantes pour**
 - * Obtenir une représentation la plus fidèle possible de l'état du système en tenant compte des interactions entre ces composantes
 - * Etre en mesure de faire des prévisions fiables pour prévenir l'impact d'événements environnementaux dommageables
 - Inondations
 - Raz-de-marée et tsunamis
 - Feux de forêts
 - Tempêtes et ouragans

Inondations dans le nord-ouest de l'Amérique du Nord en Octobre 2003



Deux systèmes météorologiques ont déversé 470 mm de pluies sur la côte de Colombie Britannique sur une période de 6 jours

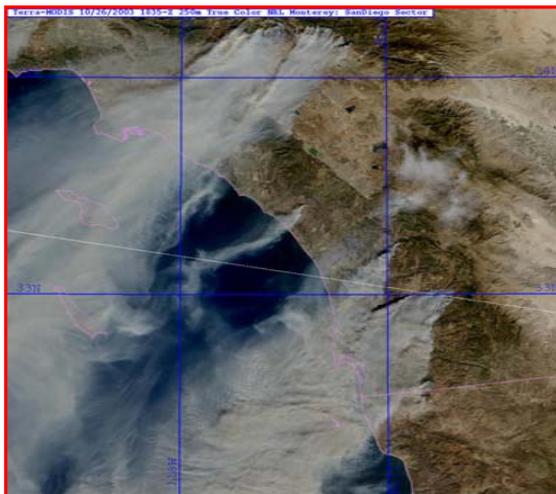
Colombie Britannique – Recors de pluie abondante à Vancouver, Abbotsford et Victoria le 10 octobre. Pont a été emporté et a coupé l'accès à Pemberton, BC. "On dit que c'est la pire inondation du XXe siècle".



Les rivières Washington - Skokomish, Nooksack et Skagit sont sorties de leur lit les 17 et 18 octobre. Record de précipitation en une journée a été enregistré à Seattle le 20 octobre. Niveaux records des rivières Skagit et Skokomish. Dommages de plus de \$160 millions.

(Shapiro, 2004)

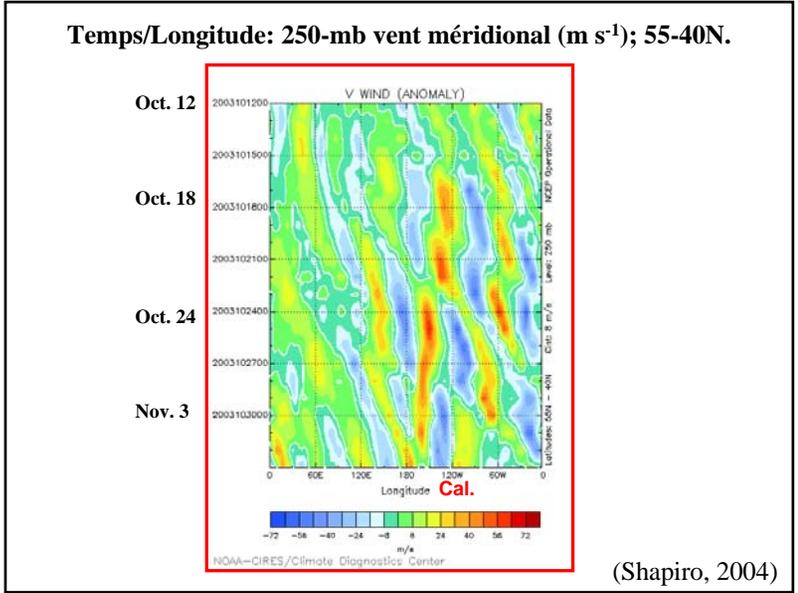
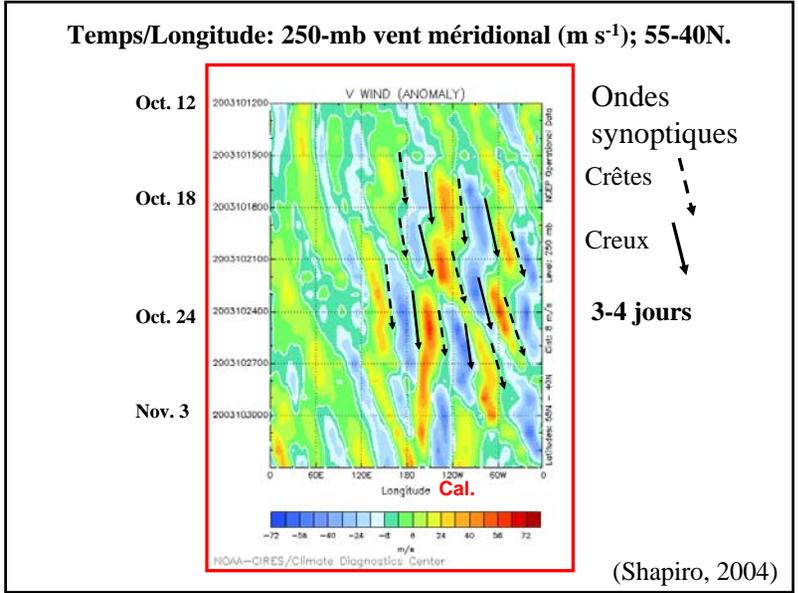
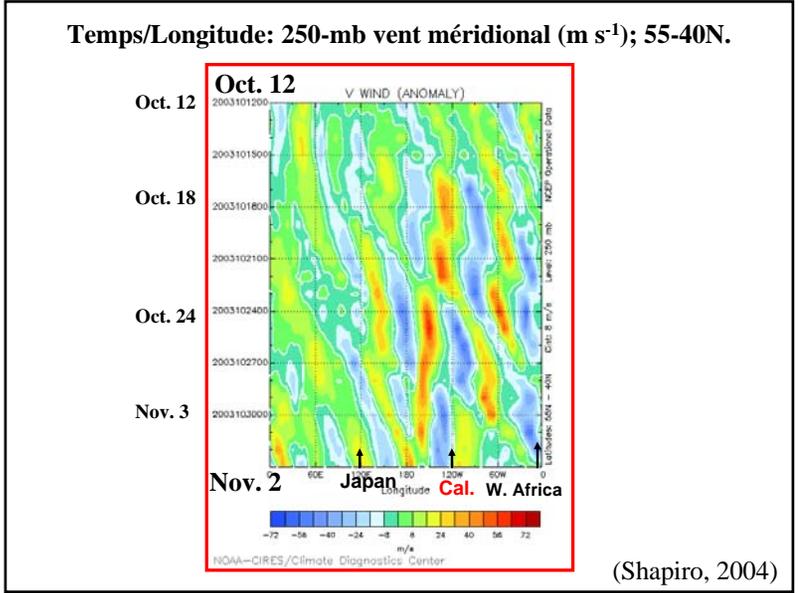
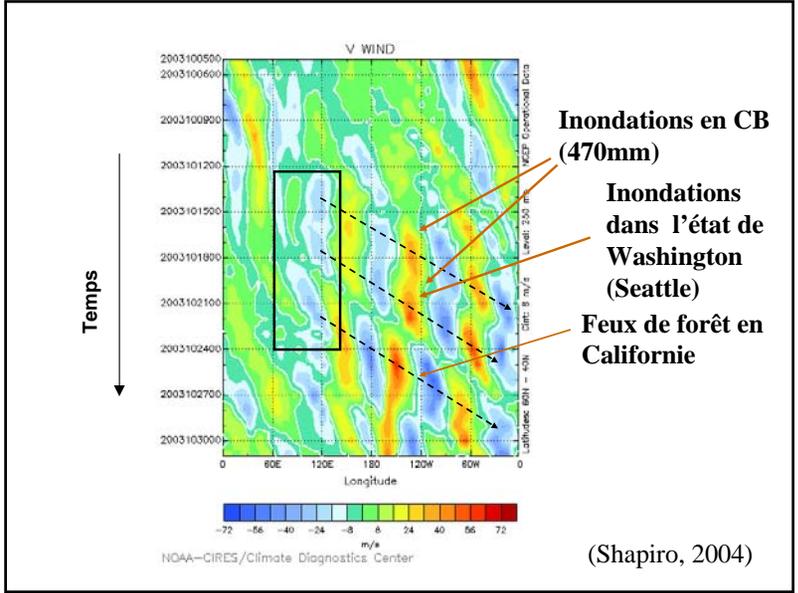
Sud de la Californie: feux de forêt, 26 octobre 2003

