

Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)  
Groupe de modélisation et d'assimilation pour la prévision (GMAP)

Responsables de stage :  
Olivier Rivière  
Laurent Descamps  
Carole Labadie

# Impact de la prise en compte des processus physiques dans le calcul des perturbations initiales de la PEARP : application à la prévisibilité des dépressions et des cyclones tropicaux

---

François Jobard  
Pierre Nabat  
Emmanuel Vullierme

Toulouse, le 12 février 2010



## Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement nos trois encadrants, Olivier Rivière, Laurent Descamps et Carole Labadie, de nous avoir accueillis pour ce projet. Les échanges que nous avons pu avoir ont été précieux, et ce fut un réel plaisir de travailler avec eux. Nous tenons à souligner leur disponibilité tout au long de ces cinq semaines.

Nous remercions également toute l'équipe du GMAP de nous avoir reçus dans leurs bureaux, et d'avoir mis à notre disposition le matériel nécessaire.

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>1 Contexte et problématique</b>	<b>5</b>
1.1 Principe de la prévision d'ensemble . . . . .	5
1.2 La PEARP (Prévision d'Ensemble ARPège) . . . . .	5
1.3 Version adaptée de la PEARP utilisée dans cette étude : PENSE . . . . .	6
1.4 La méthode des vecteurs singuliers . . . . .	6
1.5 Objectifs du stage et problématique . . . . .	8
<b>2 Facteurs d'influence</b>	<b>9</b>
2.1 Le temps d'optimisation . . . . .	9
2.2 Le choix de la norme . . . . .	9
2.3 Les paramétrisations physiques du modèle linéaire-tangent pour le calcul des vecteurs singuliers . . . . .	10
2.3.1 La physique de Buizza (1994) . . . . .	10
2.3.2 La paramétrisation de l'assimilation variationnelle 4D-VAR . . . . .	10
<b>3 Déroulement pratique du stage</b>	<b>11</b>
3.1 Protocole expérimental . . . . .	11
3.2 Développement de programmes informatiques . . . . .	11
3.3 Logiciels utilisés . . . . .	12
3.4 Difficultés rencontrées . . . . .	13
<b>4 Etude de la prévision d'ensemble aux moyennes latitudes.</b>	<b>14</b>
4.1 Etat actuel de la PENSE : la physique de Buizza . . . . .	14
4.2 Test de la physique simplifiée du 4D-VAR pour le calcul des vecteurs singuliers (expérience A) . . . . .	18
4.2.1 Mise en place des schémas de turbulence, de diffusion et d'ondes de gravité . . . . .	18
4.2.2 Ciblage vertical et frottement mésosphérique . . . . .	20
4.2.3 Impact des autres schémas utilisés . . . . .	20
4.3 Test des précipitations de grande échelle . . . . .	20
4.3.1 Utilisation de la norme énergie totale sèche (expérience B1) . . . . .	21
4.3.2 Utilisation de la norme énergie totale humide (expérience B2) . . . . .	21
<b>5 Etude dans les tropiques : cas du cyclone Bill</b>	<b>23</b>
5.1 Position du problème . . . . .	23
5.2 Expérience de référence REFT : état actuel de notre configuration PENSE dans les tropiques . . . . .	24
5.3 Le problème des vecteurs singuliers de la haute troposphère . . . . .	28
5.3.1 Expérience C1 : influence de la hauteur de la couche limite $h_0$ . . . . .	28
5.3.2 Expérience C2 : le ciblage vertical . . . . .	29
5.4 Influence de la norme . . . . .	31
5.4.1 Norme énergie cinétique : expérience D1 . . . . .	31
5.4.2 Norme enstrophie : expérience D2 . . . . .	33
5.5 Ciblage sur un bassin : expérience E . . . . .	36
5.6 Influence de l'ajout des précipitations de grande échelle . . . . .	38
5.6.1 Expérience F1 avec utilisation de la norme énergie cinétique . . . . .	39
5.6.2 Expérience F2 avec utilisation de la norme énergie totale humide . . . . .	39

<b>6 Etude des trajectoires</b>	<b>44</b>
6.1 Trajectoire du cyclone Bill . . . . .	44
6.1.1 Trajectoires obtenues avec l'expérience de référence (REFT) . . . . .	44
6.1.2 Trajectoires obtenues avec la norme enstrophie (D2) . . . . .	45
6.1.3 Trajectoires obtenues avec la norme énergie cinétique et le ciblage sur le bassin (F1) . . . . .	46
6.2 Cas de la tempête Klaus . . . . .	46
6.2.1 Expérience de référence REF . . . . .	47
6.2.2 Expérience B1 avec le schéma de précipitations de grande échelle . . . . .	48
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>49</b>
<b>Références</b>	<b>50</b>
<b>Glossaire</b>	<b>51</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>52</b>
<b>Tables des figures</b>	<b>54</b>
<b>Annexes</b>	<b>i</b>
A - Niveaux verticaux du modèle . . . . .	i
B - Bassins cycloniques du monde . . . . .	ii

## Résumé

La prévision d'ensemble vise à apporter une information quantitative quant aux incertitudes associées à la prévision déterministe. Dans la mise en oeuvre d'un tel système de prévision, la création des perturbations initiales est une étape essentielle. Dans plusieurs centres (CEPMMT, Météo-France, ...), celles-ci sont déterminées en partie par la méthode des vecteurs singuliers, c'est-à-dire des perturbations qui croissent le plus vite au début de la période de prévision sous l'hypothèse d'évolution linéaire. La mesure de cette croissance nécessite l'utilisation d'une norme. Cette méthode de calcul de perturbations initiales requiert une version linéarisée approchée du modèle de prévision, où certains processus physiques non-linéaires sont représentés de façon simplifiée.

Actuellement, l'algorithme d'assimilation variationnelle 4D-VAR incorpore la représentation de différents processus physiques (turbulence, processus humides, ...). La première partie de cette étude évalue l'impact aux moyennes latitudes de la physique simplifiée du 4D-VAR par rapport à celle utilisée aujourd'hui dans le calcul des vecteurs singuliers dans la PEARP (physique simplifiée dite de Buizza). On montre que, l'emploi de cette dernière n'apporte pas de nouveaux vecteurs singuliers réalistes, et au contraire provoque la formation de vecteurs non physiques dans la région de l'Himalaya.

La prise en compte des précipitations de grande échelle dans le calcul des perturbations initiales est également testé dans ce travail : on montre que la dispersion des différents membres est ainsi augmentée, et pourrait ainsi améliorer la prévision d'ensemble.

Notre étude se focalise ensuite sur l'amélioration du système de prévision d'ensemble aux tropiques, en considérant le cas du cyclone Bill (août 2009). L'état actuel de la PEARP apporte très peu d'information au prévisionniste sur la trajectoire des cyclones, puisqu'il s'agit de vecteurs singuliers sans réalisme physique (situés dans la haute troposphère). Deux solutions sont envisagées pour résoudre ce problème : augmenter la hauteur de la couche limite ou restreindre le calcul des vecteurs singuliers aux niveaux inférieurs du modèle. La première modification ne permet pas de se débarrasser des modes instables non physiques de la haute troposphère, alors que la deuxième permet d'obtenir des perturbations initiales plus réalistes. Toutefois, ces nouveaux vecteurs ne détectent toujours pas le cyclone Bill.

Alors que jusqu'ici la norme utilisée était l'énergie totale, deux autres normes peuvent être envisagées : l'énergie cinétique et l'enstrophie. Des vecteurs singuliers se positionnent alors sur le cyclone. Avec l'énergie cinétique, le quatrième vecteur singulier centré sur Bill permet d'accroître fortement la dispersion dans cette région. La norme enstrophie donne également de la dispersion dans cette zone, mais son utilisation pratique présente quelques difficultés, de par son ordre de grandeur différent. L'utilisation de ces deux normes semble donc intéressante. Pour la suite, on conserve la norme énergie cinétique.

Pour pouvoir obtenir plus de vecteurs singuliers dans la zone du cyclone, des tests avec un ciblage sur le bassin Atlantique est réalisé. Les deux premiers vecteurs singuliers, sont alors situés autour du cyclone Bill. La dispersion qui en résulte est très importante, voire trop importante. Comme dans les moyennes latitudes, l'impact des précipitations de grande échelle est testé. Les vecteurs singuliers obtenus sont similaires à ceux calculés sans les précipitations. L'utilisation d'une norme humide n'apporte aucun changement significatif.

Pour conclure sur l'amélioration du système de prévision d'ensemble, l'étude des trajectoires obtenues dans le cas des normes énergie cinétique et enstrophie montre l'incertitude sur la prévision du cyclone Bill. Toutefois, cette dispersion paraît trop importante pour l'énergie cinétique, mais plus réaliste en ce qui concerne l'enstrophie.

# Introduction

Le but de la prévision numérique météorologique est de prévoir le temps avec les lois de la physique, des techniques mathématiques et des ordinateurs. Pour ceci, la prévision numérique météorologique se base sur un modèle déterministe : le temps qu'il fait à un instant donné est le produit de l'état de l'atmosphère à l'instant précédent et il sera la base de l'état de l'atmosphère à l'instant suivant. Pour accomplir une prévision numérique déterministe, il faut connaître le temps actuel sur la Terre et disposer d'un modèle permettant d'en prévoir son évolution.

En pratique, ni les observations, ni le modèle ne sont parfaits. Par ailleurs, la dynamique atmosphérique est très sensible, dans certaines conditions, à la moindre fluctuation. Dès le début du XX<sup>ème</sup> siècle, Poincaré (1908) remarquait :

”Pourquoi les météorologistes ont-ils tant de mal à prédire le temps avec quelque certitude ? Pourquoi les chutes de pluie, les tempêtes elles-mêmes nous semblent arriver au hasard...un dixième de degré en plus ou en moins en un point quelconque, le cyclone éclate ici et non pas là...Si on avait connu ce dixième de degré, on aurait pu le savoir d'avance mais les observations n'étaient ni assez serrées, ni assez précises, et c'est pour cela que tout semble dû à l'intervention du hasard...”

Depuis une quinzaine d'années, une nouvelle approche a donc été développée, celle de la prévision d'ensemble. Cette dernière opte généralement pour une résolution moindre afin de pouvoir consacrer les ressources informatiques à faire tourner simultanément de nombreuses prévisions sur la même situation. Dans chaque cas, l'analyse est rendue légèrement différente des autres membres de l'ensemble, en s'appuyant sur les incertitudes de mesure ou d'analyse. Les scénarios plus ou moins divergents des prévisions offertes par les membres de l'ensemble permettent de quantifier l'incertitude entourant la prévision. Le défi dans la conception d'un tel système est de faire en sorte que les fluctuations qu'on y observe constituent un signal représentatif de l'incertitude naturelle de la dynamique atmosphérique.

Afin de représenter ces perturbations de la manière la plus exacte possible, on fait intervenir des schémas de paramétrisation physique pour différents processus, comme la turbulence ou la diffusion verticale. Cependant, d'autres paramètres physiques fondamentaux, comme les précipitations ne sont pas pris en compte dans le calcul des perturbations initiales et pourraient jouer un rôle prépondérant.

Lors de notre stage, nous avons étudié l'impact de l'ajout de processus physiques dans un processus de calcul de perturbations d'un état initial utilisant les vecteurs singuliers.

Après une brève contextualisation de la problématique, une présentation des facteurs d'influence et de notre démarche, nous expliquerons les résultats des études que nous avons menées dans les moyennes latitudes d'une part, dans les tropiques d'autre part. Nous terminerons en commentant les trajectoires des phénomènes météorologiques sur lesquels nous avons travaillé.

# 1 Contexte et problématique

## 1.1 Principe de la prévision d'ensemble

Depuis l'avènement de la prévision numérique jusqu'au milieu des années 1990, et même encore aujourd'hui pour la courte échéance, l'approche qui a prévalu était l'utilisation de modèles déterministes. Ceux-ci fournissent à partir de l'état initial un état unique de l'atmosphère pour chaque échéance, c'est-à-dire un seul scénario possible pour l'évolution de l'atmosphère. Or, ce principe repose sur deux hypothèses qui peuvent être remises en question. D'une part, le modèle supposé parfait ne l'est pas : le coût numérique impose de réaliser des approximations dans les équations régissant le comportement de l'atmosphère. D'autre part, les conditions initiales ne sont pas connues parfaitement en tout point (erreurs de mesure, interpolations aux points de grille du modèle, ...), l'état initial du modèle est ainsi inexact. Au bout de quelques jours, des conditions initiales voisines peuvent engendrer des prévisions totalement différentes, ce qui rend l'approche déterministe inefficace. Il existe donc une réelle incertitude dans la prévision déterministe, qui demeure inconnue. La prévision d'ensemble vise à apporter une information quantitative sur cette incertitude.

Elle consiste notamment à représenter l'incertitude initiale par un échantillon approprié d'états de l'écoulement. Ces perturbations de l'état initial sont censées représenter l'erreur d'analyse du modèle ainsi que l'erreur de prévision. Au lieu d'effectuer ensuite une seule prévision, plusieurs sont réalisées en parallèle. Grâce à tous ces membres calculés, on peut obtenir diverses informations comme la probabilité d'occurrence du phénomène ou la dispersion de la localisation de ce dernier, qui sont les bienvenues pour aider les prévisionnistes. Cela est particulièrement crucial dans le cas de phénomènes intenses comme les cyclones tropicaux ou les tempêtes du type décembre 1999.

Différentes méthodes, décrites par Descamps (2007), existent pour introduire des perturbations à l'état initial. Le centre américain, NCEP (National Centers for Environmental Prediction) fut le premier en 1992 à expérimenter l'approche ensembliste au moyen des "breds modes". Le but de cette technique est de repérer les modes dynamiques les plus instables de la période d'assimilation de données précédant l'instant initial de la prévision. Le CEPMMT, et par la suite Météo-France, ont eux aussi mis en place leur prévision d'ensemble, mais en employant la méthode des vecteurs singuliers (ce sont les perturbations initiales qui croissent le plus vite dans le modèle linéaire sur une période donnée, cf. partie 1.4). Plus récemment d'autres méthodes, appelées méthodes non contraintes (par la dynamique de l'écoulement atmosphérique), ont été développées. Contrairement aux deux précédentes, cette approche vise à construire un système ensembliste global comprenant à la fois l'assimilation des observations et la prévision, la prise en compte de l'incertitude se faisant de façon continue.

## 1.2 La PEARP (Prévision d'Ensemble ARPège)

Un système de prévision d'ensemble est opérationnel à Météo-France depuis juin 2004, et utilise le modèle ARPEGE. En place depuis décembre 2009, la version PEARP2 inclut 35 membres (dont la prévision de contrôle), et fonctionne deux fois par jour sur les réseaux de 06UTC et 18UTC, avec des prévisions allant jusqu'à 108 heures. Sa résolution est T358L65C2.4<sup>1</sup>, et augmentera d'ici quelques mois T538L65C2.4 (ce qui correspond à une augmentation de la résolution horizontale pour la France de 23 à 15 km).

La méthode utilisée pour déterminer les perturbations initiales conjugue celles de l'ensemble d'assimilations (AEARP) et des vecteurs singuliers. Le calcul de ces derniers se découpe en quatre zones, définies sur la figure 1. Le temps d'optimisation (cf. partie 2.1) peut varier selon les zones : il est de douze heures sauf mention contraire sur la carte. Huit jeux différents de physique sont employés dans

---

<sup>1</sup>Ordre de la troncature : 358, 65 niveaux verticaux, coefficient d'étirement : 2,4

la paramétrisation du modèle non linéaire, chaque membre utilisant l'un d'entre eux tiré au hasard. L'objectif est de représenter au mieux l'erreur modèle.

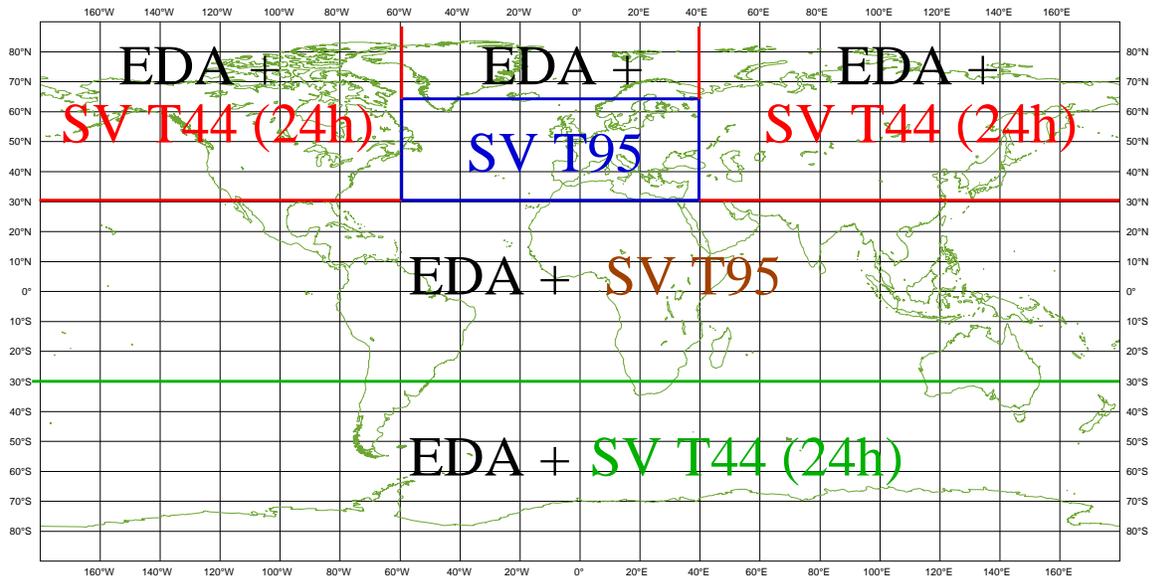


FIG. 1 – Zones de calcul des vecteurs singuliers (EDA : Ensemble Data Assimilation, SV : Vecteur Singulier)

### 1.3 Version adaptée de la PEARP utilisée dans cette étude : PENSE

Pour réaliser des expériences au cours du stage, nous n'avons pas utilisé la version opérationnelle de la PEARP, principalement en raison du coût numérique trop important. Nous avons donc fait le choix de restreindre le nombre de membres à 11, de prendre 55 niveaux verticaux, tout en conservant la résolution horizontale actuelle (T358). Notre étude se focalisera sur les vecteurs singuliers, qui seront donc la seule méthode utilisée pour déterminer les perturbations initiales. Par ailleurs, de manière à harmoniser la résolution du calcul pour ces vecteurs singuliers, celle-ci sera T95 sur les quatre zones. La version ainsi définie pour le stage sera appelée par la suite Prévision d'ENSEmble Expérimentale (PENSE), la figure 2 présente ses différentes étapes. Le mélange des vecteurs singuliers est celui réalisé en opérationnel. Nous essaierons d'évaluer l'impact de différents paramètres (cf. partie 2) sur la qualité du système PENSE.

### 1.4 La méthode des vecteurs singuliers

Pour initialiser les perturbations des prévisions d'ensemble, on utilise des vecteurs singuliers. Ces derniers peuvent être définis comme les perturbations de l'écoulement qui croissent le plus vite sous l'hypothèse d'évolution linéaire. On se ramène donc à un problème d'algèbre linéaire relativement simple : la recherche de vecteurs propres. D'après Rivière (2007, chap. 1), le vecteur singulier optimal est défini comme le vecteur dont la croissance mesurée au moyen d'une norme donnée sur une durée déterminée, est la plus importante. La durée intervenant dans cette définition est appelée temps d'optimisation et sera précisée ultérieurement (cf. partie 2.1).

Pour caractériser une croissance de vecteur, il convient de définir une mesure de son amplitude, c'est-à-dire d'introduire une norme  $E$  à laquelle on associera son produit scalaire. Le produit sca-

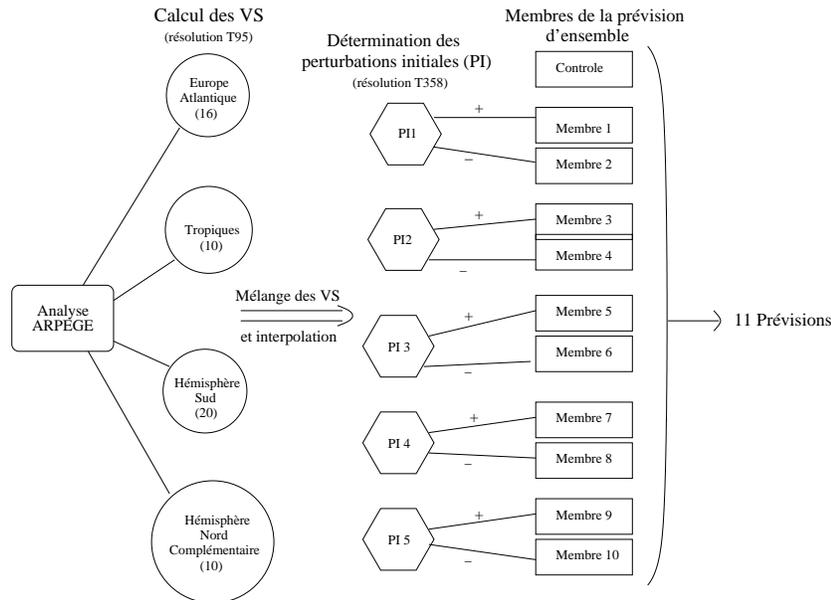


FIG. 2 – Diagrammes des différentes étapes de calcul de la PENSE

laire  $(.;.)_E$  s'exprime en fonction du produit scalaire canonique  $\langle .; . \rangle$  au moyen d'une matrice  $E$  hermitienne définie positive :

$$(a; b)_E = \langle a; Eb \rangle$$

où  $a$  et  $b$  sont des éléments d'un espace hermitien.

Formellement, les équations primitives non-linéaires qui décrivent l'évolution dans le temps du système peuvent se mettre sous la forme :

$$\frac{d\chi}{dt} = A(\chi)$$

où  $A$  représente le modèle complet non linéaire et  $\chi$  est le vecteur d'état. Si on linéarise le système en considérant de petits intervalles de temps, on peut mettre le système sous la forme :

$$\frac{dx}{dt} = A_1 x$$

avec  $A_1$  la linéarisation du modèle complet.

Cette méthode est basée uniquement sur de petites perturbations croissant linéairement. En effet, même si les effets non-linéaires sont importants une fois la perturbation bien développée, l'approximation linéaire peut être utilisée pendant la phase de croissance. On utilise ainsi le modèle linéaire tangent  $L_{X_0}(t_1, t_0)$  (qu'on notera  $L$  dans la suite) qui décrit l'évolution linéarisée de perturbations autour d'une trajectoire de référence. Le vecteur  $x(t)$  au temps  $t$  est donnée par

$$x(t) = Lx(t_0)$$

La norme du vecteur au temps  $t$ , obtenue en utilisant l'adjoint de l'opérateur  $L$  pour  $E$ , noté  $L^{*E}$ , s'écrit comme suit :  $\|x(t)\|^2 = (Lx(t_0); Lx(t_0)) = (L^{*E}.Lx(t_0); x(t_0))$

Les racines carrées des valeurs propres de la matrice  $L^{*E}.L$  sont appelées valeurs singulières de l'opérateur  $L$  et les vecteurs propres associés à ces valeurs propres sont appelés les vecteurs singuliers de  $L$ . Ainsi, les solutions du problème d'optimisation, à savoir les perturbations qui croissent le plus vite, sont simplement les vecteurs singuliers associés aux valeurs singulières les plus fortes.

Puisque  $L^{*E}.L$  est symétrique, les vecteurs singuliers sont orthogonaux. De plus, la norme d'un vecteur singulier à un temps  $t$  est donnée par :

$$\|x(t)\|^2 = (L^{*E}.Lx(t_0); x(t_0)) = \sigma x^2 \|x(t_0)\|^2$$

où  $\sigma$  est la valeur singulière associée au vecteur singulier  $x(t)$ .

