



Université du Québec à Montréal



**CENTRE ESCER**  
POUR L'ÉTUDE ET LA SIMULATION DU CLIMAT  
À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

# Échanges d'énergie associés à la variabilité inter-membre dans un ensemble de simulations du Modèle Régional Canadien du Climat: Application à la région de l'arctique

Par:

Oumarou NIKIÉMA & René LAPRISE

Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère 2013

Centre International de Conférence Météopole -  
Toulouse

# Plan de l'exposé

1. Introduction - motivations scientifiques & objectifs
2. Équation bilan de la Variabilité Inter-membre (VI) pour la température potentielle
3. Résultats:
  - A. Validation de l'équation bilan de la Variabilité inter-membre pour la température potentielle
  - B. Étude de bilan: analyse de la contribution de chaque terme de équation & interprétations physiques
4. Conclusions & perspectives

# 1. Introduction - motivations scientifiques

## Systemes Chaotique...

Lorsqu'un ensemble de simulations est réalisé avec différentes Conditions Initiales (CI), la **différence** entre les membres fluctue au cours du temps:

**Variabilité Inter-membre** ou **Variabilité Interne** (VI)

Variabilité Interne ?

## Variance

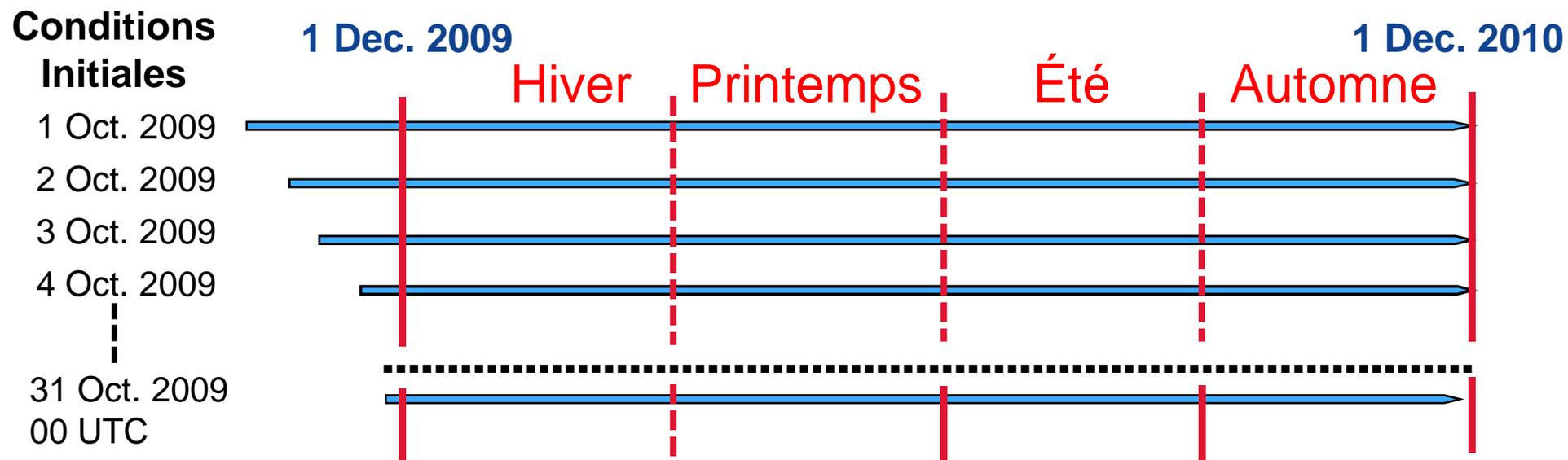
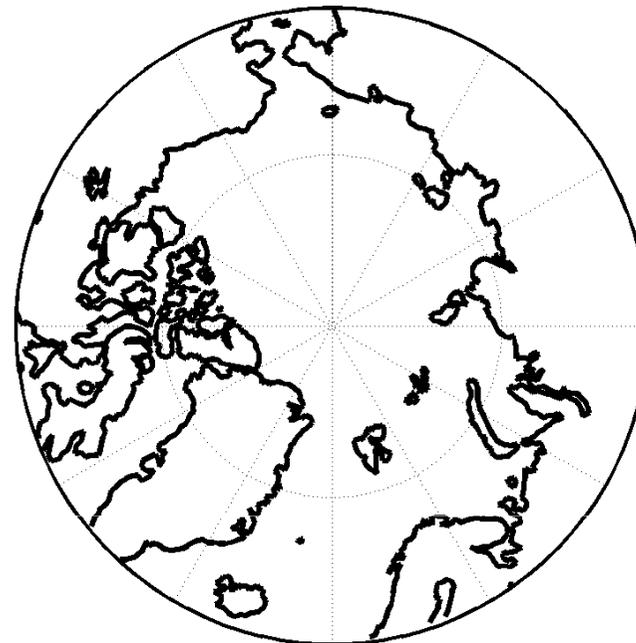
$$\sigma_{\varphi}^2(i, j, k, t) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [\varphi'_n]^2(i, j, k, t)$$

Déviaton:  $\varphi'_n = \varphi_n - \langle \varphi \rangle$

# 1. Introduction - motivations scientifiques

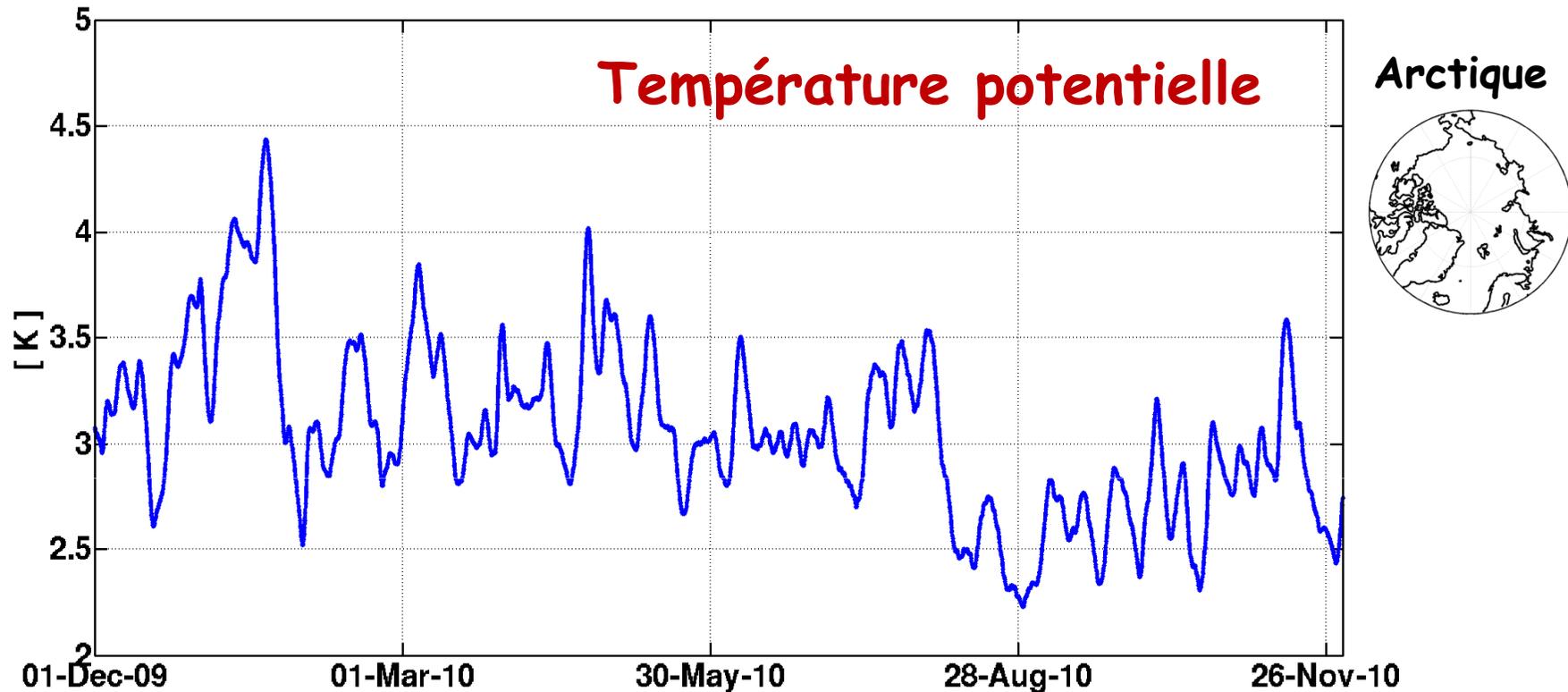
- **Modèle:** MRCC5 (version 5)
- **Ensemble:** 31 simulations initialisées à différentes dates
- **Paramètres de simulation:** identiques pour l'ensemble

**RÉGION: ARCTIQUE**



# 1. Introduction - objectifs

Évolution temporelle de la VI moyennée sur tout le domaine



La Variabilité Inter-membre fluctue dans le temps !

