

Étude du bilan d'eau atmosphérique sur l'Amérique du Nord  
par décomposition d'échelles pour les climats présent et  
futur, tels que simulés par le Modèle Régional Canadien du  
Climat

Raphaël Bresson

Séminaires 2 et 3

Maîtrise en Sciences de l'Atmosphère, UQÀM

Directeur : René Laprise

29 Juillet 2009

# Plan

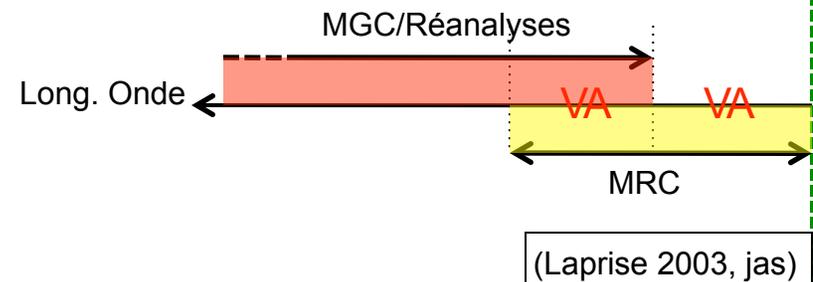
- Pourquoi étudier :
  - le bilan d'eau de l'atmosphère ?
  - avec un Modèle Régional de Climat ?
- Comment ?
  - Comparaison de 2 simulations de climat
  - Diagnostique du bilan d'eau atmosphérique
  - Décomposition d'échelle spatiale des champs
  - Statistiques des champs
- Résultats :
  - Climatologie du bilan d'eau atmosphérique
  - Contribution des différentes échelles
  - Interactions d'échelles
  - x4 pour les climats présent et futur, et les saisons d'hiver et d'été



# Quoi ? Pourquoi ?

Étudier le bilan d'eau atmosphérique dans deux **simulations régionales** de climat pour les climats présent et futur

- Évaluer la valeur ajoutée (VA) des MRC
  - Simuler des détails de petites échelles **spatiales** et **temporelles** pertinents tout en reproduisant fidèlement les champs de grande échelle imposés
  - À chercher dans les petites échelles



- **3 Objectifs :**
  - Étudier la climatologie du bilan d'eau atmosphérique actuel en s'intéressant à la contribution de plusieurs échelles  
→ *Décomposition d'échelle, statistiques*
  - Estimer son évolution accompagnant un climat futur plus chaud  
→ *Comparaison de deux simulations de climat*
  - Évaluer la valeur ajoutée du MRCC

# Comment ? – Les Simulations

## Modèles

MRCC 4.2 →  
piloté par  
MCCG 3.1 →

Modèle à aile limitée  
Équations d'Euler élastiques et non-hydrostatiques  
Schéma semi-implicite semi-Lagrangien

Modèle mondial spectral  
Résolution horizontale ~3.75 degrés lat/lon

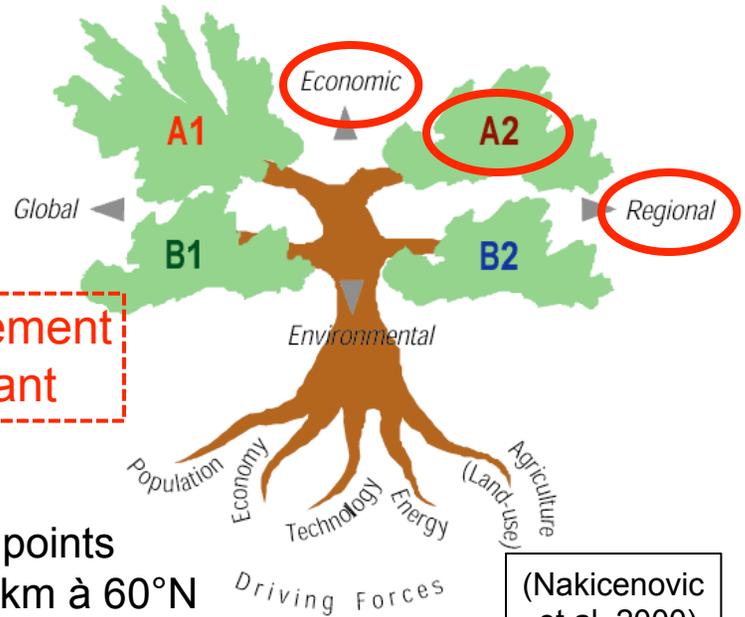
~ même  
paramétrage  
physique

## Simulations et scénarios

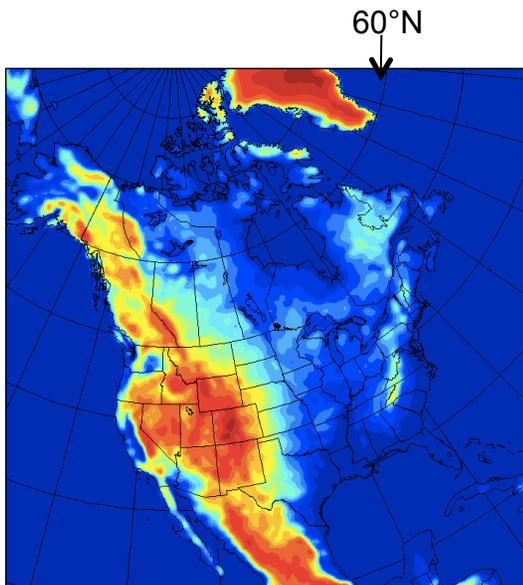
Climat présent  
1961 – 1990  
Observations

Climat futur  
2041 – 2070  
Scénario A2

Réchauffement  
important



(Nakicenovic  
et al. 2000)



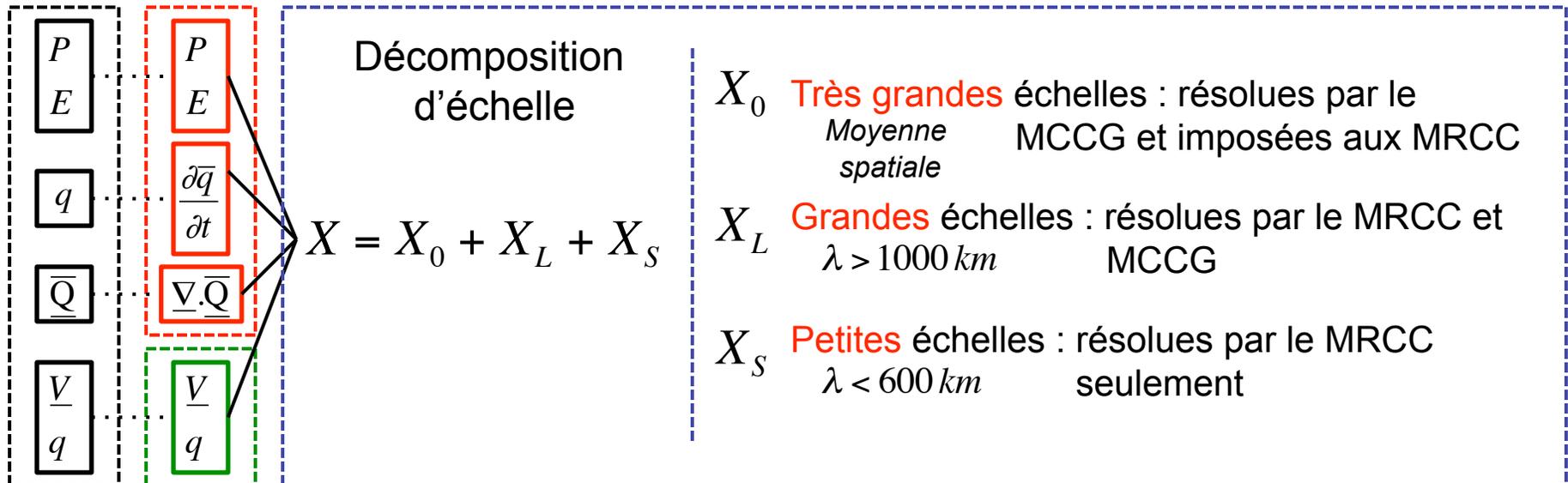
## Caractéristiques

- Domaine AMNO : 200x192 points
- Résolution horizontale : 45 km à 60°N
- Pas de temps : 15 min
- A la verticale : 29 niveaux Gal-Chen sur 29 km
- Pilotage unidirectionnel, interpolation aux pas de temps des données pilotes
- Relaxation sur zone éponge de 10 points
- Pilotage spectral vent (> 1400 km) au-dessus de 500 hPa



# Comment ? – La décomposition spatiale 1

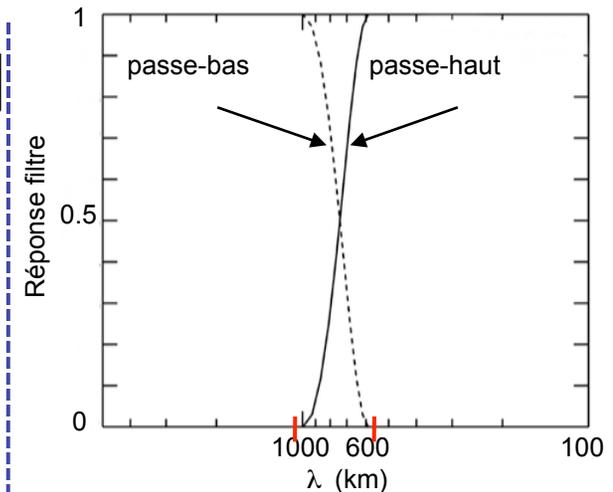
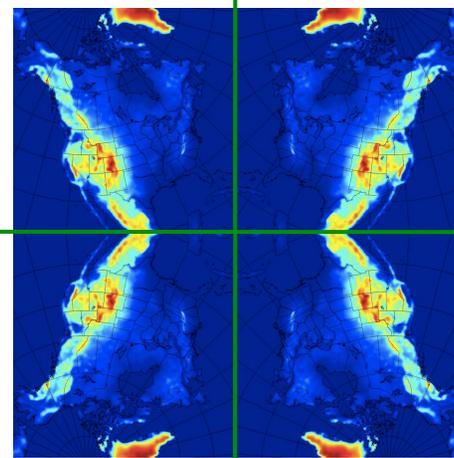
Décomposition appliquée aux champs 2D ou 3D en coordonnées Pression



Transformée en Cosinus Discrète (DCT)

(Denis et al 2002, mwr)

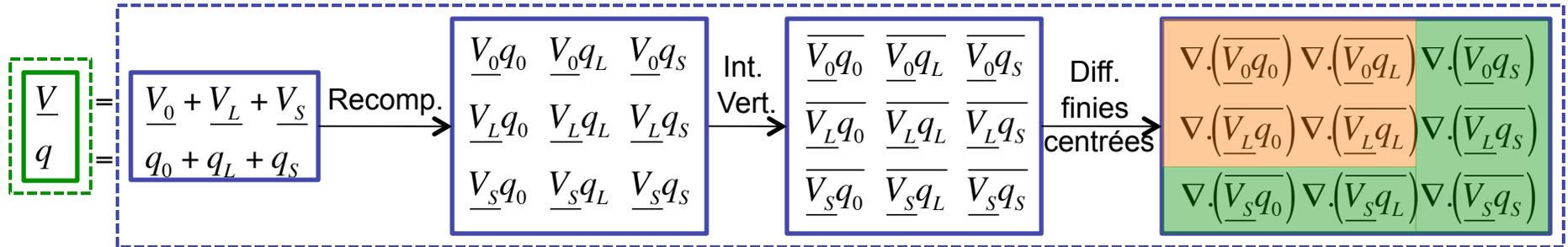
- **DFT** = **Repliement** des grandes échelles sur les petites
- **DCT** = **double symétrie** + DFT
- Apériodicité des champs **contournée**
- Apériodicité des dérivées **demeure**



(Bielli et Laprise 2006, mwr)

# Comment ? – La décomposition spatiale 2

Recomposition des termes d'interaction pour la divergence du flux d'humidité



$$\underline{V} \underline{q} = \underline{q}_0 + \underline{q}_L + \underline{q}_S$$

= Résolues par MCGG

$$\underline{V}_0 \quad \underline{V}_0 \underline{q}_0 \quad \underline{V}_0 \underline{q}_L \quad \underline{V}_0 \underline{q}_S$$

+

$$\underline{V}_L \quad \underline{V}_L \underline{q}_0 \quad \underline{V}_L \underline{q}_L \quad \underline{V}_L \underline{q}_S$$

+

$$\underline{V}_S \quad \underline{V}_S \underline{q}_0 \quad \underline{V}_S \underline{q}_L \quad \underline{V}_S \underline{q}_S$$

NON résolues par MCGG

$$\nabla \cdot \overline{\underline{Q}} = (\nabla \cdot \overline{\underline{Q}})_R + (\nabla \cdot \overline{\underline{Q}})_U$$

$$(\nabla \cdot \overline{\underline{Q}})_R = \nabla \cdot (\overline{\underline{V}_0 \underline{q}_0}) + \nabla \cdot (\overline{\underline{V}_0 \underline{q}_L}) + \nabla \cdot (\overline{\underline{V}_L \underline{q}_0}) + \nabla \cdot (\overline{\underline{V}_L \underline{q}_L})$$

Terme résolu par MCGG

$$(\nabla \cdot \overline{\underline{Q}})_U = \nabla \cdot (\overline{\underline{V}_0 \underline{q}_S}) + \nabla \cdot (\overline{\underline{V}_S \underline{q}_0}) + \nabla \cdot (\overline{\underline{V}_L \underline{q}_S}) + \nabla \cdot (\overline{\underline{V}_S \underline{q}_L}) + \nabla \cdot (\overline{\underline{V}_S \underline{q}_S})$$

Terme NON résolu par MCGG

9 termes  
d'interactions d'échelles

# Comment ? – La décomposition spatiale 3

En résumé,

|                 |                                       |     |  |   |
|-----------------|---------------------------------------|-----|--|---|
| $P$             | $P$                                   | $=$ | $P_0 + P_L + P_S$  | où <b>0</b> : très grandes échelles résolues par le MCCG et <b>imposées au MRCC</b><br><b>L</b> : grandes échelles résolues par le <b>MRCC</b> et le <b>MCCG</b><br><b>S</b> : petites échelles résolues par le <b>MRCC seulement</b>   |
| $E$             | $E$                                   | $=$ | $E_0 + E_L + E_S$  |   |
| $q$             | $\frac{\partial \bar{q}}{\partial t}$ | $=$ | $\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} \Big _0 + \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} \Big _L + \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} \Big _S$  |   |
| $\bar{Q}$       | $\underline{\nabla} \cdot \bar{Q}$    | $=$ | $\underline{\nabla} \cdot \bar{Q} \Big _0 + \underline{\nabla} \cdot \bar{Q} \Big _L + \underline{\nabla} \cdot \bar{Q} \Big _S$   |   |
| $\underline{V}$ | $\underline{V}$                       |     | $\underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_0 q_0)$ $\underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_0 q_L)$ $\underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_0 q_S)$<br>$\underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_L q_0)$ $\underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_L q_L)$ $\underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_L q_S)$<br>$\underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_S q_0)$ $\underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_S q_L)$ $\underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_S q_S)$ | ou encore $\underline{\nabla} \cdot \bar{Q} = (\underline{\nabla} \cdot \bar{Q})_R + (\underline{\nabla} \cdot \bar{Q})_U$ avec   |
| $q$             | $q$                                   |     |  | $(\underline{\nabla} \cdot \bar{Q})_R = \underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_0 q_0) + \underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_0 q_L) + \underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_L q_0) + \underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_L q_L)$<br>$(\underline{\nabla} \cdot \bar{Q})_U = \underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_0 q_S) + \underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_S q_0) + \underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_L q_S) + \underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_S q_L) + \underline{\nabla} \cdot (\underline{V}_S q_S)$ |