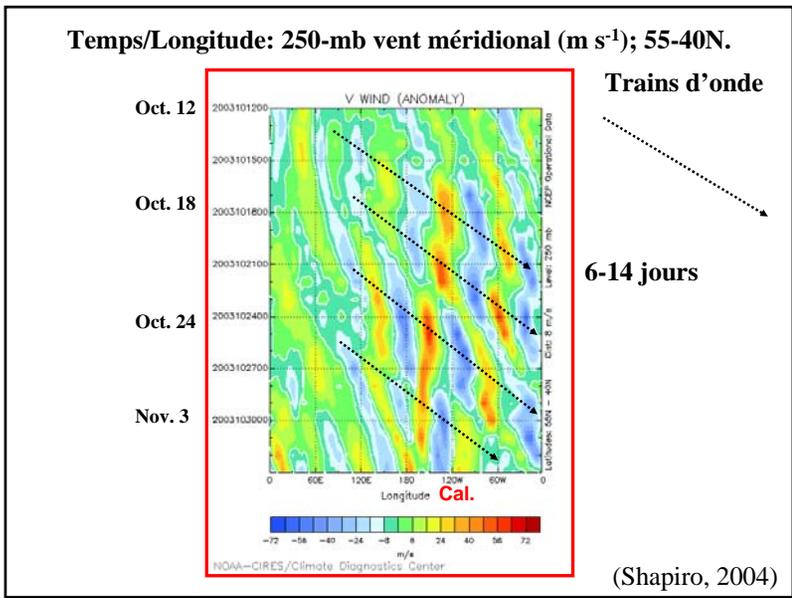
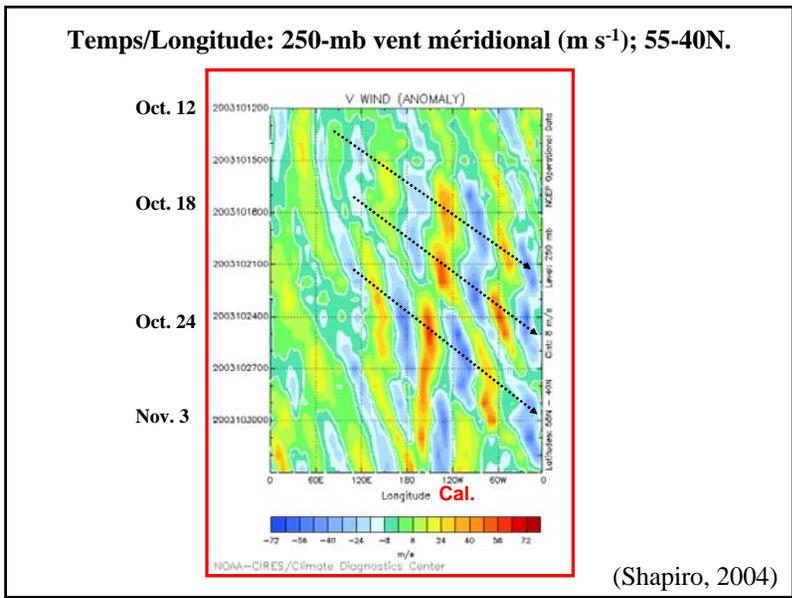
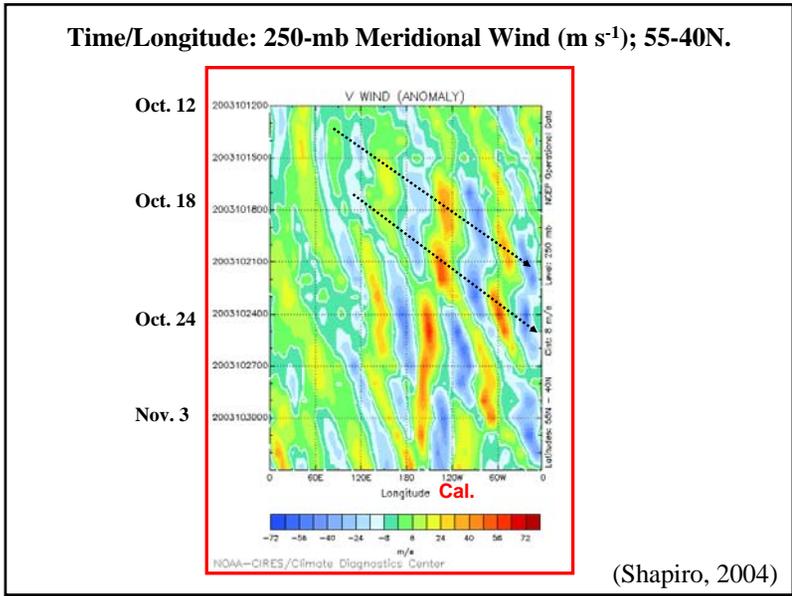
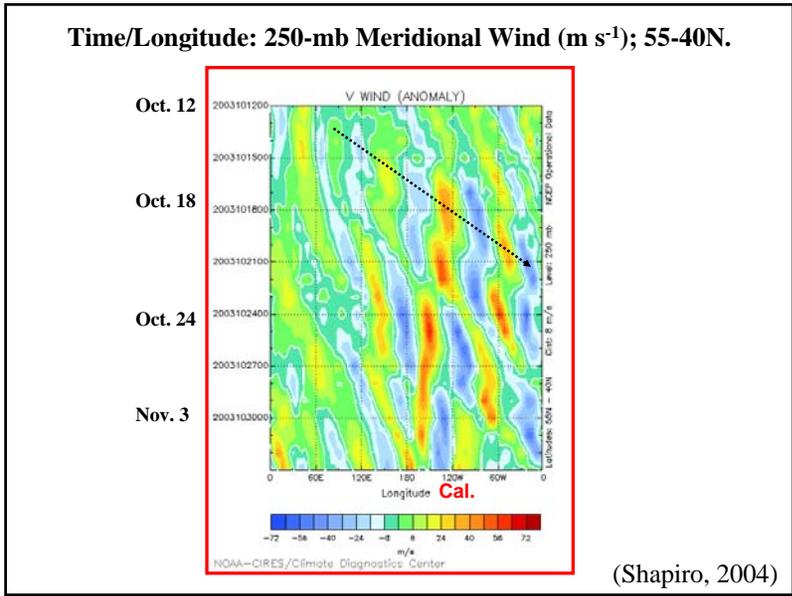


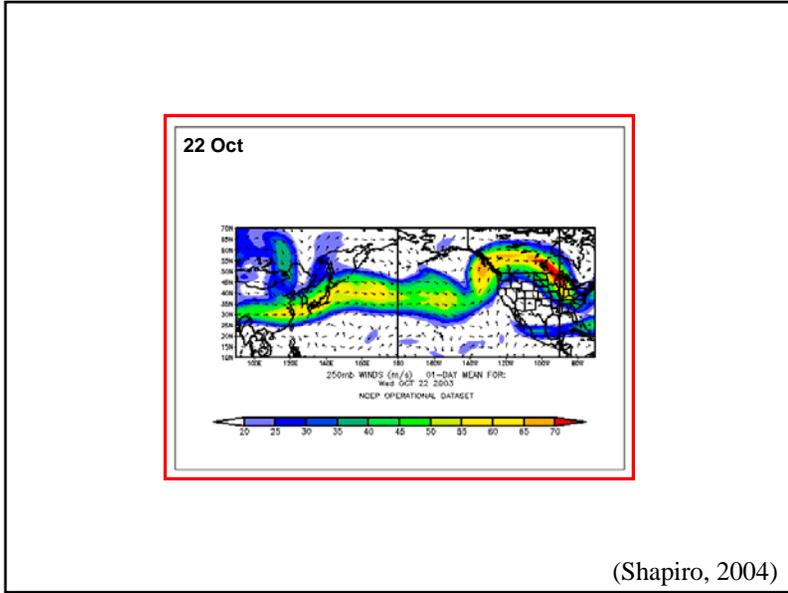
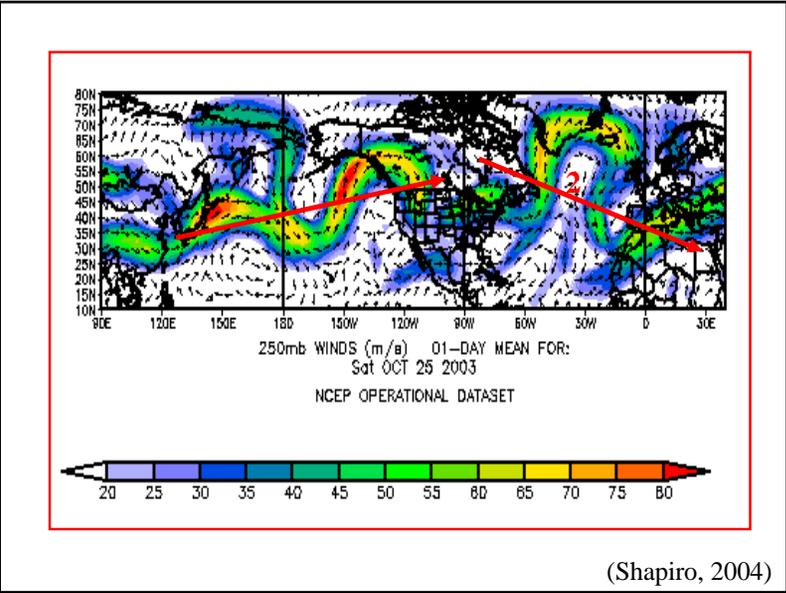
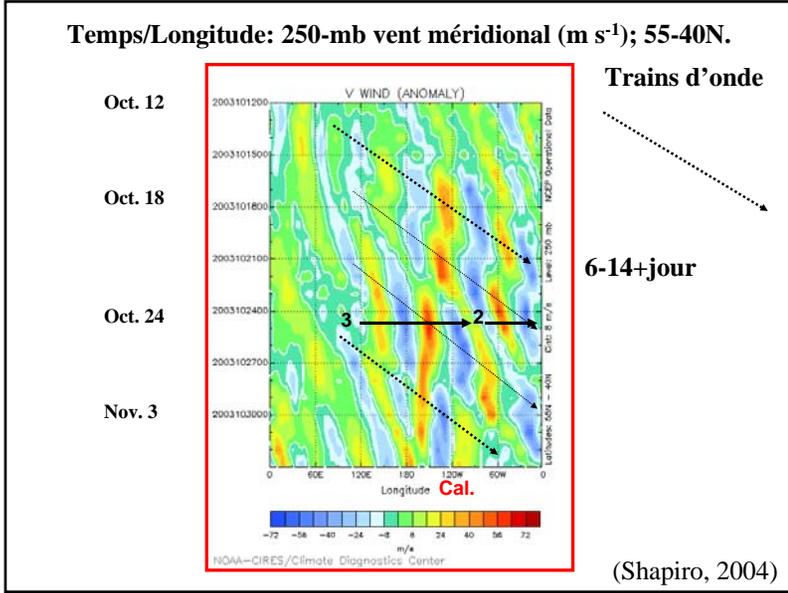
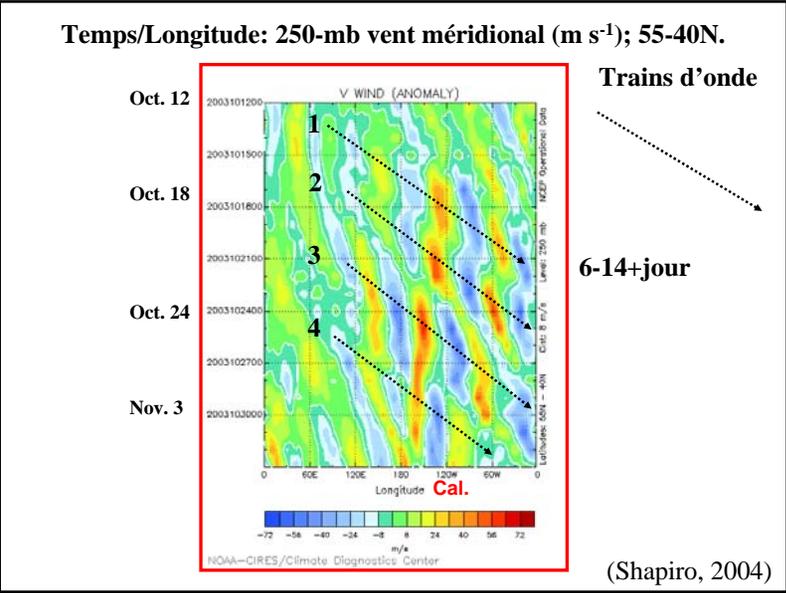
(Shapiro, 2004)