**Question scientifique?**

Quelles sont les processus physiques qui contribuent au maintien de la VI dans les simulations des MRC ?

## 2. Équation bilan de la variabilité interne

### Température potentielle

$$L_\theta = R_\theta = A_h + A_v + B_h + B_v + C + E_h + E_v$$

Tendance VI  $L_\theta = \frac{\partial \sigma_\theta^2}{\partial t}$  where  $\sigma_\theta^2(i, j, k, t) \equiv \langle \theta_n'^2 \rangle(i, j, k, t)$

Transport  $A_h = -\bar{\nabla} \cdot (\langle \bar{V} \rangle \sigma_\theta^2); \quad A_v = -\frac{\partial (\langle \omega \rangle \sigma_\theta^2)}{\partial p}$

Covariance de fluctuations dans la direction du gradient  $\langle \theta \rangle$

$$B_h = -2 \langle \theta_n' \bar{V}_n' \rangle \cdot \bar{\nabla} \langle \theta \rangle; \quad B_v = -2 \langle \theta_n' \omega_n' \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial p}$$

Covariance de fluctuations de température potentielle et du taux de réchauffement diabatique

$$C = 2 \langle \theta_n' J_n' \rangle$$

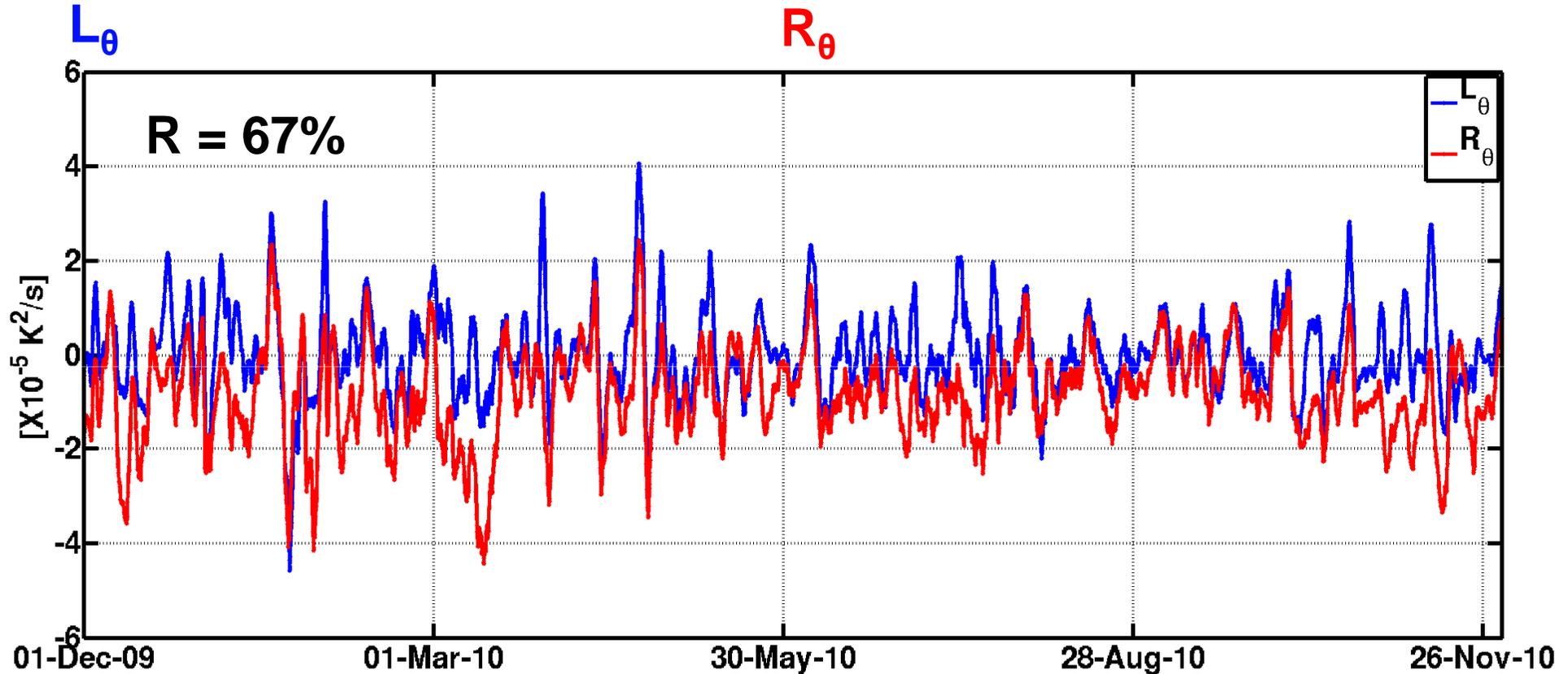
$J_n'$ : Taux de rechauf. diabatique

Terme 3ème ordre

$$E_h = -2 \langle \theta_n' \bar{\nabla} \cdot (\theta_n' \bar{V}_n') \rangle; \quad E_v = -2 \left\langle \theta_n' \frac{\partial}{\partial p} (\theta_n' \omega_n') \right\rangle$$

## 4. Résultats – validation de l'équation de la VI

$$\frac{\partial \sigma_\theta^2}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\langle \vec{V} \rangle \sigma_\theta^2) - \frac{\partial (\langle \omega \rangle \sigma_\theta^2)}{\partial p} - 2 \langle \theta'_n \vec{V}'_n \rangle \cdot \vec{\nabla} \langle \theta \rangle - 2 \langle \theta'_n \omega'_n \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial p} + 2 \langle \theta'_n J'_n \rangle - 2 \langle \theta'_n \vec{\nabla} \cdot (\theta'_n \vec{V}'_n) \rangle - 2 \left\langle \theta'_n \frac{\partial (\theta'_n \omega'_n)}{\partial p} \right\rangle$$



$$\overline{L_\theta(i, j, k)(t)} \approx \overline{R_\theta(i, j, k)(t)}$$

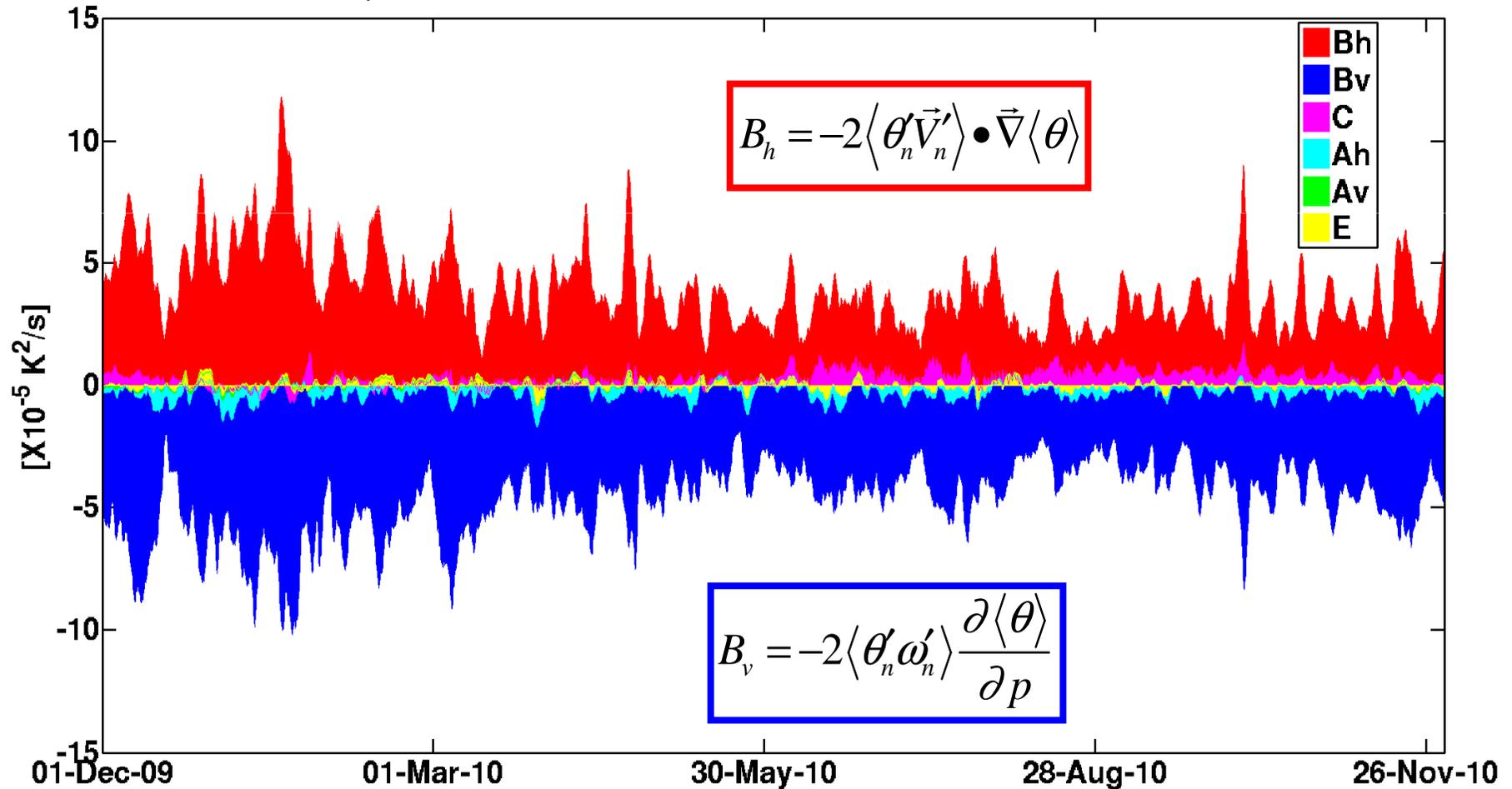
En moyenne, la tendance de la VI correspond à la somme des termes de droite.