Attention  $\underline{\nabla} \cdot \bar{Q}$  !

|  |   |
|--|---|
| $\underline{\nabla} \cdot \bar{Q} = \begin{cases} \underline{\nabla} \cdot \bar{Q} \Big _0 + \underline{\nabla} \cdot \bar{Q} \Big _L + \underline{\nabla} \cdot \bar{Q} \Big _S \\ (\underline{\nabla} \cdot \bar{Q})_R + (\underline{\nabla} \cdot \bar{Q})_U \end{cases}$ | $\rightarrow$ <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">Échelles utilisées pour représenter <math>\underline{\nabla} \cdot \bar{Q}</math></span>   |
|  | <b>Projections</b> sur 3 échelles<br>$\neq$<br><b>Interactions</b> entre 3 échelles $\rightarrow$ <span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">se projettent sur tout le spectre !</span>                |
|  | $\rightarrow$ <span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">Échelles de <math>\underline{V}</math> et <math>q</math> impliquées dans la formation de <math>\underline{\nabla} \cdot \bar{Q}</math></span> |

# Comment ? – Les statistiques

Saisons :

- Hiver : systèmes synoptiques plus forts
- Été : plus de convection

Durée :

30 ans

**Statistiques :**  $X_{j,y}$  archive de variable  $X$ ,  $Y$  années (indice  $y$ ) et  $J$  archives (indice  $j$ )

$$\bar{X}_y^J = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J X_{j,y} \quad \text{Moyenne saisonnière de } X \text{ pour l'année } y$$

Moyenne saisonnière climatologique

$$\bar{X}^{Y,J} = \frac{1}{Y \cdot J} \sum_{y=1}^Y \sum_{j=1}^J X_{j,y}$$

Variance saisonnière climatologique

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{Y \cdot J} \sum_{y=1}^Y \sum_{j=1}^J (X_{j,y} - \bar{X}^{Y,J})^2 = \sigma_{isc}^2 + \sigma_{iac}^2$$

Variance intrasaisonnière climatologique

$$\sigma_{isc}^2 = \frac{1}{Y \cdot J} \sum_{y=1}^Y \sum_{j=1}^J (X_{j,y} - \bar{X}_y^J)^2$$

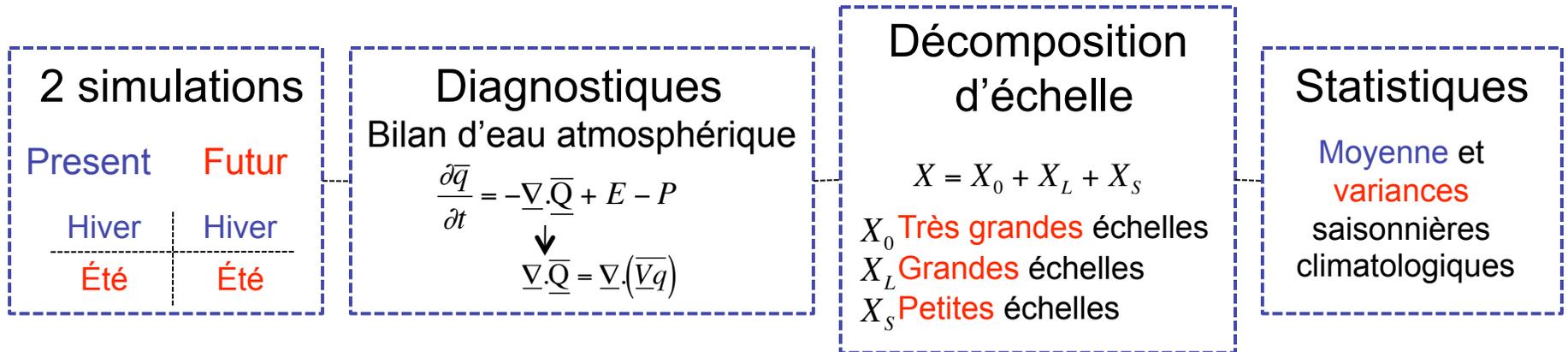
Variance interannuelle saisonnière

$$\sigma_{iac}^2 = \frac{1}{Y} \sum_{y=1}^Y (\bar{X}_y^J - \bar{X}^{Y,J})^2$$

Combinaison des décompositions spatiales et temporelles :

$$X = X_L + X_S \longrightarrow \sigma^2(X) = \sigma^2(X_L) + \boxed{\sigma^2(X_S) + \text{cov}(X_L, X_S)} \text{ — Petites échelles}$$

# Comment ? – En bref,



## Résultats :



# 1. Hiver présent - Climatologie

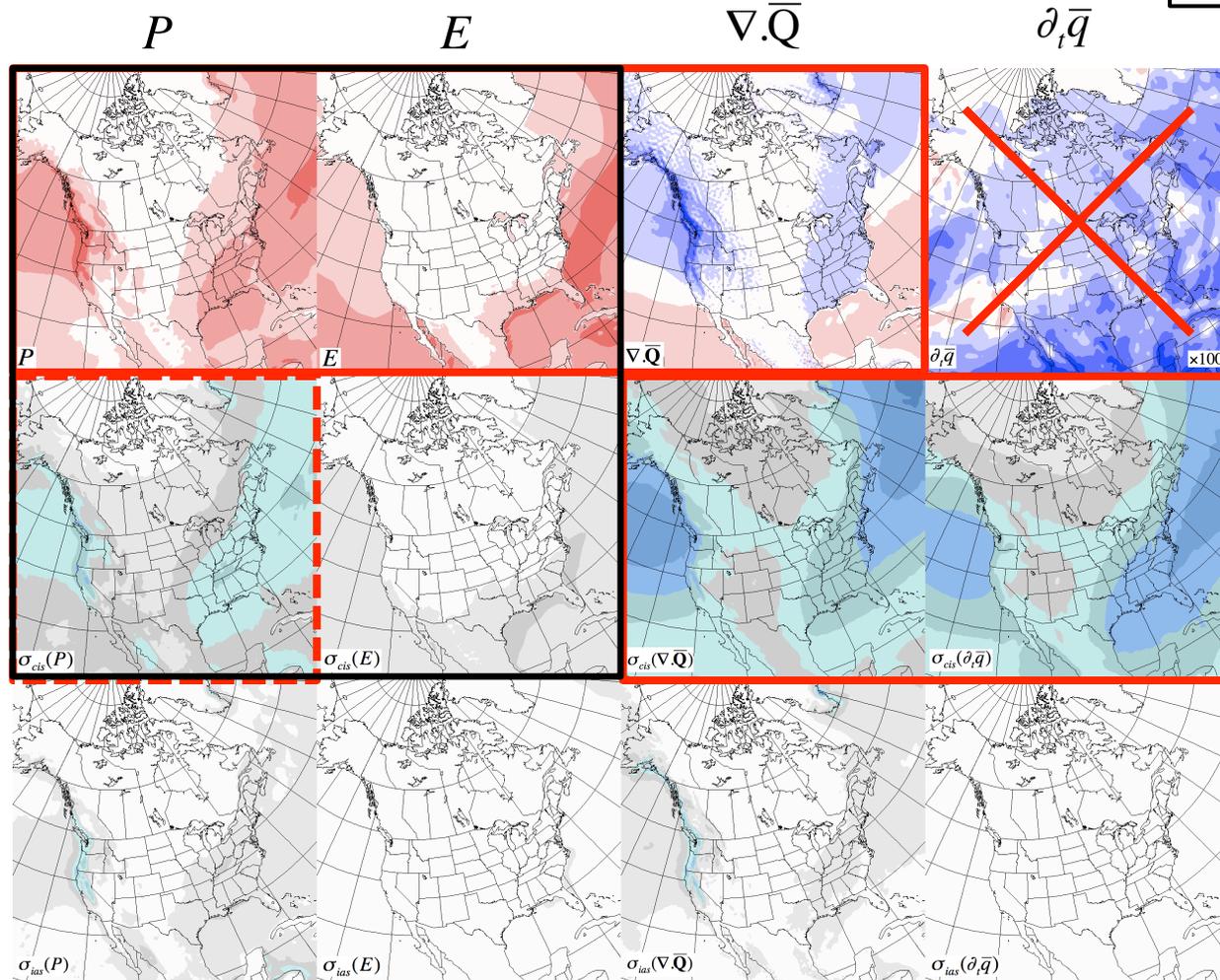
Unités : mm/j

Moyenne saisonnière

Écart-type intrasaisonnier

$$\sigma_c^2 = \sigma_{isc}^2 + \sigma_{iac}^2$$

Écart-type interannuel



Moyenne :

- Équilibre entre P, E et  $\nabla \cdot \bar{Q}$

Variabilité :

- Essentiellement intrasaisonnier
- Écart-types > Moyennes
- $\nabla \cdot \bar{Q}$  et  $\partial_t q > P \gg E$

# 1. Hiver présent – Contribution des échelles

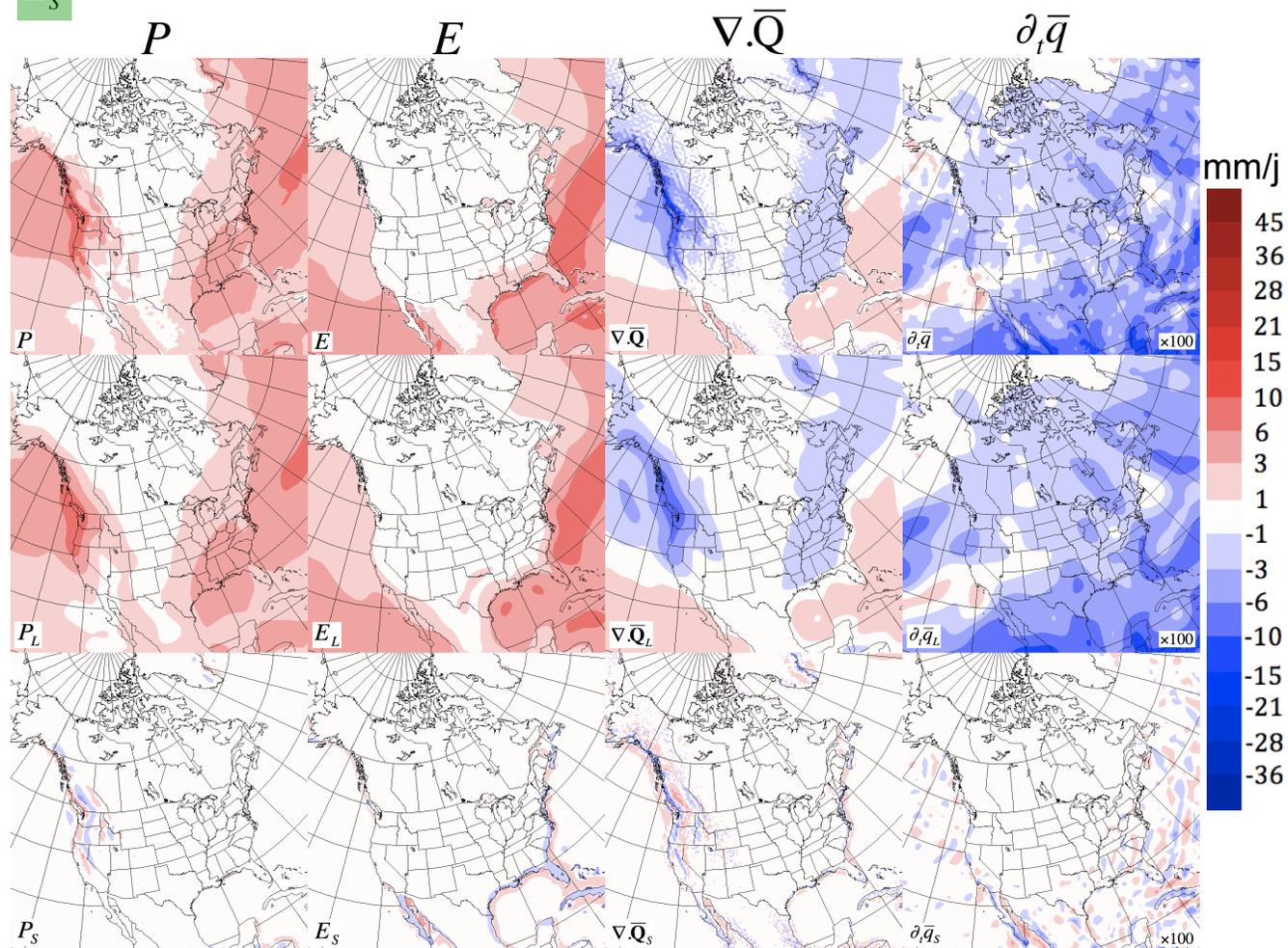
Moyenne

$$X = X_L + X_S$$

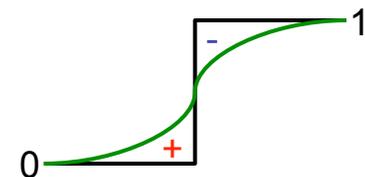
Champ total

Grandes échelles

Petites échelles



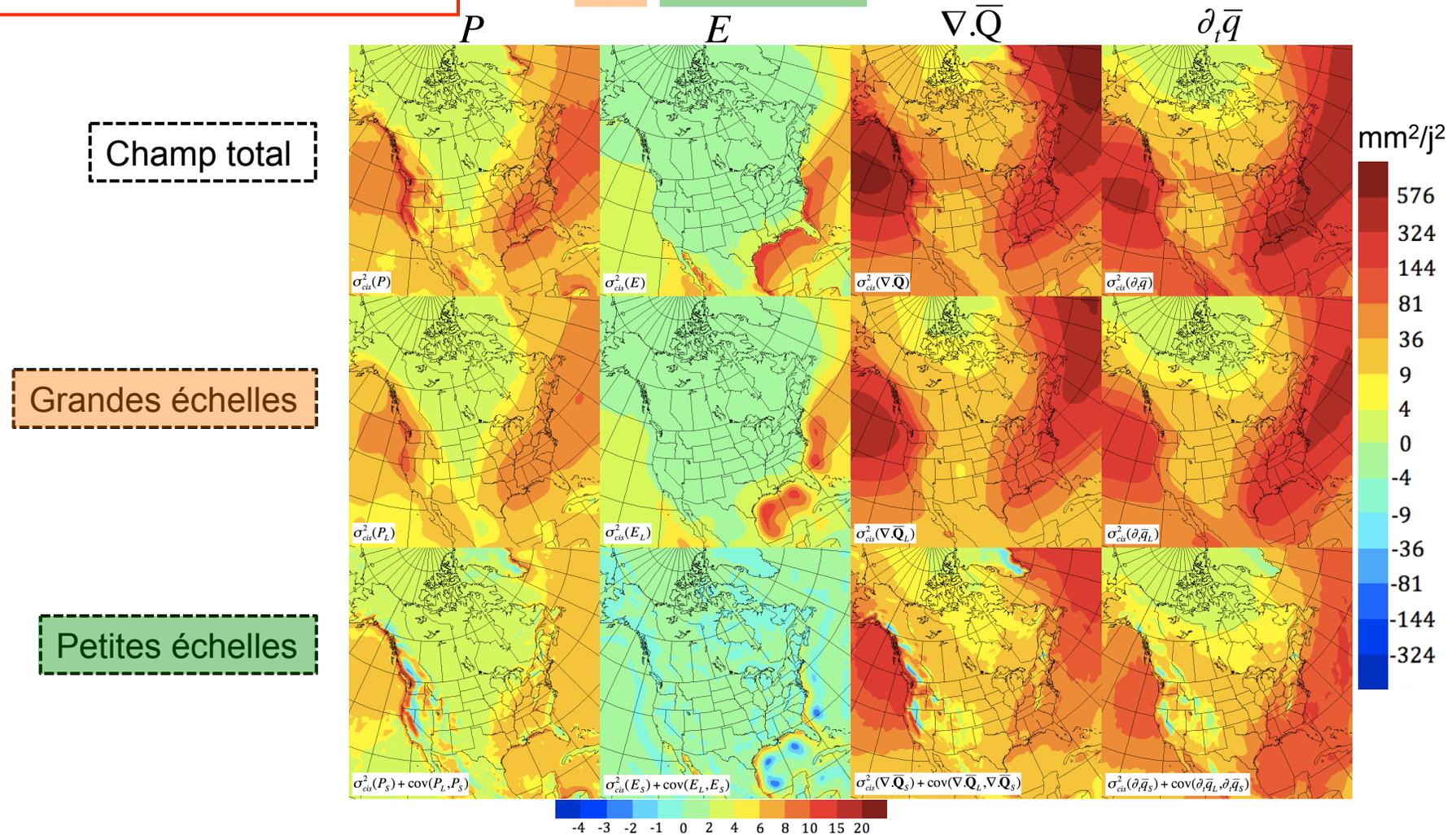
- Contribution **très limitée** des petites échelles à la moyenne
- Petites échelles concentrées le long des reliefs ou côtes
- **Pertinence** de ces petites échelles ?