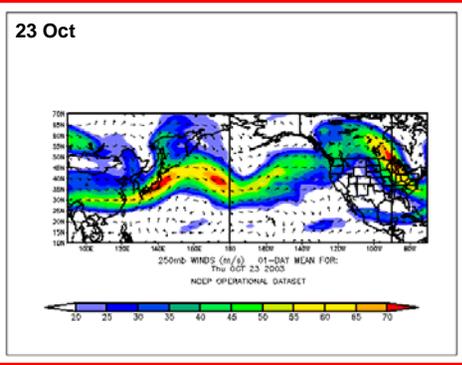


(Shapiro, 2004)

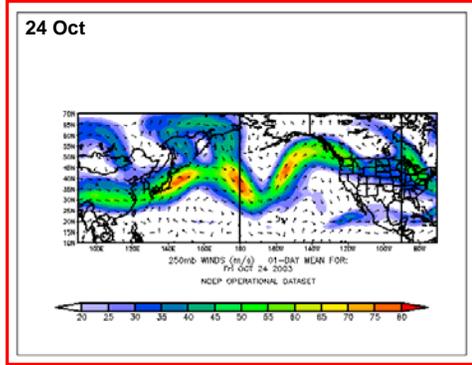




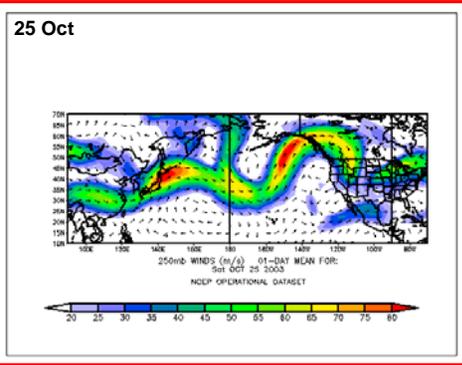




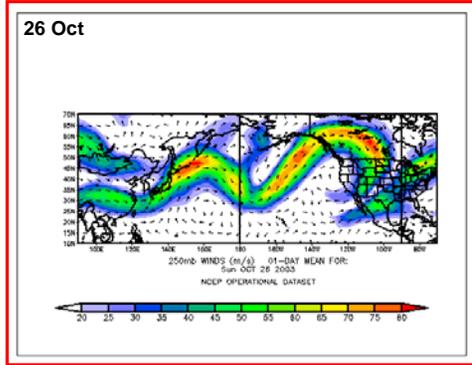
(Shapiro, 2004)



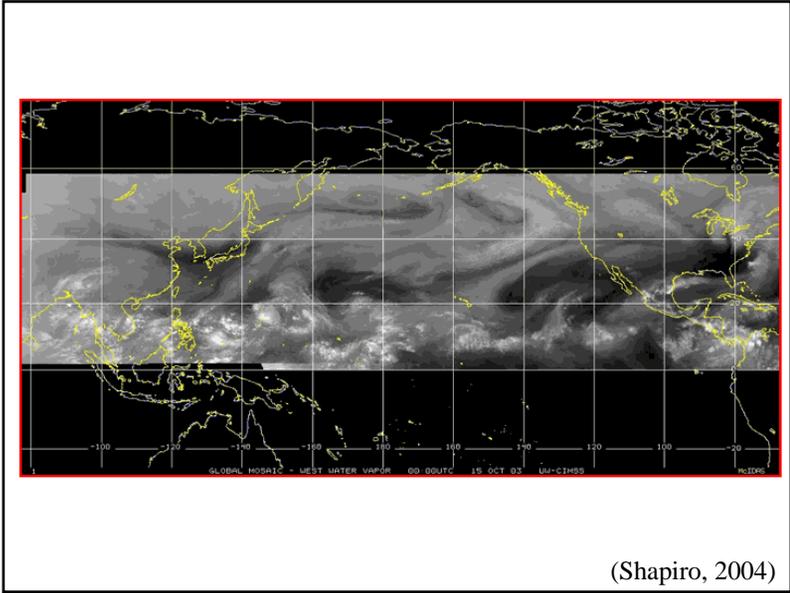
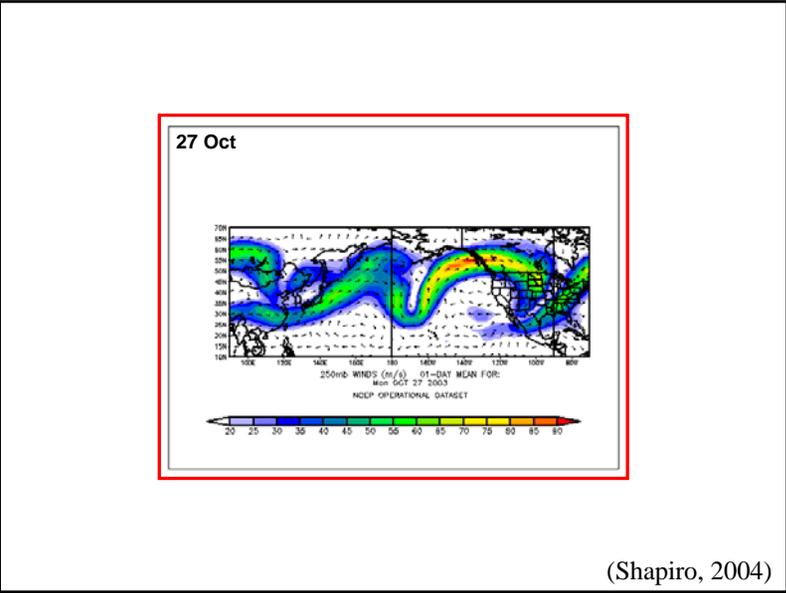
(Shapiro, 2004)



(Shapiro, 2004)



(Shapiro, 2004)



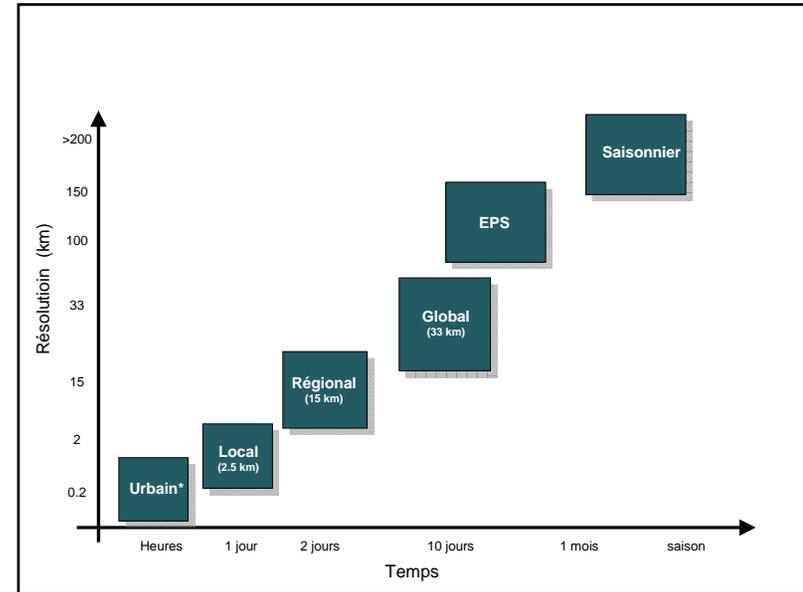
Modélisation atmosphérique

Equations primitives

- $$\frac{d\mathbf{v}}{dt} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho}$$
Equation du mouvement
 $\mathbf{v} = (u,v,w)$: vent
 p : pression ρ : densité de l'air
 $2\boldsymbol{\Omega} \sin \phi$: paramètre de Coriolis
- $$\frac{d \ln \theta}{dt} = \frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt}$$
Equation thermodynamique
 θ : température potentielle
- $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0$$
Equation de continuité
- $$p = R \rho T$$
Equation d'état des gaz

La prévision numérique du temps: la modélisation

- **Objectif**
 - * résoudre les équations de la mécanique des fluides en incluant les mécanismes dominants aux échelles spatiales résolues
 - * Discrétisation spatiale et temporelle des équations d'évolution
- **Echelle planétaire: 50-100 km**
 - * Gradient thermique équateur-pôles
 - * Force de Coriolis
 - * Interaction avec la surface et les océans
 - * Effet moyenné sur des mailles de 50-100 km
- **Echelle locales (1-10 km)**
 - * Prises en compte de la formation des nuages
 - * Effets locaux causés par les détails de la topographie et de la nature des sols (e.g., végétation, glace, neige, types de sol)
 - * Résolution des processus associés à la formation des nuages, et des précipitations de fine échelle



Système de modélisation de la surface à Environnement Canada

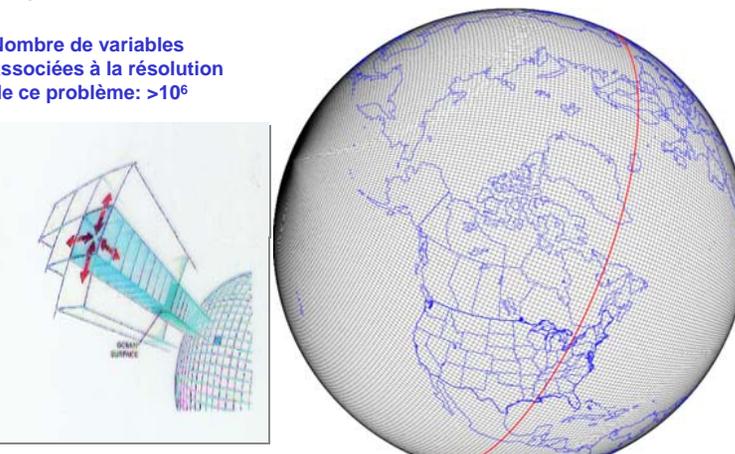
Sols et végétation	ISBA, CLASS
Eau	Schéma simple avec température de surface constante (modèle pour les lacs?)
Surfaces urbaines	TEB
Glaciers	Schéma Force-restore (avec neige), module de CLASS
Glace marine	Modèle à 3 couches avec couverture de neige
Neige	Schéma simple sur les glaciers et la glace marine; meilleur dans ISBA, CLASS et TEB, SNTHERM éventuellement?