Les vecteurs singuliers constituent une base orthogonale de l'espace des phases du système. Quant aux valeurs singulières, elles donnent le facteur d'amplification entre  $t_0$  et  $t$  pour chacun d'entre eux. Les directions associées aux plus grandes valeurs singulières sont celles qui grandissent le plus rapidement au sens de la norme  $E$ . Elles correspondent aux modes les plus instables de l'écoulement susceptibles de faire croître le plus les erreurs de prévision.

Les vecteurs singuliers sont classés par ordre d'importance de leur valeur singulière. Ainsi, le vecteur singulier 1 correspondra à une plus forte croissance pendant la période d'optimisation que le deuxième et ainsi de suite. Dans nos expériences, nous présenterons des graphiques de taux d'amplification : pour chaque vecteur singulier, le taux d'amplification correspond à la valeur singulière qui lui est associée.

## 1.5 Objectifs du stage et problématique

Notre but est d'obtenir des vecteurs singuliers les plus représentatifs de l'erreur d'analyse initiale. Comme nous l'avons montré dans la partie 1.4, les vecteurs singuliers dépendent de la norme choisie, et du modèle linéaire tangent. Ainsi, les facteurs d'influence du problème sont contenus dans le modèle linéaire tangent et dans le choix de la norme. Nous travaillerons donc sur ces deux aspects :

- En ce qui concerne le modèle linéaire tangent, le travail portera sur les paramétrisations physiques. La majorité des paramétrisations physiques d'un modèle de prévision sont non-linéaires, de nombreux processus physiques ne sont pas ou peu représentés dans le modèle linéaire tangent. En particulier, le calcul des perturbations initiales de la PENSE se fait en utilisant un modèle de perturbation n'incluant quasiment aucun processus physique et les processus humides ne sont pas représentés. Lors de ce projet modélisation, notre travail consiste en une évaluation de l'éventuel apport de ces paramètres qui impactent sur le calcul des vecteurs singuliers dans notre configuration PENSE.
- Nous testerons plusieurs normes pour le calcul des vecteurs singuliers. Les ciblage vertical et géographique que nous utiliserons correspondent également à une modification de la norme : cela revient à annuler certains coefficients de la norme.

Nous présentons une première étude aux moyennes latitudes avec un épisode de forte activité barocline dans l'Atlantique et une deuxième dans les tropiques avec un exemple de cyclone. Dans les deux cas, l'objectif est de représenter l'erreur d'analyse de la manière la plus réaliste possible afin d'avoir une prévision d'ensemble de trajectoire de tempête ou de cyclone plus pertinente.

## 2 Facteurs d'influence

Tels qu'on les a définis dans la partie 1.4, les vecteurs singuliers dépendent de plusieurs éléments :

- la norme choisie qui conditionne tout le problème.
- les paramétrisations physiques du modèle linéaire tangent.
- le ciblage (vertical et géographique).

### 2.1 Le temps d'optimisation

L'article de Buizza (1994) montre que les vecteurs singuliers obtenus diffèrent selon le temps d'optimisation choisi. Dans cet article, une comparaison a été faite pour des temps d'optimisation variant de 12 à 72 heures pour différentes situations. En effet, le modèle linéaire tangent et le modèle adjoint tiennent tous deux compte du temps d'optimisation. Il apparaît dans cet article qu'en deçà de 24h et en vue de prévisions à l'échelle synoptique, les vecteurs singuliers n'ont pas le temps de croître suffisamment. Il faut également que ce temps ne soit pas trop long pour respecter au mieux le régime de validité de l'hypothèse de linéarité : on recherche les perturbations qui croissent le plus rapidement et celles-ci sont susceptibles de devenir non-linéaires plus rapidement. Dans l'ensemble de nos expériences avec la PENSE, nous avons fait le choix de ne pas modifier le temps d'optimisation : ce paramètre sera fixé à 24h.

### 2.2 Le choix de la norme

Le vecteur singulier dépend de la norme choisie. Cette norme précise d'une part le poids relatif des différentes composantes du vecteur d'état (vent, température, humidité...) et d'autre part l'importance relative des différentes composantes spectrales et géographiques de ces champs. Les normes que nous utiliserons dans le cadre de notre étude sont :

- la norme énergie totale sèche :

$$(x, y)_E = \frac{1}{2} \iiint_{x,y,p} \left( \delta u_x \delta u_y + \delta v_x \delta v_y + RT_{ref} \delta \Pi_x \Pi_y + \frac{c_p}{T_{ref}} \delta T_x \delta T_y \right) dm$$

où  $x$  et  $y$  sont deux vecteurs singuliers,  $T, \Pi, u, v$  les champs respectifs de température, de pression de surface et de vent zonal et méridien,  $c_p$  la capacité thermique,  $T_{ref}$  une température de référence et  $dm$  l'élément de masse élémentaire

- la norme énergie totale humide :

$$(x, y)_E = \frac{1}{2} \iiint_{x,y,p} \left( \delta u_x \delta u_y + \delta v_x \delta v_y + RT_{ref} \delta \Pi_x \Pi_y + \frac{c_p}{T_{ref}} \delta T_x \delta T_y + \frac{L^2 \delta q^2}{c_p T_{ref}} \right) dm$$

Le dernier terme en  $\delta q^2$  correspond à l'influence de l'humidité

- la norme énergie cinétique :

$$(x, y)_E = \frac{1}{2} \iiint_{x,y,p} (\delta u_x \delta u_y + \delta v_x \delta v_y) dm$$

- la norme enstrophie :

$$(x, y)_\zeta = \frac{1}{2} \iiint_{x,y,p} \delta \zeta_x \delta \zeta_y dm$$

## 2.3 Les paramétrisations physiques du modèle linéaire-tangent pour le calcul des vecteurs singuliers

Le calcul des perturbations optimales pour définir les vecteurs singuliers présente un coût important, ce qui fait qu'on ne peut pas utiliser une linéarisation exacte du modèle non-linéaire, avec toutes les paramétrisations. Par conséquent, on travaille avec un modèle linéaire-tangent basé sur une linéarisation d'une version simplifiée du modèle de prévision, et avec son modèle adjoint. Cette version simplifiée présente évidemment toute la dynamique du modèle complet, mais la simplification se fait au niveau des paramétrisations : il faut choisir et développer celles que l'on souhaite garder.

### 2.3.1 La physique de Buizza (1994)

En l'état actuel de la PENSE, le calcul des vecteurs singuliers prend en compte la diffusion verticale et la traînée au sol, cette physique est dite de Buizza (1994). Dans cette paramétrisation utilisée pour le calcul des vecteurs singuliers, l'équation de la diffusion verticale est la suivante :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_{\Psi}}{\partial z}$$

où  $\Psi$  représente une des trois variables  $U, V$  et  $S$ ,  $S = c_p T + \Phi$  étant l'énergie statique sèche.

Pour paramétrer le flux  $F_{\Psi}$ , on sépare la couche de surface des couches supérieures. Dans la première, on a :

$$F_u = \rho_0 u_* \frac{k U_{19}}{\ln(z_{19}/z_0)} \quad F_v = \rho_0 u_* \frac{k V_{19}}{\ln(z_{19}/z_0)} \quad F_s = 0$$

où  $U_{19}$  et  $V_{19}$  sont les composantes de vitesse au niveau modèle le plus bas,  $z_{19}$  est la hauteur entre ce niveau modèle et la surface, et  $z_0$  la longueur de rugosité.

Dans les couches supérieures, les flux sont définis par

$$F_{\Psi} = \rho_0 u_* l_{diff} f \left( \frac{z}{h_0} \right) \frac{\partial \Psi}{\partial z}$$

où  $h_0$  est la hauteur de la couche limite,  $l_{diff} = \frac{kz}{1+kz/\lambda}$  est la longueur de mélange,  $k = 0.4$  est la constante de Von Karman et  $f$  une fonction visant à faire décroître la diffusion verticale avec l'altitude :  $f \left( \frac{z}{h_0} \right) = \exp \left( -\frac{z}{h_0} \right)$ .

On s'intéressera aussi à l'influence de cette hauteur  $h_0$ . Actuellement, celle-ci est fixée à 1000m, et sa valeur joue un rôle important dans le schéma de diffusion verticale.

### 2.3.2 La paramétrisation de l'assimilation variationnelle 4D-VAR

Les processus physiques représentés dans le 4D-VAR sont entre autres la turbulence, la traînée des ondes de gravité et les précipitations de grande échelle. La première partie de notre travail consistera ainsi à étudier l'impact sur les vecteurs singuliers d'un passage à la turbulence du 4D-VAR.

Le schéma de turbulence reprend la même équation de diffusion verticale, mais l'expression du flux  $F_{\Psi}$  est modifiée :

$$F_{\Psi} = \rho K_{\Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial z}$$

où le coefficient  $K_{\Psi}$  est calculé à partir de l'énergie cinétique turbulente (ECT) :

$$K_{\Psi} = C_{\Psi} L_{\Psi} \sqrt{ECT}$$

où  $C_\Psi$  est une constante et  $L_\Psi$  la longueur de mélange. L'ECT est déterminée par une équation d'évolution.

Les reliefs entraînent la formation d'ondes de gravité dont il faut tenir compte. Leur paramétrisation est définie par l'équation suivante :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{t}}{\partial z} = -g \frac{\partial \vec{t}}{\partial p}$$

où  $\vec{t}$  est le tenseur associé au mouvement des ondes de gravité.

Le schéma de précipitations de grande échelle utilisé dans le 4D-VAR est un schéma de type Smith, comprenant la fraction nuageuse et la quantité d'eau condensée en tenant compte de la variabilité de l'humidité spécifique  $q$  au sein de la maille. En effet, au lieu de déclencher des précipitations lorsque  $\bar{q} > \bar{q}_{sat}$ , on introduit une densité de probabilité pour évaluer l'écart à la moyenne de  $q - q_{sat}$ . Il peut donc pleuvoir dans une maille recouverte seulement en partie par un nuage.

D'autres paramètres de la physique simplifiée du 4D-VAR peuvent être activés, comme les frottements mésosphériques. Cette paramétrisation consiste simplement en un rappel linéaire du vent vers 0, et de l'humidité spécifique vers une valeur minimale.

Pour tester ces paramètres séparément, il existe dans le code du modèle ARPEGE des clés, dont on peut fixer la valeur à vrai ou faux pour chaque expérience, afin d'indiquer si l'on souhaite qu'ils soient pris en compte ou non.

### 3 Déroulement pratique du stage

Notre première semaine de projet a été consacrée en partie à la prise en main des outils informatiques utilisés au GMAP, ainsi qu'au développement de scripts.

#### 3.1 Protocole expérimental

À partir de la PENSE, nous effectuons des modifications jouant sur les paramètres de manière à obtenir une nouvelle expérience. Pour procéder rigoureusement, il est important de ne modifier qu'un seul paramètre à la fois pour comprendre l'influence de ce dernier sur le modèle. Chaque expérience requiert plusieurs heures de calcul sur le supercalculateur Yuki de Météo-France. Une perturbation est obtenue en effectuant une combinaison linéaire de vecteurs singuliers. On en calcule cinq que l'on ajoute ou soustrait à l'analyse non perturbée. La combinaison linéaire peut être choisie arbitrairement. Ainsi pour observer un seul vecteur singulier, il suffit de l'isoler en annulant tous les coefficients correspondant aux autres vecteurs : c'est ainsi que l'on procédera au cours de notre étude (cf. figure 3) pour mieux comprendre l'influence des paramètres modifiés sur la prévision d'ensemble et visualiser chacun des 5 premiers vecteurs.

Une fois l'expérience achevée, il faut aller chercher les données sur le serveur de stockage Cougar et les récupérer sur nos ordinateurs grâce à un protocole de transfert de fichier. Ces données sont soit au format GRIB (cf. 3.3), soit de type binaire (pour faire d'autres calculs, cf. 3.2).

#### 3.2 Développement de programmes informatiques

Toutes les expériences lancées fournissent en retour les mêmes types de fichiers. Il est donc utile d'automatiser l'extraction et l'interprétation des données au moyen de programmes et de scripts.

- *Produits scalaires* : ce premier script, lancé sur le supercalculateur Tori, réalise les produits scalaires entre chacun des vecteurs singuliers d'une même expérience, à partir des données

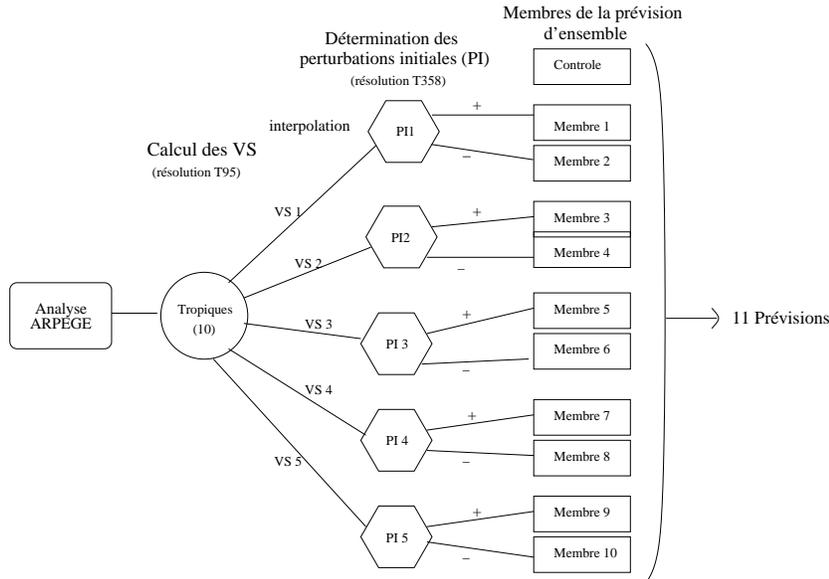


FIG. 3 – Diagrammes des différentes étapes de calcul de la PENSE pour l’étude dans les tropiques (même principe pour les moyennes latitudes, en remplaçant Tropiques par Europe Atlantique)

énergétiques (vorticité, divergence, température, humidité, pression de surface et énergie totale), pour chaque niveau vertical du modèle et chaque nombre d’onde zonal. Grâce au logiciel R, on obtient en retour un profil vertical par niveau modèle et un spectre d’énergie en fonction du nombre d’onde zonal. La correspondance pour l’atmosphère standard entre niveau modèle et altitude est fournie en annexe. Ces graphiques d’énergie sont essentiels dans notre étude pour repérer les niveaux d’instabilité des vecteurs singuliers et leur échelle spatiale.

- *Matrice de similarité* : ce programme reprend le principe du précédent mais en utilisant les vecteurs singuliers de deux expériences différentes. Comme Buizza (1994) notamment, on détermine ainsi les points communs et les différences entre ces deux bases de vecteurs, en définissant l’indice de similarité :

$$m_{i,j}(A, B) = (v_i(A); v_j(B))_E^2$$

où  $v_i(A)$  est le  $i^{\text{ème}}$  vecteur singulier d’une expérience A et  $v_j(B)$  le  $j^{\text{ème}}$  vecteur singulier d’une expérience B. Les indices  $m_{i,j}$  sont les coefficients de la matrice de similarité. Le résultat est affiché grâce à R avec une matrice dont les valeurs dépendent d’une échelle de gris. Les cases les plus foncées indiquent deux vecteurs très semblables, et inversement. La dernière ligne correspond à la somme de chaque colonne, et la dernière colonne à la somme de chaque ligne, ce qui permet de voir si un vecteur s’est réparti entre plusieurs de l’autre base.

- *Cartes de dispersion autour de la moyenne de l’ensemble* : il est important de pouvoir mesurer cette dispersion afin de repérer les zones de forte incertitude. Ce script calcule donc la somme des écarts-types entre les prévisions de l’ensemble et la prévision de contrôle pour la Z500, la T850 ou la  $P_{mer}$ , à toutes les échéances.
- *Détermination de trajectoires* : ce script détermine le minimum dépressionnaire dans la zone concernée pour chaque échéance de la prévision de chaque membre. On obtient ainsi les différentes trajectoires possibles pour le cyclone.

### 3.3 Logiciels utilisés

- *Olive* : permet de générer ou modifier une expérience en jouant sur les paramètres du modèle (cf. 2.3). L’interface Olive est utilisée actuellement pour la recherche, et reproduit exactement

ce qui se passe dans l'opérationnel, afin de résoudre les problèmes éventuels survenus dans la chaîne opérationnelle.

- *XCDp* : logiciel faisant le lien entre les expériences Olive et le supercalculateur. Il permet de vérifier la liste des paramètres utilisés et de contrôler les tâches liées à nos expériences (avancement, relance en cas de problème, détails de l'exécution une fois terminées).
- *Metview* : logiciel développé par le CEPMMT pour visualiser les fichiers GRIB de sortie de modèle, notamment les vecteurs singuliers. Metview donne accès à de nombreux paramètres (température, humidité, vent zonal, géopotentiels, ...) à différents niveaux.

### 3.4 Difficultés rencontrées

La principale difficulté était l'utilisation de ces nouveaux outils informatiques. En dehors des quelques problèmes techniques que nous avons eus, leur prise en main a demandé du temps. Nous pensons que certains logiciels, tels que Metview, qui sont utilisés dans de nombreux services du CNRM, pourraient être ajoutés à notre formation à l'ENM. Le développement de scripts, essentiel dans la recherche pour ne pas perdre de temps, pourrait aussi être approfondi.

## 4 Etude de la prévision d'ensemble aux moyennes latitudes.

La date sur laquelle nous nous sommes concentrés, le 19 janvier 2009 à 18h UTC, correspond au début d'une période marquée par un fort jet d'Ouest qui verra la formation de tempêtes dont Klaus qui dévasta le Sud-Ouest de la France le 24 janvier. Il s'agit de savoir si une nouvelle paramétrisation utilisée pour le calcul des vecteurs singuliers de la PEARP permet d'améliorer la détection de cette tempête et d'en prévoir son évolution -pour rappel, les modèles déterministes opérationnels français de l'époque donnaient des prévisions peu satisfaisantes. Différentes expériences (cf. tableau 1) seront donc réalisées sur cette situation.

Expérience	Physique pour le calcul des VS	Norme	Précipitations
REF	Buizza	ET	non
A	4D-VAR	ET	non
B1	Buizza	ET	oui
B2	Buizza	ETH	oui

TAB. 1 – Tableau résumant les caractéristiques de chaque expérience dans les moyennes latitudes (ET : énergie totale (sèche), ETH : énergie totale humide)

### 4.1 Etat actuel de la PENSE : la physique de Buizza

À la date du 19 janvier 2009, nous avons dans un premier temps lancé une première expérience de PENSE en prenant la version initiale non modifiée (expérience REF). La physique du modèle linéaire-tangent est la paramétrisation de Buizza (1994), peu coûteuse en temps de calcul, et la norme utilisée est la norme énergie totale. Par défaut la hauteur de la couche limite, notée  $h_0$ , est fixée à un kilomètre. Pour observer un vecteur singulier, on fait la différence entre le champ perturbé et le champ de contrôle.

Le champ de  $P_{mer}$  (figure 4) indique deux zones dépressionnaires situées de part et d'autre d'un anticyclone sur les Açores. La première, centrée au Sud de l'Islande, est déjà bien développée car elle atteint moins de 960hPa. La seconde, beaucoup moins creuse, se trouve près de Terre-Neuve avec 998hPa.

La figure 5 présente des coupes horizontales des deux premiers vecteurs singuliers pour le champ de température, au niveau de leur maximum d'énergie (d'après les profils verticaux de la figure 7). On observe que le premier vecteur singulier est placé au niveau de la côte Est des Etats-Unis, dans l'axe du talweg de la dépression associée. Cette localisation au niveau d'un talweg dans une zone de forte activité barocline (on peut repérer le jet lié à la zone barocline figure sur la 6) est conforme aux écrits de la littérature (présence de fronts et de gradients marqués). Le deuxième vecteur singulier, quant à lui un peu plus bruité numériquement que le premier (le calcul des vecteurs singuliers est réalisé avec une résolution T95, du bruit est donc généré lors du passage à la résolution T358), est situé à l'Est de Terre-Neuve. Plus exactement, il se trouve à l'entrée d'un flux d'Ouest-Nord-Ouest rapide. Si l'on observe l'analyse du champ de température (figure non montrée), on remarque également une forte baroclinie. Les vecteurs 3 et 4 qui n'ont pas été montrés ici sont quasiment identiques aux deux premiers. En effet, dans les moyennes latitudes, les vecteurs singuliers sont souvent associés deux à deux. Ainsi, deux vecteurs singuliers orthogonaux déphasés d'une demi longueur d'onde et souvent situés dans une même zone ont des taux d'amplification similaires (Rivière, 2007).