# 1. Hiver présent – Contribution des échelles

Variance intrasaisonnière

$$\sigma_c^2(X) = \sigma_c^2(X_L) + \sigma_c^2(X_S) + \text{cov}(X_L, X_S)$$

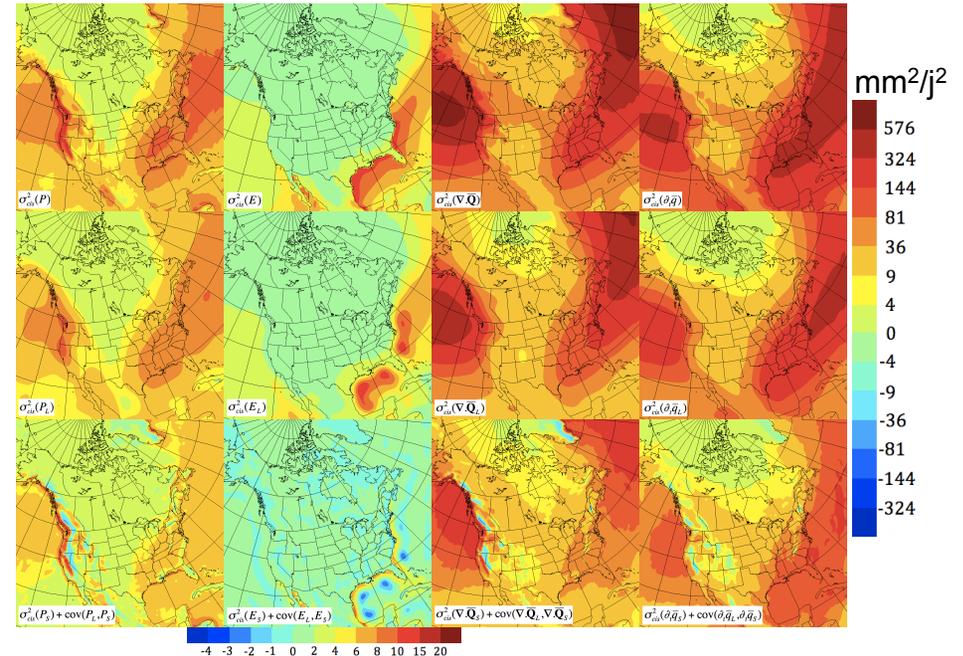
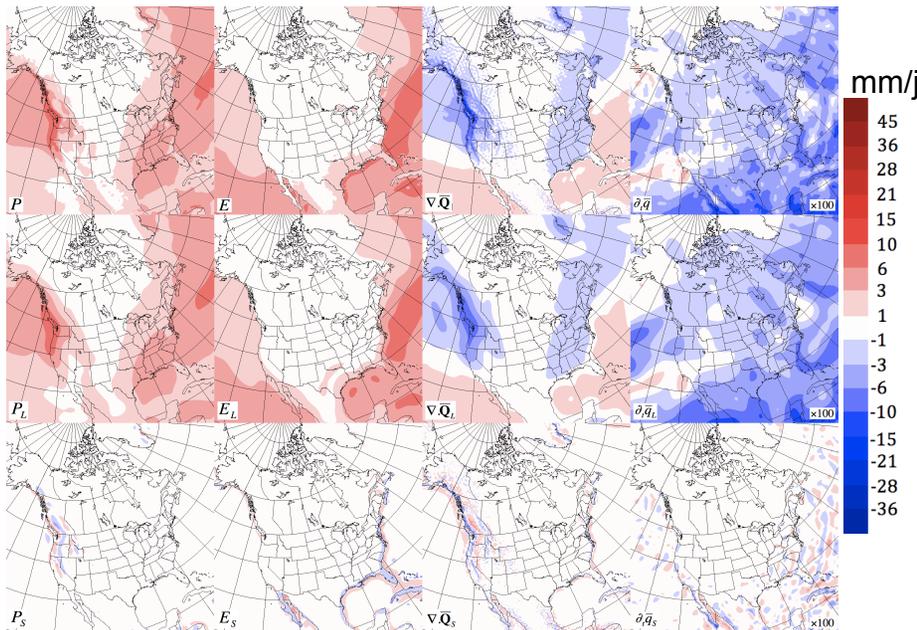


- Contribution **importante** des petites échelles à la variabilité
- Exception pour E : contribution des grandes échelles seulement
- **Valeur ajoutée** non négligeable des petites échelles

# 1. Hiver présent – Contribution des échelles

Moyenne

Variance intrasaisonnière



- Contribution **limitée** des petites échelles
- Petites échelles **stationnaires**
- Forçages : Surface

- Contribution **importante** des petites échelles
- Petites échelles **transitoires**
- Forçages : Systèmes synoptiques

Petites échelles reliées aux **extrêmes climatiques**  
 → Nécessité de bien les résoudre

# 1. Hiver présent – Interactions d'échelles

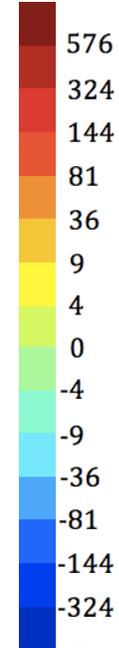
Variance intrasaisonnière

$$\sigma_c^2(\nabla \cdot \bar{Q}) = \sigma_c^2(\nabla \cdot \bar{Q}_R) + \sigma_c^2(\nabla \cdot \bar{Q}_U) + \text{cov}(\nabla \cdot \bar{Q}_R, \nabla \cdot \bar{Q}_U)$$

Champ total

Interactions  
d'échelles

mm<sup>2</sup>/j<sup>2</sup>



$\sigma_{cis}^2(\nabla \cdot \bar{Q})$

Partie résolue  
par MCG3

$\sigma_{cis}^2(\nabla \cdot \bar{Q}_R)$

$$\nabla \cdot (\bar{V}_0 q_0) \quad \nabla \cdot (\bar{V}_0 q_L) \quad \nabla \cdot (\bar{V}_0 q_S)$$

$$\nabla \cdot (\bar{V}_L q_0) \quad \nabla \cdot (\bar{V}_L q_L) \quad \nabla \cdot (\bar{V}_L q_S)$$

$$\nabla \cdot (\bar{V}_S q_0) \quad \nabla \cdot (\bar{V}_S q_L) \quad \nabla \cdot (\bar{V}_S q_S)$$

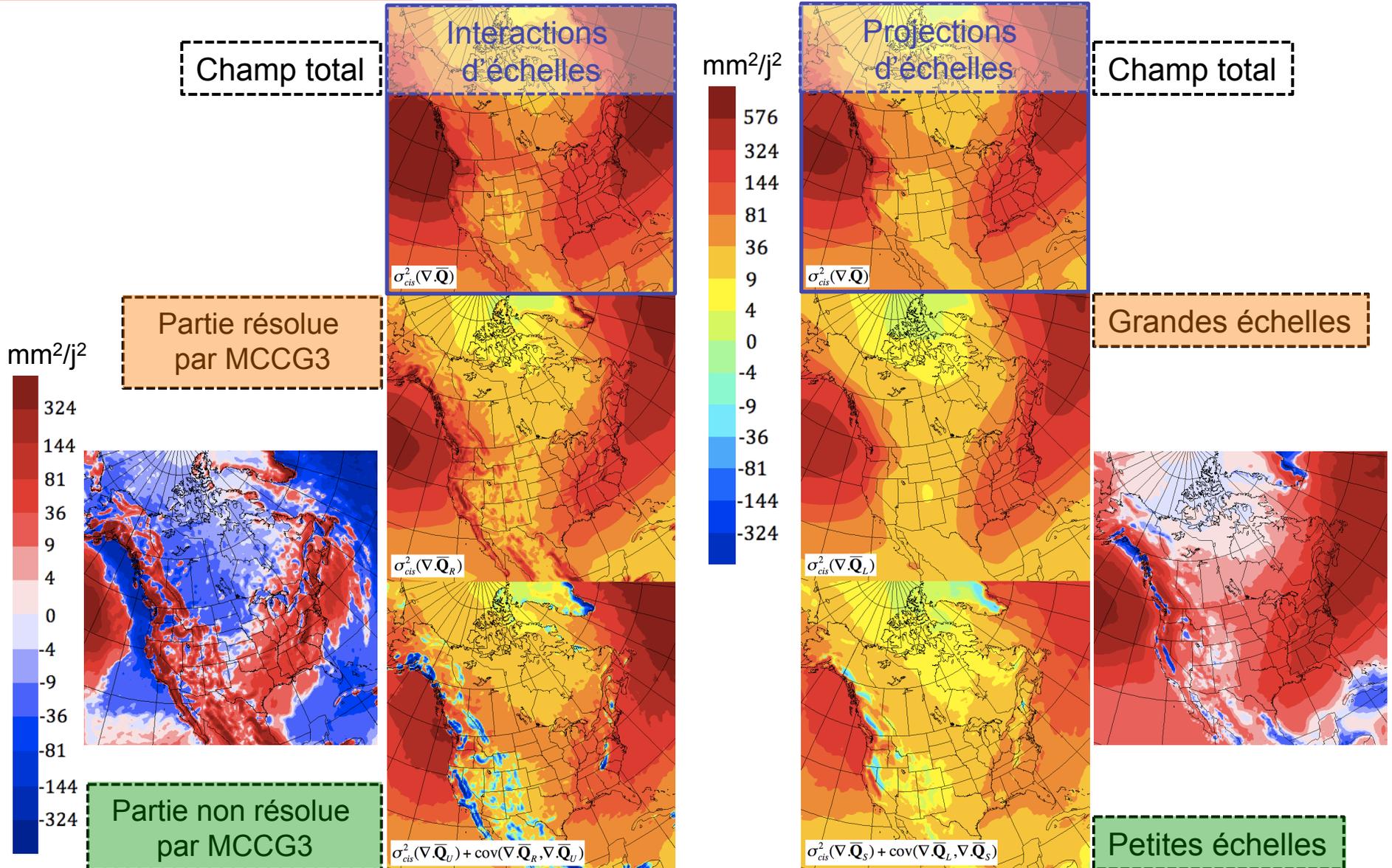
Partie non résolue  
par MCG3

$\sigma_{cis}^2(\nabla \cdot \bar{Q}_U) + \text{cov}(\nabla \cdot \bar{Q}_R, \nabla \cdot \bar{Q}_U)$

# 1. Hiver présent – Interactions d'échelles

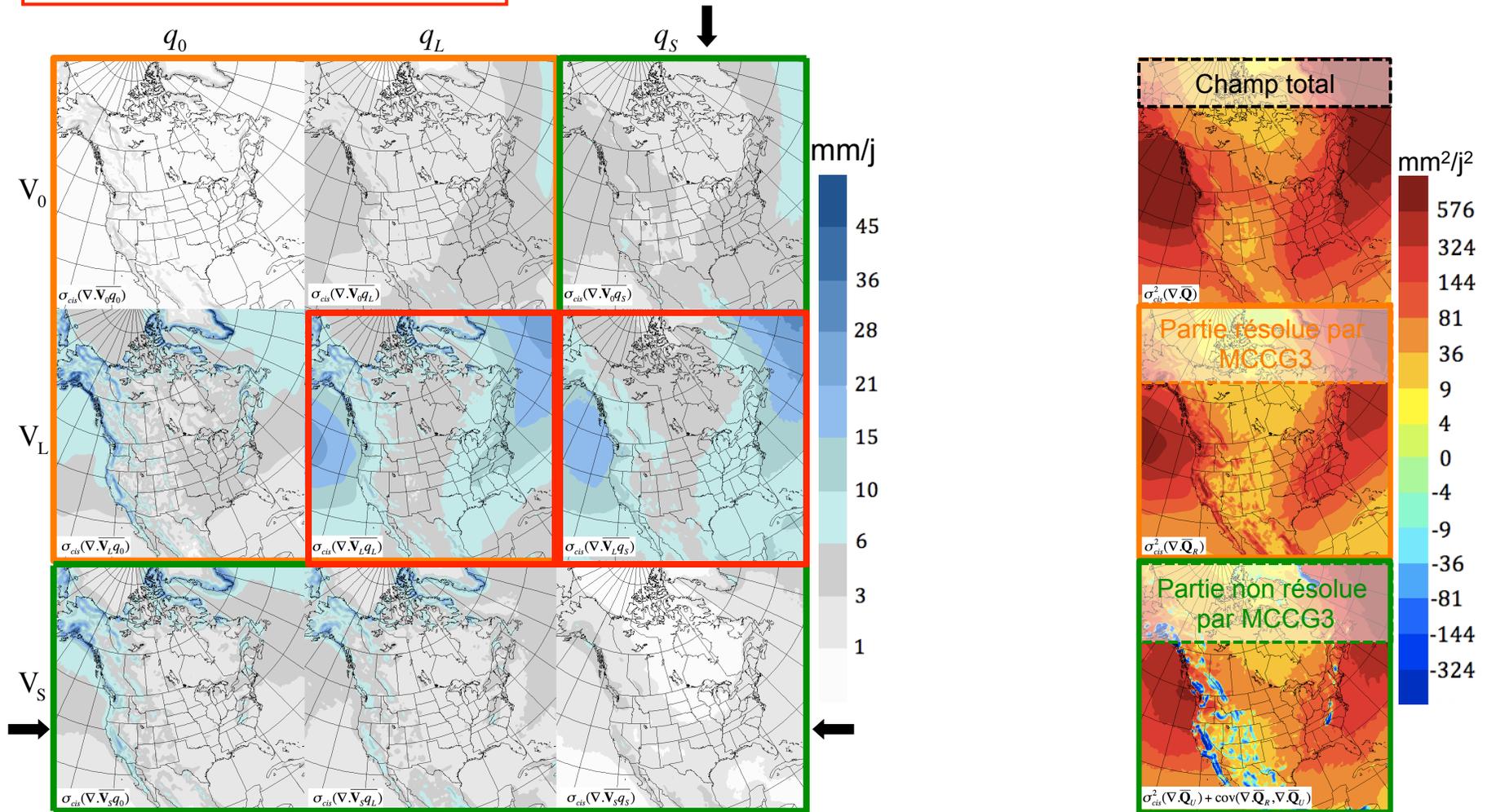
Variance intrasaisonnière

$$\sigma_c^2(\nabla \cdot \bar{Q}) = \sigma_c^2(\nabla \cdot \bar{Q}_R) + \sigma_c^2(\nabla \cdot \bar{Q}_U) + \text{cov}(\nabla \cdot \bar{Q}_R, \nabla \cdot \bar{Q}_U)$$