Applications à l'échelle globale

- **Prévision numérique du temps (PNT ou *Numerical Weather Prediction, NWP*)**
 - * Résoudre le problème aux conditions initiales pour des périodes de 1 à 10 jours
 - * Caractérisation des conditions initiales en utilisant les observations disponibles
- **Simulation du climat**
 - * Représentation de l'état de l'atmosphère sur des périodes de plusieurs mois (prévision saisonnière) à plusieurs années
 - * Caractérisation des forçages dynamiques et physiques qui importent pour le comportement moyen de l'atmosphère
 - * Validation par une comparaison aux observations des mécanismes représentés par ces modèles
 - * Echelles spatiales sont généralement plus grandes (100 à 200 km pour les modèles climatiques globaux)
- **Modèle de prévision unifié**
 - * Paradigme par lequel la distinction entre ces deux types d'application devient de moins en moins claire au fur et à mesure que les modèles de PNT cherchent à produire des prévisions saisonnières
 - * Limitations des modèles de climat dus à une représentation trop grossière des mécanismes physiques de l'atmosphère (e.g., nuages, cycle de l'eau, interaction avec la surface)

Grille du modèle opérationnel du Service Météorologique du Canada en configuration globale (résolution uniforme de 100 km)

Nombre de variables associées à la résolution de ce problème: >10⁶



Résumé

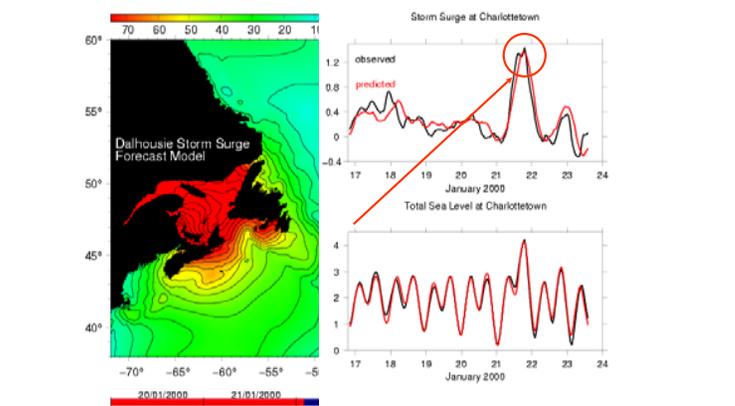
- **Modélisation de chaque composante est complexe**
 - * requiert une expertise particulière
 - * Dépendance par rapport à de l'information externe au modèle lui-même (e.g., caractérisation des sols pour les modèles de surface, bilan hydrique et hydrologie, présence de nappes phréatiques, etc.)
- **Prévision de phénomènes environnementaux à moyenne échéance (5 à 15 jours) dépend de mécanismes globaux**
 - * Phénomènes convectifs dans les régions Tropicales
 - * Interaction avec les océans (échanges thermiques et dynamiques)

Application de la prévision environnementale avec un modèle couplé atmosphère-océan-glace à Environnement Canada

Prévision des changements dans le niveau de la mer causés par les systèmes météorologiques

Modèle océanique forcé par les prévisions de pression de surface et de vents fournies par le Service météorologique du Canada

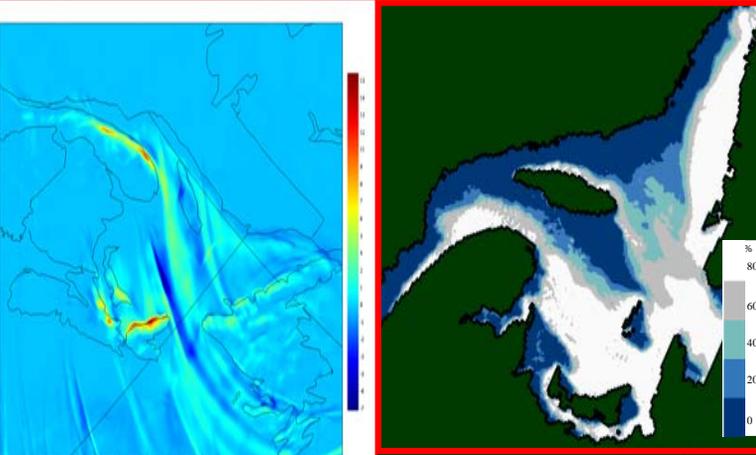
- **Prévision de hausse du niveau de la mer associée aux tempêtes et système d'alerte**
- Alerte des prévisionnistes des risques d'inondations associées aux effets combinés de marée haute et de tempêtes associées aux systèmes météorologiques

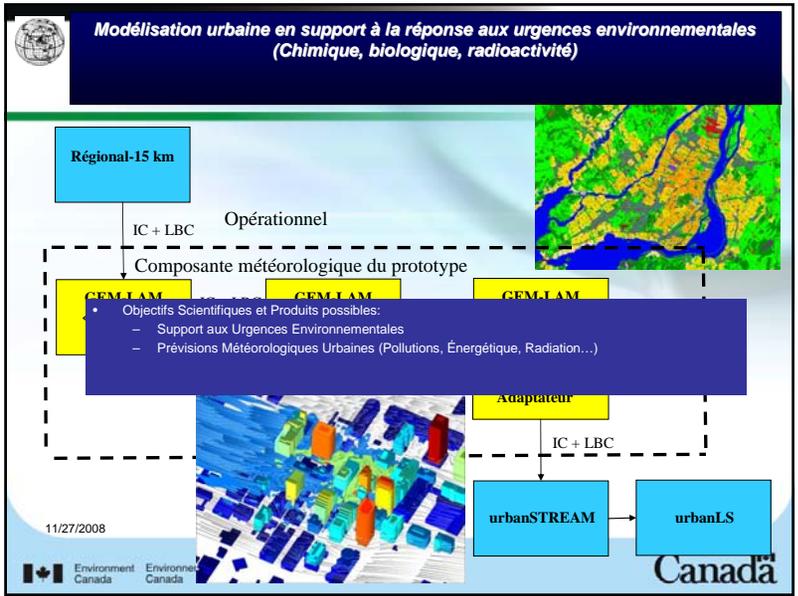


- Couplage bidirectionnel améliore la température de l'air, les précipitations et les nuages de bas niveau

Système régional atmosphère-océan-glace pour le golfe du Saint-Laurent

- Amélioration de la prévision des changements dans la couverture de glace
- Signaux pour améliorer la circulation et la sécurité du transport sur la voie maritime du Saint-Laurent

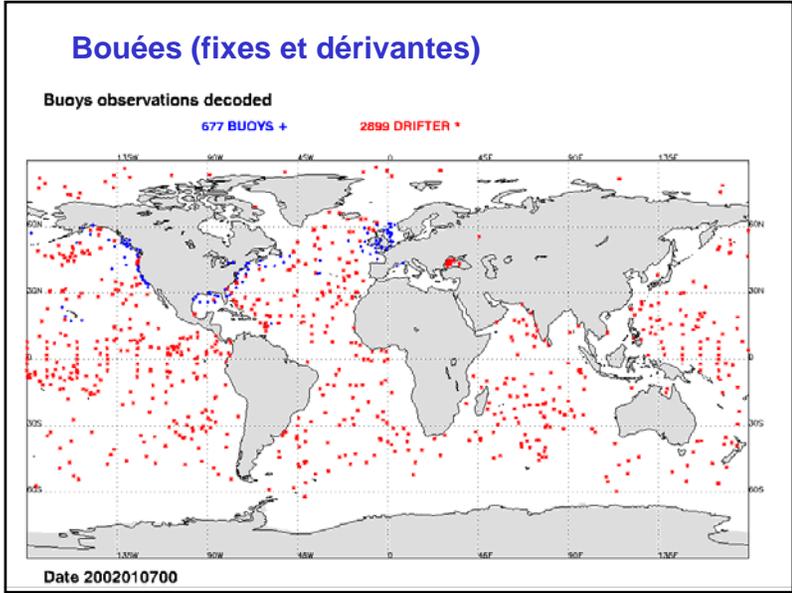
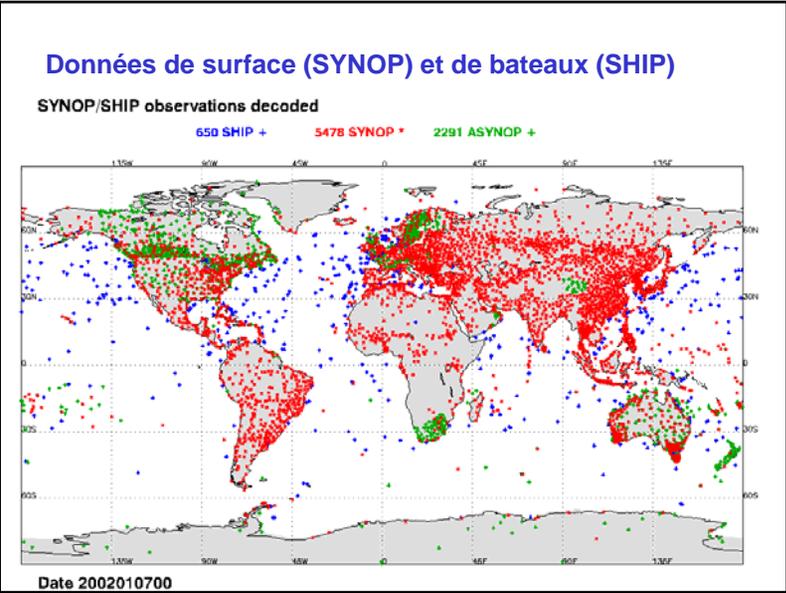
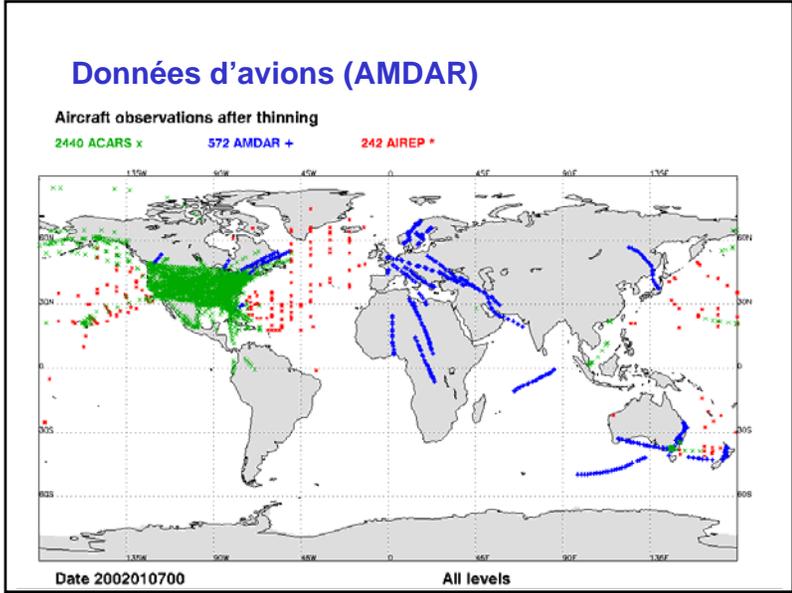
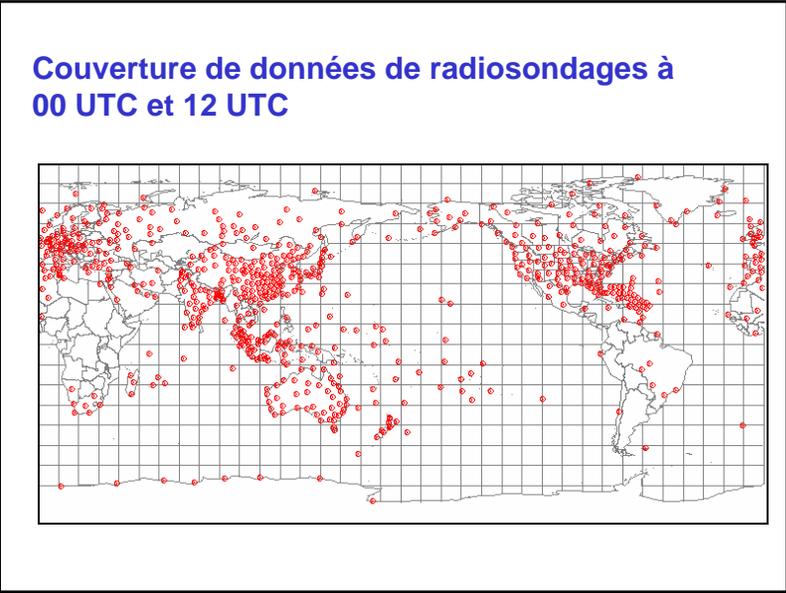