Le pic d'énergie totale, à l'instant initial, se trouve vers le niveau 45 (vers 1500m) pour le premier vecteur et 30 (vers 8000m) pour le second. Il faut donc regarder les vecteurs à ces niveaux pour comprendre leur comportement et leur influence. Vingt-quatre heures plus tard (figures 7 (a) et (b)), le pic d'énergie du premier vecteur est descendu au niveau 50 (environ 500m), s'est propagé sur une

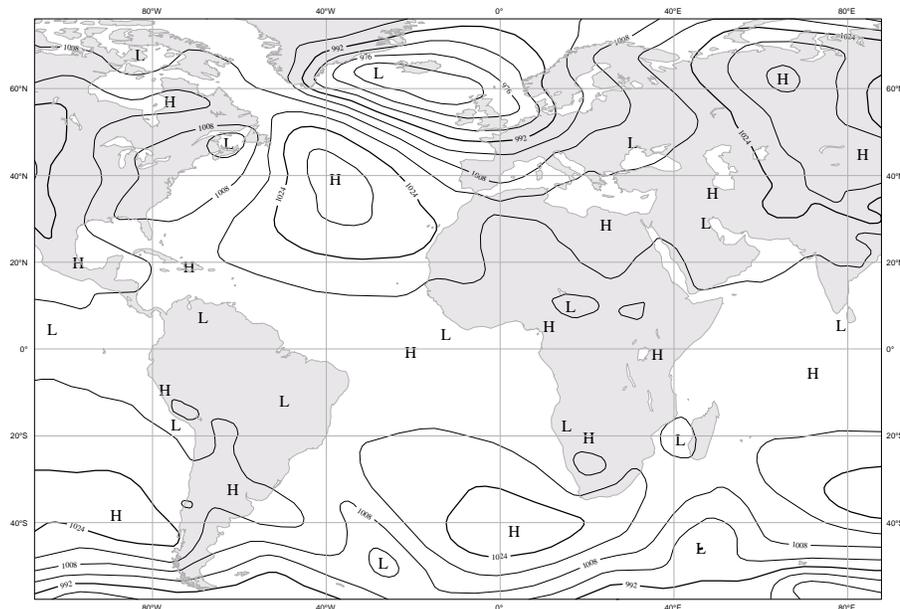


FIG. 4 – Analyse ARPEGE du champ de pression réduite au niveau de la mer ( $P_{mer}$ ) le 19 janvier 2009 à 18h UTC

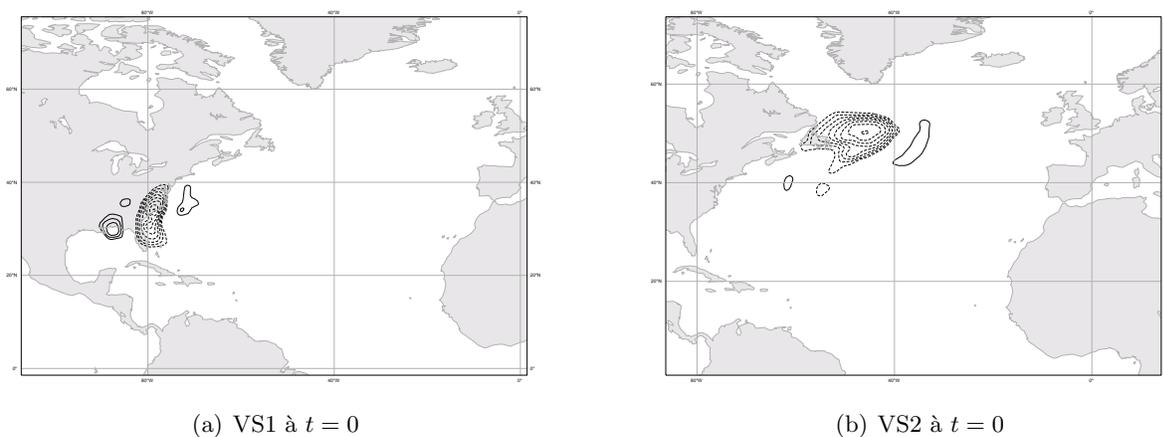


FIG. 5 – Vecteurs singuliers 1 (à gauche) au niveau 44 (vers 850hPa) et 2 (à droite) au niveau 29 (vers 320hPa) à l'instant initial, champ de température. Valeurs positives en traits pleins, valeurs négatives en tiretés, une isoligne égale à 0.03K.

grande échelle verticale et s'est amplifié (2,4J au pic principal à l'état final contre 1J à l'instant initial). Le pic principal d'énergie totale du second vecteur est toujours vers 320hPa mais celui-ci s'est nettement plus amplifié passant de 0.07J à 3.6J soit un facteur de plus de 50! Cependant, le taux d'amplification global (figure 8) du premier vecteur par rapport au second est légèrement supérieur à cause d'une propagation verticale de l'énergie relativement conséquente. L'analyse des différentes contributions des sources d'énergie (figures 7 (a) et (b)) montre qu'à l'état initial, l'énergie est surtout

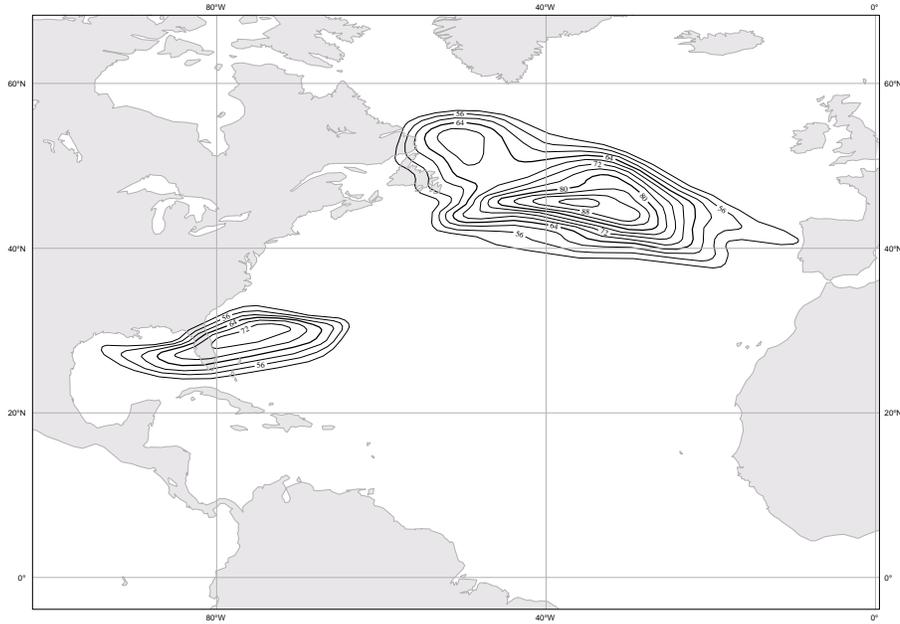


FIG. 6 – Analyse ARPEGE du champ de vent zonal le 19 janvier 2009 à 18h UTC au niveau modèle 30 (environ 10km) seuillé à 50m/s. Une isoligne égale à 6m/s

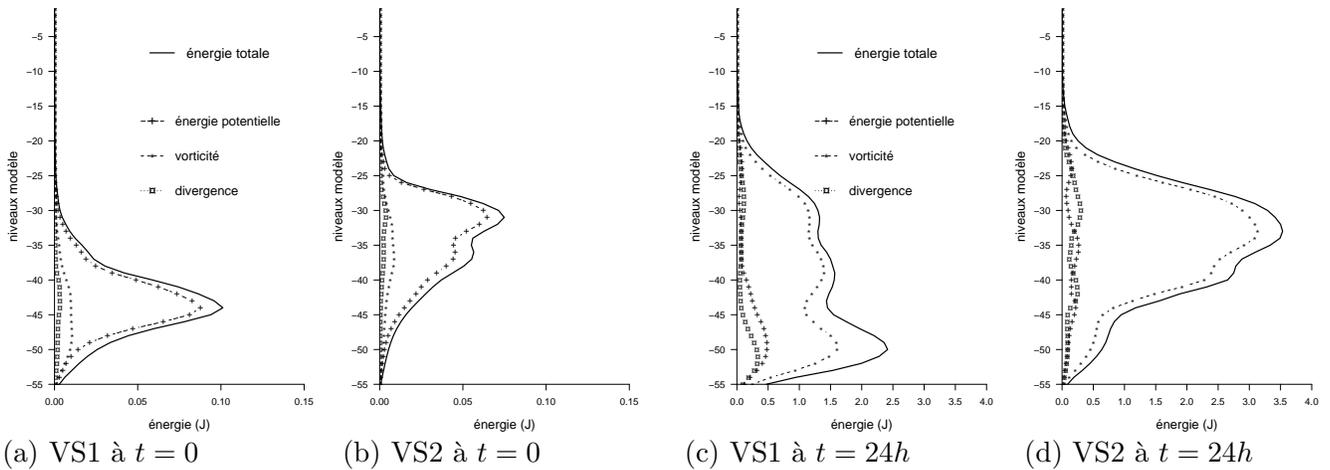


FIG. 7 – Profils verticaux des deux premiers vecteurs singuliers à l’instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite).

présente sous forme potentielle tandis qu’à l’instant final (figures 7 (c) et (d)), c’est le terme de vorticité (ou de tourbillon) qui est prépondérant. Il y a donc un transfert d’énergie potentielle en énergie cinétique correspondant au stade de formation de la perturbation et au stade mature conformément à la théorie (cours de C. Freyrier sur la météorologie dynamique des moyennes latitudes). On note que la divergence n’intervient quasiment pas dans le bilan énergétique.

La figure 9 présente l’échelle zonale des vecteurs singuliers.

Pour le premier vecteur singulier, le maximum d’énergie se situe aux alentours du nombre d’onde

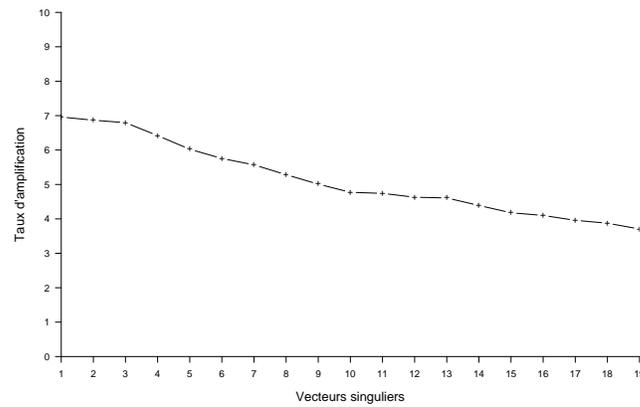


FIG. 8 – Taux d'amplification en fonction du numéro des vecteurs singuliers de la zone Europe Atlantique (expérience REF)

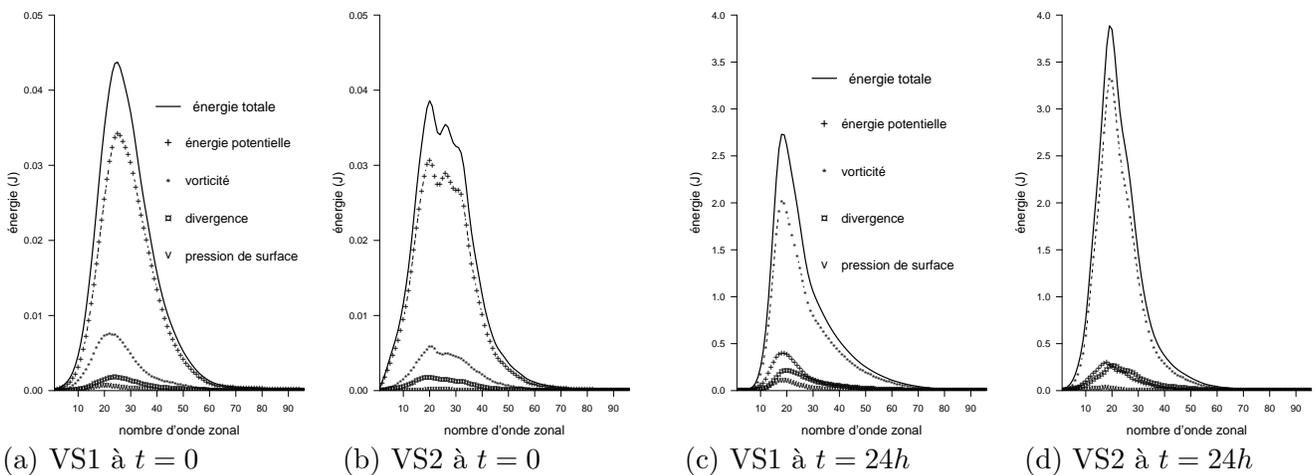


FIG. 9 – Spectres des deux premiers vecteurs singuliers à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REF

zonal 28 soit 500km d'échelle zonale environ à l'état initial tandis qu'après 24 heures dans le modèle linéaire, il est passé au nombre d'onde zonal 20 soit 800km. Deux remarques sont à tirer de ce constat :

-les nombres d'onde zonaux correspondent à des échelles horizontales cohérentes. Pour rappel, l'ordre de grandeur de l'étendue spatiale d'une perturbation barocline est de 1000km.

-au cours de leur évolution, l'échelle zonale a tendance à augmenter ce qui signifie que le vecteur se disperse spatialement, ce qui est courant pour les vecteurs singuliers comme l'a montré Coutinho et al. (2004).

Pour le second vecteur, le maximum d'énergie, peu net à l'instant initial, reste au nombre d'onde 20 mais devient plus marqué au bout de 24h (pic en forme d'aiguille).

Il est enfin intéressant de regarder l'emplacement géographique des vecteurs évolués au bout de 24h dans le modèle linéaire tangent. Conformément aux attentes, les vecteurs ont tendance à se déplacer dans le sens du flux (flux de Sud-Ouest pour le premier et de Ouest-Nord-Ouest pour le deuxième). Plus bruyé que le premier, le deuxième vecteur singulier a notamment parcouru plus de 4000km en un jour passant de Terre-Neuve au Sud de l'Espagne. En effet, il se trouve au niveau 30 du modèle

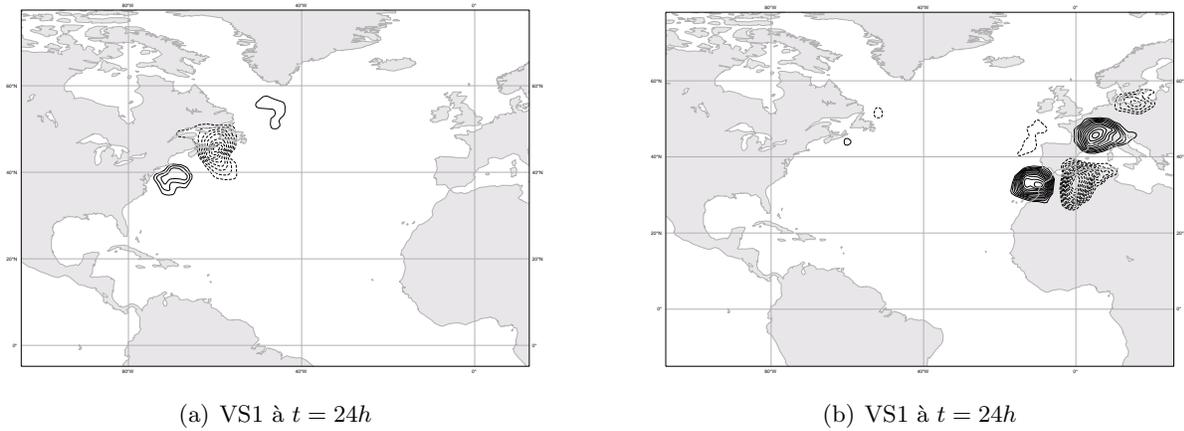


FIG. 10 – Evolution dans le modèle linéaire des vecteurs singuliers 1 (à gauche) niveau 44 (environ 800hPa) et 2 (à droite) niveau 30 (environ 350hPa) au bout de 24h, champ de température, expérience REF. Même légende que la figure 5

soit à près de 8000m ce qui est proche de l’altitude du jet. Le jet rapide d’Ouest a donc transporté sur une longue distance ce vecteur singulier de manière extrêmement rapide.

En conclusion, sur la date du 19 janvier 2009, la PENSE permet de bien repérer la zone barocline.

## 4.2 Test de la physique simplifiée du 4D-VAR pour le calcul des vecteurs singuliers (expérience A)

Pour mieux représenter le comportement de l’atmosphère, une première idée serait de remplacer les paramétrisations physiques de Buizza par les paramétrisations de physique simplifiée utilisées en opérationnel dans l’assimilation 4D-VAR.

### 4.2.1 Mise en place des schémas de turbulence, de diffusion et d’ondes de gravité

On active tout d’abord pour le calcul des vecteurs singuliers les schémas de turbulence, de diffusion et d’ondes de gravité (cf. partie 2.3.2), ce qui correspond à la paramétrisation actuelle de la chaîne opérationnelle.

Les deux premiers vecteurs singuliers sont identiques à un déphasage de  $\frac{\pi}{2}$  près. Comme dans l’expérience précédente, ceux-ci sont simplement déphasés entre eux. On ne montre donc que le premier vecteur sur la figure 11.

Ils sont situés au Nord du massif himalayen au premier niveau du modèle (cf. figure 13) ce qui correspond à une altitude de plus de 60km, dans la mésosphère ! Cette hauteur verticale correspond à une zone où le modèle représente mal l’atmosphère car les mailles sont très larges. Un pic d’énergie nettement visible est centré sur le premier niveau du modèle : toute l’énergie est concentrée dans les trois premiers niveaux du modèle, dans la mésosphère. Si le maximum d’énergie correspond à une longueur d’onde zonale du phénomène de 1000km, l’énergie tend à devenir constante égale à 0.08J plus on augmente le nombre d’onde zonal. De plus, le spectre d’énergie n’est pas nul pour le nombre limite 95. Dès lors, on peut se demander si ces vecteurs ont un sens physique ou s’ils correspondent plutôt à un artefact du modèle.

Le taux d’amplification des deux vecteurs singuliers situés sur l’Himalaya, respectivement de 50 et 27, est très élevé comparé aux autres vecteurs. Cependant, s’ils ne représentaient rien physiquement, ils disparaîtraient dans le modèle non-linéaire. Or, ils ne s’atténuent que légèrement (figure non montrée).

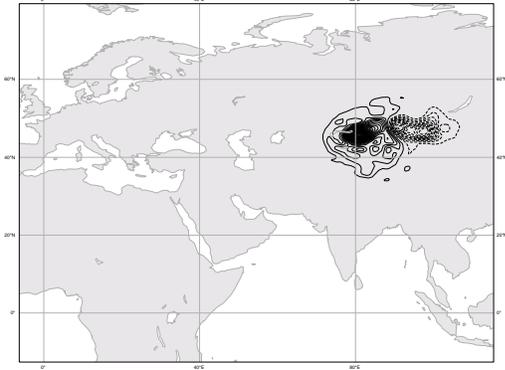


FIG. 11 – Vecteur singulier 1 à l’instant initial, niveau 1 (60km environ), champ de température, expérience A. Même légende que la figure 5

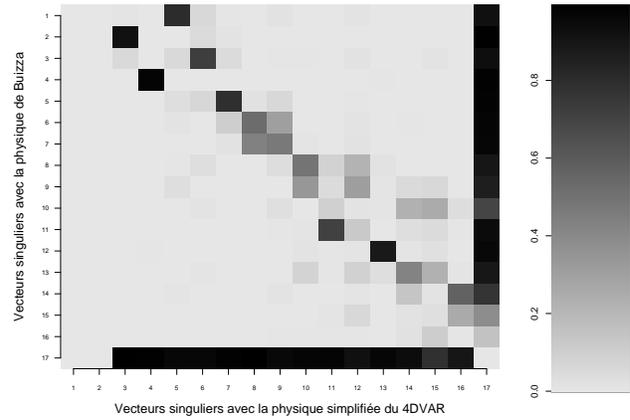


FIG. 12 – Matrice de similarité entre les vecteurs issus de Buizza et ceux de la physique simplifiée du 4D-VAR à l’instant initial (expériences REF et A)

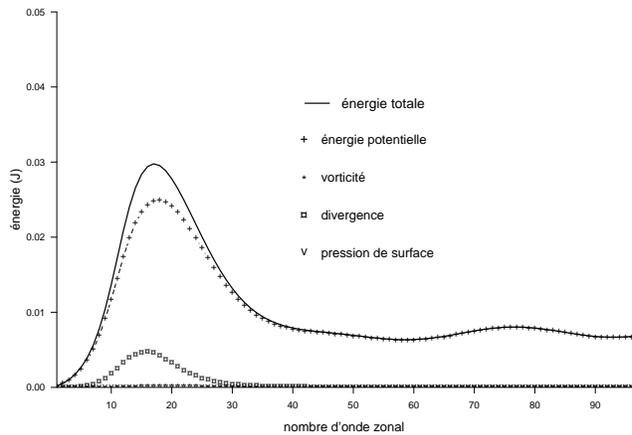
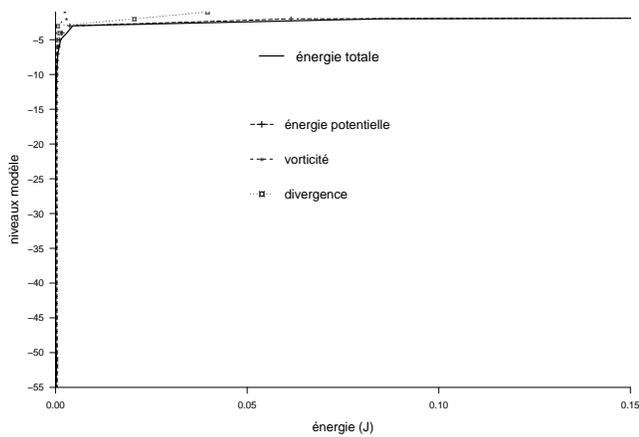


FIG. 13 – Profil vertical d’énergie du premier vecteur par niveau modèle (à gauche) et son spectre d’énergie (à droite) à l’instant initial

La matrice de similarité de la figure 12 permet de comparer cette nouvelle expérience à l’expérience de base de la physique de Buizza. Dans la matrice, les deux premières colonnes sont nulles : les deux premiers vecteurs singuliers de cette nouvelle expérience sont donc inexistant dans l’expérience de base. En revanche, les vecteurs suivants correspondent à d’autres vecteurs singuliers de la première expérience. Ainsi, le nouveau vecteur 3 correspond à l’ancien vecteur 2. Si l’on oublie les deux premiers vecteurs, la matrice est quasiment diagonale ce qui signifie que la prise en compte de ces schémas de la physique simplifiée du 4D-VAR dans la nouvelle expérience ne crée pas de nouveau vecteur singulier réaliste.

Afin de pouvoir continuer à travailler avec l’interface de la physique simplifiée, il va donc falloir s’affranchir de ces deux premiers vecteurs.

## 4.2.2 Ciblage vertical et frottement mésosphérique

Une première idée consiste à effectuer un ciblage vertical des vecteurs singuliers. Pour cela, on impose aux vecteurs de se trouver dans les niveaux 10 à 55 après 24h dans le modèle linéaire. Cela devrait a priori supprimer les vecteurs himalayens qui se trouvent dans les tout premiers niveaux du modèle. Cependant les résultats obtenus ne sont pas convaincants : les vecteurs singuliers se situent toujours sur l'Himalaya à une altitude très élevée et leur taux d'amplification diminue légèrement mais reste important (pour les deux premiers vecteurs). D'autres expériences avec des ciblage verticaux plus restrictifs ont été lancées sans apporter d'amélioration significative.

Étant donné que ces vecteurs singuliers se forment en haute altitude, au niveau de la mésosphère, il nous a paru intéressant d'activer le drag mésosphérique (frottements dans la mésosphère) car ... (plus d'info à demander à olivier) tout en gardant un ciblage vertical. Pour autant, ce changement n'a pas corrigé le modèle qui a conservé les deux vecteurs dans la mésosphère.

## 4.2.3 Impact des autres schémas utilisés

Nous avons alors supprimé le schéma initial de diffusion du 4D-VAR ce qui n'a pas modifié non plus les deux premiers vecteurs.

Enfin, nous avons enlevé la traînée des ondes de gravité. Dès lors, les deux vecteurs himalayens ont disparu et les résultats observés ont été identiques à ceux de la physique de Buizza. Ce problème était donc dû à la paramétrisation des ondes de gravité utilisé dans le 4D-VAR. En réalité, ayant enlevé successivement chacun des paramètres de la physique simplifiée du 4D-VAR, il ne restait plus que la paramétrisation de Buizza dans ce schéma de physique simplifiée. Il est donc intéressant de conserver uniquement l'interface de ce nouveau schéma afin de pouvoir rajouter ensuite les précipitations de grande échelle.

## 4.3 Test des précipitations de grande échelle

La prise en compte des processus humides semble importante dans la modélisation de la cyclogenèse. Il est par conséquent intéressant de voir leur impact dans le modèle de prévision d'ensemble. La question est de savoir si l'on inclut l'humidité dans la norme : deux expériences différentes sont réalisées.

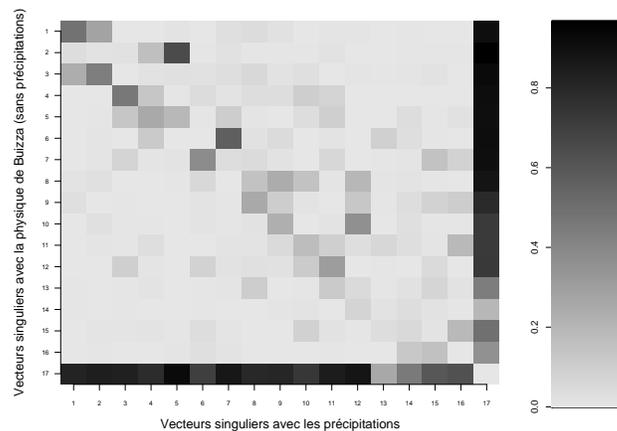


FIG. 14 – Matrice de similarité entre les vecteurs issus de Buizza et ceux de la physique simplifiée avec les précipitations de grande échelle à l'instant initial (expériences REF et B1)

### 4.3.1 Utilisation de la norme énergie totale sèche (expérience B1)

Nous avons, tout d'abord dans cette expérience que l'on nommera B1, activé le schéma de précipitations de grande échelle de la physique simplifiée du 4D-VAR. La matrice de similarité entre les expériences B1 et REF est donnée en figure 14.

La matrice montre que les premiers vecteurs sont quasiment identiques. En effet, la dernière colonne (respectivement la dernière ligne) qui représente la somme de tous les coefficients sur les lignes correspondantes (respectivement les colonnes correspondantes) est proche de 1. Ainsi, ces vecteurs singuliers sont des combinaisons linéaires des vecteurs de la première expérience. La nouvelle expérience les réorganise d'une autre manière dans la même base, et crée aussi quelques nouveaux vecteurs. Ce résultat ne semble pas, a priori, satisfaisant car il ne donne pas d'informations supplémentaires par rapport à l'expérience de base.