# 1. Hiver présent – Interactions d'échelles

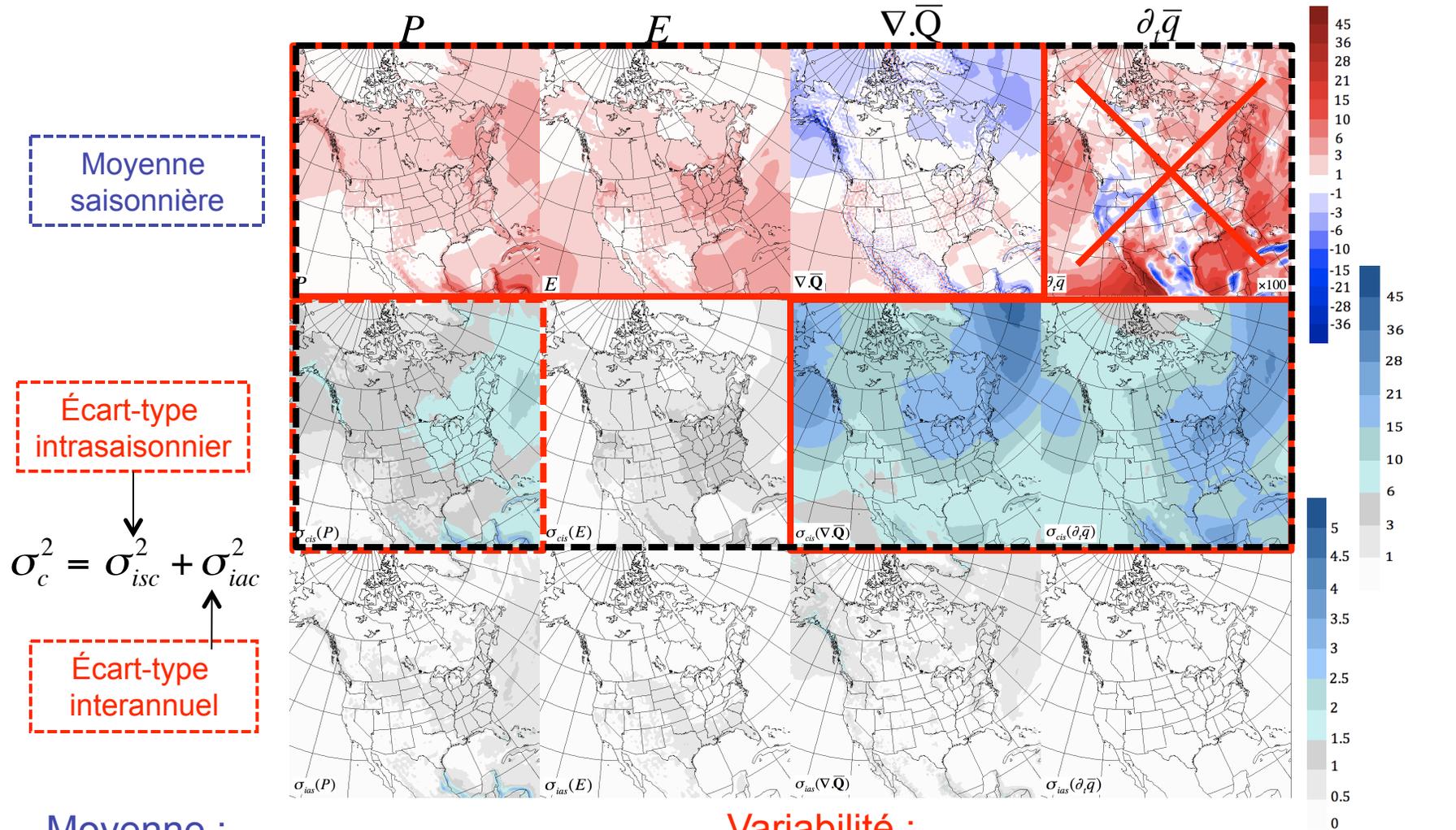
Écart-type intrasaisonnier



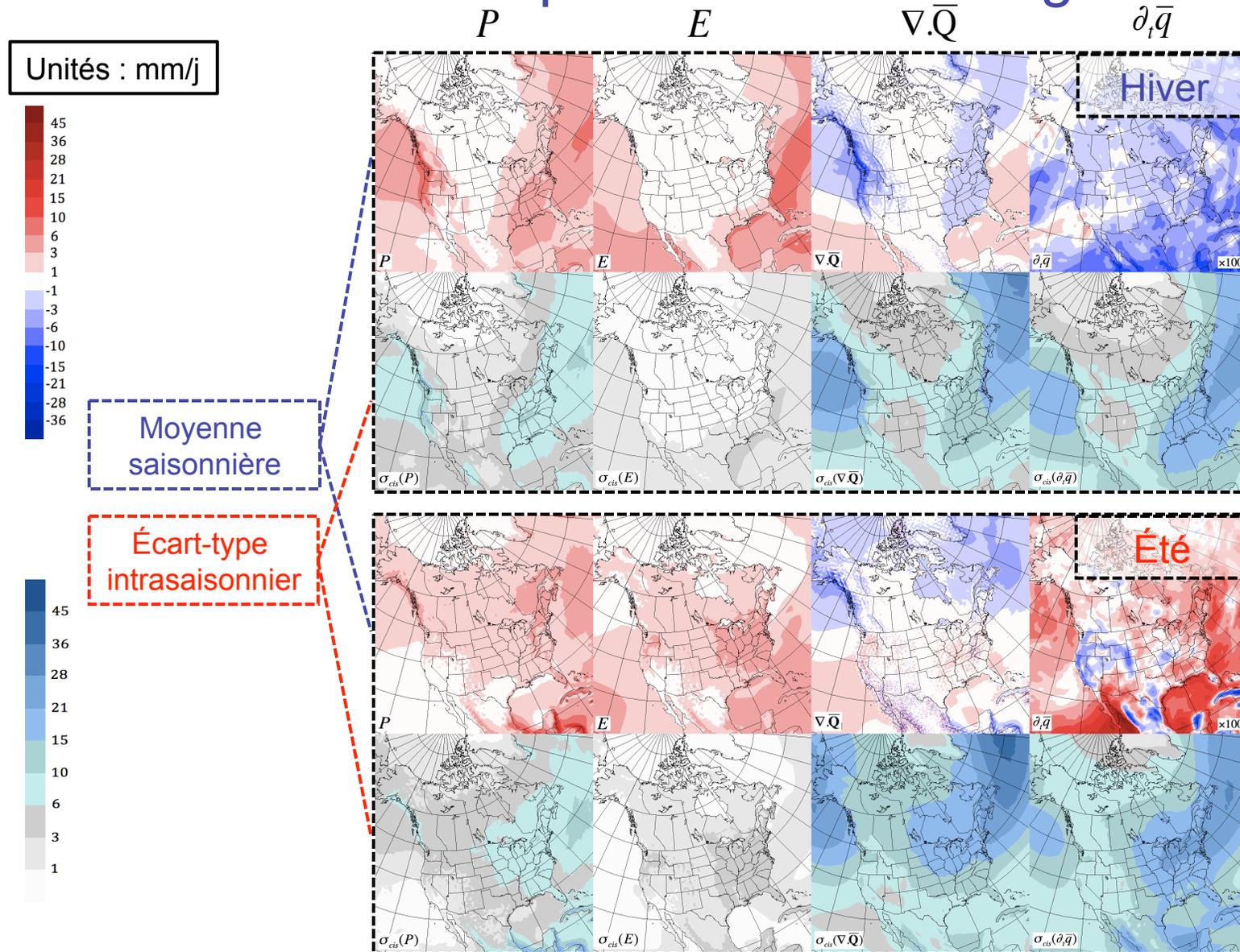
- 2 termes dominants
- Petite échelle de **vent** → + variabilité sur **relief**
- Petite échelle d'**humidité** → + variabilité sur **océans**

## 2. Été présent - Climatologie

Unités : mm/j



## 2. Été présent - Climatologie



En été :

- Systèmes synoptiques plus au nord
- Convection plus forte → Continent et Caraïbes

## 2. Été présent – Contribution des échelles

Les petites échelles sont-elles plus présentes en été ?