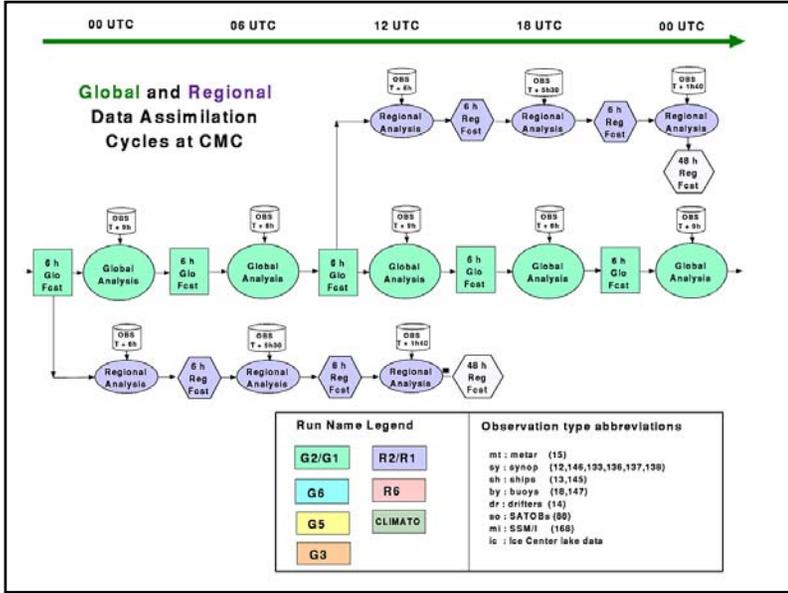
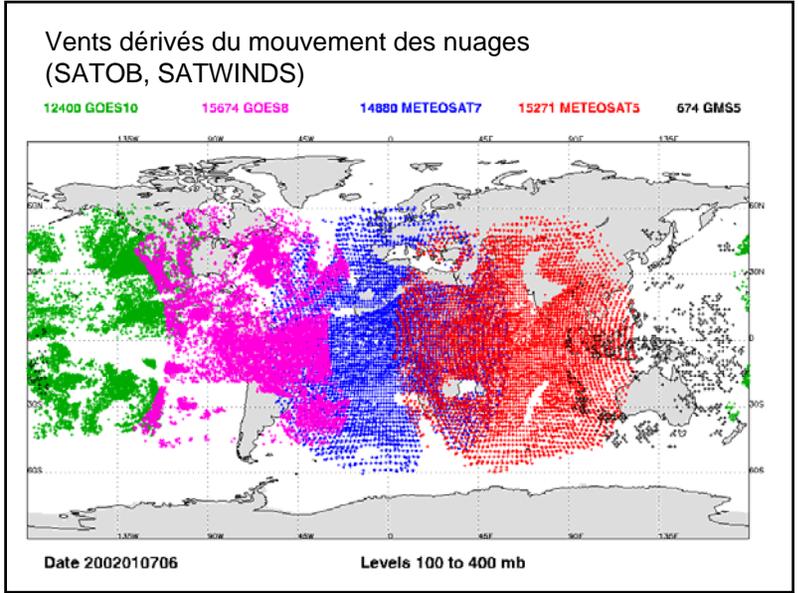
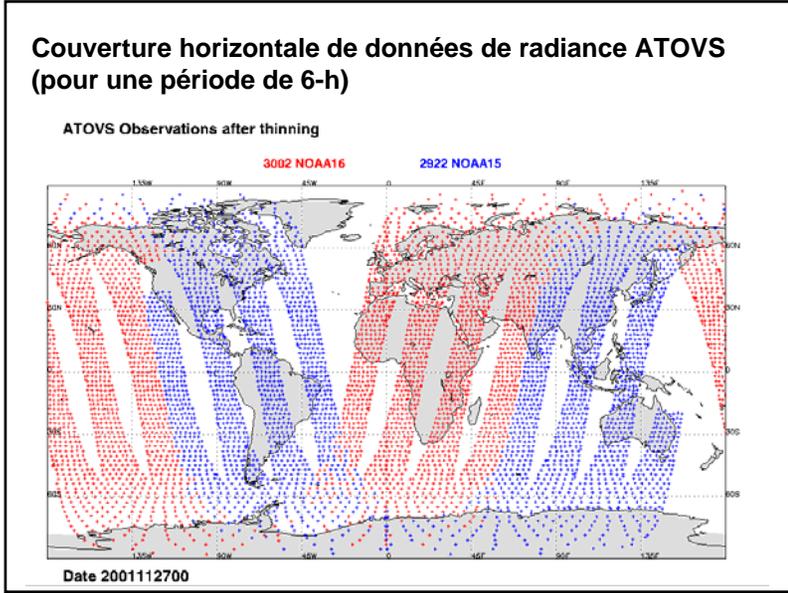
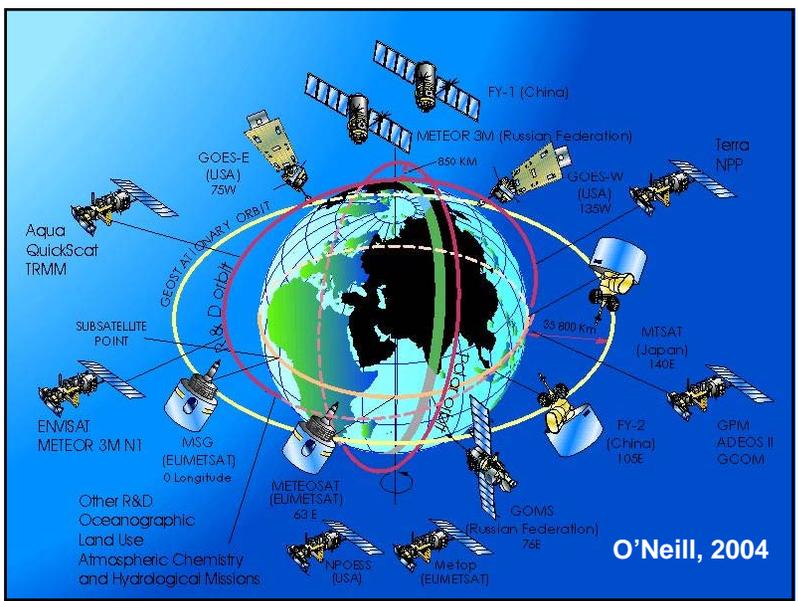


- ### Observations utilisées dans le système d'assimilation opérationnel du Service météorologique du Canada
- **Radiosondages**
 - * Profils de vent, température et humidité
 - * Volume de données : 60,000
 - **Avions (AIREP, ACARS, AMDARS)**
 - * Mesures de vent et de température à sur un seul niveau
 - * Volume de données: 10,000
 - **Données provenant des navires (SHIP) et de stations de surface**
 - * Pression de surface, température, vent et humidité
 - * 20,000
 - **Bouées (fixes et dérivantes)**
 - * surface pressure, temperature, winds
 - * 15,000 data