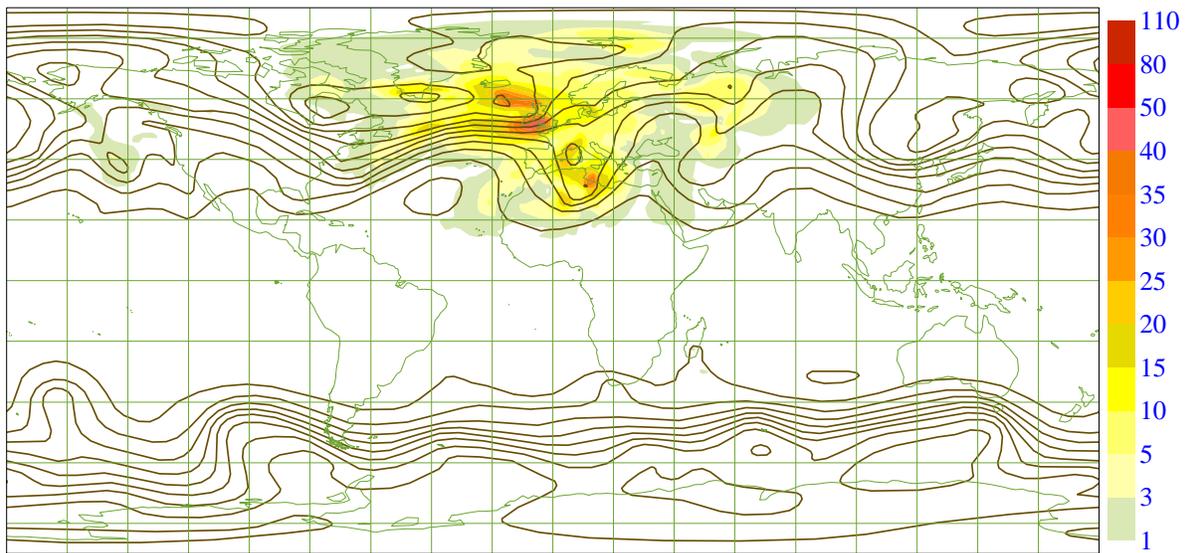


FIG. 15 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ de géopotential à 500hPa (en m/gp) au bout de 60h pour l'expérience REF

Afin de comprendre l'influence éventuelle de la prise en compte des précipitations de grande échelle on peut comparer les champs de dispersion des expériences (figures 15 pour REF et 16 pour B1).

Les deux figures se ressemblent : dans les deux cas, la zone barocline sur l'Ouest de l'Europe correspond à des fortes valeurs de dispersion, tout comme la zone de bas géopotential centrée sur la méditerranée. Toutefois, dans l'expérience B1, les valeurs de dispersion sont plus fortes et de nouvelles zones d'instabilité du modèle apparaissent (par exemple, au Nord et à l'Est des régions septentrionales, dans un talweg). Les précipitations ont donc introduit un mélange intéressant des vecteurs singuliers pour la quantification de l'incertude dans la PENSE.

### 4.3.2 Utilisation de la norme énergie totale humide (expérience B2)

La prise en compte des phénomènes humides de grande échelle va de pair avec l'utilisation d'une norme permettant de mesurer cette humidité. Dans cette norme énergie totale humide, l'humidité doit être mise à zéro aux instants initial et final pour conserver les propriétés de norme. Nous avons donc lancé une nouvelle expérience, nommée B2, avec une norme humide. La matrice de similarité entre

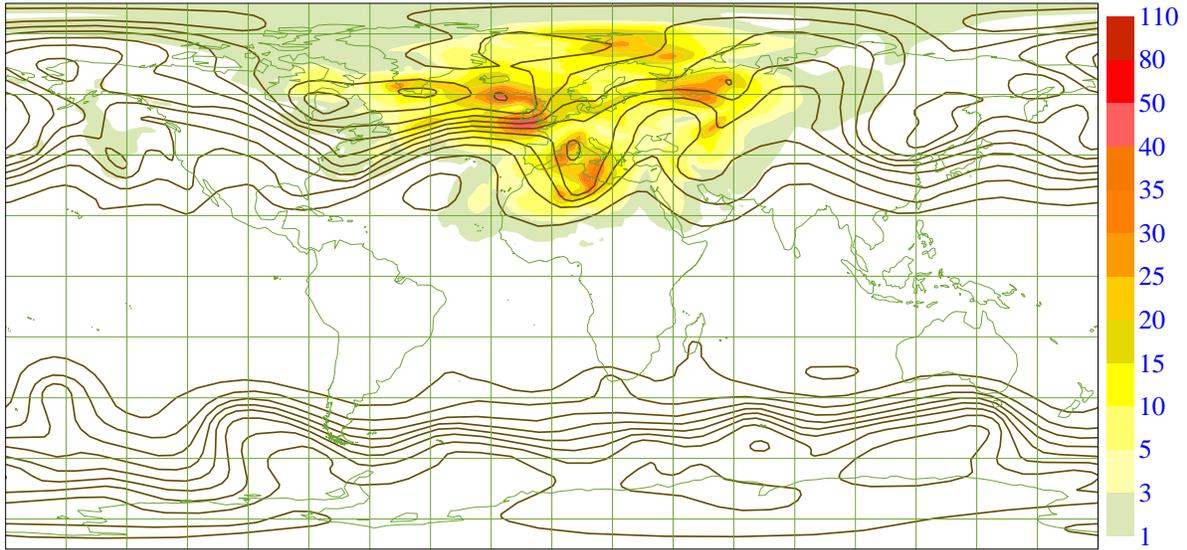


FIG. 16 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ de géopotiel à 500hPa (en mgp) au bout de 60h pour l'expérience B1

les expériences B1 et B2 est donnée en figure 17. Elle est quasiment diagonale : les vecteurs singuliers

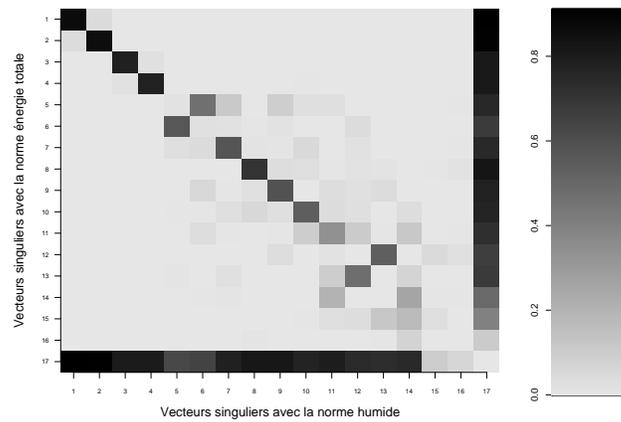


FIG. 17 – Matrice de similarité entre les vecteurs issus des expériences B1 et B2 à l'instant initial

sont donc les mêmes. Cela signifie que l'apport de la nouvelle norme est négligeable dans le calcul des vecteurs. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'utiliser une norme humide dans la PENSE.

En dehors des précipitations, les paramétrisations physiques développées dans le 4D-VAR n'ont donc pas d'impact significatif par rapport à la physique de Buizza (1994).

## 5 Etude dans les tropiques : cas du cyclone Bill

### 5.1 Position du problème

Actuellement, la prévision d'ensemble se révèle très utile sur la détection d'événements extrêmes comme les cyclogenèses atlantiques et les phénomènes de vents forts associés. Toutefois, celle-ci n'est que peu utilisée pour la prévision des trajectoires cycloniques. Le NHC (National Hurricane Center) propose des prévisions de trajectoires cycloniques utilisant à la fois la trajectoire prévue issue d'un modèle déterministe et un cône d'erreur basé sur des statistiques d'erreur des années précédentes (cf. figure 54). Cette dernière méthode ne constitue donc pas une prévision probabiliste.

Le CEPMMT utilise toutefois la prévision d'ensemble (EPS) pour les trajectoires cycloniques. Pour ce faire, il utilise un calcul des vecteurs singuliers ciblés précisément autour du cyclone, une fois celui-ci détecté. Sans ce ciblage, le CEPMMT n'est pas capable d'échantillonner l'erreur d'analyse autour du cyclone. Cela a pour inconvénient qu'en dehors de cette zone souvent très réduite, on ne perturbe pas l'analyse. Un des objectifs de ce stage a été de voir si on pouvait se passer de tels cibrages. En effet, à MétéoFrance, les contraintes opérationnelles sont telles qu'on ne peut pas modifier les caractéristiques de la chaîne opérationnelle. Notre travail a été de tester les différents réglages possibles pour obtenir des vecteurs singuliers échantillonnant au mieux l'erreur de prévision liée au cyclone.

Expérience	$h_0$ (en m)	Ciblage vertical (niveaux verticaux 35/55)	Ciblage géographique (bassin Atlantique)	Norme	Précipitations
REFT	1000	non	non	ET	non
C1	4000	non	non	ET	non
C2	1000	oui	non	ET	non
D1	1000	oui	non	EC	non
D2	1000	oui	non	ENS	non
E	1000	oui	oui	EC	non
F1	1000	oui	oui	EC	oui
F2	1000	oui	oui	ETH	oui

TAB. 2 – Tableau résumant les caractéristiques de chaque expérience dans les tropiques (ET : énergie totale (sèche), ETH : énergie totale humide, EC : énergie cinétique, ENS : enstrophie)

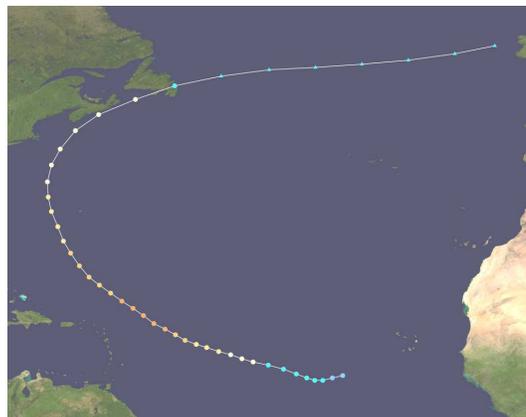


FIG. 18 – Trajectoire du cyclone Bill du 15 au 24 août 2009

Dans cette partie, nous exposons différentes expériences (cf. tableau 2) que nous avons pu mener. Nous nous sommes focalisés sur le cas du cyclone Bill de l'été 2009. Nous nous sommes attachés à mettre

en valeur la progression de notre raisonnement ainsi que les choix que nous avons progressivement dû faire.

## 5.2 Expérience de référence REFT : état actuel de notre configuration PENSE dans les tropiques

Le cyclone Bill s'est formé à partir d'une onde tropicale d'est sortant d'Afrique le 12 août 2009. Bill est devenu une dépression tropicale près des îles du Cap-Vert le samedi 15 août puis rapidement une tempête tropicale en poursuivant son chemin vers l'ouest. Sa trajectoire s'est ensuite incurvée vers l'ouest-nord-ouest et le système est devenu un ouragan le 17 août, puis un ouragan majeur le 18, soit au moins de catégorie 3 sur l'échelle de Saffir-Simpson, et a atteint son maximum à la catégorie 4 en pleine mer. Il est le seul cyclone de la saison 2009 à avoir atteint la catégorie 4.

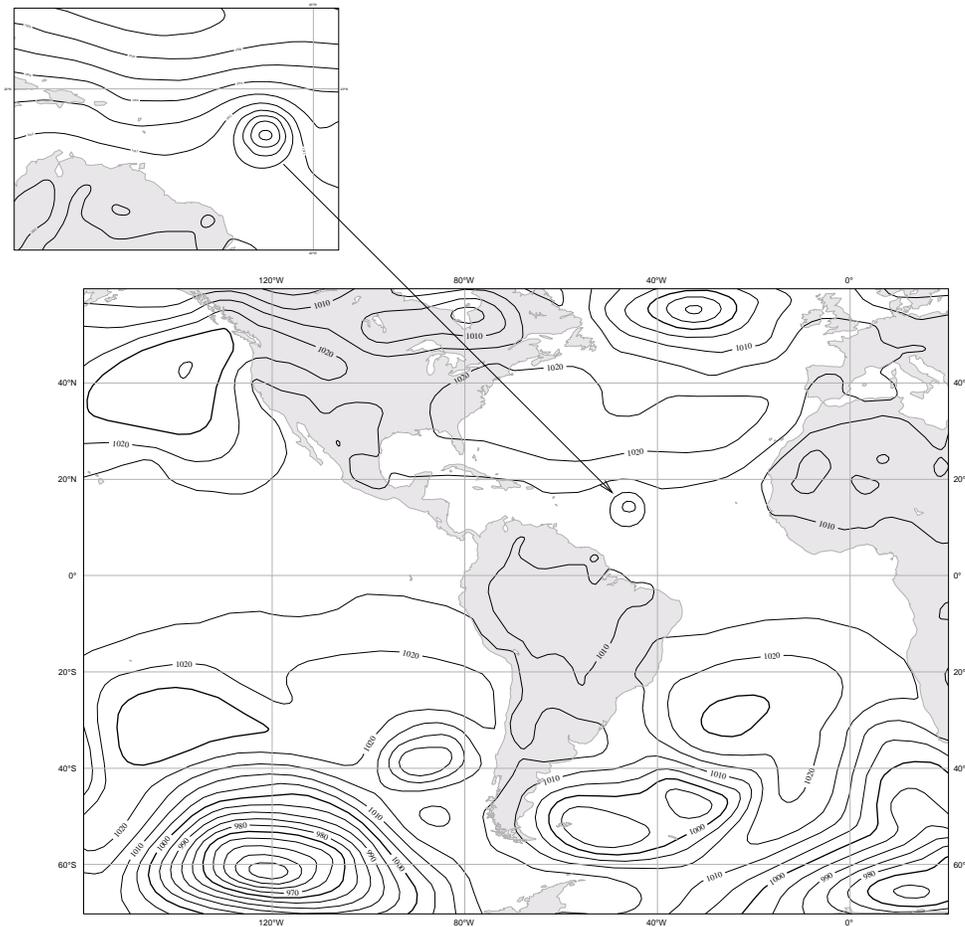


FIG. 19 – Analyse ARPEGE de la pression réduite au niveau de la mer du 17 août 2009 à 18h (expérience REFT). Une isoligne représente 5hPa. Sur l'agrandissement, une isoligne représente 2hPa.

Sur la figure 19, le cyclone Bill est bien visible sur le champ de  $P_{mer}$ . À partir de cette journée, il vient de passer en catégorie 1.

Dans cette expérience, nous utiliserons les résultats de la physique de Buizza et, jusqu'à la partie 5.4, la norme utilisée sera la norme énergie totale sèche. La figure 20 présente les taux d'amplification des vecteurs singuliers issus de l'expérience REFT.

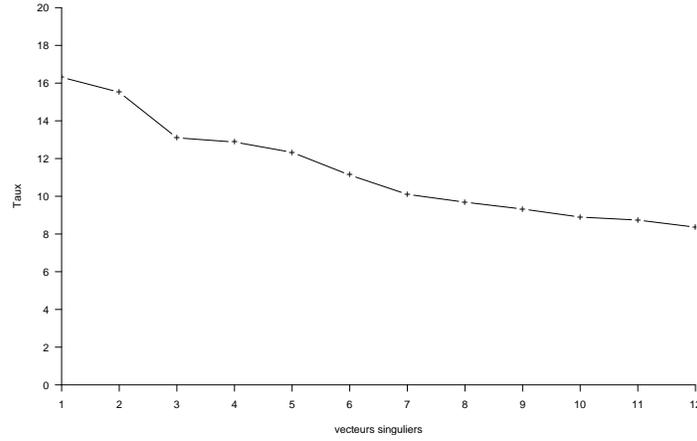


FIG. 20 – Taux d'amplification pour chaque vecteur singulier (expérience REFT)

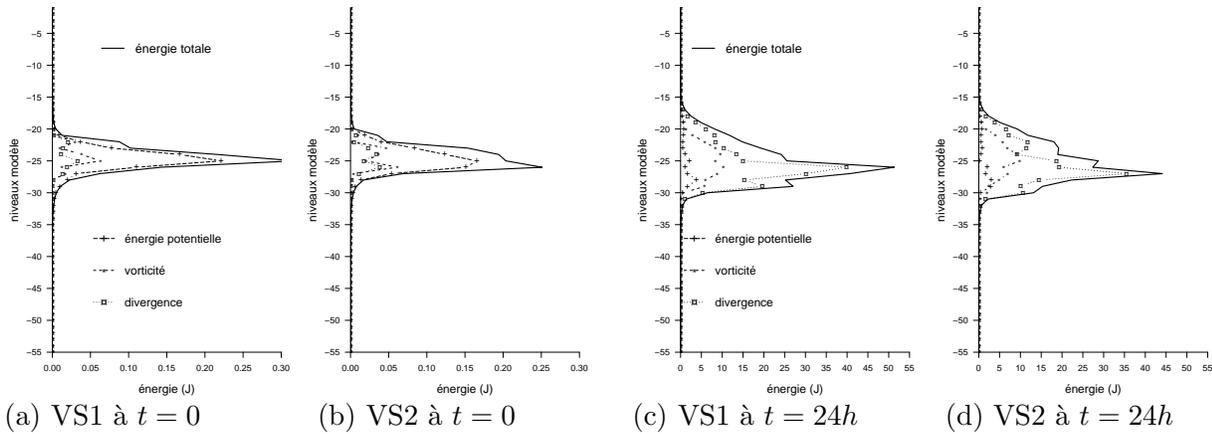


FIG. 21 – Profils verticaux d'énergie des vecteurs singuliers 1 et 2 à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REFT

La figure 21 présente les profils verticaux d'énergie que nous avons obtenus pour les 2 premiers vecteurs singuliers à l'instant initial et à l'instant final  $t_0 + 24h$ , tandis que la figure 22 représente les spectres d'énergie en fonction du nombre d'onde zonal. On peut remarquer de prime abord que les maxima d'énergie sont centrés vers le niveau 25 du modèle (250hPa), c'est-à-dire à 10km d'altitude environ. Après 24h, les maxima d'énergie sont toujours centrés sur le niveau 25 même s'ils se sont élargis. Le spectre d'énergie après 24h a tendance à se décaler légèrement vers les plus grandes échelles.

La figure 23 montre le premier vecteur singulier associé à cette expérience au niveau où les profils suggéraient le maximum d'énergie. À droite, on peut le voir lorsqu'il a évolué avec le modèle linéaire : il a subi un décalage vers l'est. Le deuxième vecteur singulier (non montré), très semblable au premier, est le vecteur déphasé d'une demi longueur d'onde par rapport au premier. Ces derniers ont un pic d'énergie au voisinage du niveau modèle 25 (vers 250hPa). Ils ont une signature particulièrement visible en température et ce, en cohérence avec le choix de la norme énergie totale sèche, d'où notre choix pour leur visualisation.

Le vecteur singulier 3 (cf. figure 24) est situé au milieu du Pacifique, au niveau d'un fond de thalweg visible sur un champ de géopotential Z300hPa (non montré). A droite son évolution après 24h avec le modèle linéaire. Il est identique au quatrième vecteur singulier à un déphasage de  $\frac{Pi}{2}$  près (non montré). La question que nous nous sommes posée a été de savoir si ces vecteurs singuliers sont

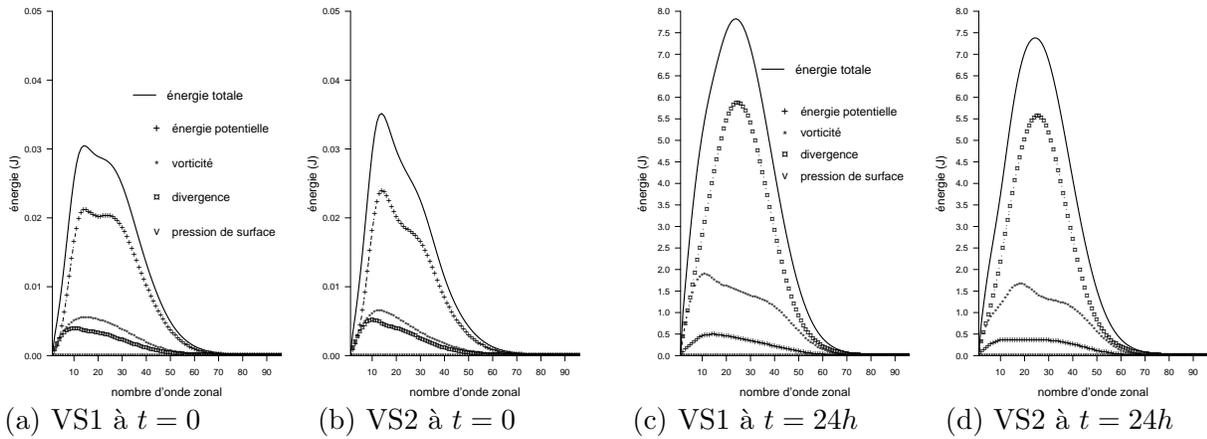


FIG. 22 – Spectres d'énergie des vecteurs singuliers 1 et 2 à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REFT

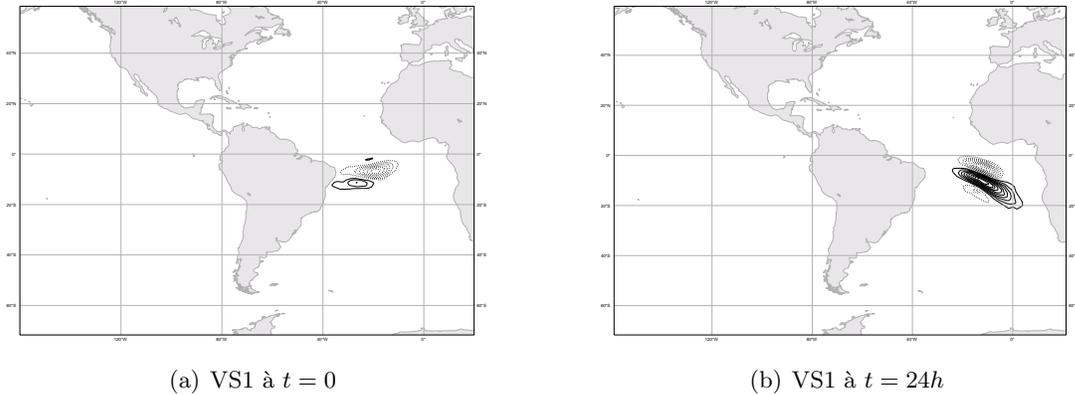


FIG. 23 – Vecteur singulier 1 au niveau 25 (vers 250hPa), à l'état initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REFT. Champ de température. Valeurs positives en traits pleins, valeurs négatives en tiretés, une isoligne représentant 0.05K.

physiques ou non. En effet, si ces derniers ne sont qu'un artefact du modèle linéaire tangent, leur intérêt est nul pour la prévision d'ensemble. Pour le savoir, nous disposons pour chaque expérience de profils d'énergie suivant la verticale et par nombre d'onde.

Ces vecteurs s'atténuent très rapidement avec le modèle non linéaire. De plus, l'erreur de prévision n'est pas attendue a priori si haut en altitude. Pour ces raisons, ces vecteurs singuliers semblent ne pas être physiques. Pour évaluer la dispersion au fur et à mesure des échéances, nous avons pu visualiser des cartes de dispersion de  $P_{mer}$  visibles sur les figures 25 et 26. Nous avons choisi de représenter le champ de pression réduite au niveau de la mer. En effet, le cyclone a une signature plus visible sur ce champ qu'avec le géopotentiel à 500hPa car ce dernier varie très peu aux latitudes intertropicales.