## 4. Résultats – Bilan de l'équation de la variabilité interne

$$\frac{\partial \sigma_\theta^2}{\partial t} = \underbrace{-\vec{\nabla} \cdot (\langle \vec{V} \rangle \sigma_\theta^2)}_{A_h} + \underbrace{\frac{\partial (\langle \omega \rangle \sigma_\theta^2)}{\partial p}}_{A_v} + \underbrace{-2 \langle \theta'_n \vec{V}'_n \rangle \cdot \vec{\nabla} \langle \theta \rangle}_{B_h} + \underbrace{-2 \langle \theta'_n \omega'_n \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial p}}_{B_v} + \underbrace{2 \langle \theta'_n J'_n \rangle}_{C} + \underbrace{-2 \langle \theta'_n \vec{\nabla} \cdot (\theta'_n \vec{V}'_n) \rangle - 2 \left\langle \theta'_n \frac{\partial (\theta'_n \omega'_n)}{\partial p} \right\rangle}_{E}$$

$L$ 
 $A_h$ 
 $A_v$ 
 $B_h$ 
 $B_v$ 
 $C$ 
 $E$

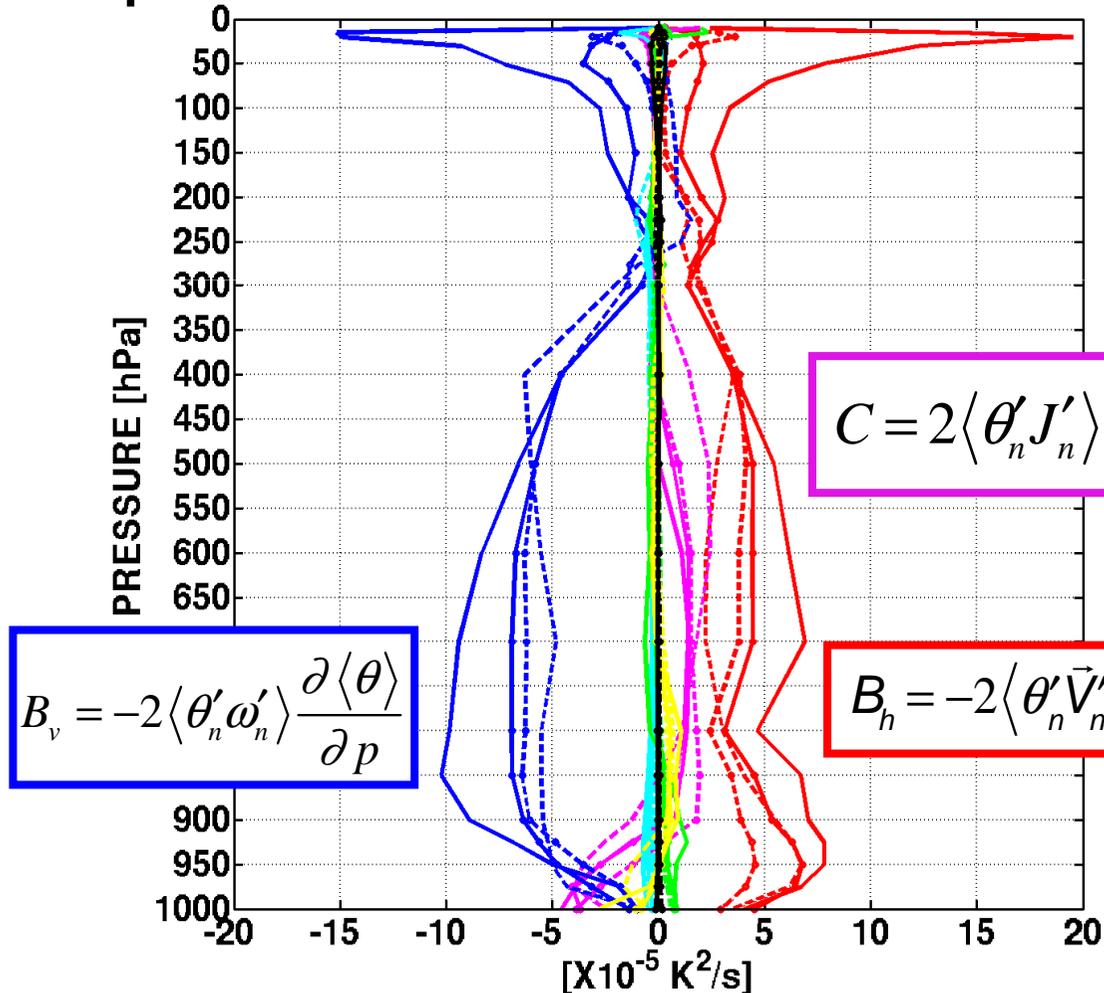
Évolution temporelle des contributions à la tendance de la VI moyennées sur tout le domaine d'étude.



## 4. Résultats – Bilan de la variabilité interne à l'échelle de la saison

$$\frac{\partial \sigma_\theta^2}{\partial t} = \underbrace{-\vec{\nabla} \cdot (\langle \vec{V} \rangle \sigma_\theta^2)}_{A_h} - \underbrace{\frac{\partial (\langle \omega \rangle \sigma_\theta^2)}{\partial p}}_{A_v} - \underbrace{2 \langle \theta'_n \vec{V}'_n \rangle \cdot \vec{\nabla} \langle \theta \rangle}_{B_h} - \underbrace{2 \langle \theta'_n \omega'_n \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial p}}_{B_v} + \underbrace{2 \langle \theta'_n J'_n \rangle}_{C} - \underbrace{2 \langle \theta'_n \vec{\nabla} \cdot (\theta'_n \vec{V}'_n) \rangle}_{E} - \underbrace{2 \langle \theta'_n \frac{\partial (\theta'_n \omega'_n)}{\partial p} \rangle}_{E}$$

Profil vertical des moyennes saisonnières et spatiale de la contribution des termes



➤ Tendance nulle à l'échelle de la saison

➤ C contribue légèrement en raison des processus de condensation, radiation et diffusion

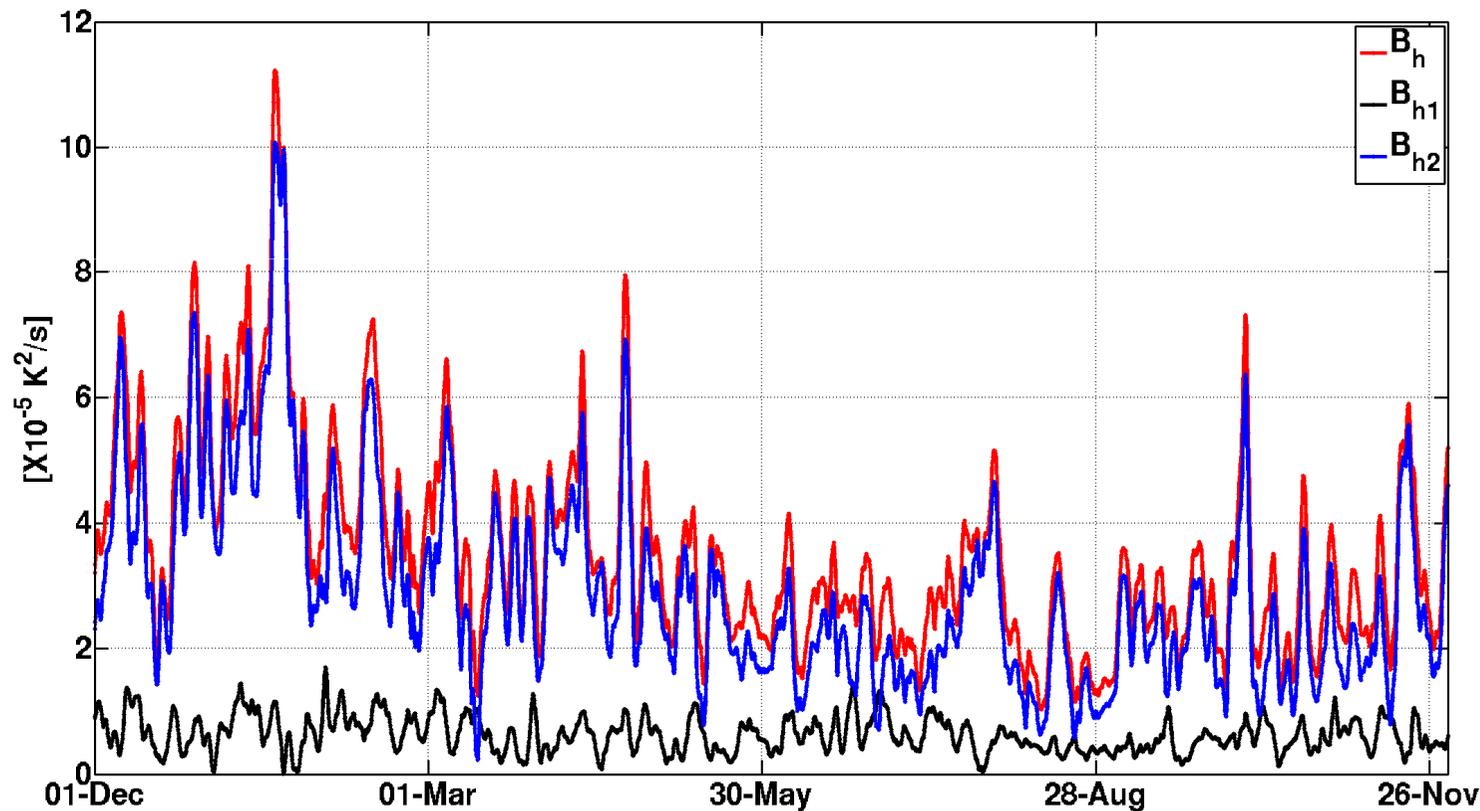
➤ Deux termes dominants:  $B_h$  &  $B_v$