## 2. Été présent – Contribution des échelles

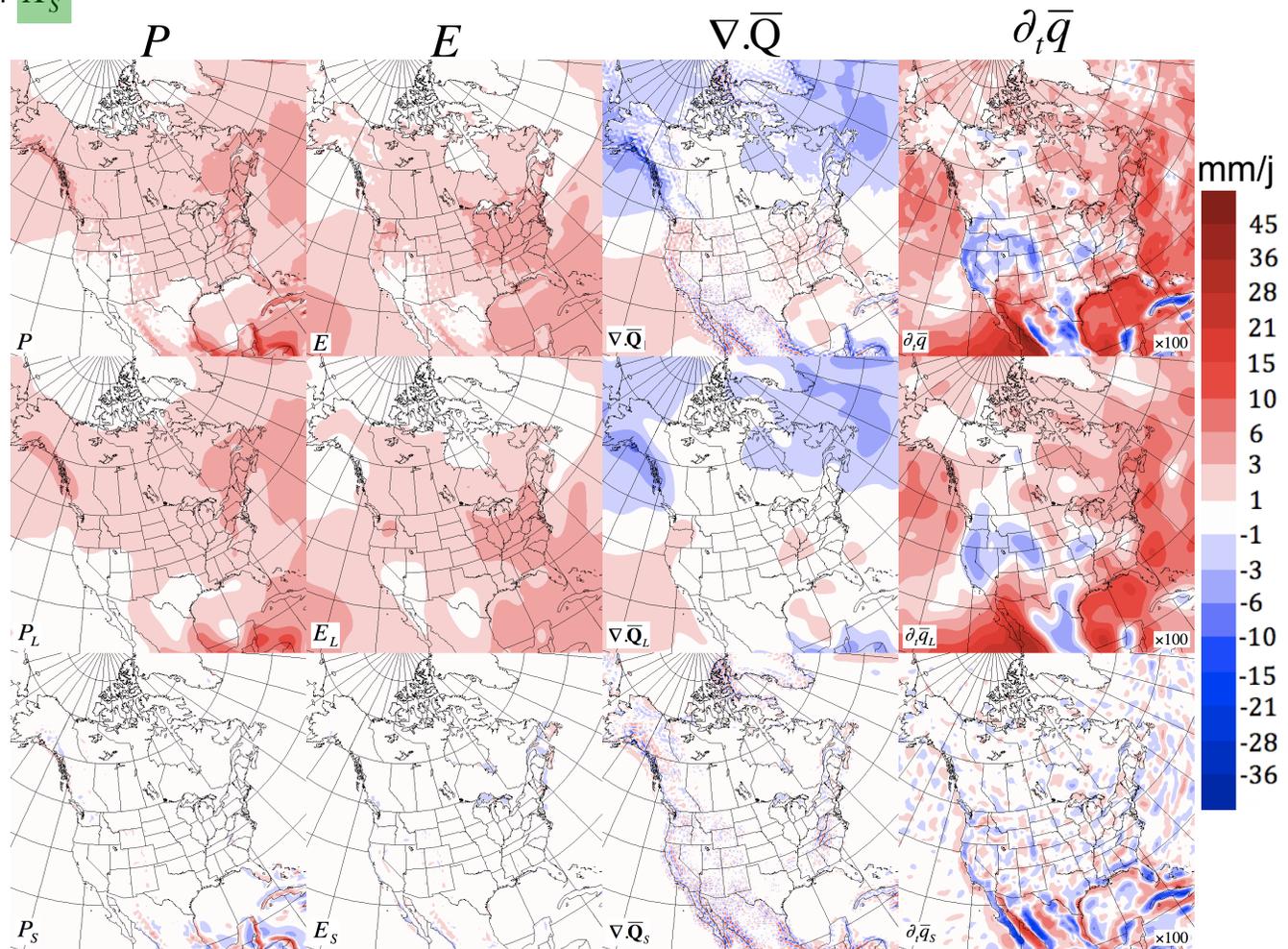
Moyenne

$$X = X_L + X_S$$

Champ total

Grandes échelles

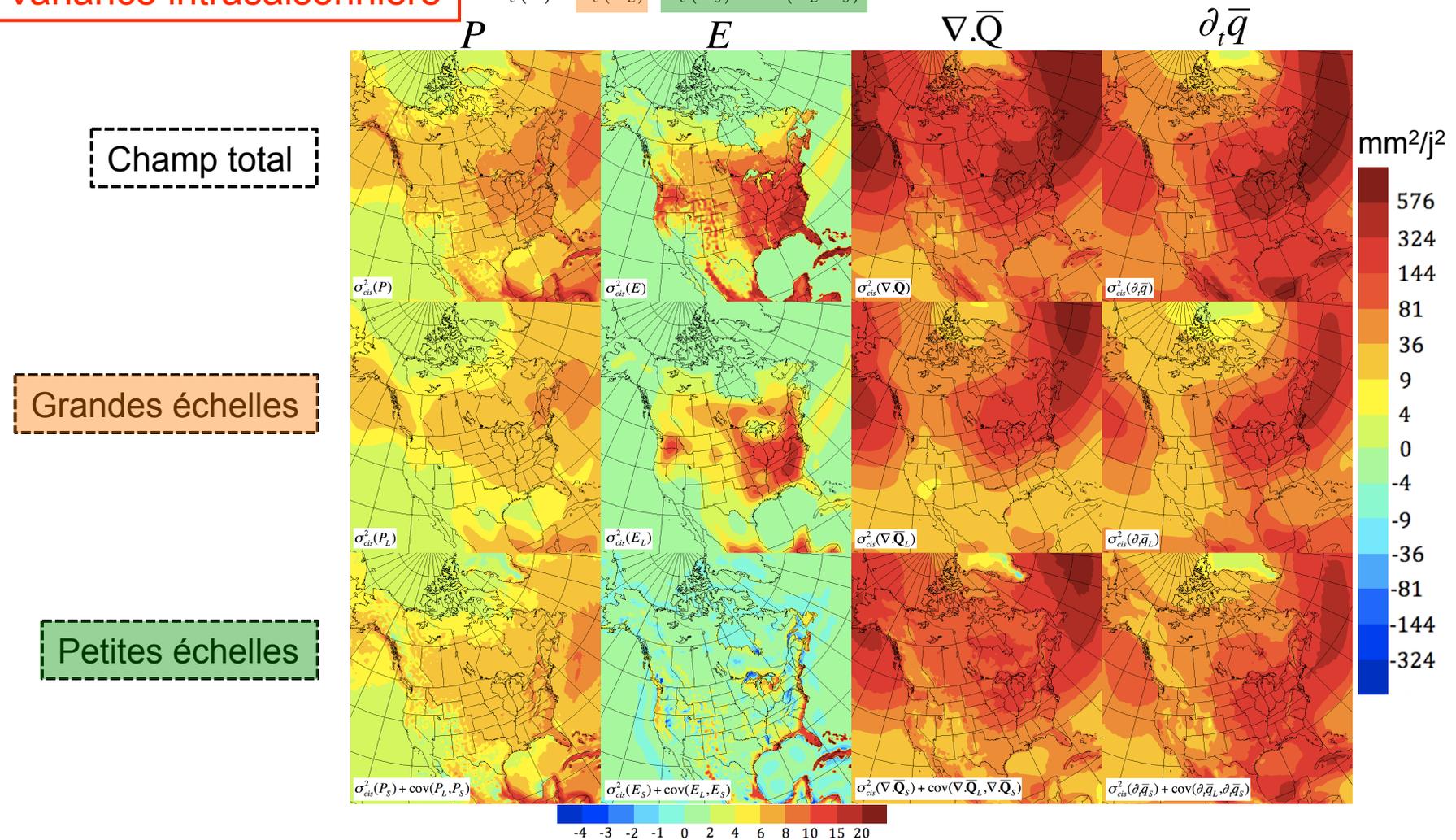
Petites échelles



## 2. Été présent – Contribution des échelles

Variance intrasaisonnière

$$\sigma_c^2(X) = \sigma_c^2(X_L) + \sigma_c^2(X_S) + \text{cov}(X_L, X_S)$$



- Petites échelles **dominantes** sur le continent, l'Atlantique et les Caraïbes ← Convection
- Grandes échelles toujours dominantes dans le **rail des dépressions**
- Petites échelles **transitoires** forcées par systèmes synoptiques + **convection** en été

## 2. Été présent – Contribution des échelles

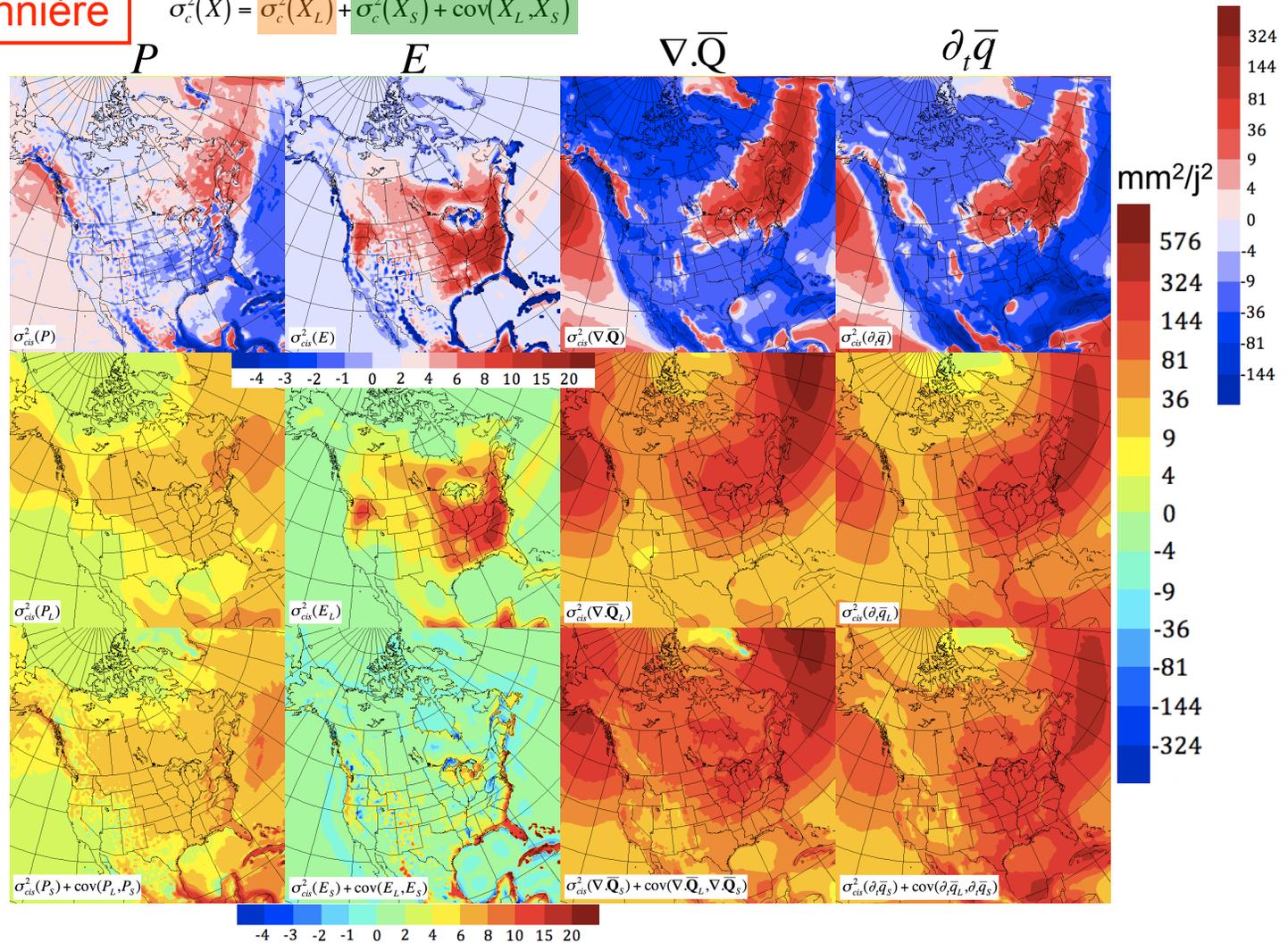
Variance intrasaisonnière

$$\sigma_c^2(X) = \sigma_c^2(X_L) + \sigma_c^2(X_S) + \text{cov}(X_L, X_S)$$

Grandes – petites échelles

Grandes échelles

Petites échelles

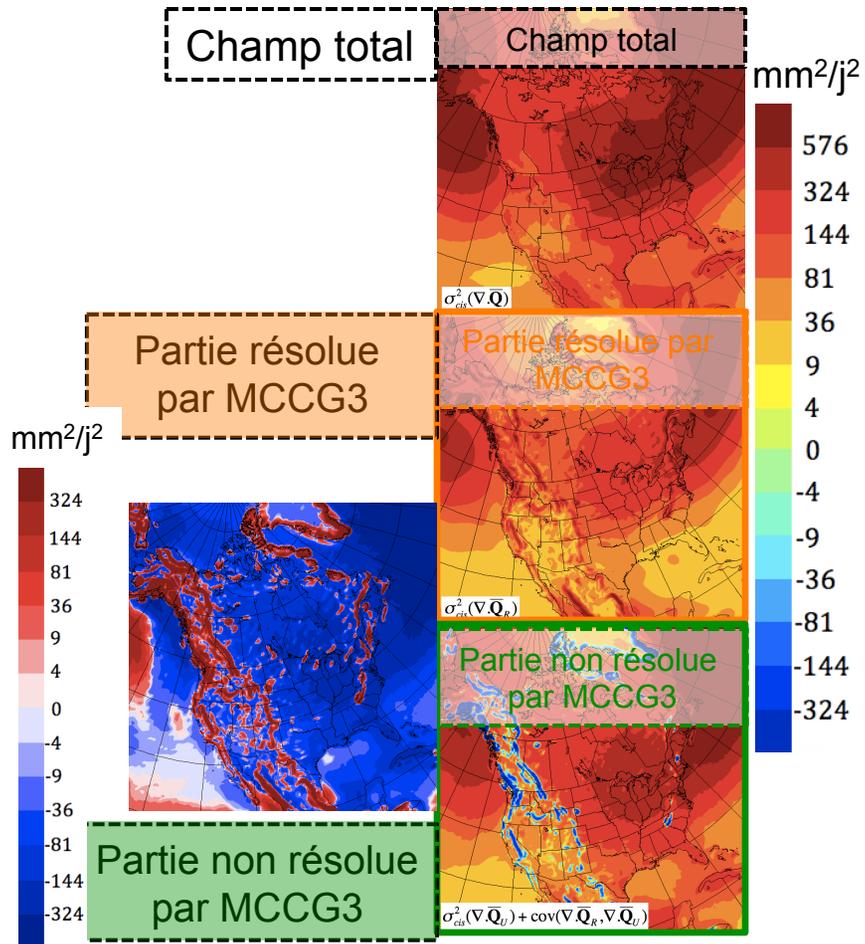


- Petites échelles **dominantes** sur le continent, l'Atlantique et les Caraïbes ← Convection
- Grandes échelles toujours dominantes dans le **rail des dépressions**
- Petites échelles **transitoires** forcées par systèmes synoptiques + **convection** en été

## 2. Été présent – Interactions d'échelles

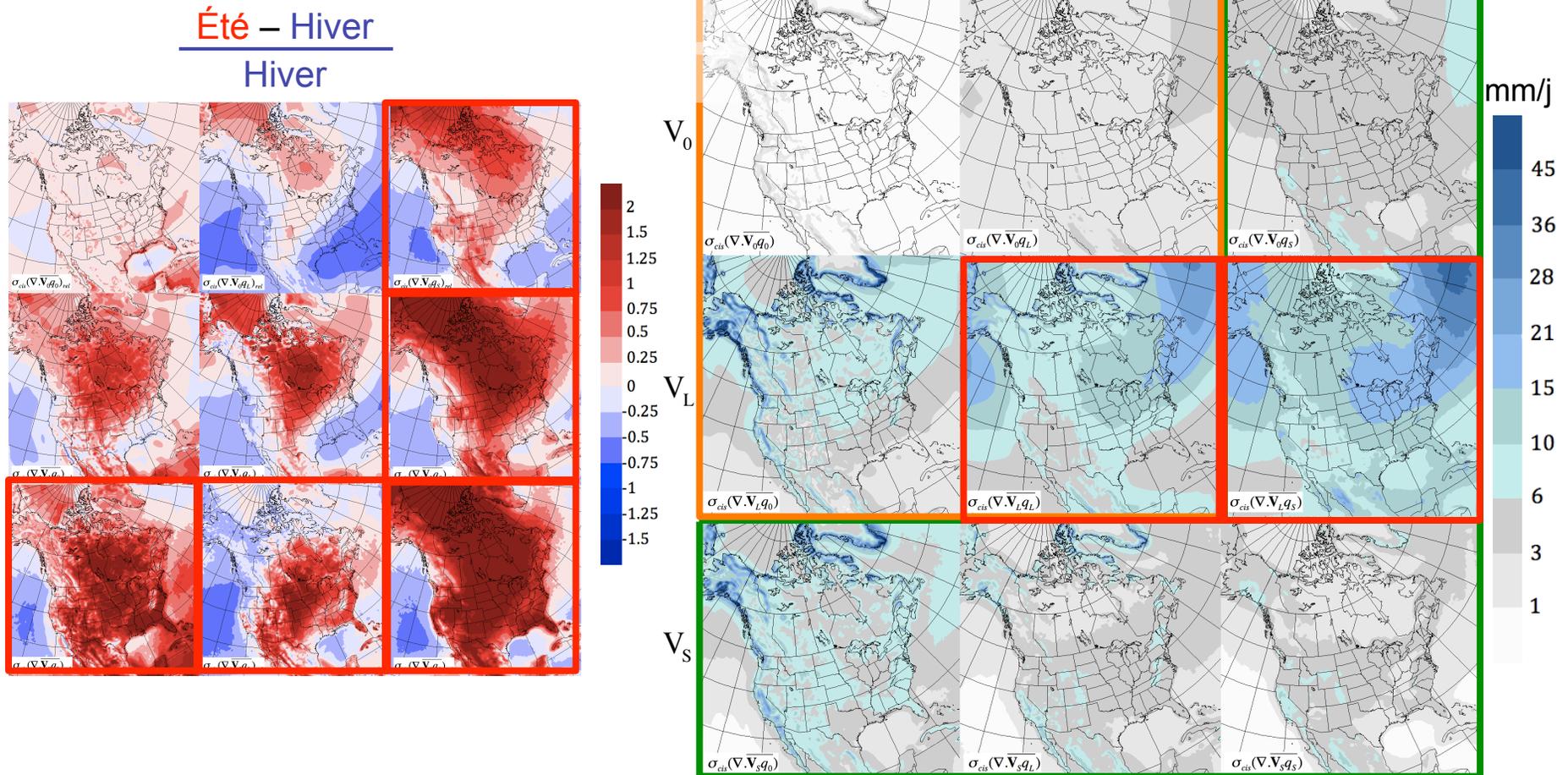
Variance intrasaisonnière

$$\sigma_c^2(\nabla \cdot \bar{Q}) = \sigma_c^2(\nabla \cdot \bar{Q}_R) + \sigma_c^2(\nabla \cdot \bar{Q}_U) + \text{cov}(\nabla \cdot \bar{Q}_R, \nabla \cdot \bar{Q}_U)$$



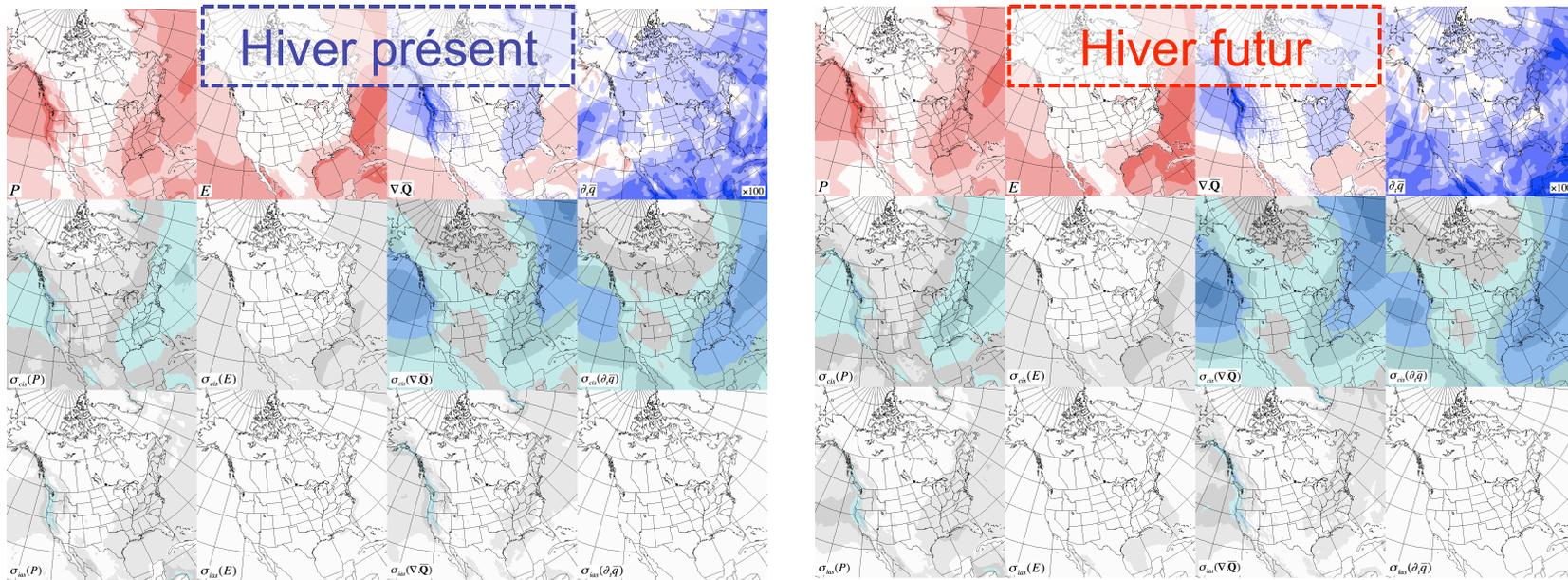
## 2. Été présent – Interactions d'échelles