À un instant proche de l'instant initial (échéance 6h), la dispersion se concentre autour des zones où sont situées les vecteurs singuliers initiaux. Dans notre cas il s'agit de deux zones centrées sur l'Atlantique et le Pacifique, comme on peut le voir sur la figure 25. En particulier, on remarque qu'aucune dispersion ne vient accompagner le cyclone (aucun des 5 premiers vecteurs singuliers n'était dans la zone du cyclone). Rappelons en effet que dans le cadre de nos expériences avec la configuration PENSE, les 10 runs perturbés ne sont construits qu'avec les 5 premiers vecteurs singuliers (cf. partie

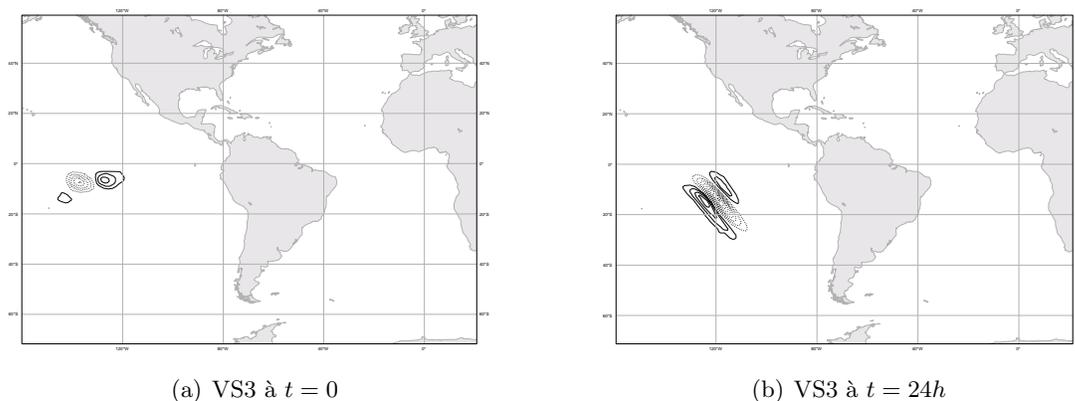


FIG. 24 – Vecteur singulier 3 au niveau 20 (vers 200hPa) à l'état initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REFT. Même légende que la figure 23.

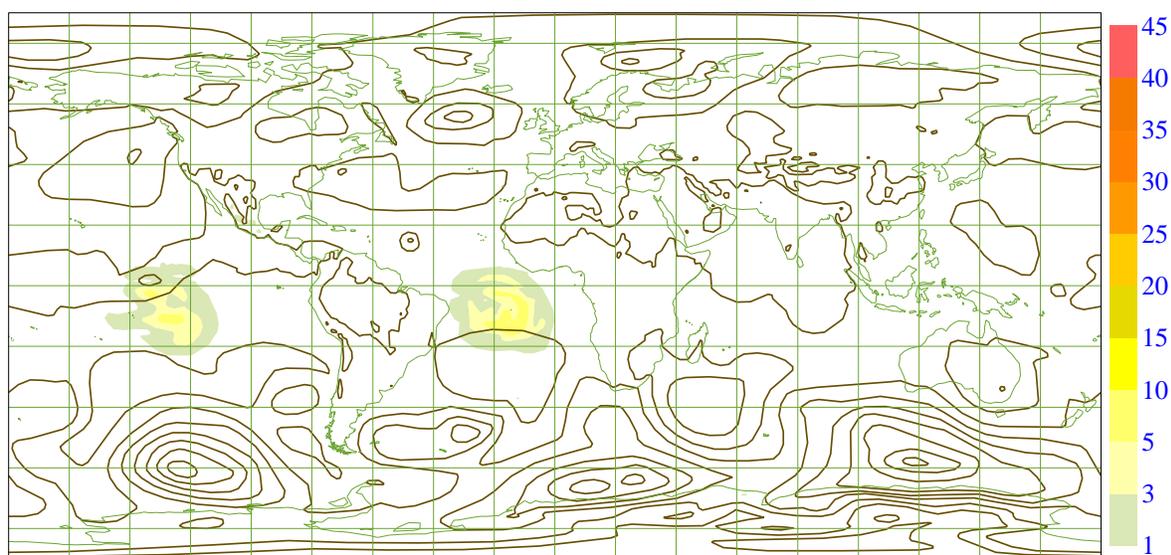


FIG. 25 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 6h (expérience REFT).

3.1). A l'échéance 60h (cf. figure 26), de la dispersion est reprise dans les deux zones baroclines ainsi qu'autour du cyclone. Celle-ci est toutefois très atténuée par rapport à l'échéance 6h. En particulier, les différentes prévisions perturbées prises à 72h montrent plusieurs trajectoires de cyclones qui restent toutes extrêmement proches de la prévision non perturbée (cf. partie 6.1). Dans certains cas, cette situation est caractéristique d'une bonne prévisibilité. Toutefois, et conformément au cône d'erreur utilisé par le NHC (cf. figure 54), on peut supposer que la prévisibilité intrinsèque de l'atmosphère à proximité d'un cyclone est relativement faible. C'est pourquoi on recherchera a priori plus de dispersion autour du cyclone et ce, dès 6h d'échéance.

L'insuffisance de cette expérience de référence s'explique donc par des vecteurs singuliers trop proches de la tropopause, c'est-à-dire que leur énergie est confinée vers 250hPa. Dans le cas des trajectoires cycloniques, on attend de l'erreur dans les basses couches.

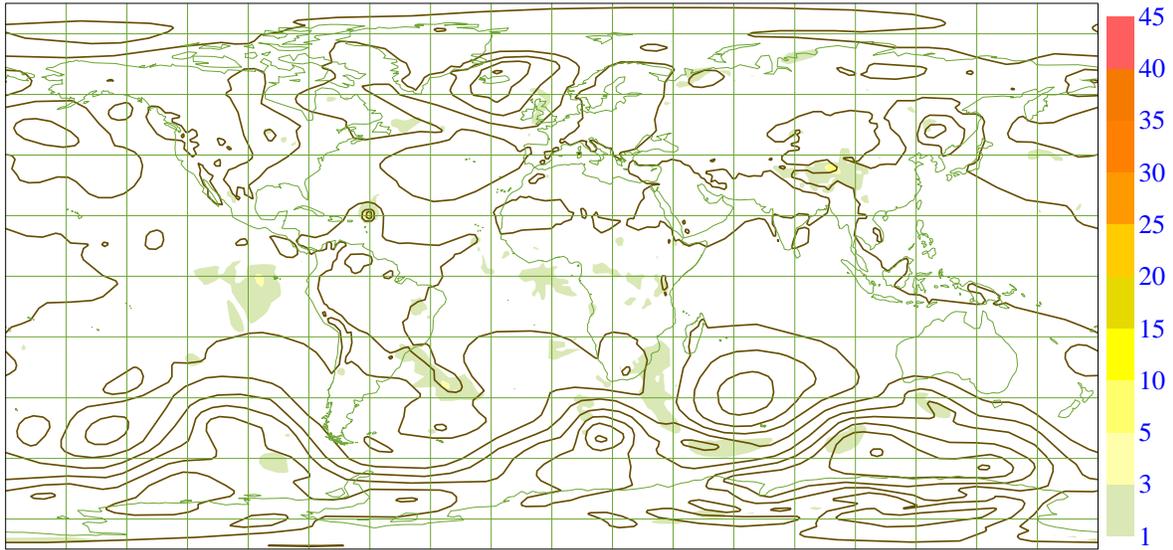


FIG. 26 – Moyenne de l’ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 60h (expérience REFT).

### 5.3 Le problème des vecteurs singuliers de la haute troposphère

Les deux expériences présentées ici ont été réalisées dans le but de s’affranchir des vecteurs singuliers trop proches de la tropopause.

#### 5.3.1 Expérience C1 : influence de la hauteur de la couche limite $h_0$

L’expérience de référence REFT présentée plus haut fonctionnait avec un schéma de diffusion verticale par défaut issu de la physique de Buizza. En particulier, dans REFT, on avait  $h_0 = 1000m$ . Comme indiqué dans Barkmeijer et al. (2001), augmenter  $h_0$  permet de faire apparaître de nouveaux vecteurs singuliers. En effet, cela revient à augmenter la hauteur de la couche limite et, par voie de conséquence, la diffusion sur la verticale. L’expérience suivante se propose d’étudier l’influence de ce paramètre. Nous avons effectué plusieurs expériences avec différentes valeurs de  $h_0$ . Par choix, nous vous présentons dans cette partie l’expérience C1 qui a fonctionné en prenant  $h_0 = 4000m$ .

L’examen de la matrice de similarité entre l’expérience C1 et REFT montre la nouveauté des six premiers vecteurs singuliers. Ceux-ci ne peuvent se projeter sur le sous-espace formé par les 10 premiers vecteurs singuliers de l’expérience de référence. Par contre, le septième de l’expérience C1 est se projette sur le premier de l’expérience REFT.

Les figures 28 et 29 présentent respectivement les profils verticaux et spectres d’énergie du premier et du septième vecteur singulier. Elles confirment que le septième vecteur singulier reste lui un vecteur singulier de la haute troposphère. On retrouve un maximum d’énergie vers le niveau 25 du modèle, comme observé dans l’expérience de référence. L’analyse des spectres en nombre d’onde zonal indique un premier vecteur singulier caractérisé par des nombres d’onde proches de 65 (300km de longueur d’onde) alors que le septième conserve un pic d’énergie pour les nombres d’onde proches de 20 (environ 1000km). On note toujours une conversion d’énergie potentielle en énergie cinétique dans les deux cas.

La figure 30 présente le premier vecteur singulier obtenu dans cette expérience. Les six premiers vecteurs sont également situés dans la même zone, à savoir sur la Cordillère des Andes, qui dépasse fréquemment 5000m dans ce secteur. Ces vecteurs singuliers ne sont pas physiquement réalistes, ce qui est confirmé par l’évolution de ces vecteurs singuliers (avec le modèle non-linéaire) qui montre une

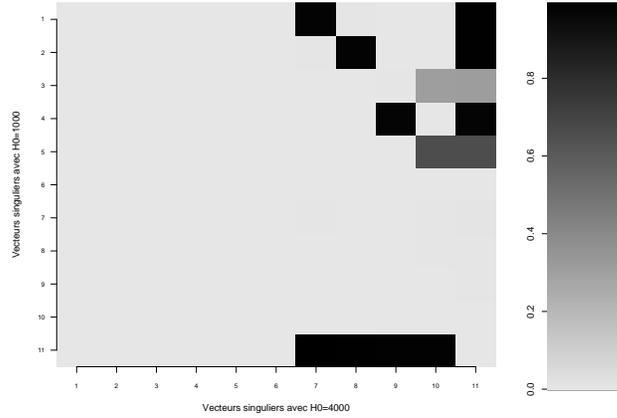


FIG. 27 – Matrice de similarité entre l'expérience REFT (avec  $h_0 = 1000m$ ) et l'expérience C1 (avec  $h_0 = 4000m$ )

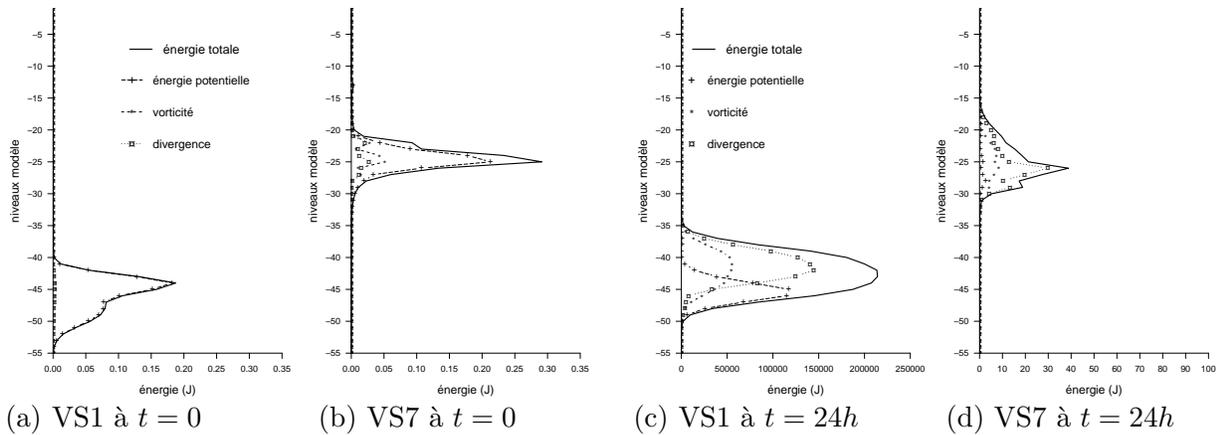


FIG. 28 – Profils verticaux d'énergie en fonction des niveaux modèle du premier et du septième vecteur singulier (expérience C1). À gauche, à l'instant initial, à droite à l'instant final.

atténuation très rapide de ce signal.

La figure 31 présente la dispersion des 10 prévisions perturbées au bout de 60h. La dispersion reste très faible. Finalement, la modification de la hauteur de la couche limite n'est pas satisfaisante puisque les vecteurs singuliers obtenus sont tous non réalistes physiquement, qu'ils soient trop proches de la tropopause ou générés sur la Cordillère des Andes.

### 5.3.2 Expérience C2 : le ciblage vertical

Une autre possibilité pour s'affranchir de vecteurs singuliers de la haute troposphère est de réaliser un ciblage vertical. Le principe est de ne retenir que les vecteurs singuliers qui, au bout de la durée du temps d'optimisation, maximisent leur norme quand on les restreint à certains niveaux. Ainsi, pour éliminer les vecteurs de la haute troposphère, nous avons choisi un ciblage vertical sur les niveaux 35 à 55 (du sol au niveau 500hPa). La matrice de similarité entre cette expérience et l'expérience de référence (non montré) est la matrice nulle : tous les principaux vecteurs singuliers de cette expérience sont nouveaux par rapport à ceux de l'expérience de référence.

La figure 32 présente le premier vecteur singulier obtenu lors de cette expérience de ciblage ver-

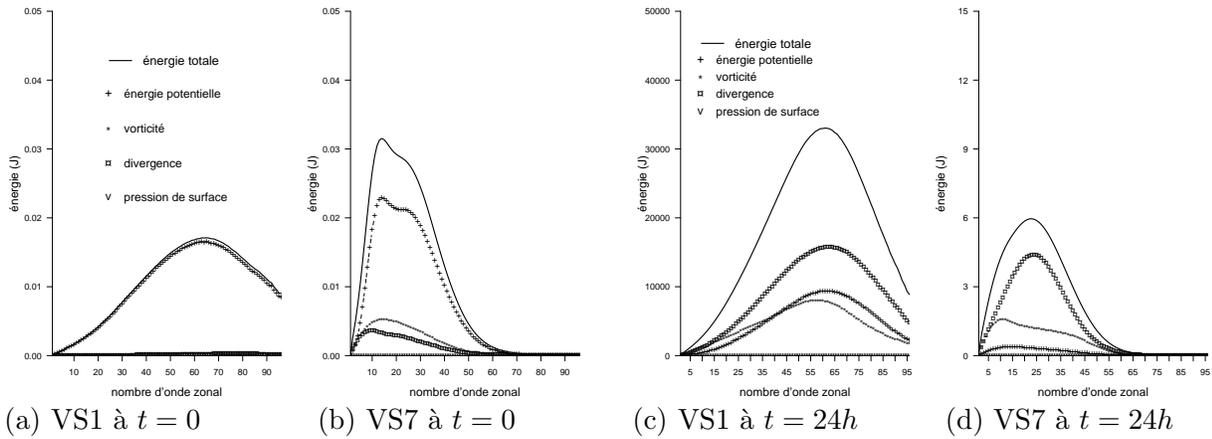
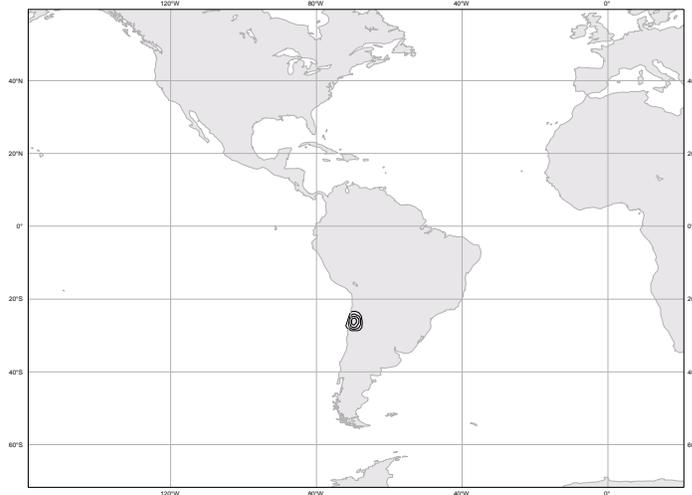


FIG. 29 – Spectres d’énergie en fonction des niveaux modèle du premier et du septième vecteur singulier (expérience C1). À gauche, à l’instant initial, à droite à l’instant final.



(a) VS1 à  $t = 0$

FIG. 30 – Vecteur singulier 1 à l’état initial au niveau 42 (vers 750hPa), champ de température (expérience C1). Même légende que la figure 23.

tical. Les autres vecteurs se situent aussi bien au Sud de l’Afrique, dans l’océan Pacifique ou bien en Australie. On déplore encore l’absence de vecteurs singuliers à proximité du cyclone Bill. Les profils verticaux de ce premier vecteur singulier visibles en figure 34 révèlent un maximum d’énergie à l’état initial au niveau 35. Même si ce dernier niveau constitue la limite haute de notre ciblage, ces vecteurs se révèlent être plus physiques que ceux obtenus en augmentant la hauteur de la couche limite  $h_0$ . En effet, ces vecteurs singuliers ne sont pas atténués par le modèle non linéaire.

Enfin, avec ces nouveaux vecteurs singuliers, l’ensemble de notre configuration PENSE génère de la dispersion là où ils sont comme l’atteste la figure 33 : on distingue nettement au bout de 60h un certain écart-type sur la prévision du champ de  $P_{mer}$ , au niveau de la zone barocline de l’hémisphère Sud. Ce n’était pas le cas jusqu’alors.

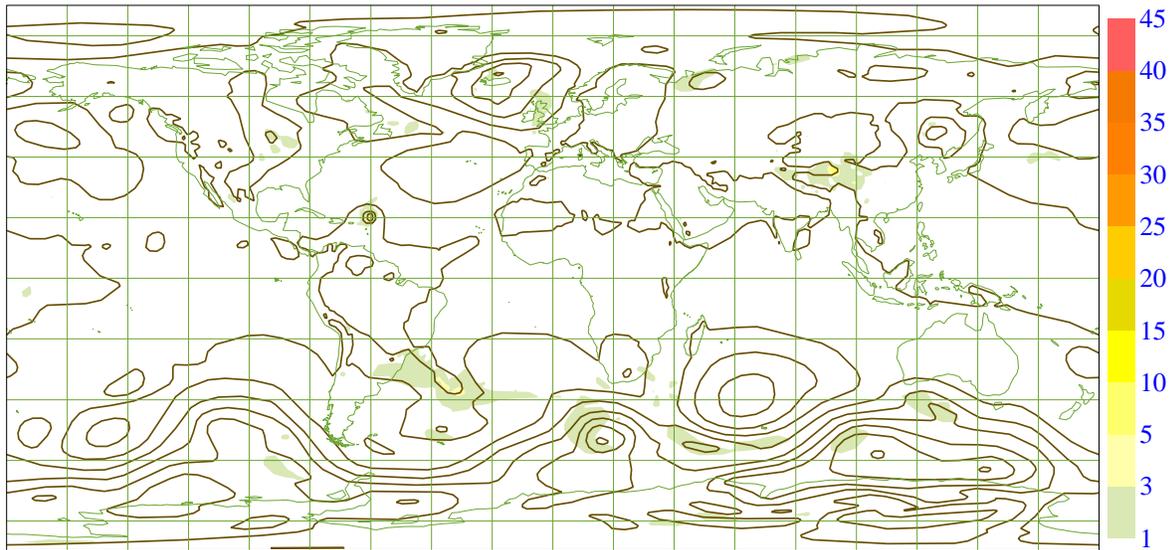


FIG. 31 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 60h (expérience C1).

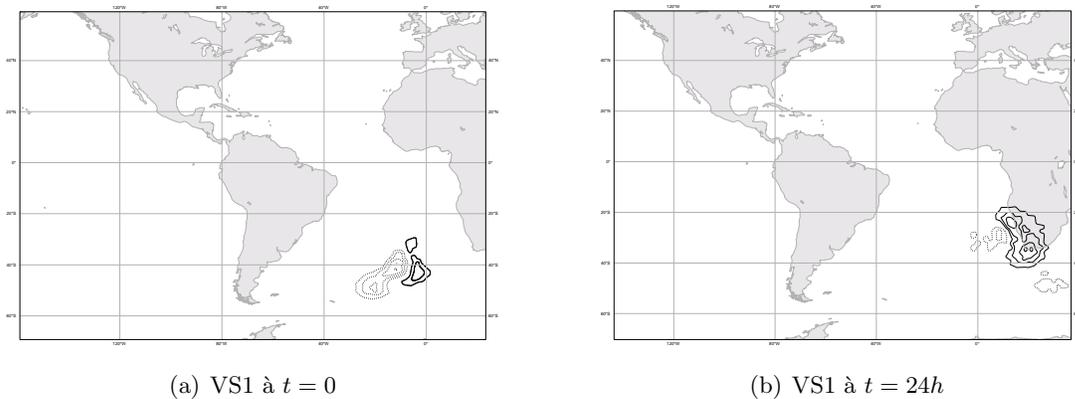


FIG. 32 – Vecteur singulier 1 à l'état initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) au niveau 35 (vers 500hPa) : expérience C2, champ de température. Même légende que la figure 23.

## 5.4 Influence de la norme

Nous nous intéressons maintenant à la norme utilisée pour identifier les vecteurs singuliers. Le choix de la norme est en effet primordial pour les calculer (cf. partie 1.4), jusqu'à présent la norme énergie totale (température, vorticité, divergence et pression de surface) était employée.

### 5.4.1 Norme énergie cinétique : expérience D1

Nous prenons d'abord une norme énergie cinétique, qui ne garde que les termes en vorticité et en divergence (cf. partie 2.3). Dans cette expérience D1, on conserve bien entendu les réglages précédents, à savoir une valeur de  $h_0$  inchangée (1000m) et un ciblage vertical sur les niveaux 35 à 55.

La figure 35 présente les indices de similarité entre les vecteurs calculés avec ces deux normes. Comme la somme des colonnes 3 à 9 est presque nulle, on en déduit que les vecteurs singuliers 3 à

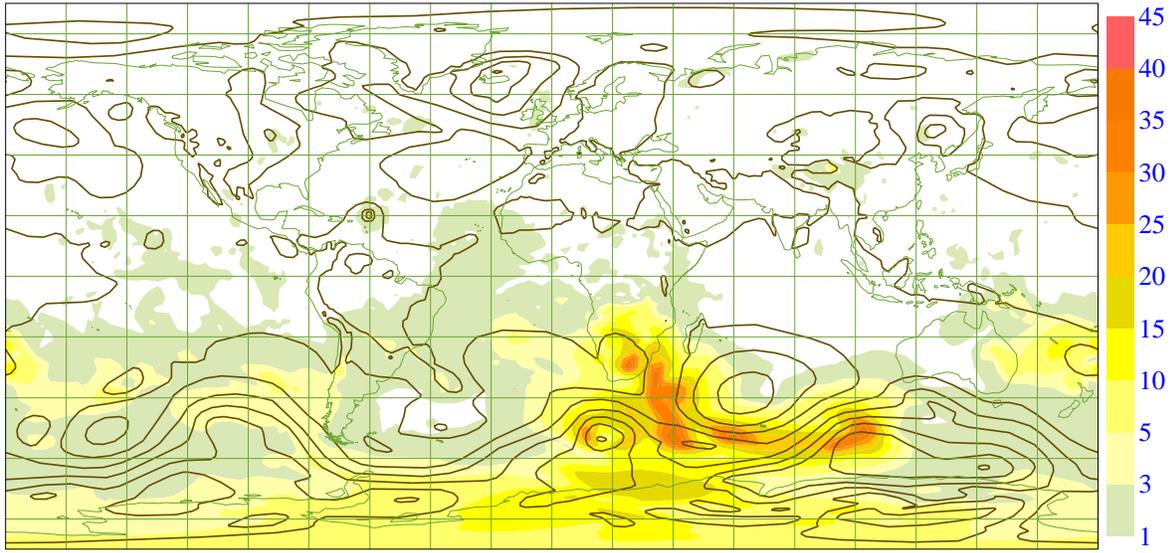


FIG. 33 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 60h (expérience C2).