## 4. Résultats - Interprétations physiques

Pourquoi  $B_h$  contribue à la croissance de la VI ?

$$B_h = \overset{B_{h1}}{\boxed{-2\langle\theta'_n U'_n\rangle \frac{\partial\langle\theta\rangle}{\partial X}}} - \overset{B_{h2}}{\boxed{2\langle\theta'_n V'_n\rangle \frac{\partial\langle\theta\rangle}{\partial Y}}}$$

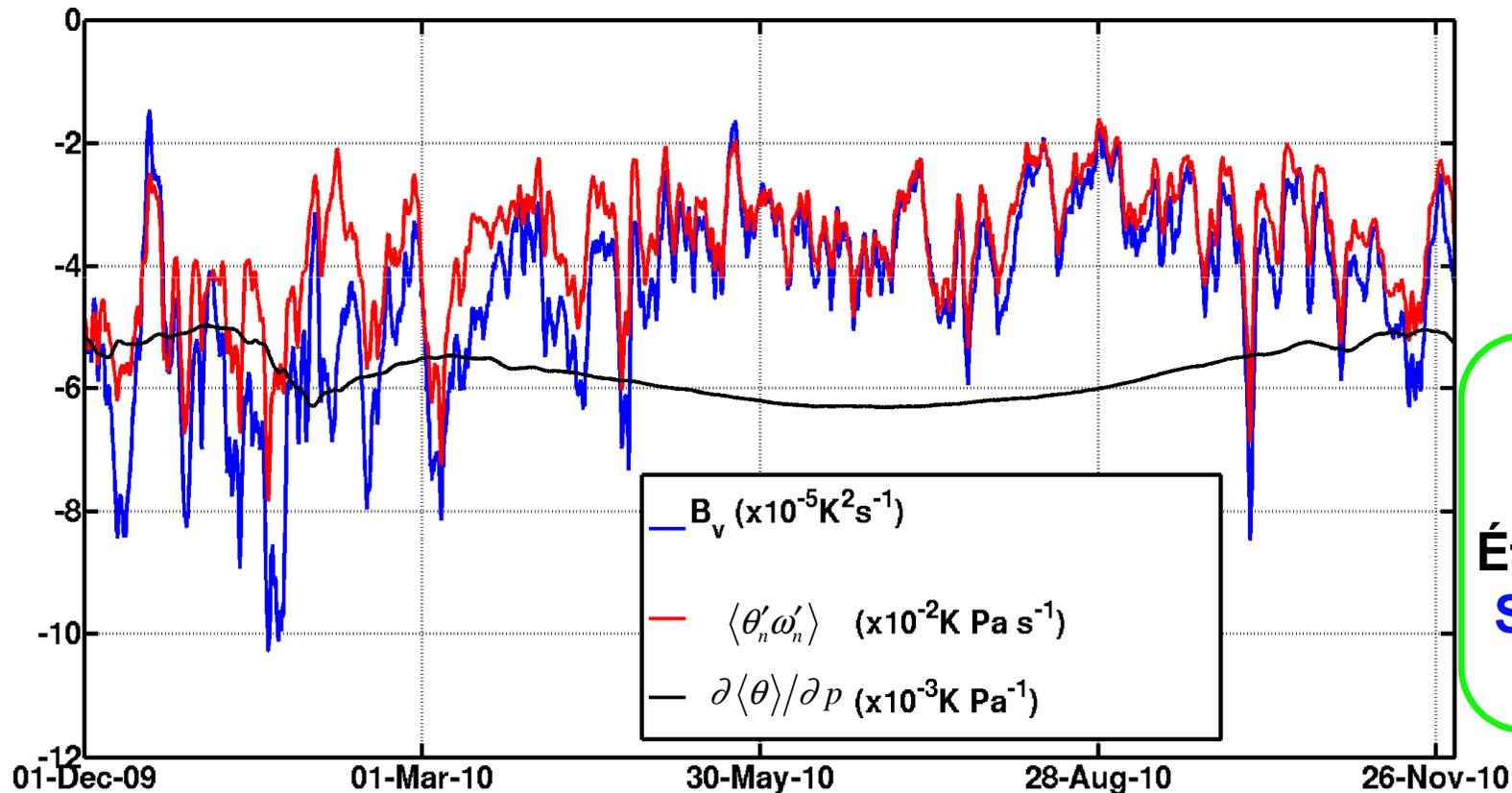


Transport horizontal de chaleur par la **covariance des fluctuations** est **contre-gradient** dans l'état de la **moyenne d'ensemble**

## 4. Résultats - Interprétations physiques

Pourquoi la croissance de la VI est réduite par  $B_v$  ?

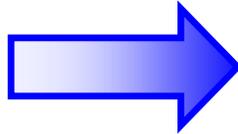
$$B_v = -2 \langle \theta'_n \omega'_n \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial p} \quad \Rightarrow \quad \langle \theta'_n \omega'_n \rangle < 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial p} < 0$$



$$\langle \theta'_n \omega'_n \rangle < 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \theta'_n > 0 & \& \omega'_n < 0 \Rightarrow \text{Monté des fluctuations chaudes} \\ \theta'_n < 0 & \& \omega'_n > 0 \Rightarrow \text{Descente des fluctuations froides} \end{cases}$$

## 4. Conclusion

Croissance IV



Croissance de  $B_h$  car le transport par covariance de fluctuation est contre-gradient de l'état de la moyenne d'ensemble

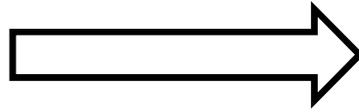
**En opposition...**

$B_v$  contribue à réduire la croissance de IV à travers une conversion barocline de l'énergie potentielle disponible vers l'énergie cinétique des fluctuations.

*(e.g. Lorenz 1955, 1967)*

## 4. Conclusion - perspectives

Variabilité  
Inter-membre (VI)



Transfert d'énergie

**Cycle d'énergie pour la VI inspiré des travaux classiques sur les transferts d'énergies dans les systèmes météorologiques (e.g. Lorenz 1955, 1967; Pearce 1978; Marquet 1991).**

**Nikiéma, O., and R. Laprise, 2012:** An approximate energy cycle for inter-member variability in ensemble simulations of a regional climate model. *Clim. Dyn.* 22 pp, doi:10.1007/s00382-012-1575-x

## References

# Merci!!!

### For detailed budget diagnostics of IV

Nikiéma, O., and R. Laprise, 2010: Diagnostic budget study of internal variability in ensemble simulations of the Canadian RCM. *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-010-0834-y

Nikiéma, O., and R. Laprise: Budget study of the internal variability in ensemble simulations of the Canadian RCM at the seasonal scale. *Journal of Geophysical research.* DOI: 10.1029/2011JD015841

## Sponsors Acknowledgement



Canadian Foundation for Climate  
and Atmospheric Sciences (CFCAS)  
Fondation canadienne pour les sciences  
du climat et de l'atmosphère (FCSCA)