Écart-type intrasaisonnier

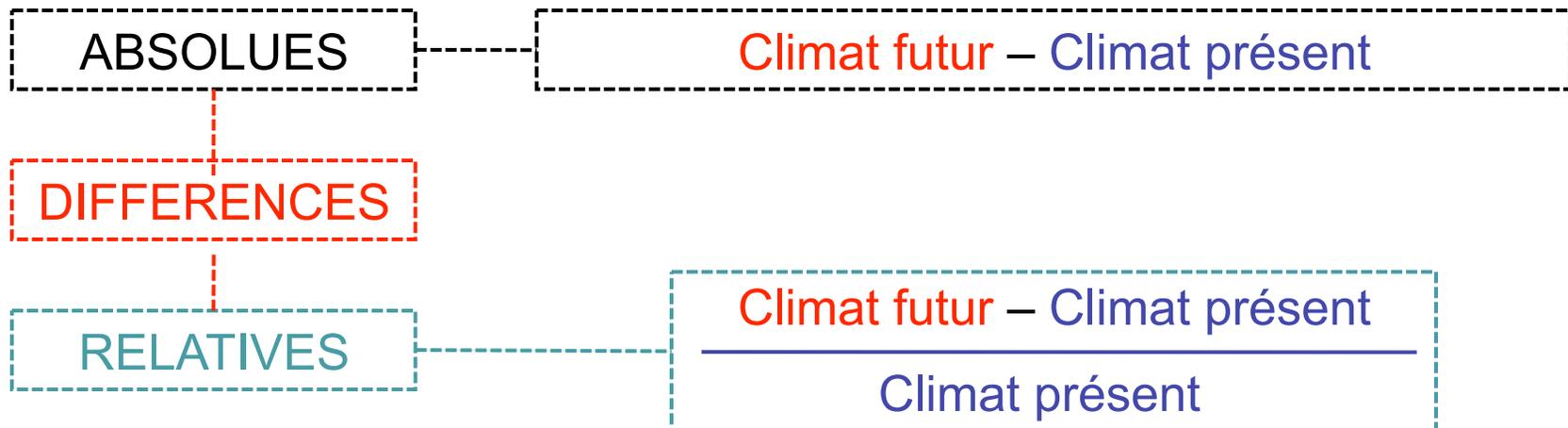


- Globalement + de variabilité pour à peu près tous les termes
- Augmentation relative de la variabilité supérieure pour les interactions impliquant des petites échelles

# Projections climatiques

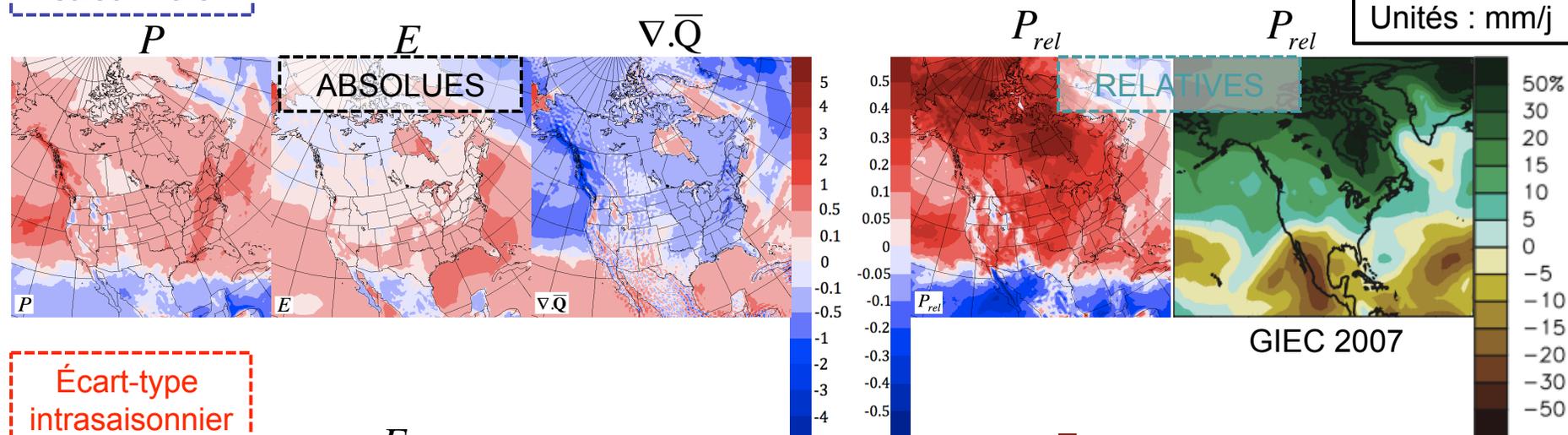


Patrons très similaires !

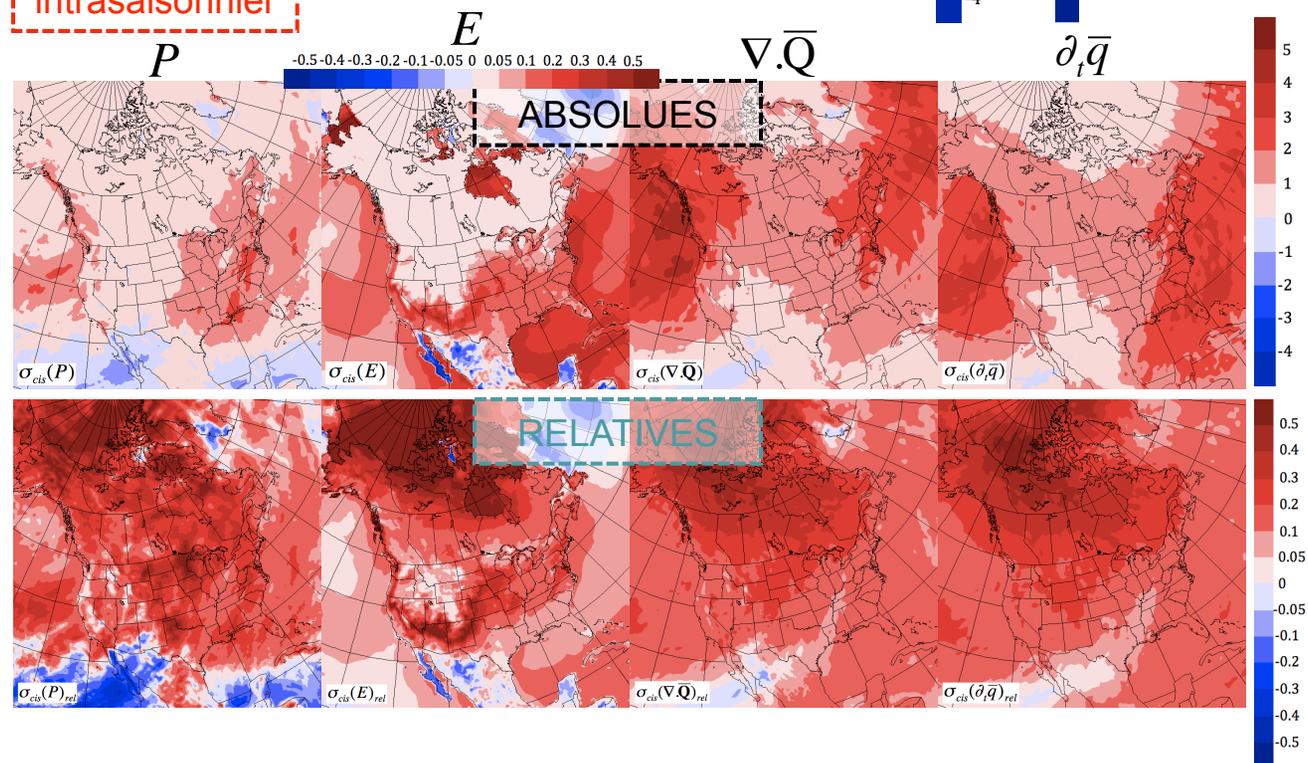


### 3. Hiver futur - Climatologie

Moyenne  
saisonnière



Écart-type  
intrasaisonnier

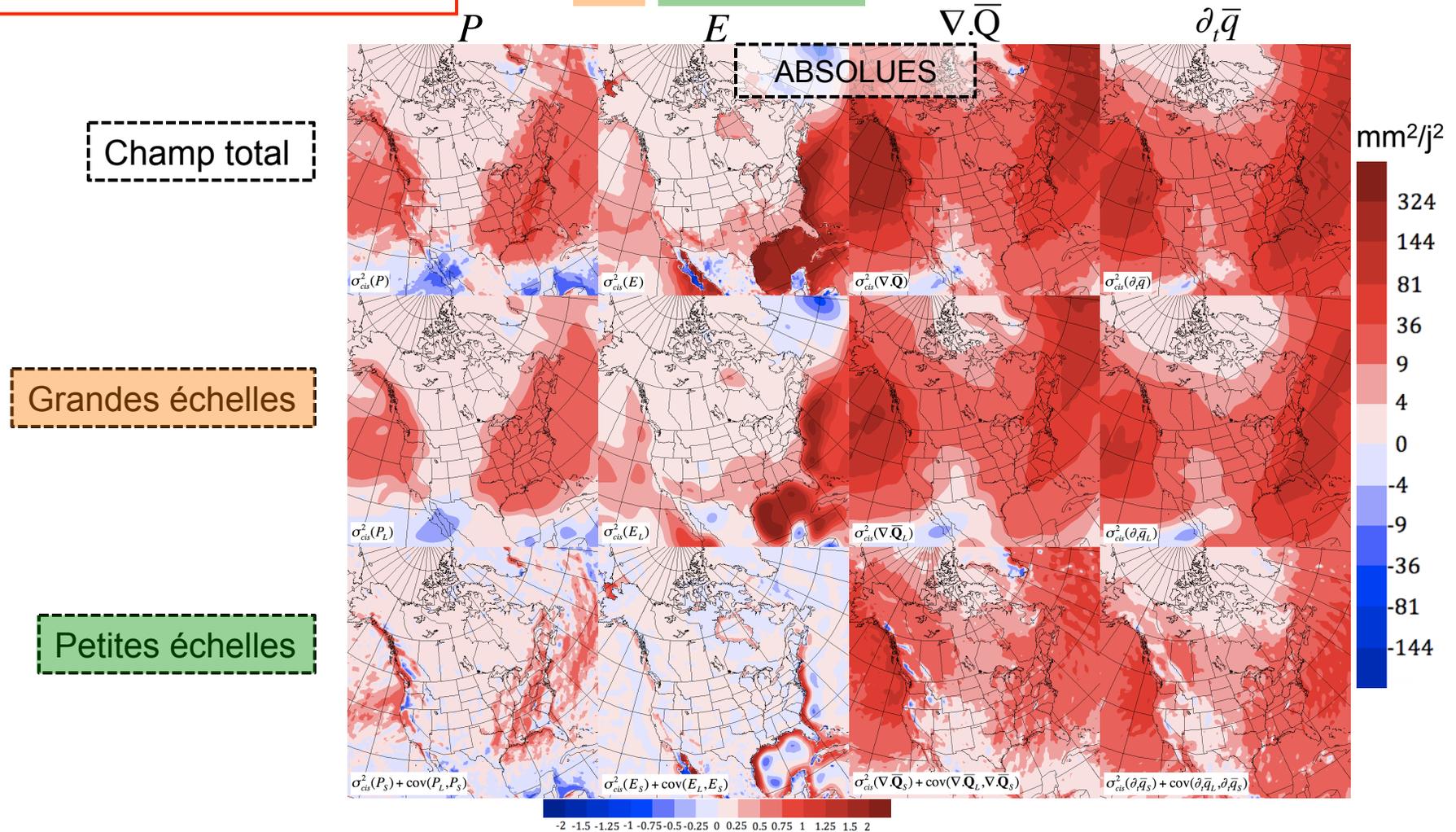


- Intensification générale du cycle hydrologique
- En accord avec les patrons et amplitudes du climat présent
- Comparable en termes relatifs pour la moyenne et la variabilité

### 3. Hiver futur – Contribution des échelles

Variance intrasaisonnière

$$\sigma_c^2(X) = \sigma_c^2(X_L) + \sigma_c^2(X_S) + \text{cov}(X_L, X_S)$$

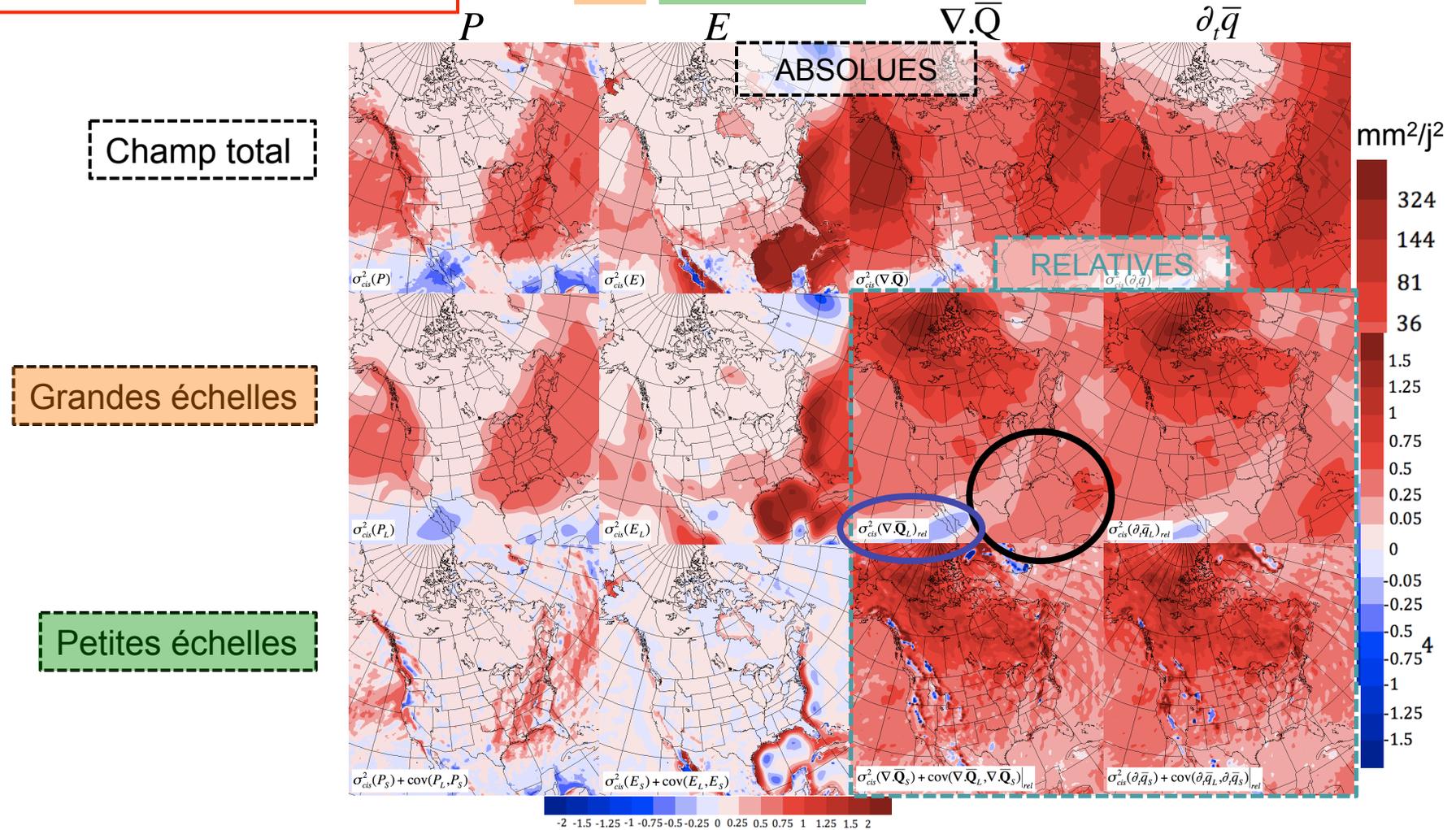


- Contribution des échelles cohérente avec leur contribution à la variabilité dans le climat présent