Observations assimilées au SMC

Type	Variables	Thinning									
radiosonde/dropsonde	U, V, T, (T-T _d), p _s	28 niveaux									
Rapport de surface	T, (T-T _d), p _s (et U, V au-dessus de l'eau)	1 rapport/6h									
Avions (AIREP, AMDAR, ADS)	U, V, T	1° x 1° x 50 hPa									
ATOVS NOAA 15-16-17, AQUA	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Ocean</td> <td>Contin.</td> </tr> <tr> <td>AMSU-A</td> <td>3-10</td> <td>3-10</td> </tr> <tr> <td>AMSU-B</td> <td>2-5</td> <td>3-4</td> </tr> </table>		Ocean	Contin.	AMSU-A	3-10	3-10	AMSU-B	2-5	3-4	250 km x 250 km
	Ocean	Contin.									
AMSU-A	3-10	3-10									
AMSU-B	2-5	3-4									
Canal de vapeur d'eau GOES 10-12	IM3 (6.7 μ)	2° x 2°									
AMV (Meteosat 5-7, GOES 9-10-12)	U,V (IR, WV, VI channels)	1.5° x 1.5°									
MODIS (Aqua, Terra)	U,V	1.5° x 1.5°									
Profileur (NOAA Network)	U,V	(750 m) Vertical									





Schématisation de la méthode d'insertion directe



Estimation statistique: cas univarié

\mathbf{X}_b = prévision (ou champ d'essai) $\varepsilon_b = (\mathbf{X}_b - \mathbf{X}_t)$: erreur de prévision
 $\mathbf{y}_{obs.}$ = observation $\varepsilon_o = (\mathbf{y}_{obs.} - \mathbf{X}_t)$: erreur d'observation
 \mathbf{X}_a = analyse $\varepsilon_a = (\mathbf{X}_a - \mathbf{X}_t)$: erreur d'analyse
 et \mathbf{X}_t = état réel

Hypothèses sous-jacentes à l'interpolation statistique

- Erreur d'observation et de prévision sont non biaisées
 $\langle \varepsilon_b \rangle = \langle \varepsilon_o \rangle = 0$
- variances d'erreur $\sigma_b^2 = \langle \varepsilon_b^2 \rangle$ et $\sigma_o^2 = \langle \varepsilon_o^2 \rangle$ sont connues

Meilleur estimé linéaire non-biaisé (Best Linear Unbiased Estimate) (BLUE)

- Analyse

$$\mathbf{X}_a = \mathbf{X}_b + \lambda(\mathbf{y}_{obs} - \mathbf{X}_b)$$

- Variance d'erreur d'analyse

$$\begin{aligned} J(\lambda) &= \sigma_a^2 = \langle (\mathbf{X}_a - \mathbf{X}_t)^2 \rangle \\ &= \langle (\mathbf{X}_b - \mathbf{X}_t + \lambda(\mathbf{y}_{obs} - \mathbf{X}_t) - (\mathbf{X}_b - \mathbf{X}_t))^2 \rangle \\ &= \langle ((1-\lambda)\varepsilon_b + \lambda\varepsilon_o)^2 \rangle = (1-\lambda)^2 \langle \varepsilon_b^2 \rangle + 2\lambda(1-\lambda)\langle \varepsilon_b\varepsilon_o \rangle + \lambda^2 \langle \varepsilon_o^2 \rangle \\ &= \sigma_b^2(1-\lambda)^2 + \lambda^2 \sigma_o^2 \end{aligned}$$

- Estimé de λ minimisant la variance d'erreur d'analyse:

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{d\lambda} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda^* &= \frac{\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sigma_o^2} \Rightarrow \frac{1}{\sigma_a^2} = \frac{1}{\sigma_f^2} + \frac{1}{\sigma_o^2} \\ &\Rightarrow \sigma_a^2 < \min \{ \sigma_f^2, \sigma_o^2 \} \end{aligned}$$

Opérateur d'observation

- Analyse de température en un point sur le dernier niveau du modèle utilisant une mesure de la température à 10m



Opérateur d'observation: $HT = \alpha T$

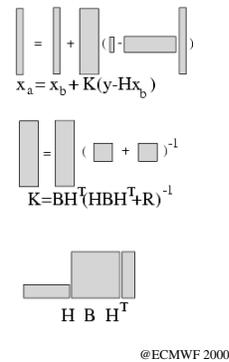
Valeur analysée: $T_a = T_b + \lambda(T_{obs.} - \alpha T_b)$

Estimé minimisant la variance d'erreur d'analyse:

$$\lambda = \frac{\alpha \sigma_b^2}{(\sigma_o^2 + \alpha^2 \sigma_b^2)}$$

Dimensionnalité du problème

- Nombre d'observations: $M \sim 10^5$
- Etat-modèle: $N \sim 10^7$
- Vecteur d'état x_a et x_b : $X = (N \times 1)$
- Vecteur d'observation: $y = (M \times 1)$
- Equivalent modèle de l'observation: $HX_b = (N \times 1)$
- Opérateur d'observation $H = (M \times N)$
- Matrice de gain $K = (N \times M)$
- Covariance d'erreur de prévision $B = ((N \times N))$
- Covariance d'erreur d'observation $R = (M \times M)$
- Erreur de prévision dans l'espace des observations $HBH^T = (M \times M)$



Equations de l'interpolation statistique

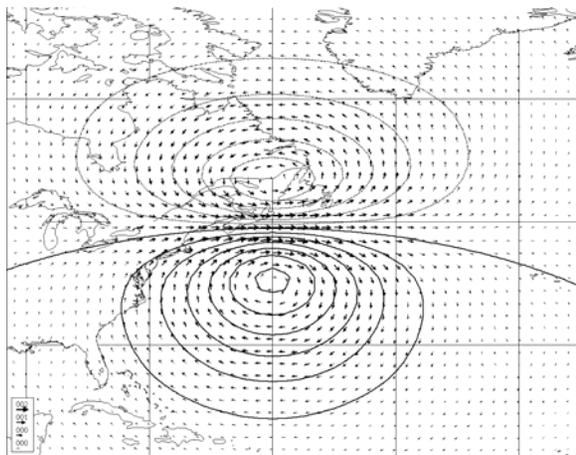
$$X_a = X_b + K(y - HX_b)$$

$$K = BH^T(R + HBH^T)^{-1}$$

$$P_a = (I - KH)B$$

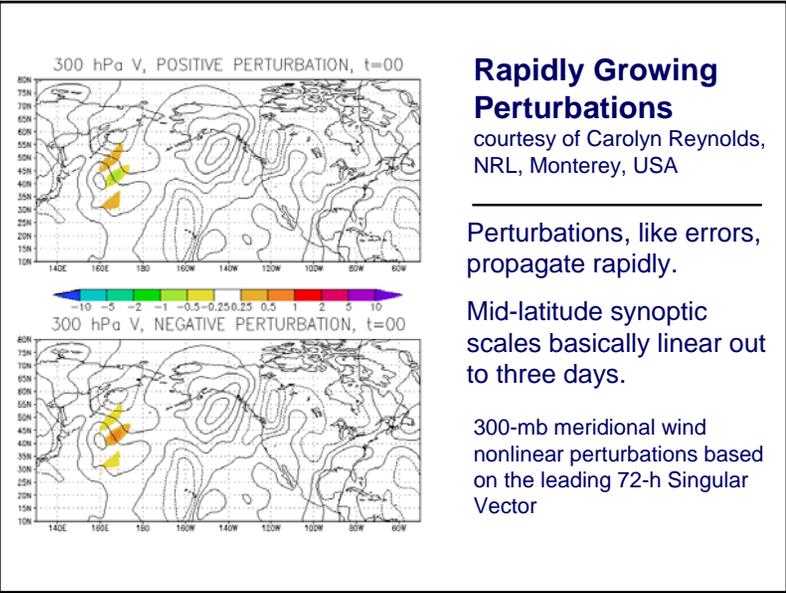
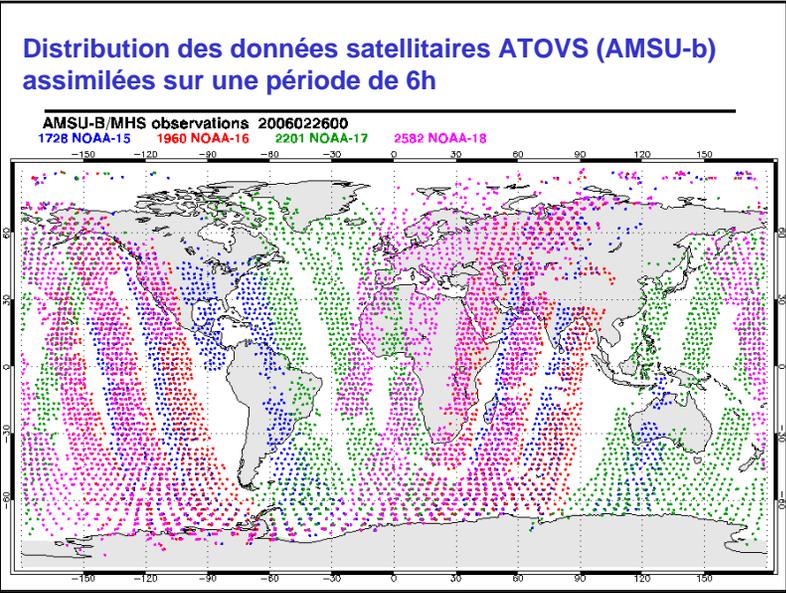
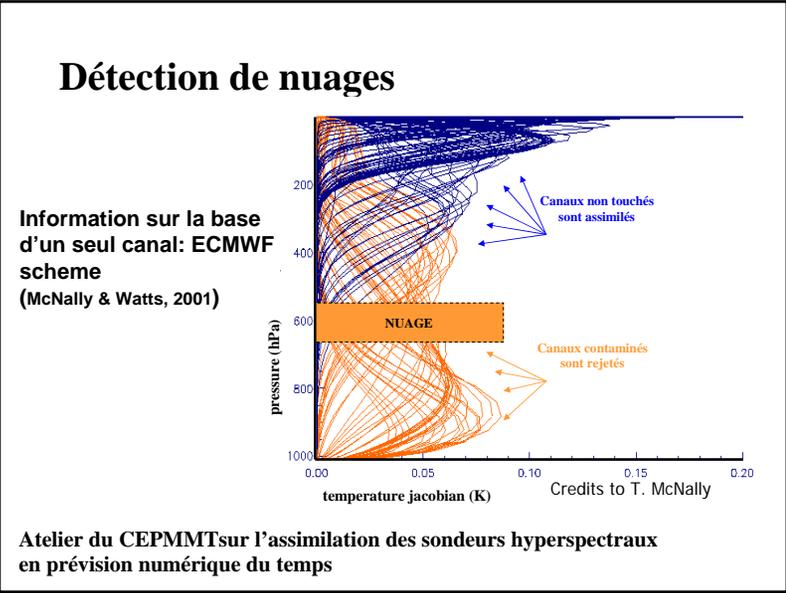
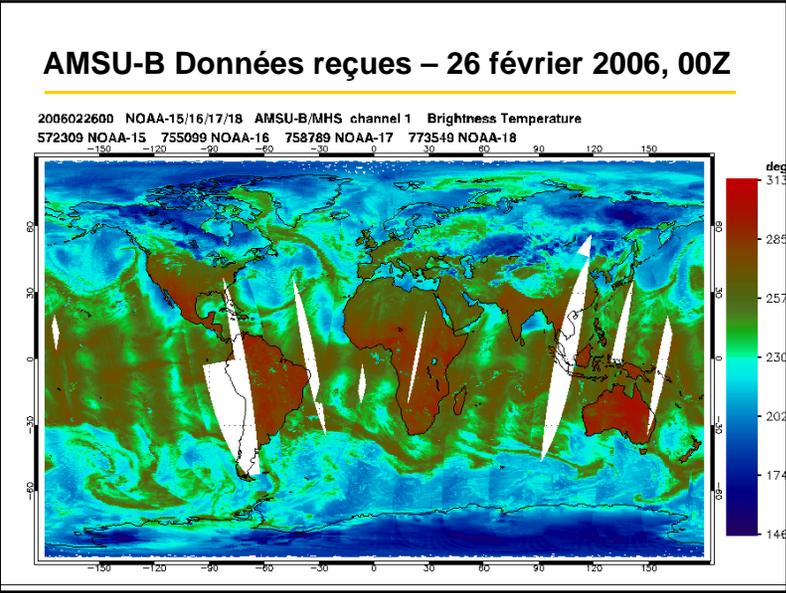
Matrice de gain (ou poids statistiques): K
Innovations (ou écarts aux observation): $y - HX_b$