Développement  
économique, Innovation  
et Exportation



Fonds de recherche  
sur la nature  
et les technologies



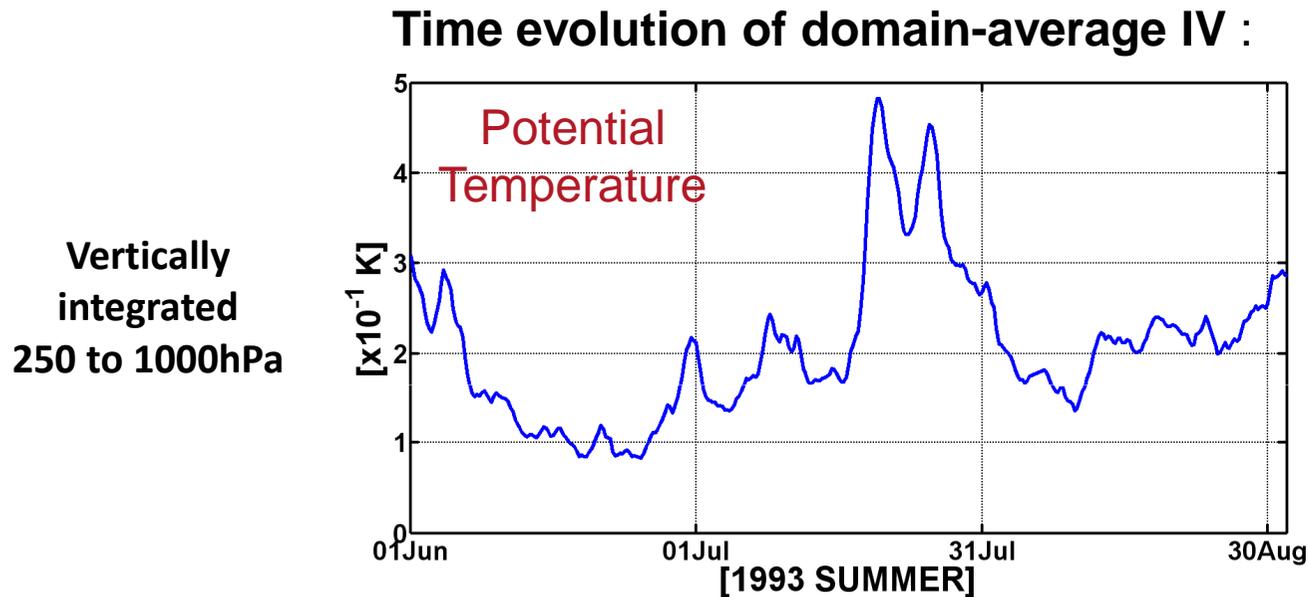
# Références

- Alexandru A, de Elia R, Laprise R (2007)** Internal Variability in regional climate downscaling at the seasonal scale. *Mon Weather Rev* 135:3221-3238
- Giorgi F, Bi X (2000)** A study of internal variability of regional climate model. *J Geophys Res* 105:29503-29521
- Lorenz EN (1955)** Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus* 7:157–167
- Lorenz EN (1967)** The nature and theory of the general circulation of the atmosphere. *World Meteorological Organ* 218 TP 115 161 pp
- Marquet P (1991)** On the concept of energy and available enthalpy: application to atmospheric energetics. *Q J R Meteorol Soc* 117:449–475
- Pearce RP (1978)** On the concept of available potential energy. *Q J R Meteorol Soc* 104:737–755
- Rinke A, Dethloff K (2000)** On the sensitivity of a regional Arctic climate model to initial and boundary conditions. *Clim Res* 14:101-113
- Rinke A, Marbaix P, Dethloff K (2004)** Internal variability in Arctic regional climate simulations: case study for the Sheba year. *Clim Res* 27:197-209

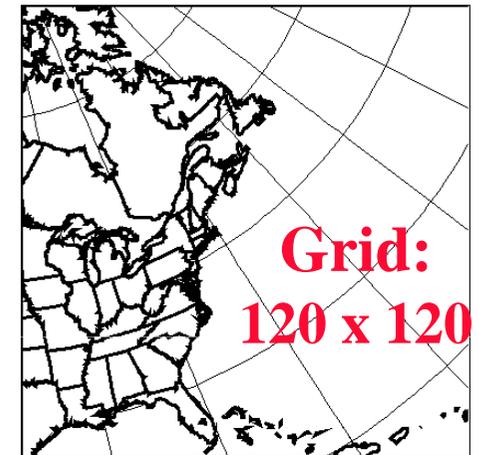


# 1. Introduction - scientific motivations

- **Ensemble:** 20 simulations with only different ICs
- **Run:** summer 1993



**Study domain**  
East of North America



Alexandru et al.,  
2007

**Internal Variability greatly fluctuates in time !**

**Scientific question ?**

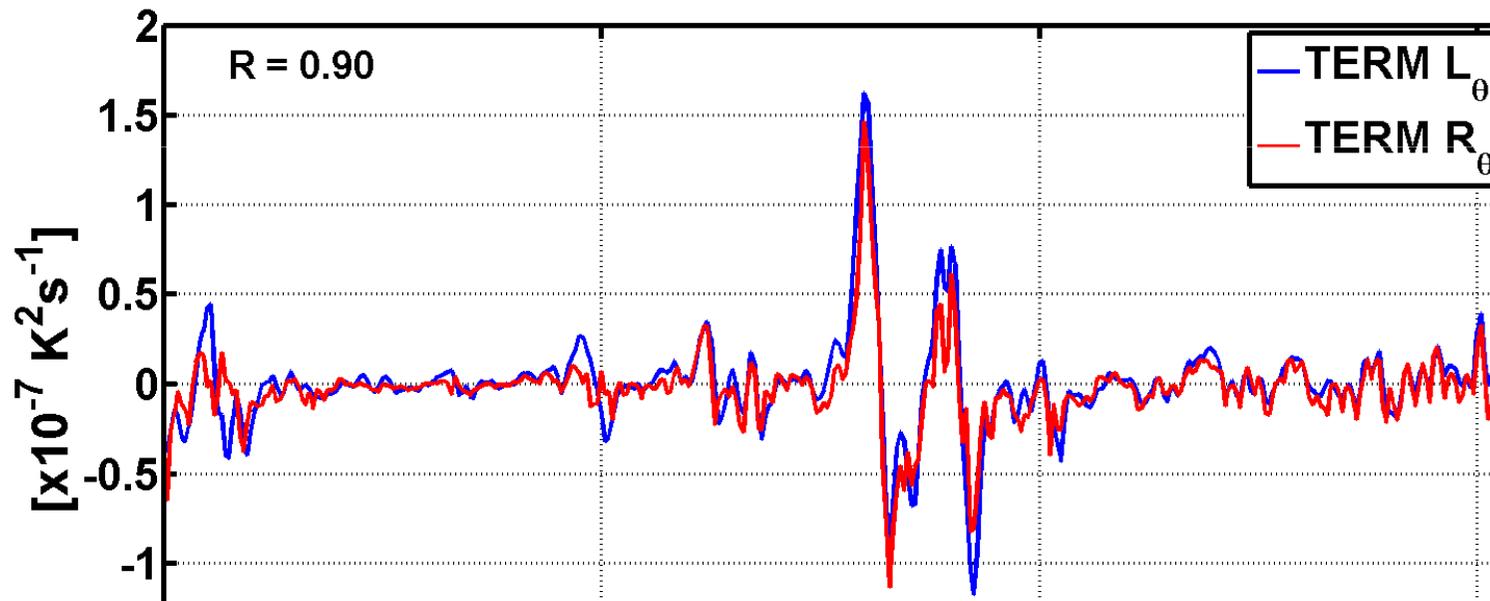
☞ What are the physical processes that contribute to the IV in RCM simulations?

## 4. Results – Time rate of change of Potential Temperature the internal variability

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}^2}{\partial t} = \underbrace{-\vec{\nabla} \cdot (\langle \vec{V} \rangle \sigma_{\theta}^2)}_{L} - \frac{\partial (\langle \omega \rangle \sigma_{\theta}^2)}{\partial p} - 2 \langle \theta'_n \vec{V}'_n \rangle \cdot \vec{\nabla} \langle \theta \rangle - 2 \langle \theta'_n \omega'_n \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial p} + 2 \langle \theta'_n J'_n \rangle - 2 \langle \theta'_n \vec{\nabla} \cdot (\theta'_n \vec{V}'_n) \rangle - 2 \left\langle \theta'_n \frac{\partial (\theta'_n \omega'_n)}{\partial p} \right\rangle_{R}$$