# 3. Hiver futur – Contribution des échelles

Variance intrasaisonnière

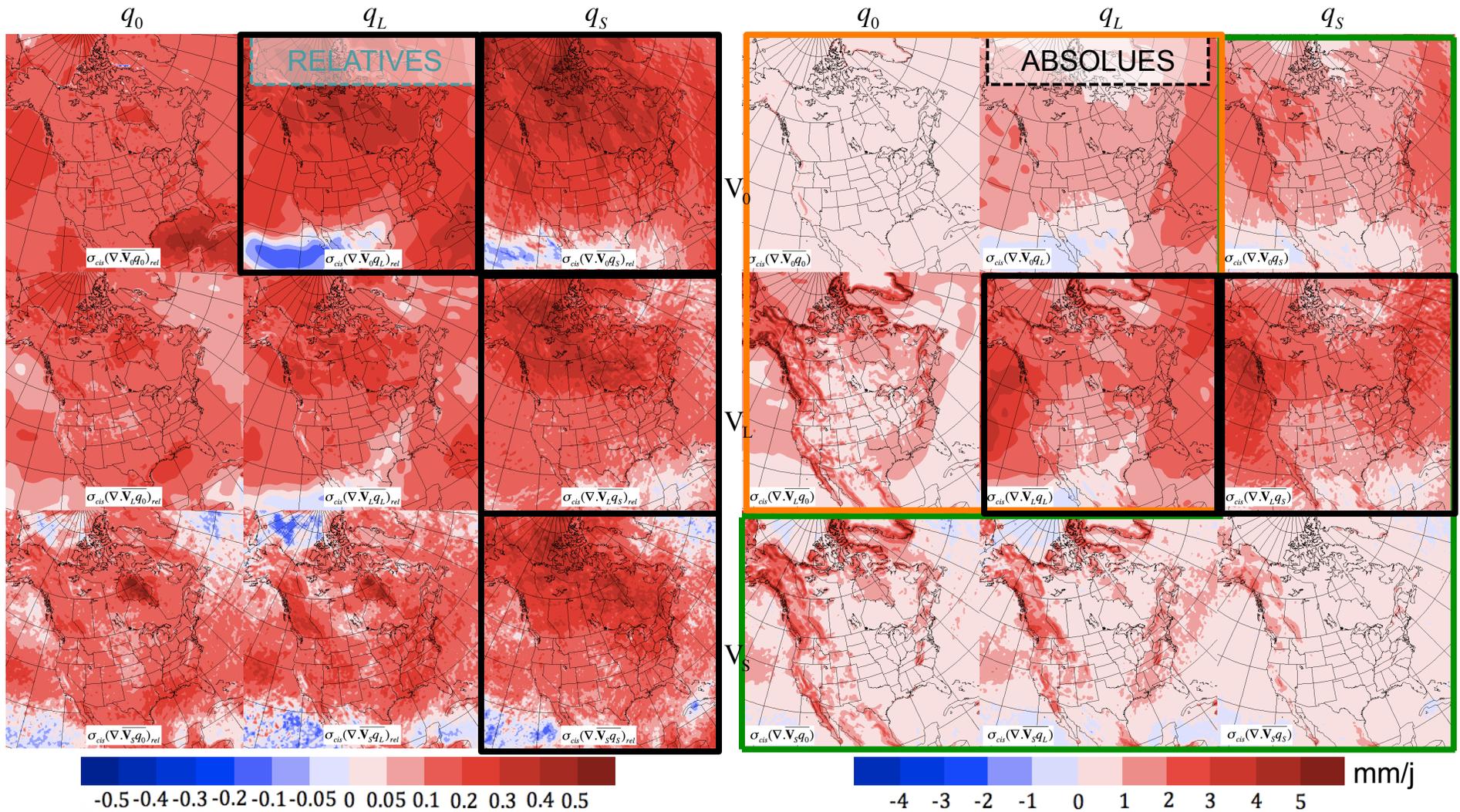
$$\sigma_c^2(X) = \sigma_c^2(X_L) + \sigma_c^2(X_S) + \text{cov}(X_L, X_S)$$



- Contribution des échelles cohérente avec leur contribution à la variabilité dans le climat présent

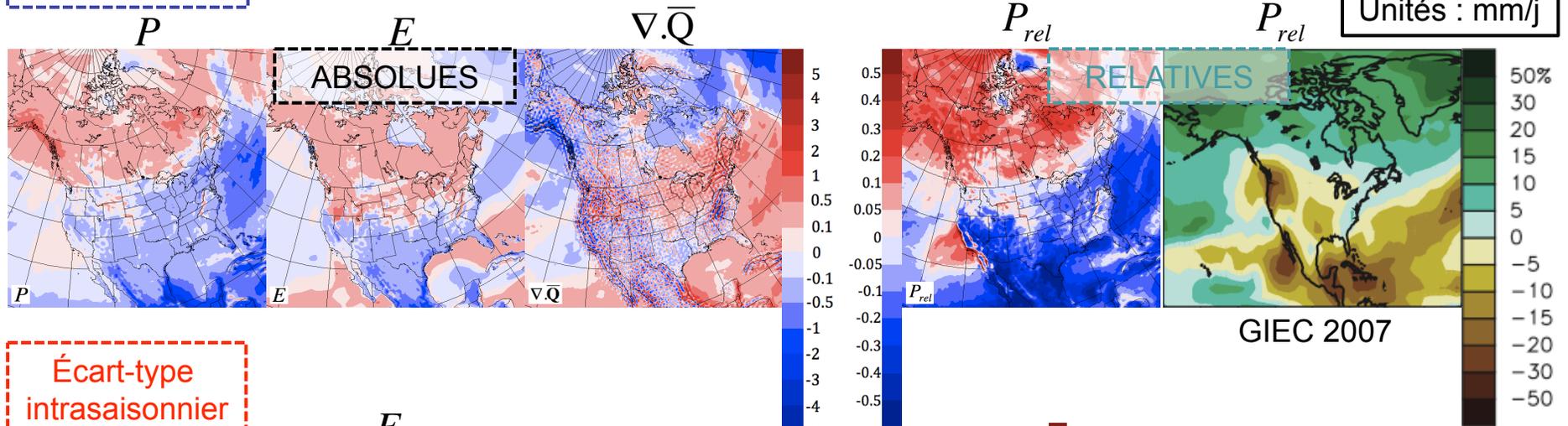
### 3. Hiver futur – Interactions d'échelles

Écart-type intrasaisonnier

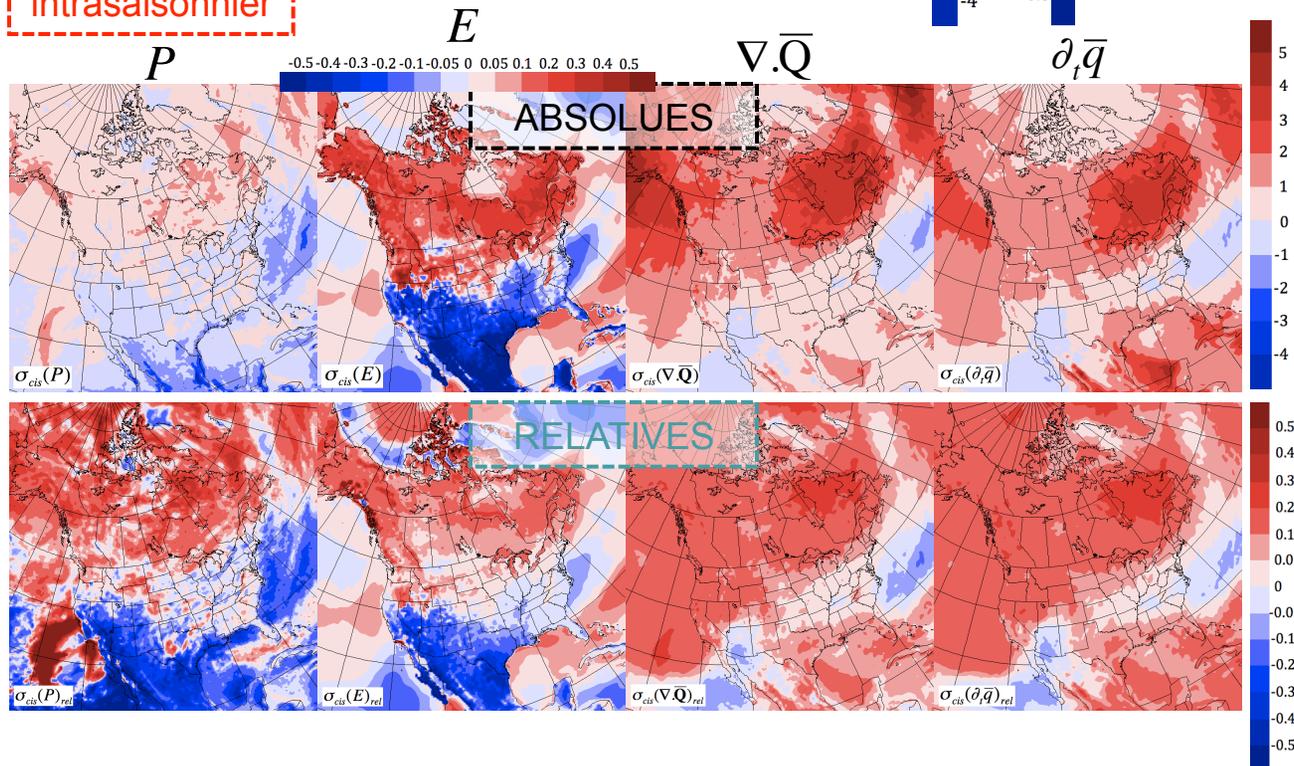


# 4. Été futur - Climatologie

Moyenne saisonnière



Écart-type intrasaisonnier

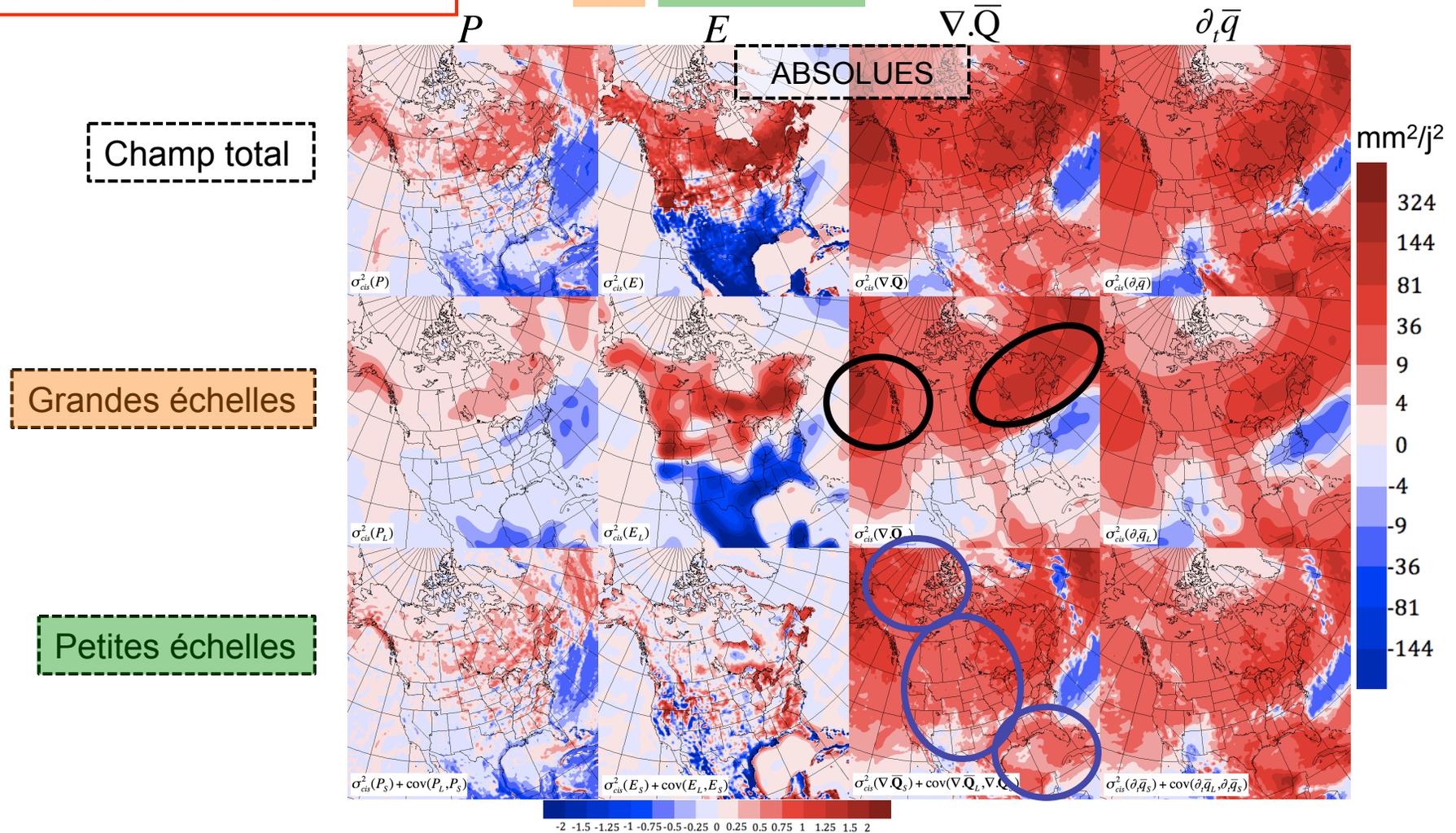


- Intensification générale du cycle hydrologique, mais **plus faible, en termes relatifs, en été qu'en hiver**
- En accord avec les patrons et amplitudes du climat présent
- Comparable en termes relatifs pour la moyenne et la variabilité