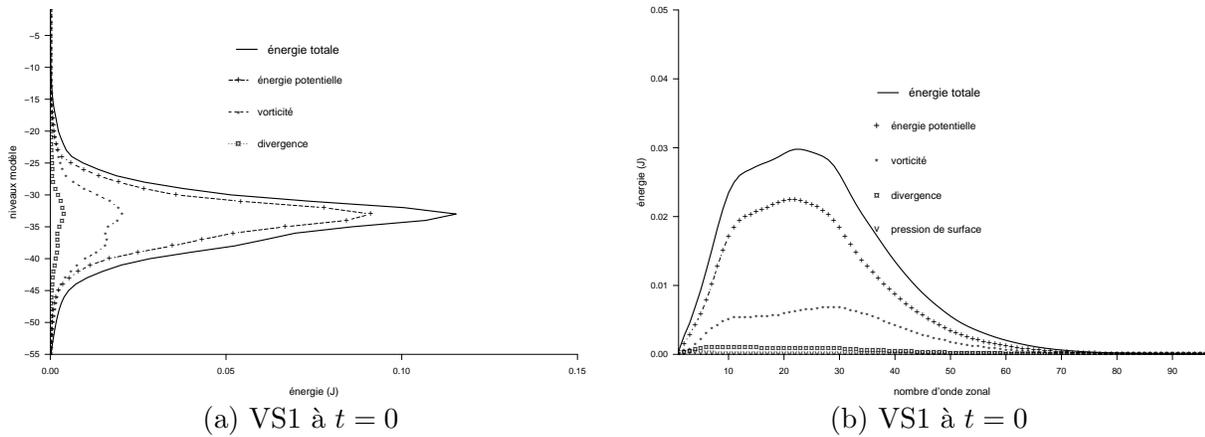


FIG. 34 – Profil vertical (à gauche) et spectre (à droite) d'énergie du premier vecteur singulier à l'instant initial : expérience C2.

9 calculés grâce à la norme énergie cinétique sont nouveaux. Au contraire, le premier et le deuxième apparaissent déjà avec la norme énergie totale. Ils ressemblent respectivement aux deuxième (au Sud-Ouest de l'Afrique dans l'océan Atlantique, proche de la zone barocline de l'hémisphère Sud) et cinquième (à l'Est de l'Australie) de l'expérience de référence (figure non montrée). Seul le quatrième (figure 36) est positionné à proximité du cyclone Bill, vers  $20^\circ \text{N}$  et  $40^\circ \text{W}$ , c'est pourquoi nous allons nous y intéresser. C'est la première fois que l'on obtient un vecteur singulier sur ce cyclone.

À la fin de la période d'optimisation, le vecteur singulier s'est légèrement décalé vers l'ouest ( $50^\circ \text{W}$ ), suivant le décalage du minimum de pression, ce qui confirme le bon repérage du cyclone.

Le profil du vecteur singulier centré sur le cyclone (le quatrième) se démarque des autres (cf. figure 37) par une forme bien triangulaire dans les basses couches. C'est le seul à présenter cette forme particulière, et comme on le verra par la suite, on peut identifier les vecteurs singuliers centrés sur un cyclone de cette manière.

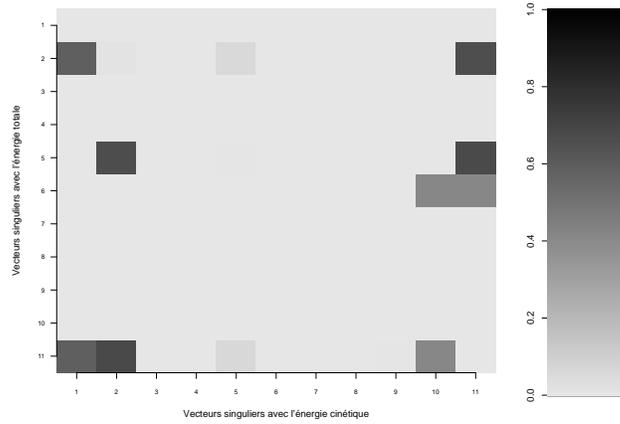


FIG. 35 – Matrice de similarité entre les normes énergie totale et énergie cinétique après 24h dans le modèle linéaire (expériences C2 et D1)

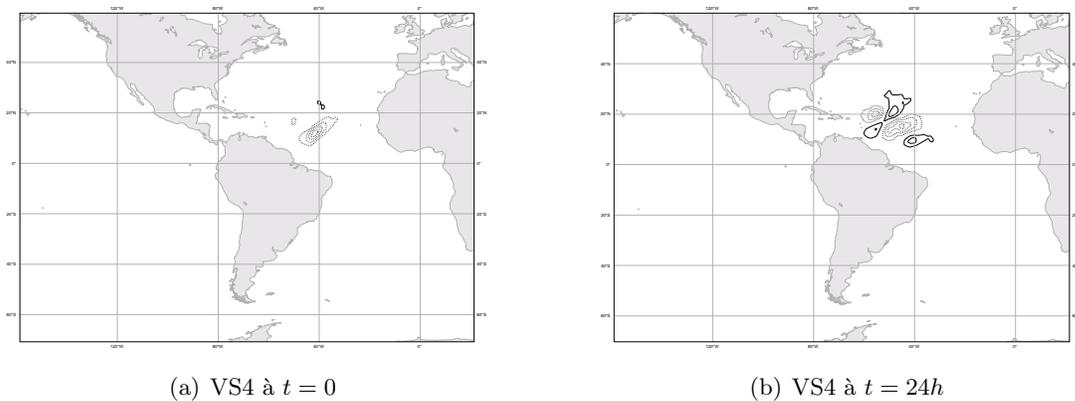


FIG. 36 – Vecteur singulier 4 à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite), au niveau 45 (vers 850 hPa), champ de vent zonal (expérience D1). Même légende que la figure 23.

Parmi les quatre premiers vecteurs singuliers à l'instant initial (figure 38), le quatrième se distingue par un pic plus prononcé autour du nombre d'onde zonal 15. Par ailleurs, tous ces vecteurs ont la plus grande part de leur énergie sous forme de vorticité. On peut même remarquer que pour le vecteur singulier du cyclone de la figure 37 (d), le terme en divergence est encore plus faible que pour les autres vecteurs.

La dispersion affichée sur la figure 39 est très forte dans la zone de Bill, et forte dans la zone barocline au sud de Madagascar. On peut donc en déduire que l'utilisation de cette norme est plutôt satisfaisante pour la prévision d'ensemble, notamment pour quantifier l'incertitude autour du cyclone.

En conclusion de cette expérience, la norme énergie cinétique a apporté des éléments nouveaux : en particulier un des vecteurs singuliers est situé dans la zone du cyclone Bill. Cependant, avant de décider de conserver ou non cette nouvelle norme à disposition sera étudié.

#### 5.4.2 Norme enstrophie : expérience D2

 tant donné qu'à l'intérieur d'un cyclone la vorticité est très importante, l'utilisation d'une norme basée sur l'enstrophie (cf. partie 2.2) paraît judicieux dans notre cas. Dans cette expérience D2,

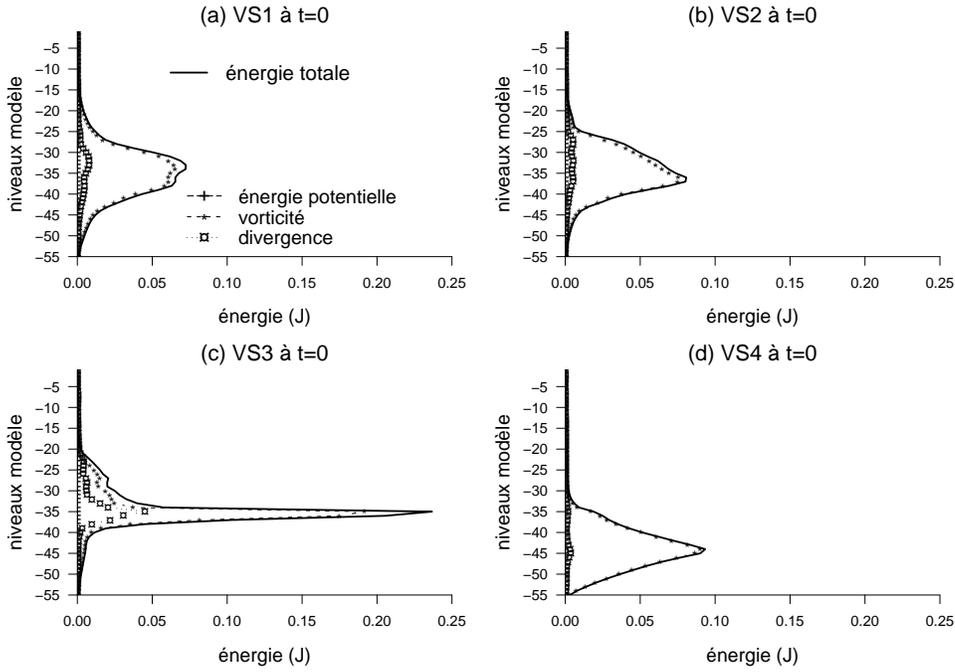


FIG. 37 – Profils verticaux des quatre premiers vecteurs singuliers à l’instant initial : expérience D1

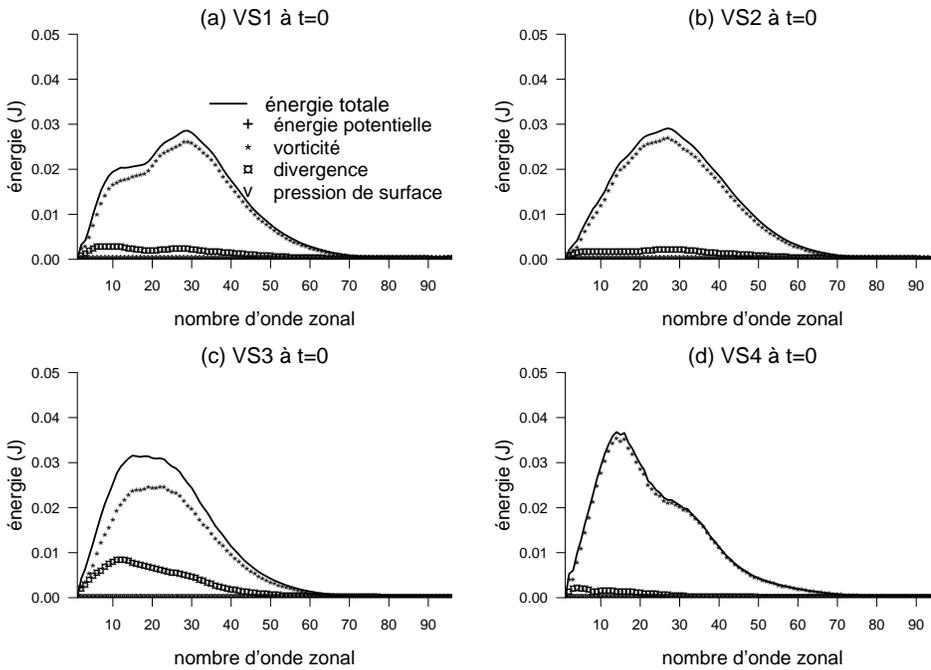


FIG. 38 – Spectres d’énergie des quatre premiers vecteurs singuliers à l’instant initial : expérience D1

on reprend donc les paramètres de l’expérience précédente D1, en changeant uniquement la norme. Cette nouvelle norme présente à première vue quelques difficultés quant à son utilisation pratique. En effet, qualitativement, plus le poids associé à un terme dans la norme est fort, plus le poids de la composante associée dans le vecteur singulier sera faible à l’instant initial et important à l’instant final. En effet, on veut maximiser le rapport  $\frac{E_f}{E_i}$  : en pratique,  $E_f$  est maximisée et  $E_i$  minimisée. De plus, par construction de la norme enstrophie, les phénomènes de grande échelle ont une contribution

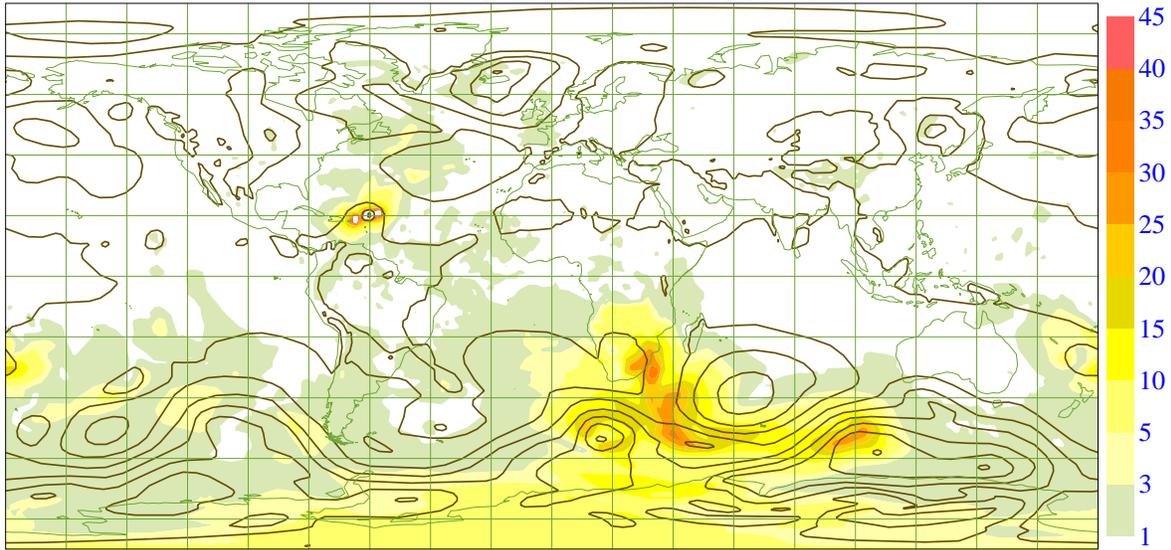


FIG. 39 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 60h (expérience D1)

plus faible en tourbillon que les phénomènes de petite échelle. Pour rappel, le tourbillon vertical s'exprime comme  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ . Ainsi, la norme enstrophie favorise les petites échelles à l'instant final. C'est un résultat intéressant lorsqu'on s'intéresse à un cyclone qui est un phénomène d'échelle assez fine, par comparaison aux ondes de Rossby des moyennes latitudes. Par conséquent, on a limité le calcul des vecteurs singuliers pour les nombres d'onde zonaux supérieurs à 10, afin d'éviter d'avoir des perturbations à l'échelle planétaire.

De plus, l'ordre de grandeur du tourbillon étant de  $10^{-5} m.s^{-1}$ , celui de l'enstrophie est donc de  $10^{-10} m.s^{-1}$  : cet écart pose problème dans l'algorithme itératif qui définit les perturbations initiales. En effet, par convention, les vecteurs singuliers sont normés à 1, et les perturbations doivent être de l'ordre de grandeur de l'écart-type d'erreur d'ébauche  $\sigma^b$ . Le nombre fixé d'itérations de cet algorithme n'est alors plus suffisant pour respecter l'ordre de grandeur de ces perturbations initiales. Un coefficient d'environ  $10^{-5}$  doit donc être appliqué aux vecteurs singuliers, sous peine de faire exploser le modèle.

Le premier vecteur singulier obtenu se situe bien sur le cyclone Bill, comme le montre la figure 40. Les suivants se trouvent partagés entre l'Océan Indien et le cyclone. Sur les profils verticaux (figures 41 (a) et (b)) et les spectres d'énergie (figures 41 (c) et (d)), il n'y a évidemment que le terme en vorticité. Le maximum d'énergie se trouve bien dans les grandes échelles, proche du nombre d'onde zonal 10, ce qui confirme la nécessité de ce filtrage spectral. La structure des vecteurs singuliers dépend ainsi du choix de cette troncature. Pour le premier vecteur, on retrouve la forme triangulaire caractéristique du cyclone.

La figure 42 montre une forte dispersion dans la région du cyclone Bill, et faible dans l'Océan Indien. Cependant, elle reste moins importante que dans l'expérience utilisant la norme énergie cinétique.

En résumé, la norme enstrophie donne de bons résultats en terme de positionnement des vecteurs singuliers et de dispersion, meilleurs que ceux obtenus avec la norme énergie totale. On pourra notamment voir les résultats sur les trajectoires dans la partie 6.1. Toutefois, elle peut encore nécessiter des réglages plus fins, à cause de la sensibilité du coefficient à appliquer. On lui préférera donc pour la suite la norme énergie cinétique.

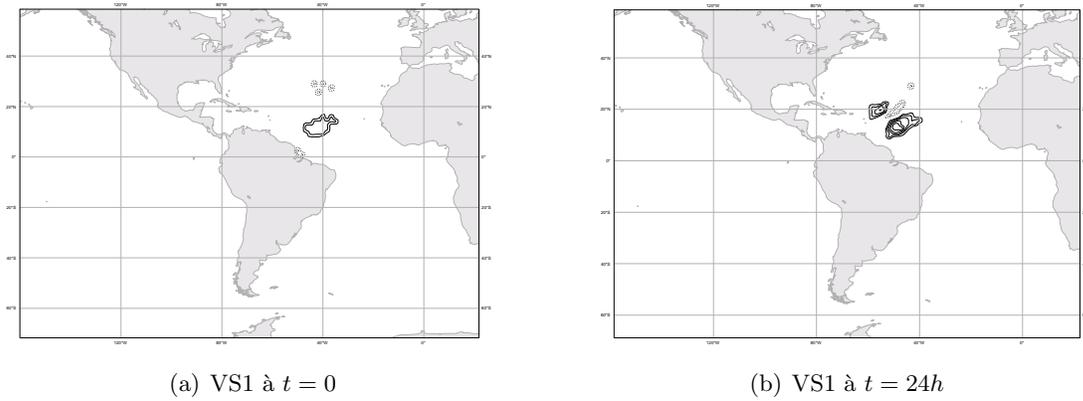


FIG. 40 – Vecteur singulier 1 à l’instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite), au niveau 45 (vers 850 hPa), champ de vent zonal (expérience D2). Valeurs positives en traits pleins, valeurs négatives en tiretés, une isoligne représentant 0.01 K.

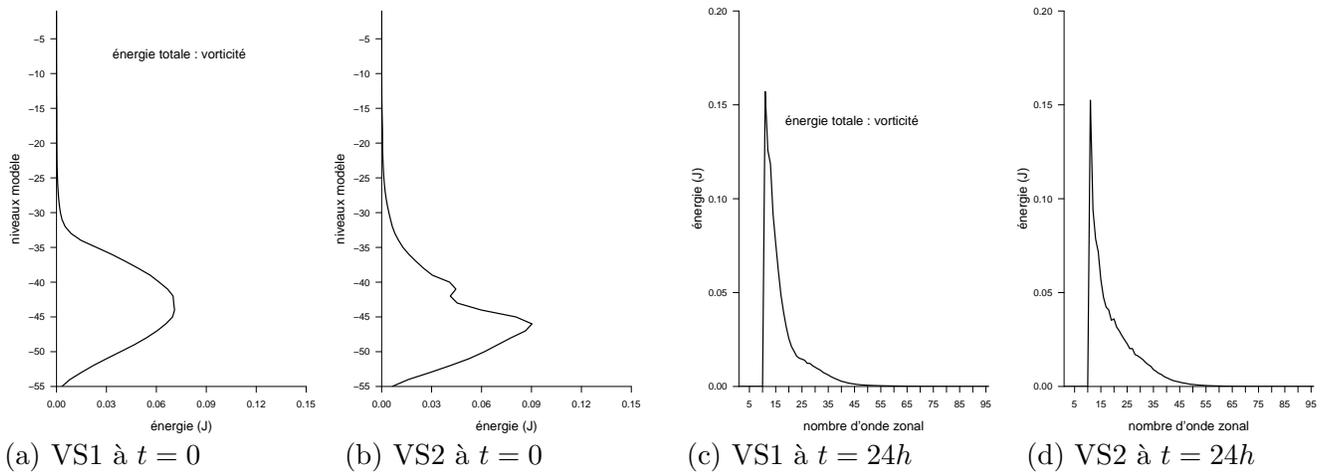


FIG. 41 – Profils verticaux des deux premiers vecteurs singuliers à l’instant initial : expérience D2

## 5.5 Ciblage sur un bassin : expérience E

Même en changeant de norme, plusieurs vecteurs singuliers se trouvent sur des zones moins intéressantes que le cyclone lui-même. Pour remédier à ce problème, nous proposons de définir une zone plus restreinte pour le calcul des vecteurs singuliers. Actuellement dans la PENSE, la zone ”tropiques” s’étend de 30° N à 30° S, et n’a pas de limites en longitude (cela n’exclut pas les perturbations baroclines). Étant donné que les cyclones tropicaux se forment dans certaines régions pendant une période de l’année donnée (cf. Annexe B), on pourrait cibler le calcul des vecteurs singuliers sur chacun des bassins de leur formation, comme le proposait Puri et al. (2001). Pour le cas de Bill, on restreint le calcul au bassin Atlantique, c’est-à-dire entre 0 et 30° N, et entre 0 et 100° W. Pour cette expérience E, la norme énergie cinétique est utilisée, ainsi que le ciblage vertical sur les niveaux 35 à 55.

La figure 43 montre que les deux premiers vecteurs singuliers se sont positionnés sur le cyclone Bill. Celui-ci est donc reconnu comme le lieu où l’amplification des vecteurs singuliers dans le modèle linéaire est la plus forte en vingt-quatre heures. De plus, on retrouve sur les profils verticaux (figure 44) de ces deux vecteurs la forme triangulaire caractéristique déjà repérée sur le quatrième vecteur

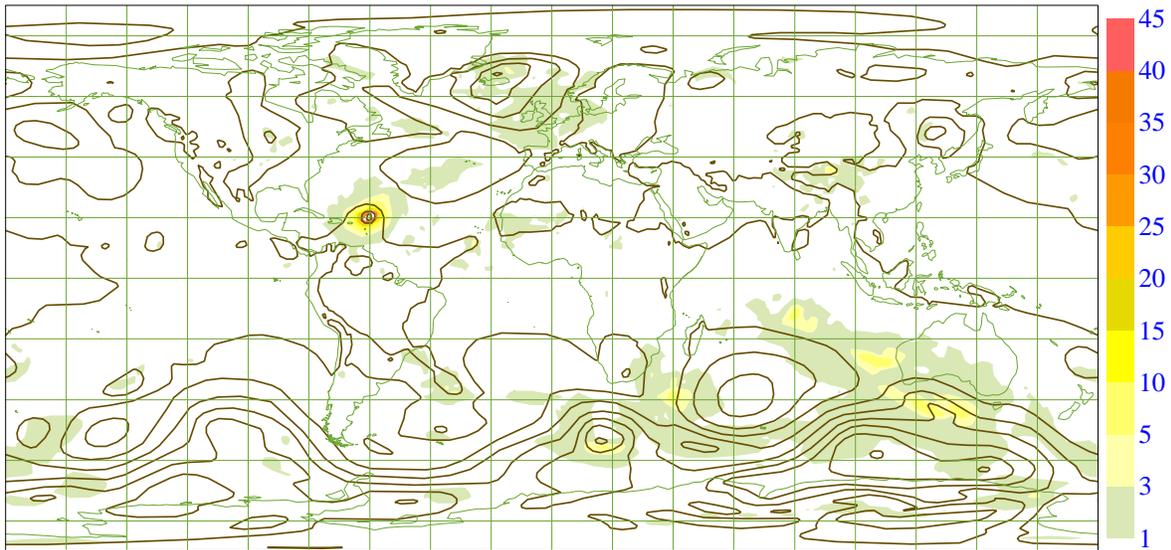
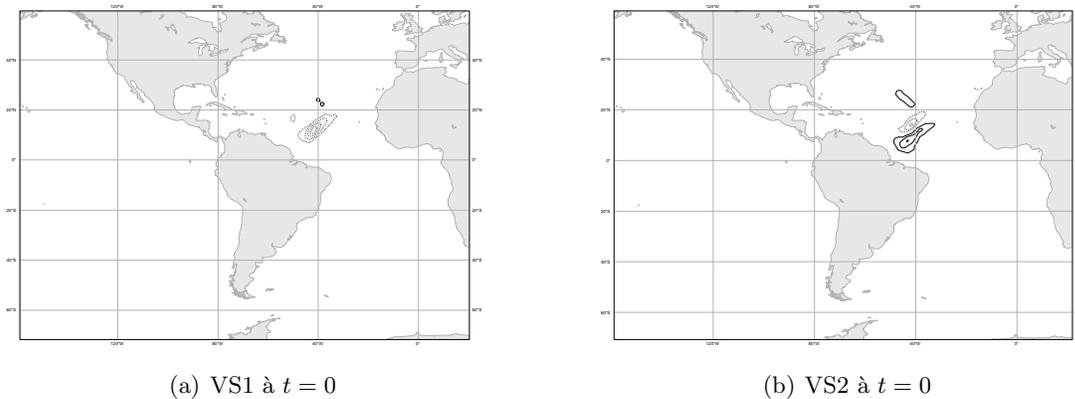


FIG. 42 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 60h (expérience D2)



(a) VS1 à  $t = 0$

(b) VS2 à  $t = 0$

FIG. 43 – Vecteurs singuliers 1 (à gauche) et 2 (à droite) au niveau 43 (vers 800 hPa), champ de vent zonal (expérience E). Même légende que la figure 23.

singulier de l'expérience précédente. La présence des grandes échelles avec un maximum vers le nombre d'onde zonal 15 est confirmée par les spectres de la figure 44.