**L**  
In CRCM  
simulation

**R**  
Diagnostic  
calculation



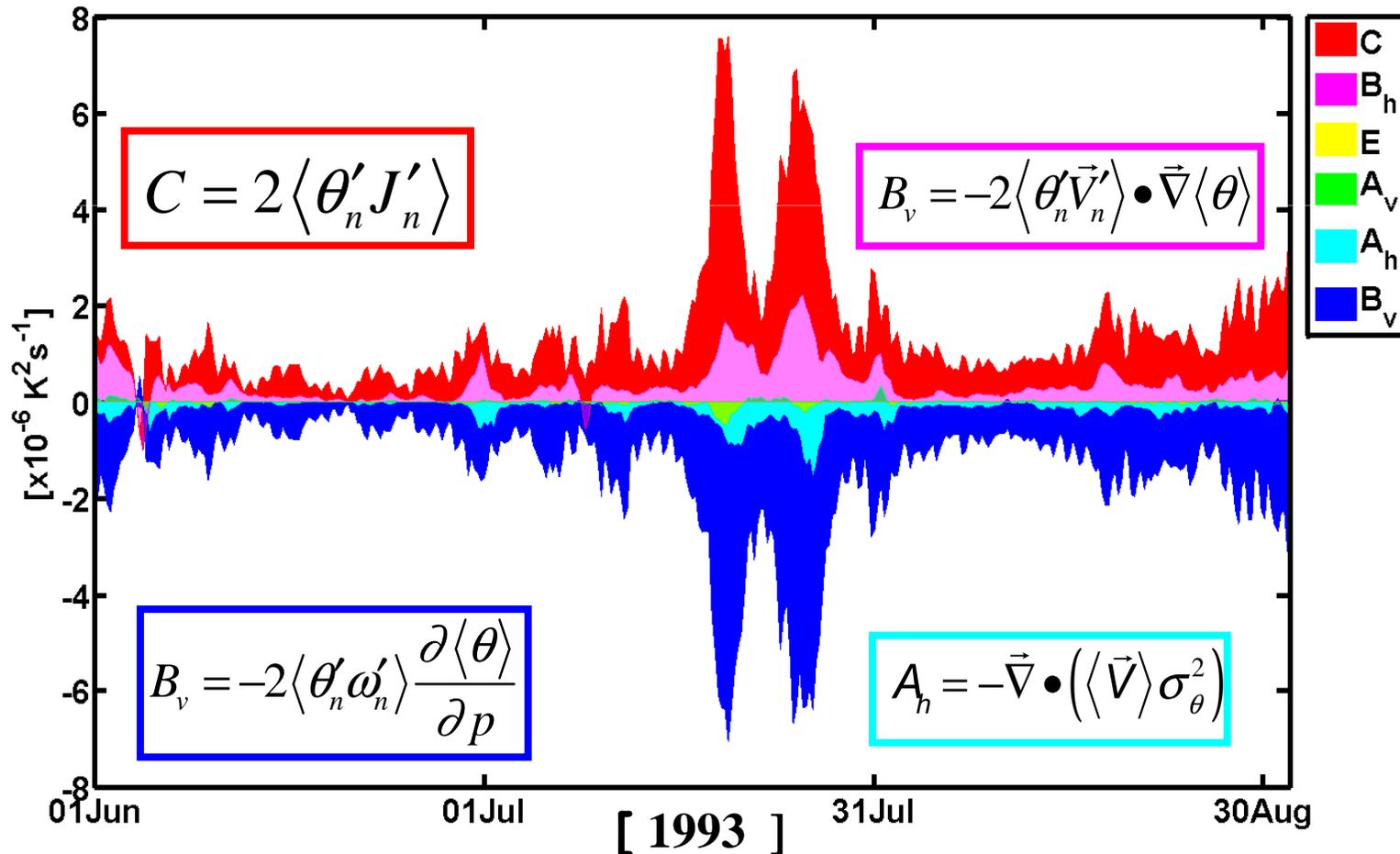
Fairly good agreement between the **IV tendency developed in the CRCM simulations** and the **sum of various terms of the diagnostic calculation**

## 4. Conclusion - Amérique du nord (saison d'été)

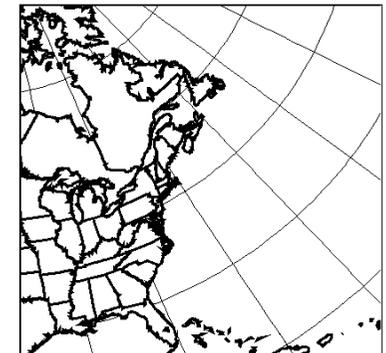
$$\frac{\partial \sigma_{\theta}^2}{\partial t} \approx \underbrace{C + B_h}_{\text{Generation (+)}} + \underbrace{B_v + A_h}_{\text{Destruction (-)}}$$

Generation (+) Destruction (-)

Évolution temporelle des contributions à la tendance de la VI



East of North America

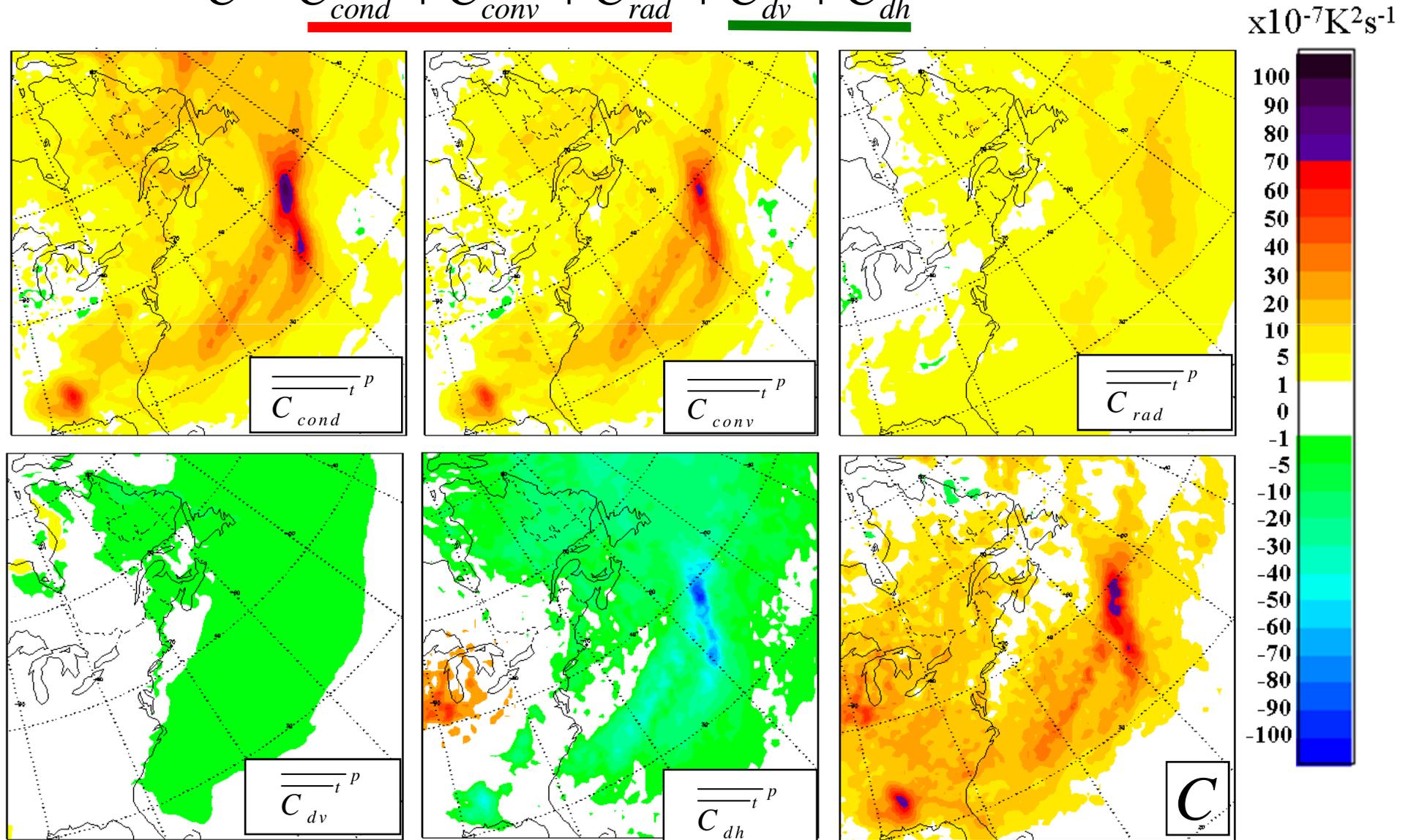


### 3. Results – Physical interpretations

$$C = 2 \langle \theta'_n J'_n \rangle$$

Why C contributes to the IV growth ?

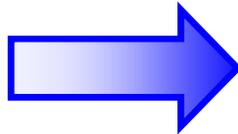
$$C = \underline{C_{cond}} + C_{conv} + C_{rad} + \underline{C_{dv}} + C_{dh}$$



## 4. Conclusion

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}^2}{\partial t} \approx \underbrace{B_h}_{\text{Generation (+)}} + \underbrace{B_v}_{\text{Destruction (-)}}$$

Croissance IV



Croissance de  $B_h$  car le transport par covariance de fluctuation est contre gradient de l'état de la moyenne d'ensemble

**En opposition...**

$B_v$  contribue à réduire la croissance de IV à travers une conversion barocline de l'énergie potentielle disponible vers l'énergie cinétique des fluctuations.