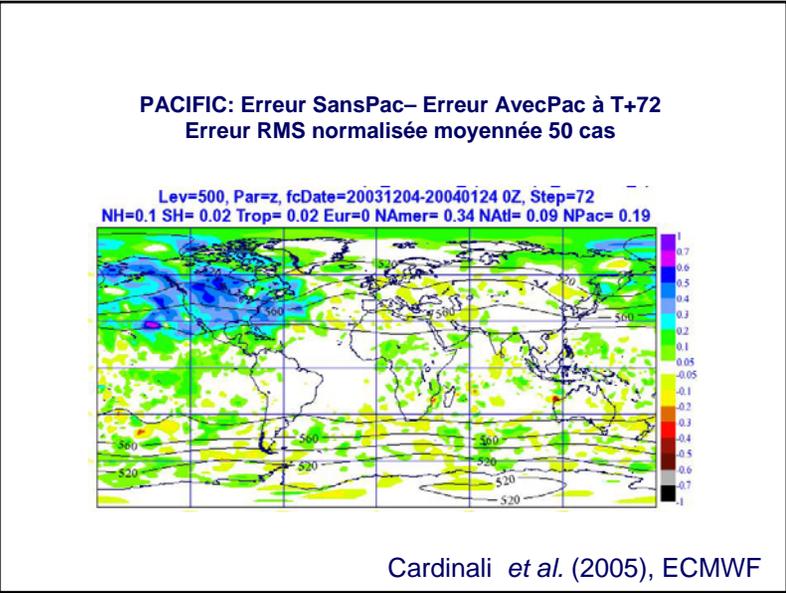
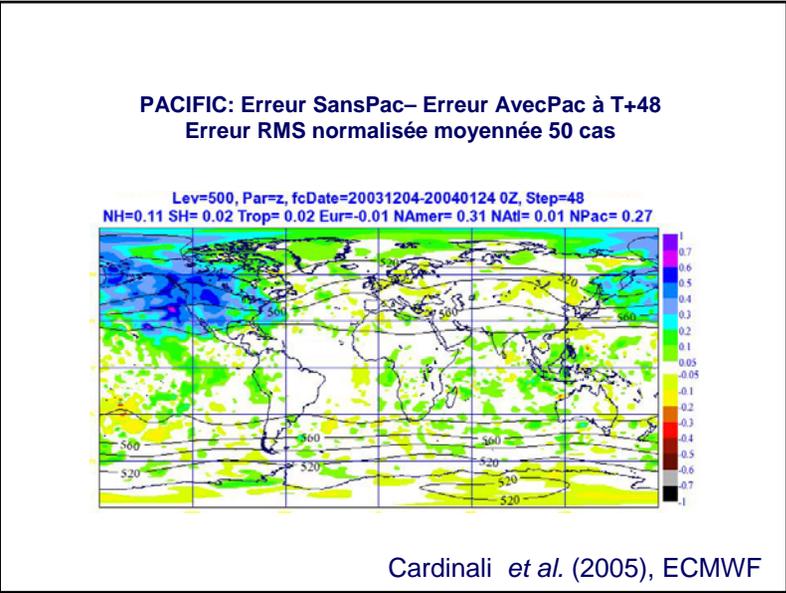
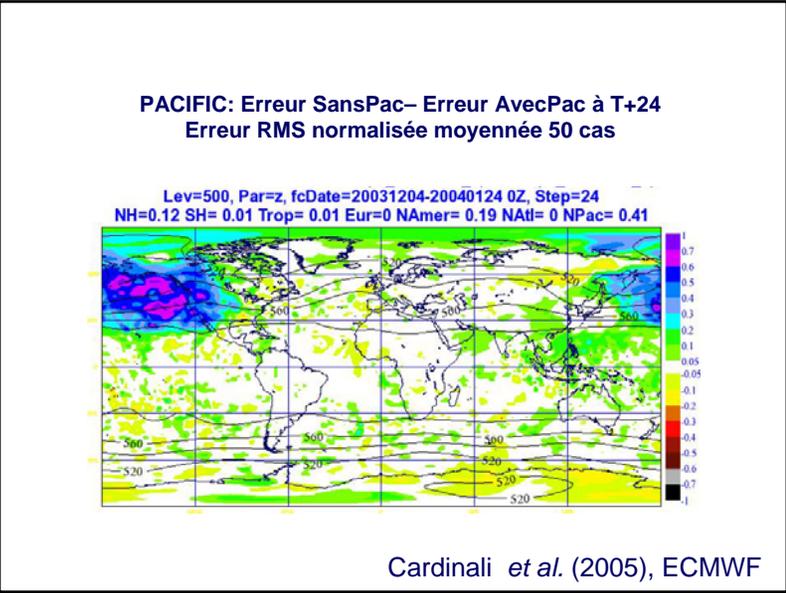
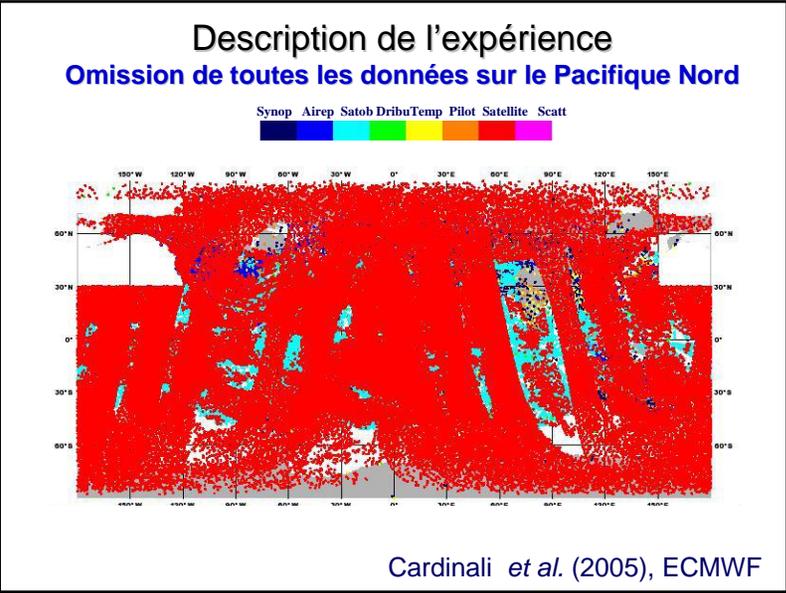
Corrections apportées par l'analyse au vent et au géopotentiel obtenues en réponse à une seule observation de la composante zonale du vent située à 265 hPa dans les extra-Tropiques Nord (45N-60W) (Gauthier *et al.*, 1998)



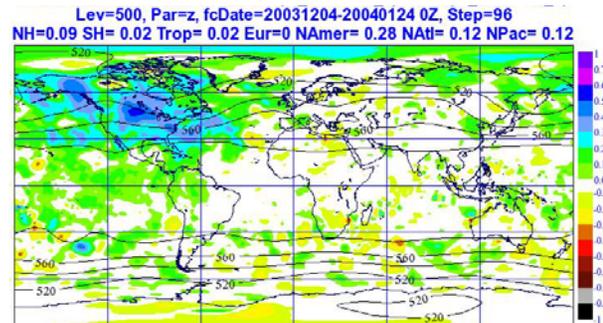
Assimilation des données satellitaires (EC)

- **Données satellitaires assimilées**
 - * Radiances ATOVS
 - Mesures de radiance dans le micro-onde pour quatre canaux
 - 26,000 données
 - * Radiances infra-rouges GOES
 - Vents dérivés du mouvement des nuages (SATOB ou SATWINDS)
 - 9,000 données
 - * Vents MODIS
- **Système d'analyse globale:**
 - * Modèle global GEM (Global Environmental Multiscale)
 - ~100 km, 28 niveaux, toit du modèle à 10 hPa
 - * 4D-Var (depuis le 15 mars 2005)
- **Analyse régionale**
 - * Assimilation 3D-Var
 - * Cycle d'assimilation court pour amorcer la dynamique ("spin-up")
 - * Emphase porte sur les précipitations des prévisions à courte échéance (0-48h)