Les troisième et quatrième vecteurs singuliers apparaissent eux en Afrique de l'Ouest (figure non montrée), repérant ainsi les phénomènes convectifs typiques de cette région. Le cinquième couvre quant à lui une zone plus large, allant du cyclone Bill aux côtes africaines.

La figure 45 compare cette expérience E avec D1 (même norme, même ciblage vertical, mais sans le ciblage géographique). La couleur gris clair dans la dernière ligne met en évidence que les vecteurs singuliers calculés sur le bassin Atlantique sont tous nouveaux, excepté le premier. Ce dernier, centré sur Bill, était bien le quatrième de l'expérience précédente.

Sur la figure 46, on constate que la dispersion se concentre sur la mer des Caraïbes. Elle indique une forte incertitude dans la région du cyclone Bill. Par rapport à la figure 39, la dispersion présente dans la zone barocline au sud de l'Afrique a bien disparu grâce au ciblage géographique.

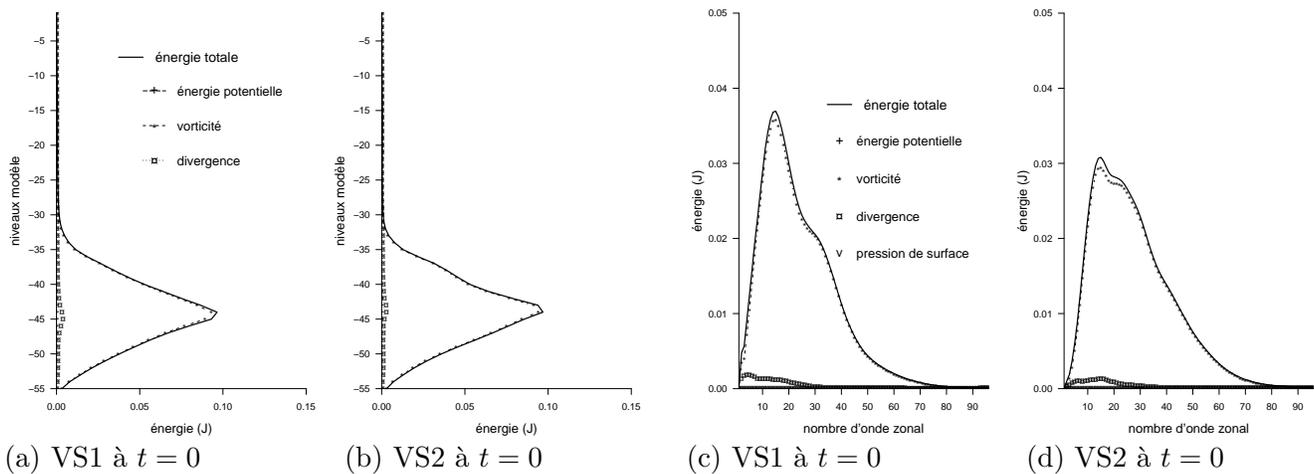


FIG. 44 – Profils verticaux (à gauche) et spectres d'énergie (à droite) des deux premiers vecteurs singuliers à l'instant initial : expérience E

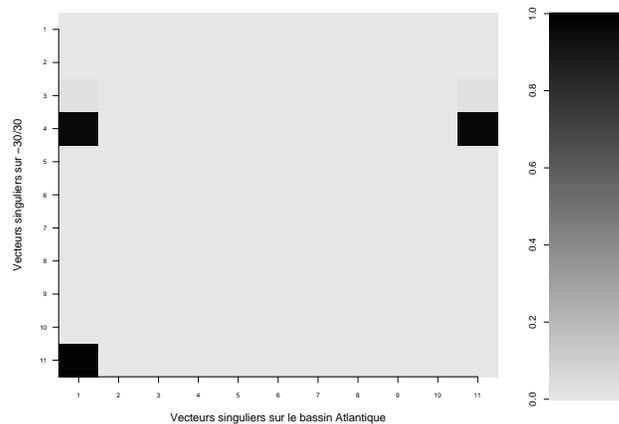


FIG. 45 – Matrice de similarité sur l'influence du ciblage sur un bassin (expériences D1 et E)

Un tel ciblage est donc intéressant pour faire de la prévision d'ensemble sur un cyclone, le centre européen va même encore plus loin en adaptant une petite boîte autour du cyclone une fois qu'il est né. Ici, nous avons montré qu'il n'est pas nécessaire d'aller jusqu'à ce point. Il suffirait de limiter le calcul sur des bassins en fonction de la période de l'année. Cette méthode a l'avantage de ne pas avoir à intervenir dans le code du modèle pour rajouter chaque jour les coordonnées géographiques du cyclone en cours. Cependant, elle augmente tout de même un peu le coût de calcul, puisque qu'il faut faire la recherche de vecteurs singuliers sur plus de zones.

## 5.6 Influence de l'ajout des précipitations de grande échelle

Actuellement dans la PENSE, les processus humides ne sont pas représentés dans le calcul des vecteurs singuliers. Dans cette partie, on étudiera l'impact de l'ajout du schéma de précipitations de grande échelle sur les vecteurs singuliers. Les deux expériences qui suivent ont été réalisées dans le bassin Atlantique, avec un ciblage vertical et avec le schéma de précipitations de grande échelle. L'expérience F1 a été réalisée avec la norme énergie cinétique. Enfin, l'expérience F2 a été réalisée avec la norme totale humide pour mieux prendre en compte les effets de l'humidité. L'expérience avec

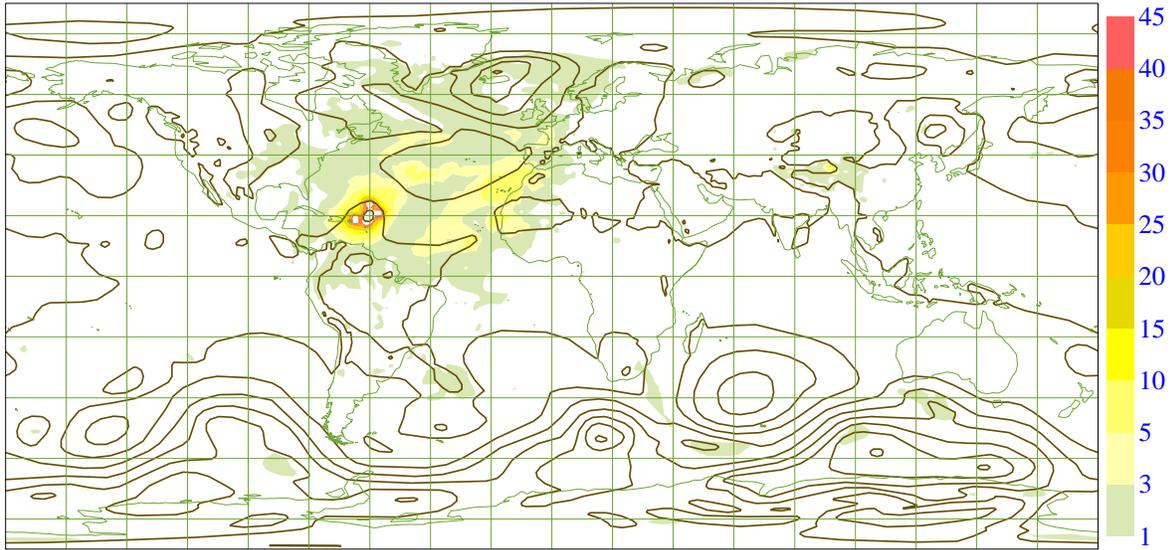


FIG. 46 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 60h (expérience E)

la norme totale sèche (non montrée ici) montre de moins bons résultats.

### 5.6.1 Expérience F1 avec utilisation de la norme énergie cinétique

La figure 47 présente la matrice de similarité entre cette expérience E et l'expérience F1 (cf. tableau 2). La matrice étant très semblable à la matrice identité, l'ajout de ce schéma de précipitations n'a que peu d'influence sur les vecteurs singuliers.

Les vecteurs singuliers présentent donc les mêmes caractéristiques spectrales que les vecteurs singuliers de l'expérience E (non montré) avec un maximum d'énergie pour les nombre d'onde 10 à 20 (vers 1000km de longueur d'onde à une latitude de 10 degrés nord). Les vecteurs singuliers ont également la même répartition géographique.

Les figures 48 et 49 présentent les cartes de dispersion de cette expérience aux échéances 6h et 60h. A 6h, de la dispersion est déjà présente sur une large partie du bassin atlantique comprenant le cyclone, des côtes africaines à la mer des Caraïbes. Il est intéressant de noter que la croissance d'erreur la plus forte se situe au voisinage du cyclone (cf. figure 48).

En conclusion, par rapport à l'expérience E, l'ajout du schéma de précipitations de grande échelle n'est pas utile lorsqu'on travaille avec l'énergie cinétique. Voyons son éventuel apport lorsque la norme énergie totale humide est utilisée.

### 5.6.2 Expérience F2 avec utilisation de la norme énergie totale humide

Jusqu'à présent, la norme utilisée était soit la norme énergie totale sèche, soit la norme énergie cinétique, soit la norme enstrophie. Cette expérience se propose d'étudier l'influence du schéma de précipitations lorsqu'on utilise la norme énergie totale humide. La figure 50 présente les vecteurs singuliers 1 et 4 de cette expérience F2. Aucun des 9 vecteurs singuliers n'est placé sur le cyclone, mais certains, comme le premier, sont situés à proximité des côtes du Venezuela. D'autres, comme le quatrième, sont placés sur l'Afrique de l'ouest. Ces derniers révèlent sans doute une zone convective tropicale marquée.

L'étude des profils et spectres d'énergie (cf. figure 51) est utile pour déterminer leurs caractéristiques.

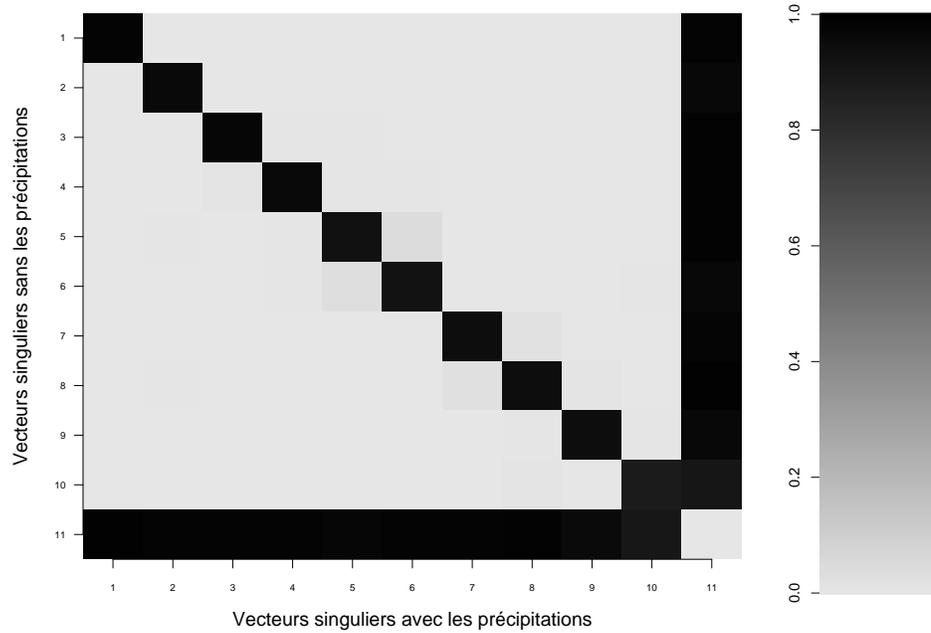


FIG. 47 – Matrice de similarité entre les expériences E et F1

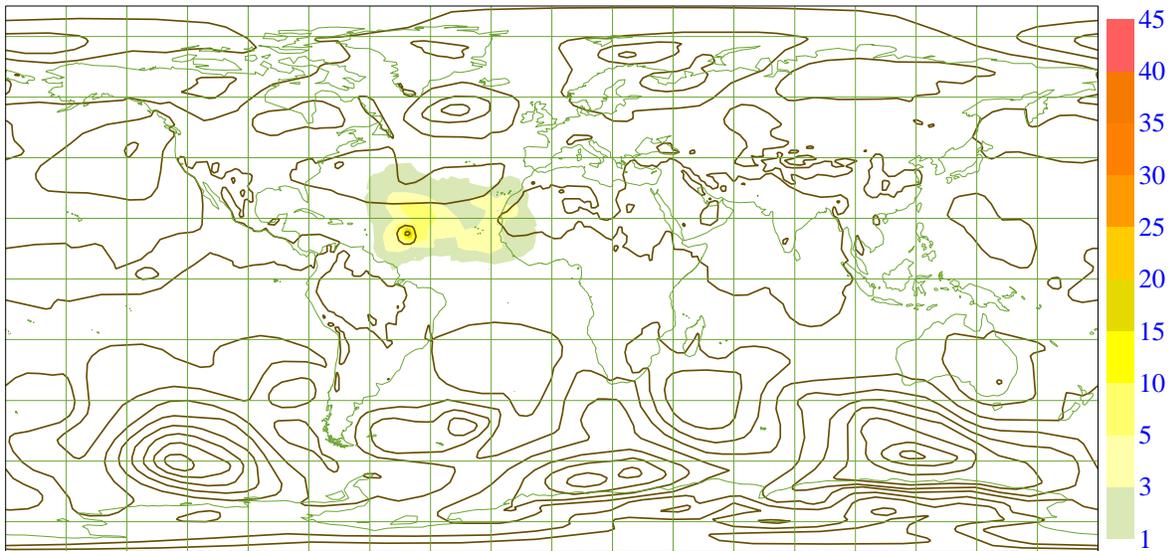


FIG. 48 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 6h (expérience F1).

On constate que le premier est un vecteur assez bas dans la mesure où il concentre son énergie vers le niveau 50 (950hPa). On note de plus une composante non négligeable en humidité. Les deux ont un spectre d'énergie maximal pour un nombre d'onde de 25 (800km).

Les figures 52 et 53 indiquent la dispersion autour de la moyenne de l'ensemble pour le champ de  $P_{mer}$ . Dès 6h (cf. figure 52), celle-ci est déjà présente sur les zones signalées plus haut : au sud du cyclone et à l'ouest de l'Afrique. Si la croissance de la dispersion reste très limitée, de la dispersion est reprise par le cyclone (visible sur la figure 53).

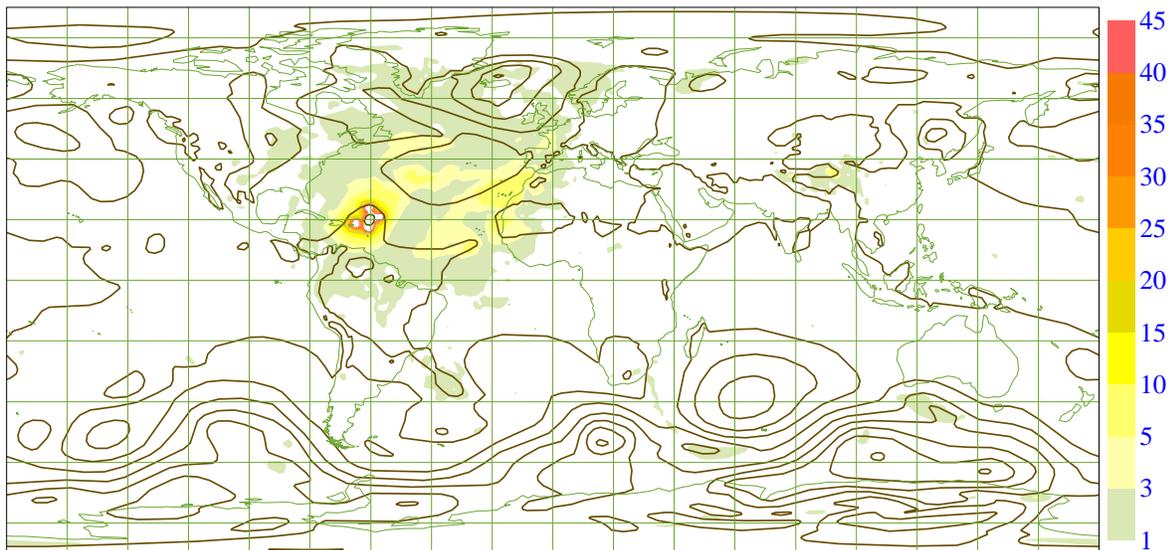


FIG. 49 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 60h (expérience F1).

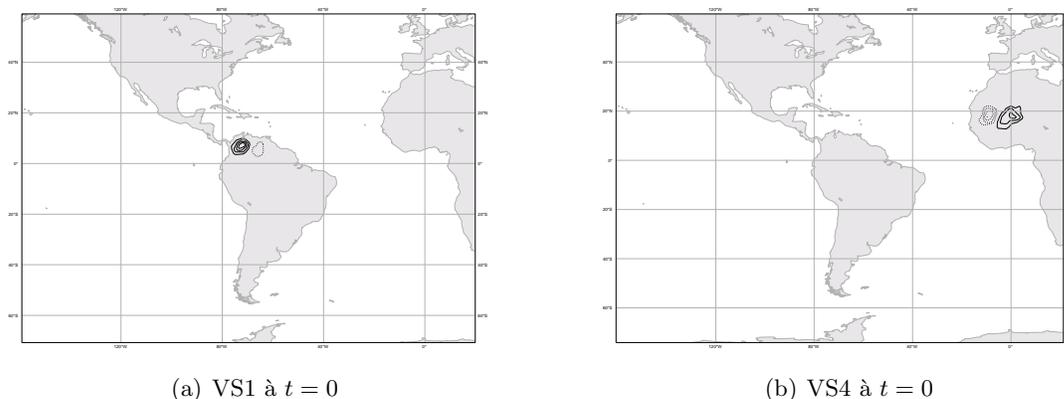


FIG. 50 – Vecteur singulier 1 (à gauche) et 4 (à droite) au niveau 45 (vers 850hPa) : expérience F2. Champ de température. Même légende que la figure 23.

Cette expérience permet également de conclure sur l'effet de la norme énergie totale humide. Pour cela, la même expérience a été réalisée avec la norme énergie totale sèche. Les résultats de cette expérience ne seront pas détaillés ici mais on retiendra néanmoins les points suivants :

- au niveau localisation géographique, tous les vecteurs singuliers de cette expérience sont situés à l'ouest de l'Afrique, un peu comme le quatrième de l'expérience F1 (cf. figure 50). Comme déjà évoqué, cette zone, caractérisée par des températures caniculaires avec plus de  $25^{\circ}C$  à 850hPa, est sans doute affectée par de la convection tropicale intense.
- la carte de dispersion à 60h de cette expérience (non montrée) montre une grande zone de dispersion sur l'ouest de l'Afrique, mais rien autour du cyclone contrairement à celle comprenant le schéma de précipitations.

Ainsi, l'impact de la norme humide est positif puisqu'on obtient des vecteurs singuliers qui se placent sur des endroits affectés par des conditions météorologiques différentes (cyclone, convection

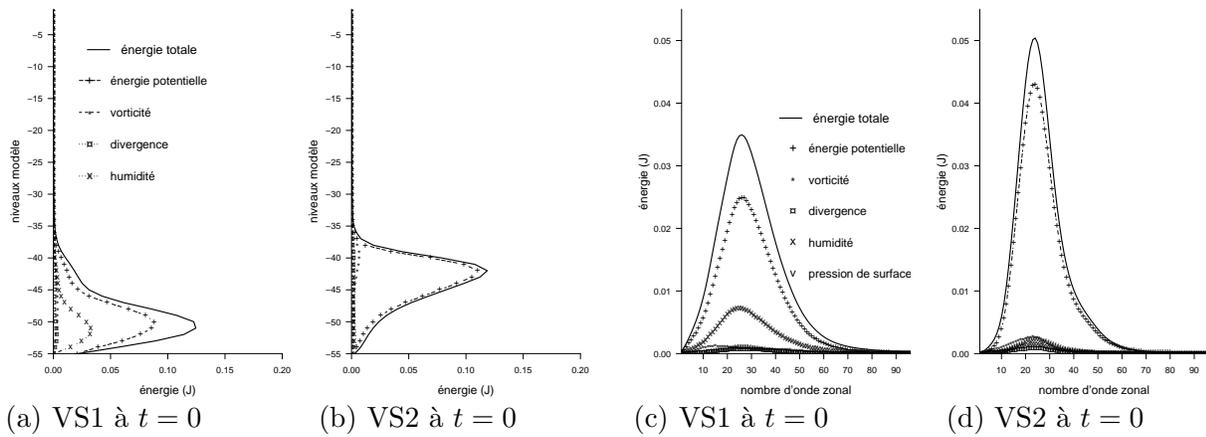


FIG. 51 – Profils verticaux (à gauche) et spectres d'énergie (à droite) des 2 premiers vecteurs singuliers : expérience F2.