*(e.g. Lorenz 1955, 1967)*

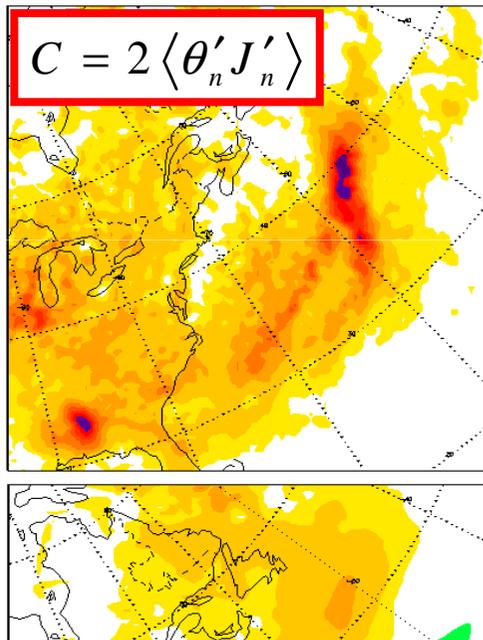
## 4. Conclusion - Perspectives

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}^2}{\partial t} \approx \underbrace{C + B_h}_{\text{Generation (+)}} + \underbrace{B_v + A_h}_{\text{Destruction (-)}}$$

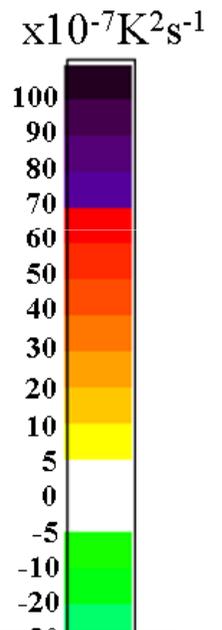
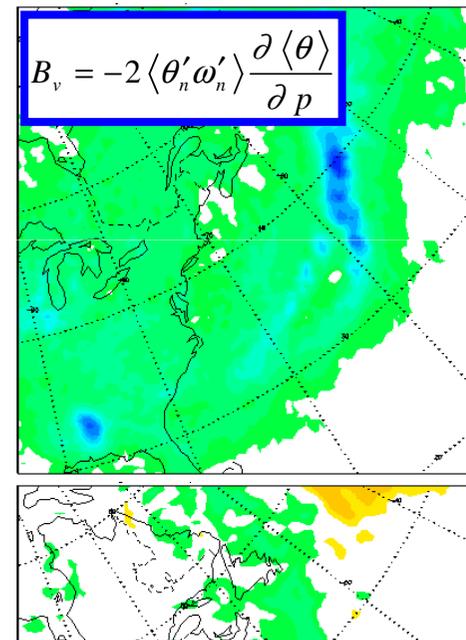
Variabilité Inter-membre  $\implies$  Transfère d'énergie

# Synthesis

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}^2}{\partial t} \approx \underbrace{C + B_h}_{\text{Generation (+)}} + \underbrace{B_v + A_h}_{\text{Destruction (-)}}$$



Time-averaged  
of different  
terms vertically  
integrated from  
250 to 1000hPa



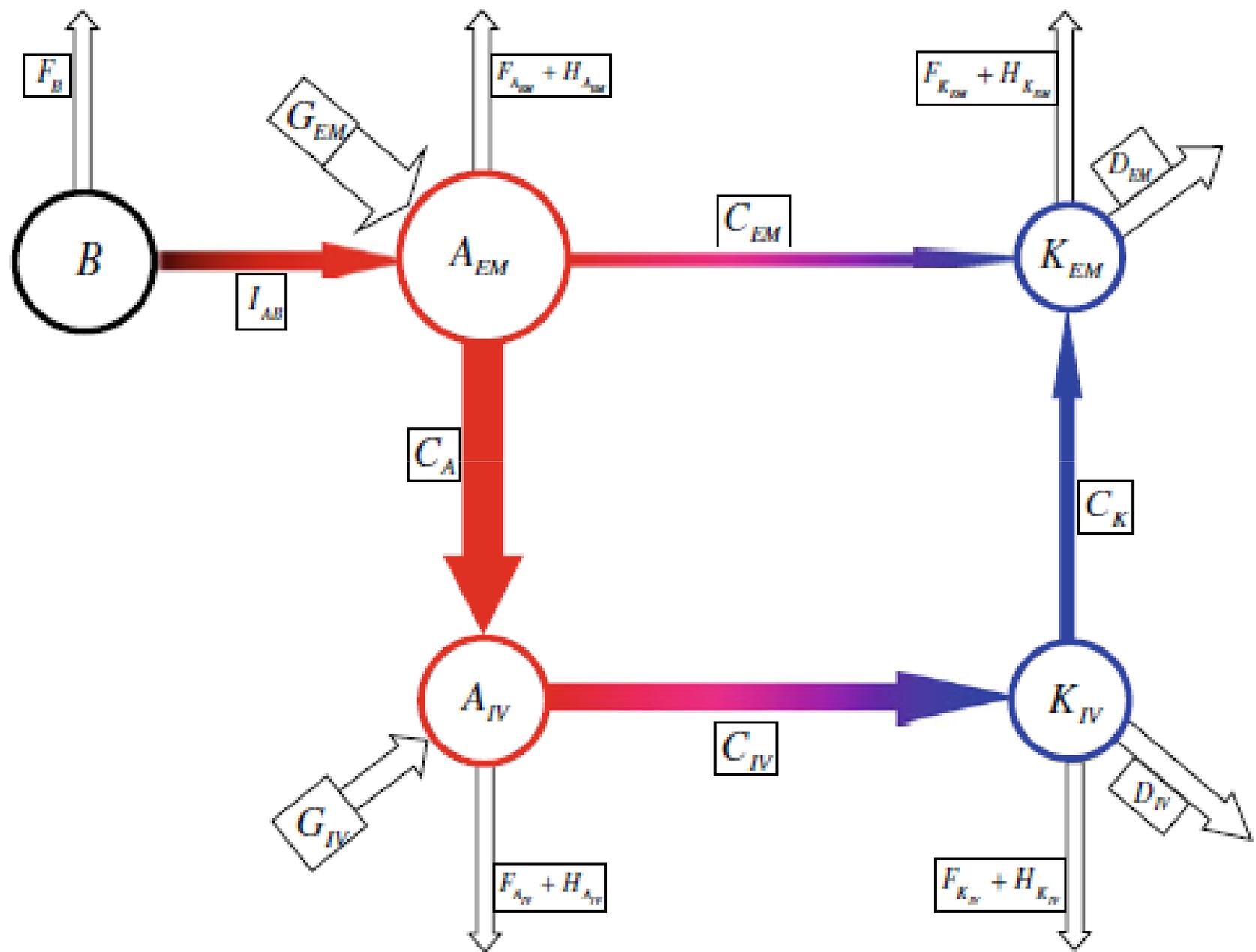
What are the physical processes that lead to these results?

$$\frac{\partial K_{EM}}{\partial t} = C_{EM} - C_K - D_{EM} - F_{K_{EM}} - H_{K_{EM}}$$

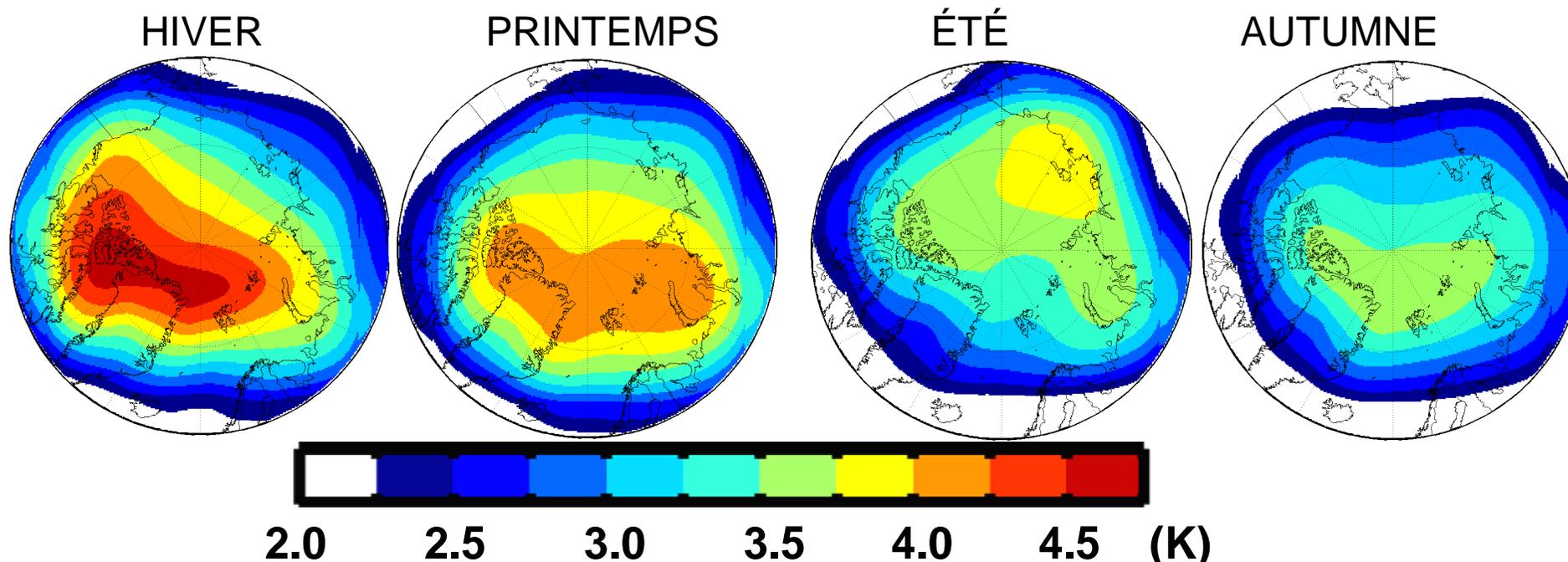
$$\frac{\partial K_{IV}}{\partial t} = C_{IV} + C_K - D_{IV} - F_{K_{IV}} - H_{K_{IV}}$$

$$\frac{\partial A_{EM}}{\partial t} = G_{EM} + I_{AB} - C_{EM} - C_A - F_{A_{EM}} - H_{A_{EM}}$$