# 4. Été futur – Contribution des échelles

Variance intrasaisonnière

$$\sigma_c^2(X) = \sigma_c^2(X_L) + \sigma_c^2(X_S) + \text{cov}(X_L, X_S)$$

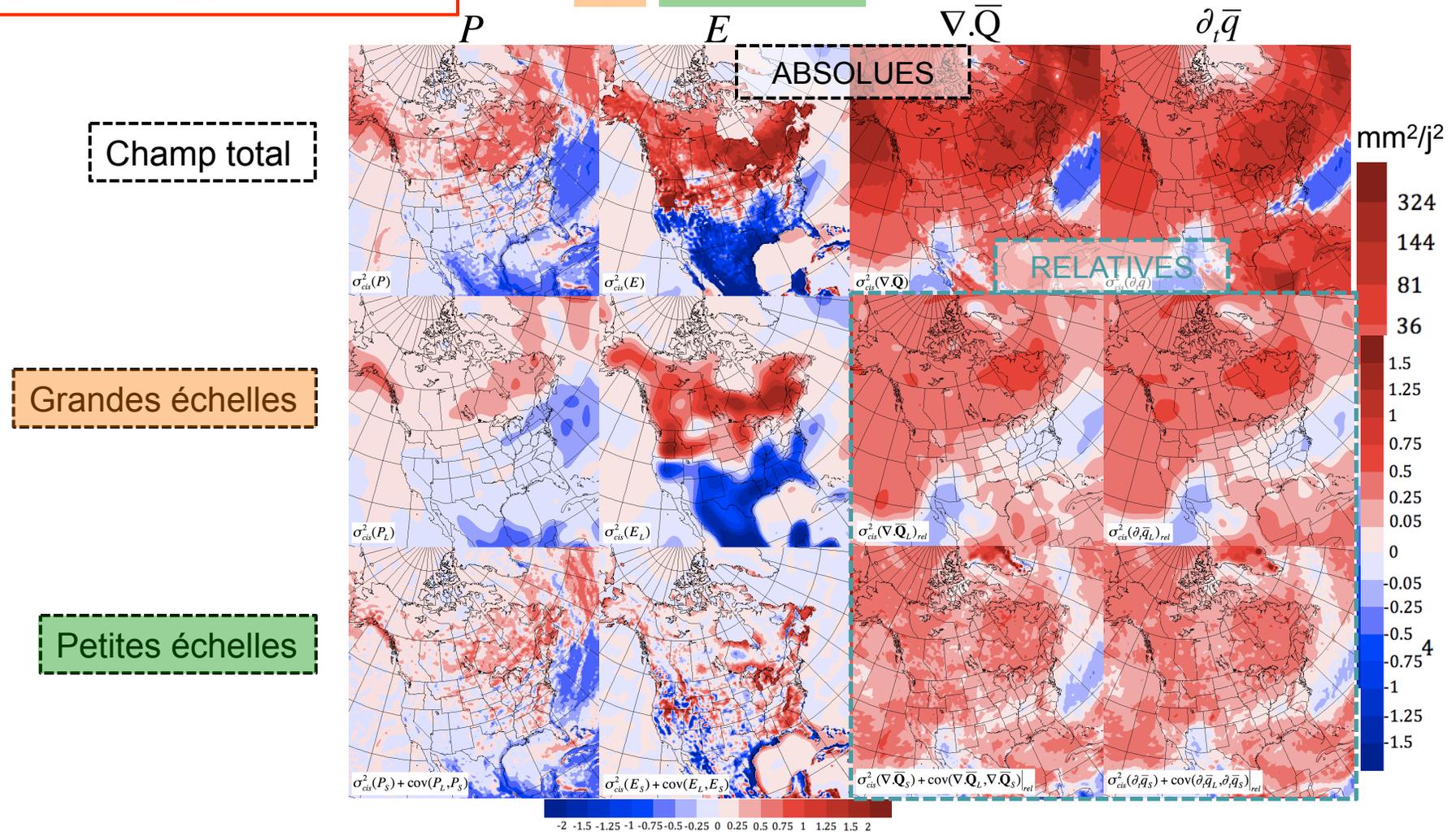


- Contribution des échelles cohérente avec leur contribution à la variabilité dans le climat présent

# 4. Été futur – Contribution des échelles

Variance intrasaisonnière

$$\sigma_c^2(X) = \sigma_c^2(X_L) + \sigma_c^2(X_S) + \text{cov}(X_L, X_S)$$

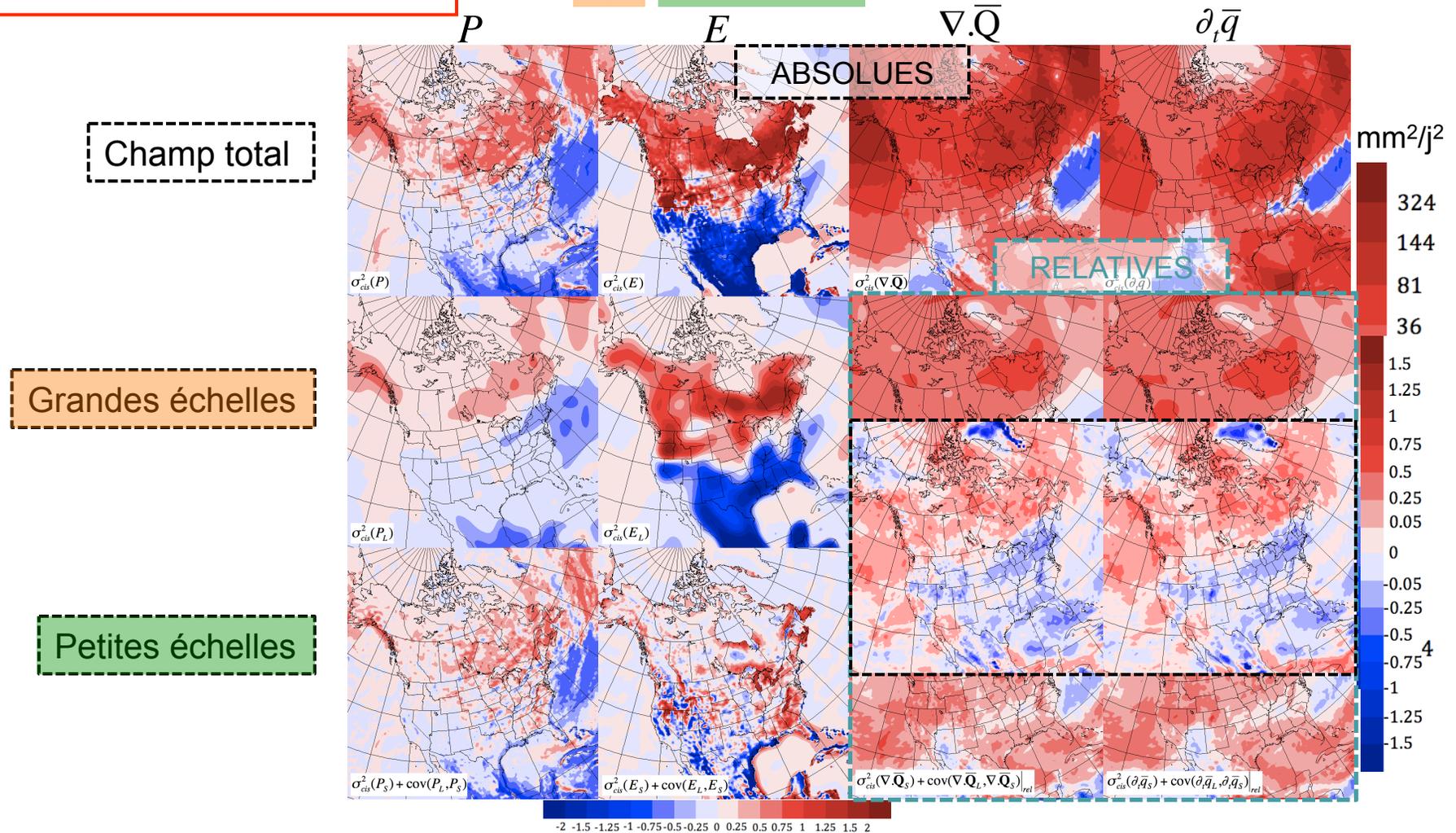


- Contribution des échelles cohérente avec leur contribution à la variabilité dans le climat présent

# 4. Été futur – Contribution des échelles

Variance intrasaisonnière

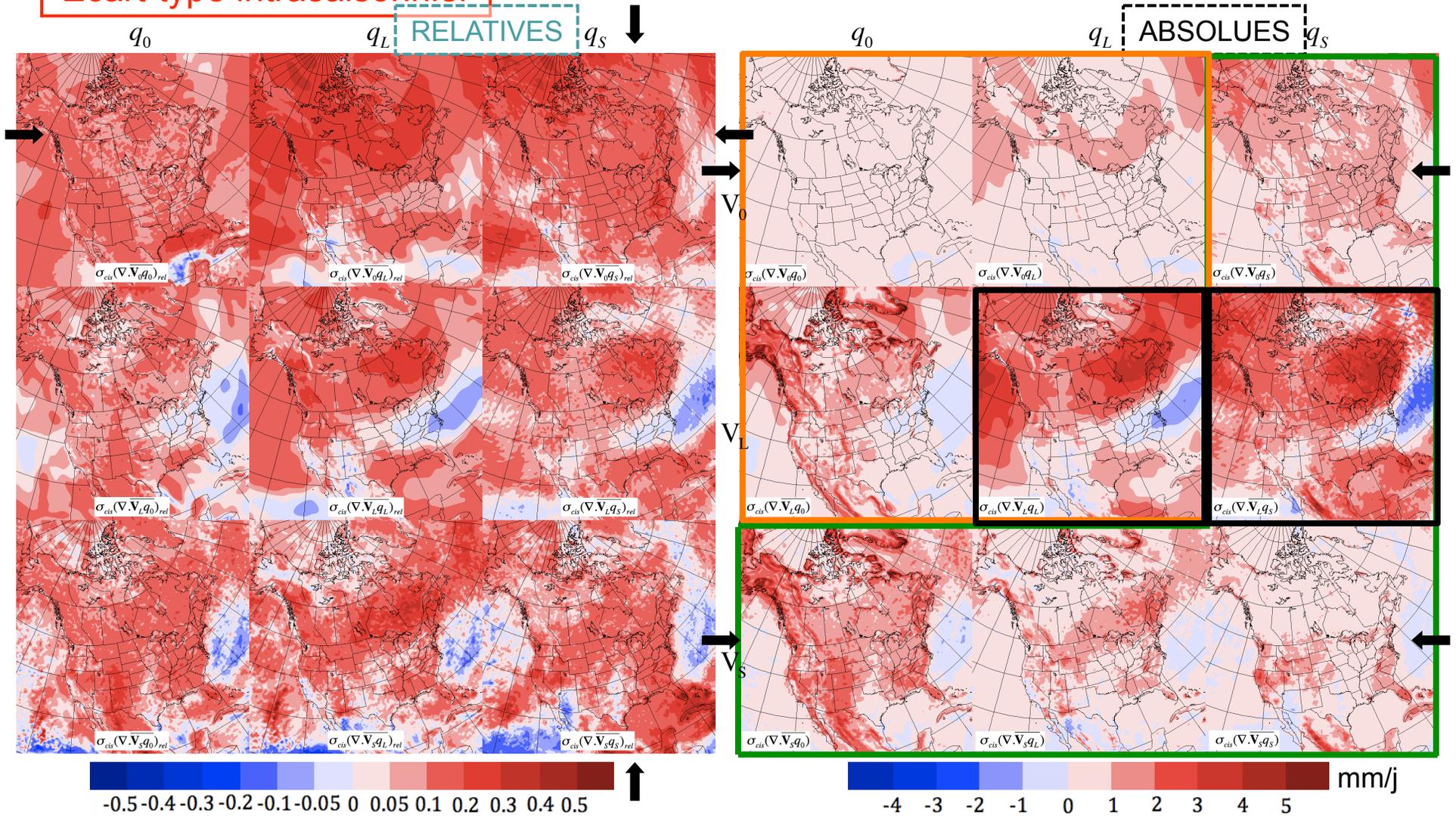
$$\sigma_c^2(X) = \sigma_c^2(X_L) + \sigma_c^2(X_S) + \text{cov}(X_L, X_S)$$



- Contribution des échelles cohérente avec leur contribution à la variabilité dans le climat présent

# 4. Été futur – Interactions d'échelles

Écart-type intrasaisonnier



# En résumé

Quoi ?

Étudier le bilan d'eau atmosphérique dans deux simulations régionales de climat pour les climats présent et futur

Objectifs ?

- Étudier en détail le bilan d'eau atmosphérique actuel
- Estimer son évolution dans un climat futur
- Évaluer la valeur ajoutée du MRCC

## I. Étudier la climatologie du bilan d'eau atmosphérique

### Points communs hiver/été

- Équilibre moyen entre P, E et DivQ
- Variabilité intrasaisonnière dominante
- Variabilité forte par rapport à la moyenne
- Variabilité maximale pour DivQ, drdt, puis P
- Patrons de moyenne et de variabilité très semblables pour P et E

### Différences

- Hiver : régime de précipitations stratiformes dominé par des systèmes synoptiques → P, E et variabilités maximales sur océans
- Été : systèmes synoptiques plus au nord et convection sur le continent → P, E et variabilités étendues sur continent

# En résumé

## II. Évaluer son évolution accompagnant un climat plus chaud

- **Intensification** générale du cycle hydrologique
- **Comparable** en termes relatifs pour les champs de moyenne et de variabilité
- **Plus forte** en termes relatifs en hiver qu'en été
- **Cohérente** avec la climatologie actuelle du bilan d'eau atmosphérique
- Changements parfois petits associés à d'importants changements relatifs

## III. Évaluer la contribution des échelles et leur valeur ajoutée

### Contribution des échelles

- Contribution des petites échelles à la **moyenne très limitée**  
→ **Petites échelles stationnaires**
- Contribution des petites échelles à la **variabilité importante**, voire dominante  
→ **Petites échelles transitoires**
- Contribution des petites échelles à la variabilité **plus forte en été** qu'en hiver
- Contributions à la climatologie présente et à son évolution future **cohérentes**

# En résumé

## III. Évaluer la contribution des échelles et leur valeur ajoutée

### Interactions d'échelles

- Un pas en avant dans l'évaluation de la valeur ajoutée
- 2 termes d'interaction responsables de la majorité de la variabilité de DivQ
- Hypothèses sur origines des différentes échelles

### Valeur ajoutée ?

- **POTENTIELLE !**
- Nécessité de comparer ces petites échelles à des observations pour conclure

### Limitations

- Une décomposition spectrale sur un domaine à aire limitée reste imparfaite
- Diagnostiques : différents traitements temporels → Grandes et petites échelles affectées différemment
- Autres sources d'incertitudes : interpolation verticale, masque de Boer...
- Toujours s'interroger sur la pertinence des résultats de séparation d'échelles obtenus

Merci