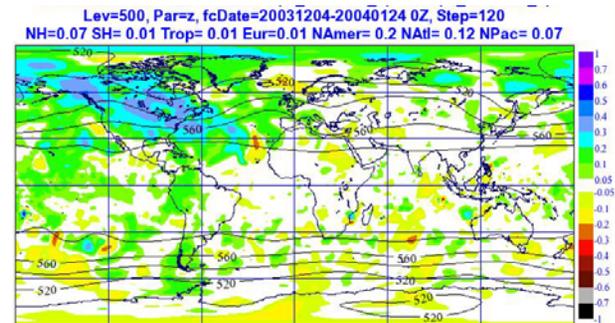


PACIFIC: Erreur SansPac- Erreur AvecPac à T+96
Erreur RMS normalisée moyennée 50 cas



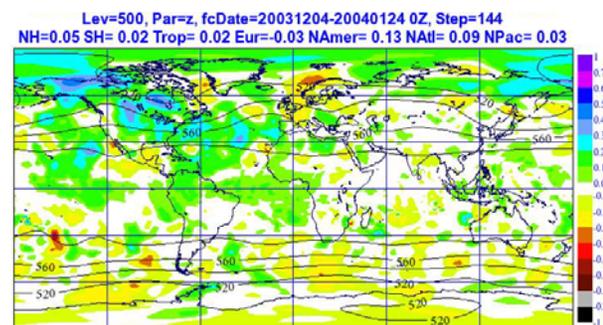
Cardinali *et al.* (2005), ECMWF

PACIFIC: Erreur SansPac- Erreur AvecPac à T+120
Erreur RMS normalisée moyennée 50 cas



Cardinali *et al.* (2005), ECMWF

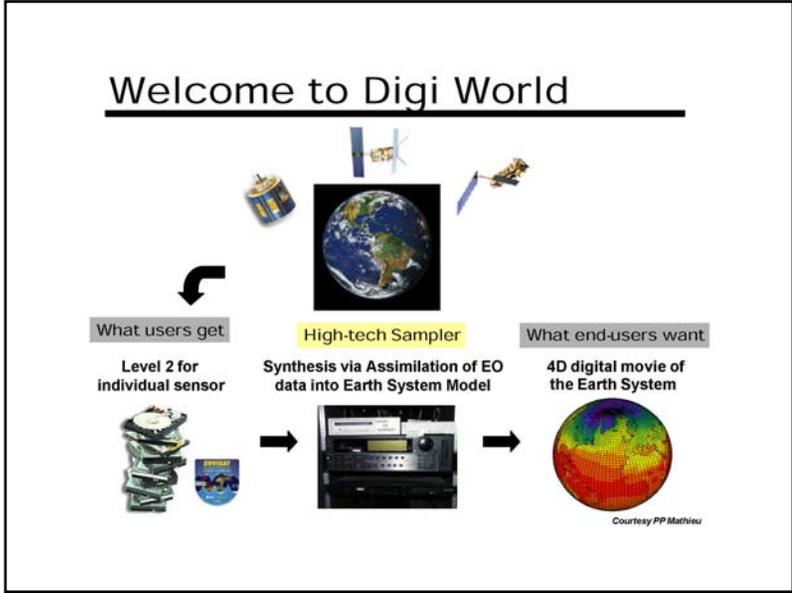
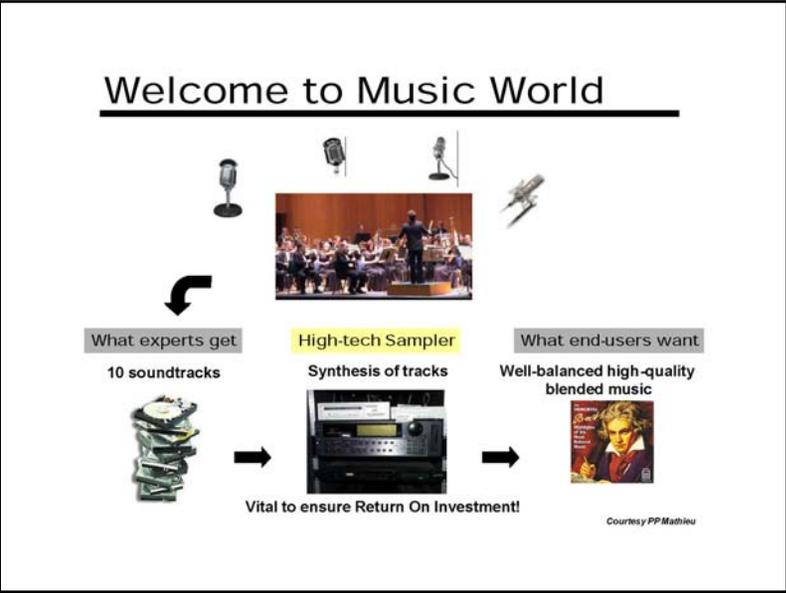
PACIFIC: NoPac forecast error – Oper forecast error at T+144
NormDiff in RMS Averaged over 50 cases



Cardinali *et al.* (2005), ECMWF

Résumé et conclusions

- **Volume d'observations reçues quotidiennement augmente**
 - * Résolution et complexité des modèles augmentent également
 - * Problème demeure sous-déterminé par rapport au nombre de variables à estimer
- **Assimilation de données cherche à corriger un estimé *a priori* de l'état complet du système**
 - * Requiert une bonne estimation et caractérisation des erreurs d'observation et des erreurs de l'estimé *a priori* (e.g., une prévision numérique à courte échéance)
 - * Prise en compte des contraintes dynamiques du système qui est gouverné des lois physiques
- **Processus d'assimilation sert également à valider les processus physiques que le modèle cherche à représenter**
 - * Accord entre la prévision du modèle et la *totalité* des observations assimilées



Applications socio-économiques

Dresden, August 2002
 Economic losses of total event: €16 bn
 Insured losses: €3.4 bn

Münchener Rück
 Munich Re Group

© REUTERS

July/August 2005 – Flooding in India 



24.7- 5.8 Flooding in India (1.150 fatalities)

Economic losses (US\$ m):	5.000
Insured losses (US\$ m):	750

source: Reuters

August 2005 – Flooding in the Alps
 For Switzerland the most expensive natural catastrophe ever





Economic losses (US\$ m):	3.000 (CH 2.100)
Insured losses (US\$ m):	1.700 (CH 1.500)

August 2005 – Hurricane Katrina
 6th strongest hurricane , largest losses of a single event





25.-30.8 Hurricane Katrina, USA (1.299 fatalities)

Economic losses (US\$ m):	125.000
Insured losses (US\$ m):	60.000 (NFIP included)

source: AP

Great Natural Disasters 1950 - 2005
 Percentage distribution worldwide



Number of events: 276

Deaths: 1.75 Million

Economic losses: 1.700 bn. US\$*

Insured losses: 340 bn. US\$*

Geological events

- Earthquake/tsunami, volcanic eruption

Weather related events

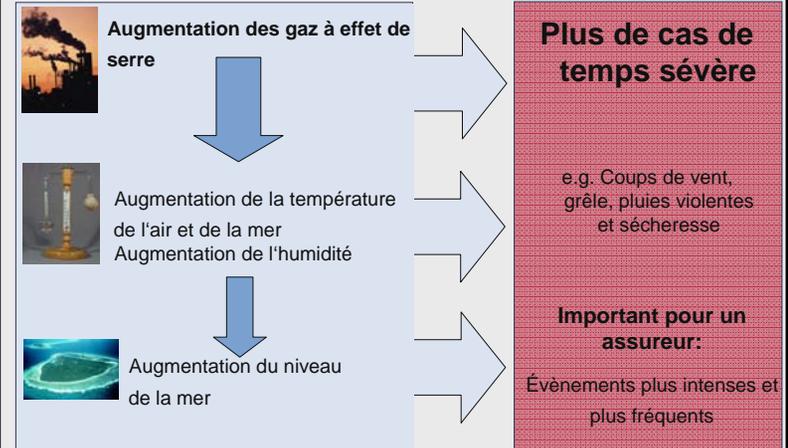
- Storm
- Floods
- Extreme temperatures

*2005 values
 © 2006 Geo Risks Research, Munich Re

Raisons expliquant l'augmentation globale des pertes associées aux catastrophes naturelles

- Augmentation de la population
- Augmentation du niveau de vie
- Concentration de population et des biens dans de grandes régions urbaines
- Établissement et industrialisation dans des régions extrêmement exposées aux risques (e.g., terres inondables)
- Sensibilité des sociétés et des technologies aux catastrophes naturelles
- **Changements dans les conditions environnementales**
 - Intérêt à établir la fiabilité des scénarios de changements climatiques pour en mesurer l'impact

Changements dans les risques



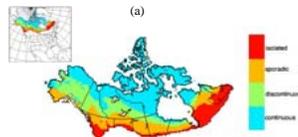
Pergélisol

- ❑ Analyse de la température du sol des régions nordiques du Canada depuis les années 1990 indiquent un approfondissement de la couche dite active (Nelson, 2003)



<http://www.amap.no/acia/Highlights.pdf>

Zones de pergélisol inclusent dans le domaine du modèle de climat régional canadien (MRCC)



- ❑ Projections climatiques indiquent une augmentation des températures moyennes au cours du prochain siècle (GIEC, 2007)

Conclusion

- Plusieurs secteurs d'activités humaines sont sensibles et mêmes dépendants des conditions météorologiques et climatiques
 - Transport, énergie, santé, sécurité civile
 - Prévisions météorologiques peuvent permettre d'amenuiser l'impact
 - Scénarios climatiques permettent de planifier en tenant compte de la possibilité de changements dans l'environnement
- Fiabilité des prévisions météorologiques et climatologiques
 - Prévisions reposent sur des systèmes de simulation d'une grande complexité qui doivent être validés contre les observations de différents types
 - Validation des processus physiques représentés dans ces modèles
 - Etablissement d'intervalles de confiance pour mesurer la précision d'une prévision (prévision d'ensemble)
- Applications socio-économiques nécessitent de prendre en compte d'autres facteurs