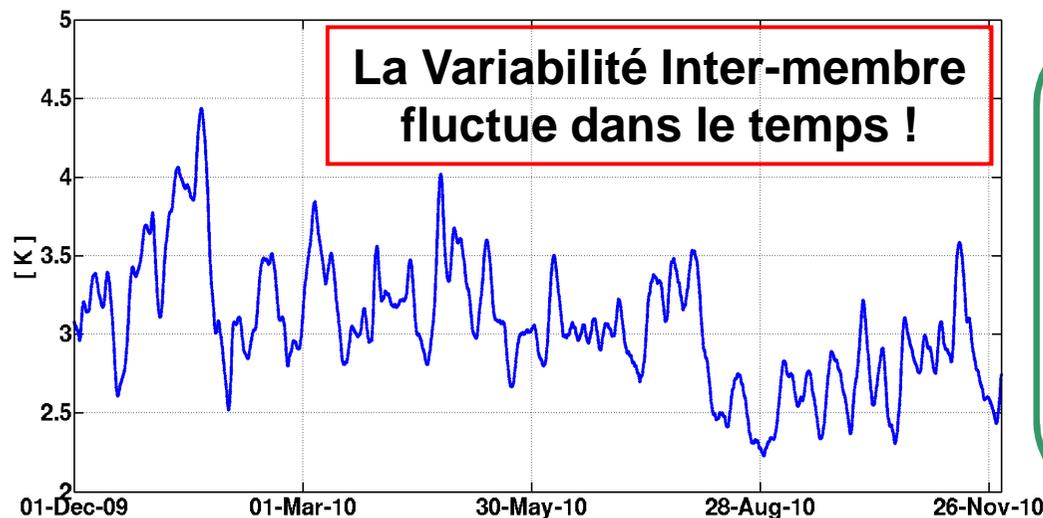
$$\frac{\partial A_{IV}}{\partial t} = G_{IV} - C_{IV} + C_A - F_{A_{IV}} - H_{A_{IV}}$$



# 1. Introduction - motivations scientifiques



Évolution temporelle de la VI pour la Température potentielle



**Question scientifique?**

Quelles sont les processus physiques qui contribuent au maintien de la VI dans les simulations des MRC

## 2. Méthodologie - équation bilan

**Étape 1:** Équation conservation de la température potentielle

$$\frac{\partial \theta_n}{\partial t} + \square \square \square = J_n \quad \text{Étape 1}$$



$$\frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial t} + \square \square \square = \langle J \rangle \quad \text{Étape 2}$$



■ **Étape 3:** Équation bilan pour la déviation

$$\frac{\partial \theta'_n}{\partial t} + \square \square \square = J'_n$$

## 2. Méthodologie - équation bilan

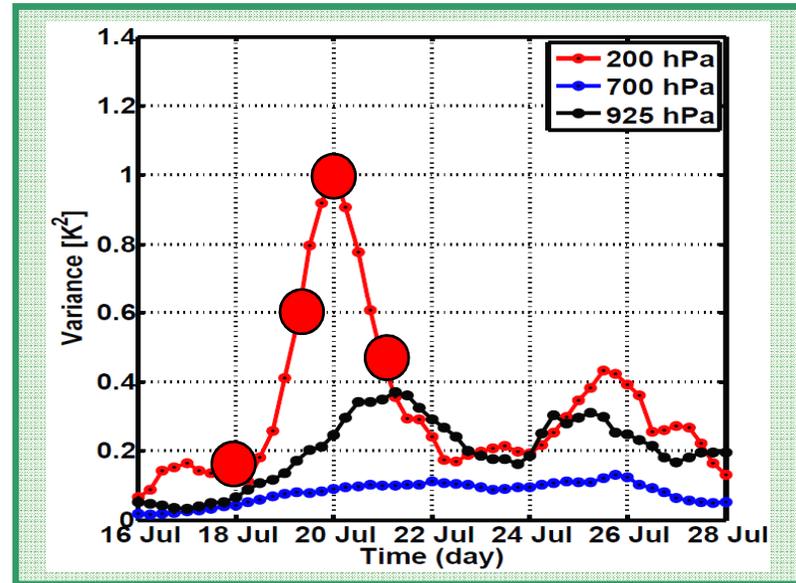
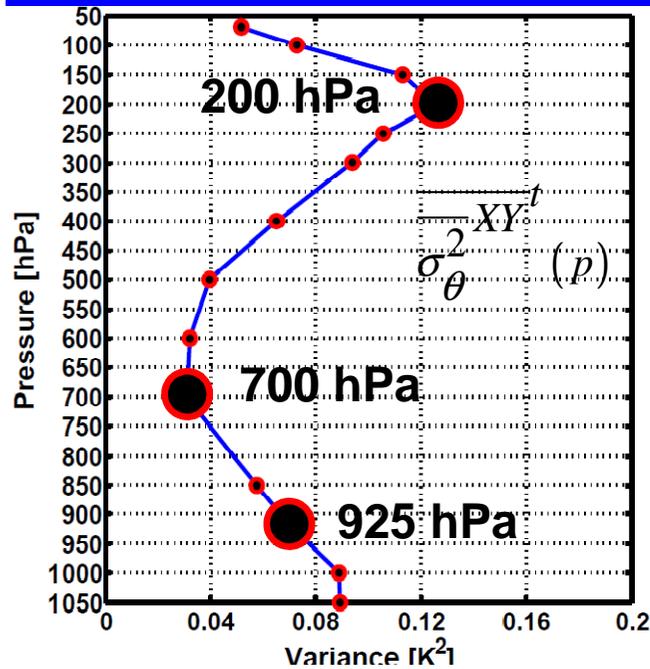
$$\theta'_n \times \left( \frac{\partial \theta'_n}{\partial t} + \square \square \square \right) = J'_n \quad \text{Étape 3}$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \theta'^2_n}{\partial t} + \square \square \square = J'_n \theta'_n \quad \text{Étape 4}$$

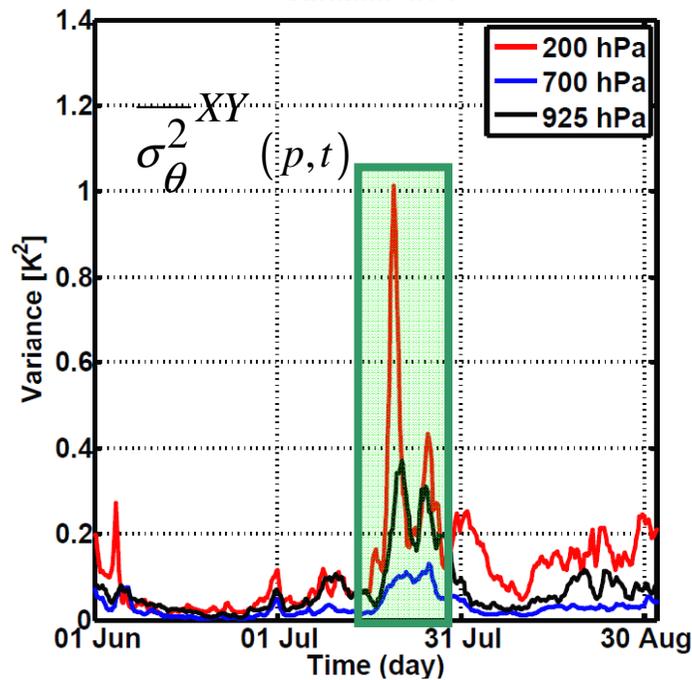
**Étape 5 : Équation bilan de la variabilité interne**

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \sigma^2_\theta}{\partial t} + \left\langle \square \square \square \right\rangle = \left\langle J'_n \theta'_n \right\rangle$$

# 4. Résultats – caractéristiques de la variabilité interne



Période  
d'intérêt:  
18 au 28 Jul



200 hPa: 21 July 1993 at 0000 UTC