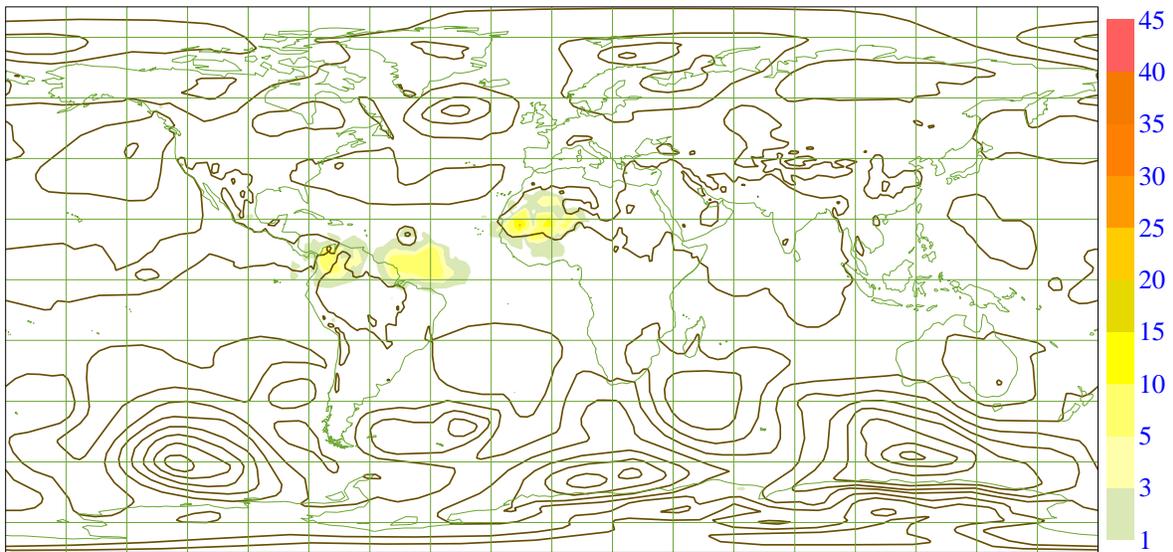


FIG. 52 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 6h (expérience F2)

tropicale). Finalement, les résultats sont moins satisfaisants que ceux obtenus avec la norme énergie cinétique (cf partie 5.5). En effet, si les vecteurs singuliers ne sont jamais très loin du cyclone (en fait, ils ne peuvent être en dehors du bassin atlantique), ils ne permettent pas d'échantillonner l'erreur d'analyse autour du cyclone. En conclusion, dans les tropiques, l'ajout du schéma de précipitations de grande échelle n'est pas pertinent que l'on utilise la norme énergie totale humide ou la norme énergie cinétique.

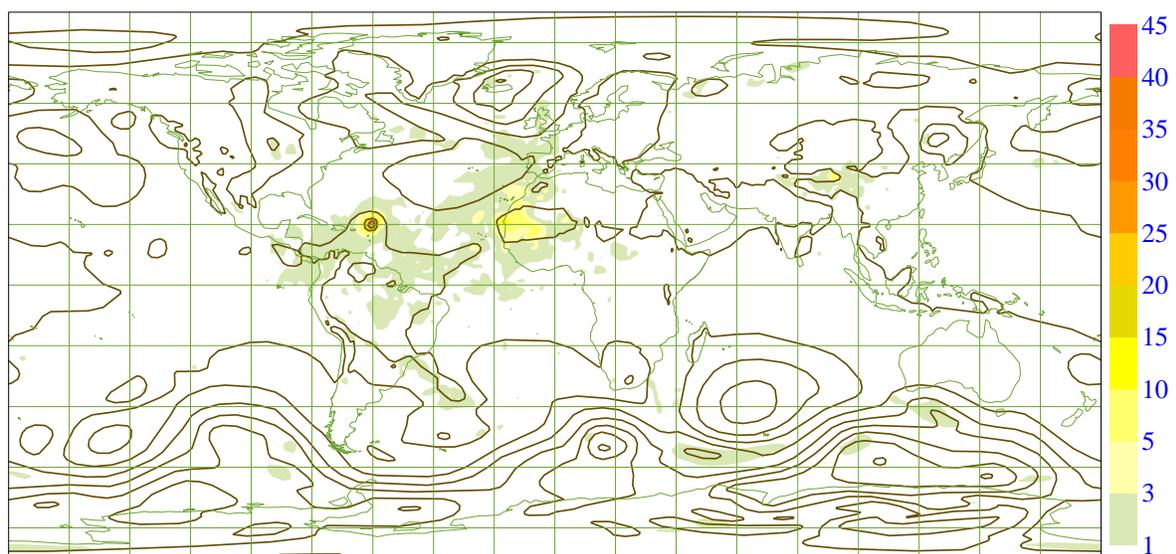


FIG. 53 – Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ  $P_{mer}$  (en hPa) au bout de 60h (expérience F2)

## 6 Etude des trajectoires

Jusqu'à présent, les différentes expériences que nous avons menées utilisaient une combinaison simple de vecteurs singuliers. Ainsi, chaque analyse perturbée était réalisée avec un vecteur singulier (cf. diagramme 3). Dans cette partie, nous testons certaines de nos configurations PENSE avec une combinaison plus complète (cf. diagramme 2) de sorte que chaque analyse perturbée soit réalisée avec une combinaison de tous les vecteurs singuliers. La combinaison qu'on utilise est proche de celle qui fonctionne en opérationnel. L'objectif de cette partie est de visualiser les trajectoires prévues par nos différentes configurations PENSE, et d'interpréter ces résultats. Bien sûr, cela ne constitue en rien une évaluation de notre système de configuration PENSE. Une prévision d'ensemble donne des résultats probabilistes et pour cette raison, tout système de prévision d'ensemble doit être évalué sur un grand nombre de cas.

### 6.1 Trajectoire du cyclone Bill

La figure 54 présente la trajectoire du cyclone Bill prévue issue d'un modèle déterministe. Cette dernière s'accompagne d'un cône d'erreur basé sur des statistiques d'erreur des années précédentes. La figure 18 représente la trajectoire réelle du cyclone Bill. Celle-ci s'inscrit bien dans le cône d'erreur de la figure 54. Les trois expériences qui suivent ont été réalisées avec des prévisions allant jusqu'à 108h.

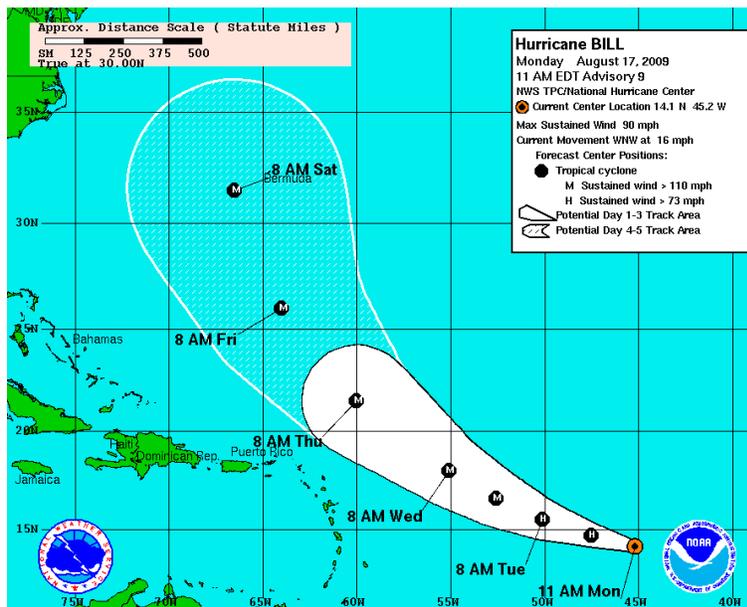


FIG. 54 – Trajectoire du cyclone Bill prévue par le NHC (National Hurricane Center) le 17 août à 15UTC (prévision à 5 jours).

#### 6.1.1 Trajectoires obtenues avec l'expérience de référence (REFT)

La figure 55 présente l'ensemble des trajectoires issues de la configuration PENSE avec l'expérience de référence REFT. On remarque que la prévision déterministe ARPEGE et celle fournie par le NHC est relativement bonne dans le sens où elle ne s'écarte pas trop de ce qui a été observé. Cette dernière est également proche de la prévision déterministe du NHC visible sur la figure 54. Toutefois l'ensemble des prévisions perturbées reste extrêmement proche de la prévision déterministe. La trajectoire observée sort de l'éventail des prévisions au bout de 24h d'échéance. On remarque de plus que l'écart-type fourni

par la PENSE est inférieure à la distance entre la trajectoire prévue et la trajectoire déterministe, ce qui n'est pas satisfaisant.

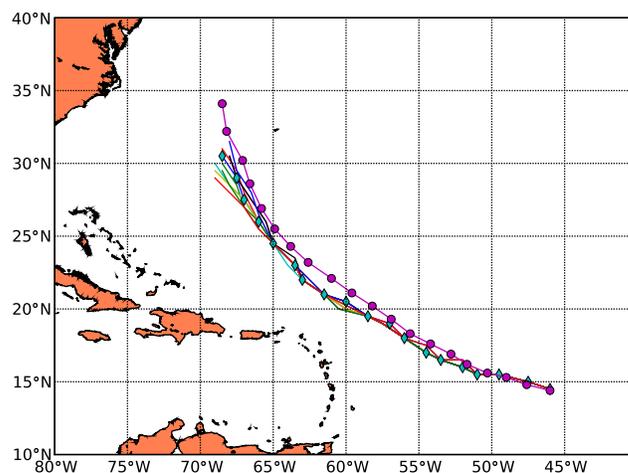


FIG. 55 – Ensemble de trajectoires issues de la configuration PENSE, expérience REFT. En losange, la trajectoire déterministe. En trait plein les dix prévisions perturbées. En cercle, la trajectoire observée. Pas de temps de 6h. Echéance maximale 108h.

### 6.1.2 Trajectoires obtenues avec la norme enstrophie (D2)

La figure 55 présente l'ensemble des trajectoires issues de la configuration PENSE avec l'expérience D2 utilisant la norme enstrophie. L'éventail des trajectoires possibles paraît être bien cohérent avec les résultats du NHC.

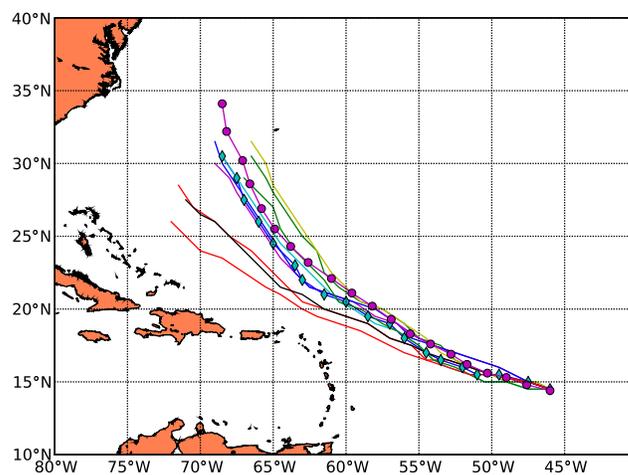


FIG. 56 – Ensemble de trajectoires issues de la configuration PENSE, expérience D2. Même légende que la figure 54.

### 6.1.3 Trajectoires obtenues avec la norme énergie cinétique et le ciblage sur le bassin (F1)

La figure 57 présente l'ensemble des trajectoires issues de la configuration PENSE avec l'expérience E utilisant la norme énergie cinétique. L'éventail des trajectoires possibles est beaucoup plus large et ce dès 24h. Au bout de 48h, plus de 500km séparent les cyclones des deux prévisions les plus éloignées. Contrairement aux informations du NHC (figure 54), on aurait une probabilité loin d'être négligeable (2 sur 10) que le cyclone Bill touche l'arc antillais. La dispersion nous paraît trop importante. Il est possible que sur un grand nombre de cas, cette configuration engendre régulièrement trop de dispersion. Dans ce cas, les trajectoires réelles seront toujours comprises dans l'éventail des prévisions, mais l'information fournie aux prévisionnistes n'est pas assez précise. A titre de comparaison, les trajectoires obtenues avec l'expérience D2 sont plus pertinentes.

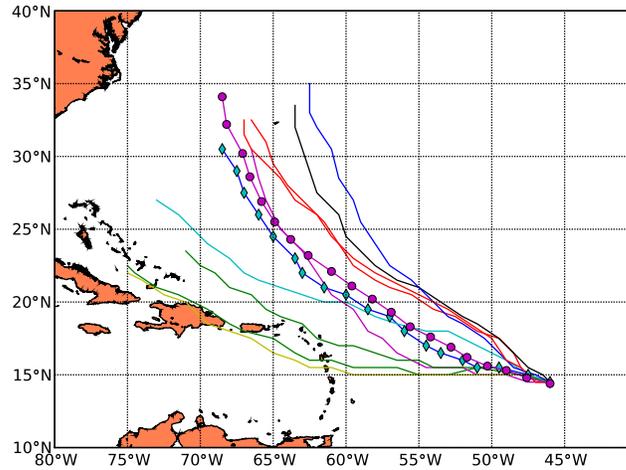


FIG. 57 – Ensemble de trajectoires issues de la configuration PENSE, expérience E. Même légende que la figure 54.

## 6.2 Cas de la tempête Klaus

Dans cette partie, nous présentons les résultats de deux expériences lancées avec la nouvelle combinaison sur la situation du 19 janvier 2009. Comme Klaus n'apparaît sur le champ  $P_{mer}$  que le 22 janvier à 00UTC, il nous a été impossible de réaliser des éventails de trajectoire comme en 6.1. Cependant, nous présentons ici les 10 prévisions perturbées ainsi que la prévision déterministe pour le champ  $P_{mer}$  à l'échéance 108h (24janvier à 6UTC). Ces résultats seront présentés sous forme de vignettes, conformément à ce qui est effectué en météorologie opérationnelle. Cela ne constitue pas une évaluation de la PENSE mais juste une illustration de notre travail.

### 6.2.1 Expérience de référence REF

La figure 58 présente les différentes prévisions pour le champ  $P_{mer}$  pour le 24 janvier 2009 à 6UTC. La prévision déterministe est visible en haut de cette dernière figure. Le placement de la dépression à 108h est très proche de ce qui a été observé avec la tempête Klaus (non montré). Cette dernière est également vue assez creuse (vers 985hPa) et le gradient de pression sur le Sud-Ouest de la France est fort : environ 20hPa pour 500km. Sur les 10 prévisions perturbées de la PENSE, les prévisions 2 et 5 présentent également les caractéristiques d'une tempête sur le Sud-Ouest de la France et la Galice. La potentialité d'une tempête sur le Sud-Ouest de la France est réelle. Les autres membres voient une dépression passer plus au Sud si bien que l'Espagne est concernée par un risque de vents forts dont l'intensité varie suivant les membres. A l'époque, ARPEGE déterministe avait proposé ce même type de scénarios avec le minimum de la dépression vers les Pyrénées (non montré).

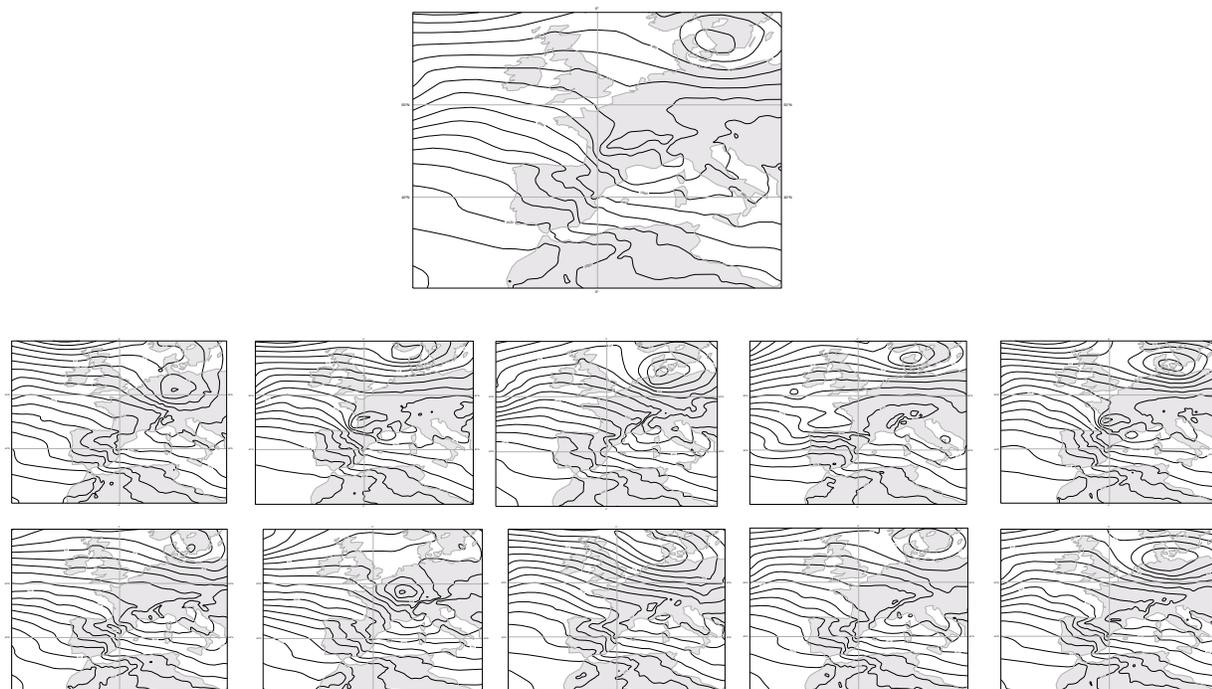


FIG. 58 – Prévisions émises le 19 janvier à 18UTC pour le 24 janvier 2009 à 6UTC. Ensemble PENSE. Expérience REF. Champ  $P_{mer}$ . En haut, prévision déterministe, puis, de gauche à droite les prévisions perturbées de 1 à 10.

### 6.2.2 Expérience B1 avec le schéma de précipitations de grande échelle

La figure 59 présente les différentes prévisions pour le champ  $P_{mer}$  pour le 24 janvier 2009 à 6UTC. Les membres 2 et 8 voient une tempête toucher le Sud-Ouest de la France ainsi que la Galice. Les membres 9 et 10 montrent le passage d'une dépression moins creuse mais affectant la France. Cinq membres voient au minimum un coup de vent affecter l'Espagne.

L'ajout du schéma de précipitations de grande échelle permet, sur ce cas, d'avoir deux membres de plus avec une dépression passant sur le massif central, donc plus proches de ce qui avait été observé.

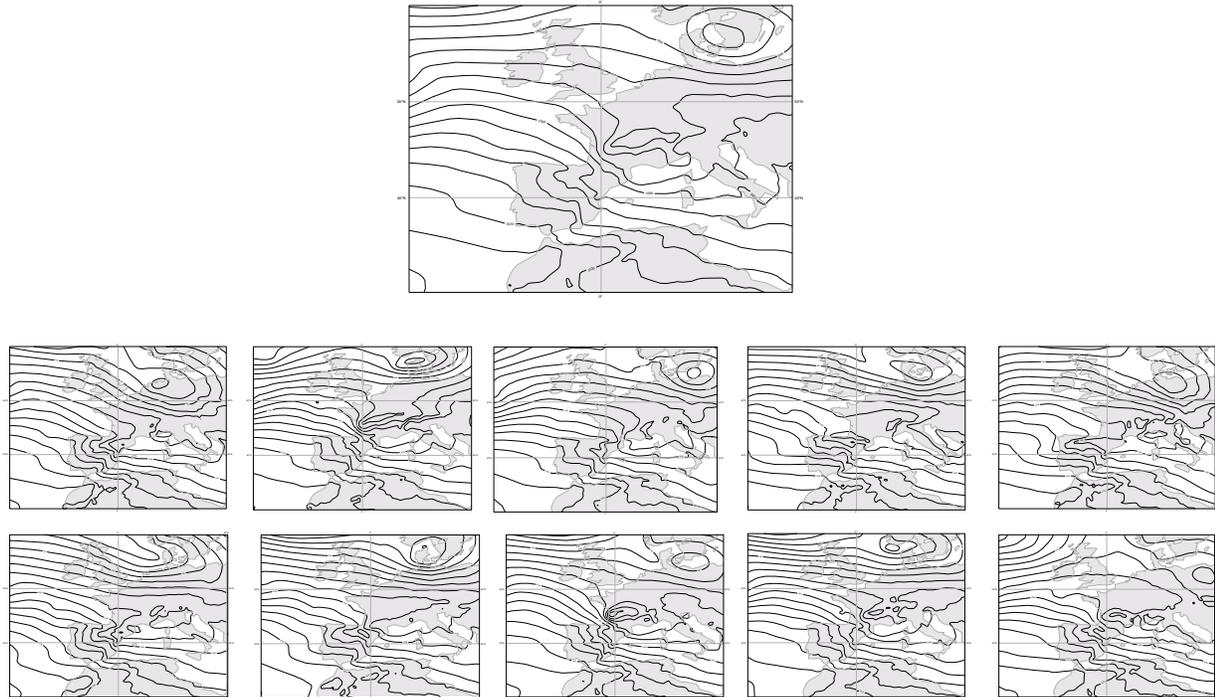


FIG. 59 – Prévisions émises le 19 janvier à 18UTC pour le 24 janvier 2009 à 6UTC. Ensemble PENSE. Expérience B1. Même légende que la figure 58.

## Conclusion et perspectives

Les différentes modifications que nous avons apportées à la PENSE améliorent la quantification de l'incertitude des prévisions.

Aux moyennes latitudes, nous avons montré que la physique de Buizza (1994) était suffisante dans la paramétrisation des processus physiques secs pour le calcul des vecteurs singuliers. La turbulence et les ondes de gravité du 4D-VAR n'apportent pas de modifications. Par contre, la prise en compte des précipitations de grande échelle est pertinente, puisque les prévisions réalisées à partir de ces nouveaux vecteurs amènent de nouvelles informations. L'utilisation d'une norme humide n'est toutefois pas nécessaire.

D'autre part dans les tropiques, l'expérience initiale montrait des vecteurs singuliers non réalistes. Après avoir tenté de résoudre ce problème en modifiant la hauteur de la couche limite, nous avons limité le calcul sur les niveaux inférieurs du modèle, ce qui a permis d'obtenir des vecteurs singuliers physiques. Nos travaux ont également rendu possible le positionnement de ces vecteurs sur le cyclone Bill dans plusieurs configurations, en particulier lors de l'utilisation d'une norme différente (énergie cinétique ou enstrophie). Jusqu'à maintenant ce changement de norme était peu présent dans la littérature. Pourtant, il prouve qu'il n'est pas nécessaire de limiter le calcul précisément autour du cyclone une fois qu'il a été observé (comme le CEPMMT le fait en opérationnel), tout au plus on peut se restreindre aux bassins de formation des cyclones. Enfin, les précipitations de grande échelle n'ajoutent aucune dispersion notable dans les régions tropicales. Cette piste pourra être reprise dans les prochaines mises à jour de la PEARP.

Toutes ces modifications ont un impact réel sur la qualité du système de prévision d'ensemble. Nous aurions aimé pouvoir entreprendre d'autres améliorations, mais par manque de temps, nous ne pouvons que les évoquer ici. Tout d'abord, pour évaluer la qualité de notre version PENSE de prévision d'ensemble, il faudrait pouvoir l'appliquer à d'autres cas, et sur une plus longue période, comme pour toute prévision probabiliste. De plus, nous aurions aimé pouvoir tester d'autres facteurs, comme le temps d'optimisation. Il aurait également été intéressant d'étudier plus en détails les processus physiques de la croissance des vecteurs singuliers, et de rajouter dans leur calcul, la prise en compte de la convection par exemple. Mieux représenter l'humidité est aussi une piste à exploiter dans les tropiques, où elle joue un rôle essentiel. Toutefois, les phénomènes non-linéaires au sein d'un cyclone restent une difficulté. On n'arrive sans doute pas encore à échantillonner toute l'erreur de prévision autour des cyclones.

En outre, il ne faudrait pas oublier que la méthode des vecteurs singuliers n'est pas la seule pour déterminer les vecteurs singuliers, nous pourrions réaliser une étude similaire sur les ensembles d'assimilations (AEARP).

En réalité, ce stage nous a donné un bon aperçu de la manière dont sont menés les travaux au CNRM. Il nous a permis de découvrir les nombreux outils à disposition des chercheurs et des équipes de prévision numérique. Nous avons ainsi travaillé sur les supercalculateurs Yuki et Tori de Météo-France. Ce travail a donc été très enrichissant tant du point de vue humain que scientifique.

## Références

- Barkmeijer, J., R. Buizza, T. Palmer, K. Puri, and J.-F. Mahfouf, 2001 : Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 685–708.
- Buizza, R., 1994 : Sensitivity of optimal unstable structures. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **120**, 429–451.
- Coutinho, M. M., B. J. Hoskins, and R. Buizza, 2004 : The influence of physical processes on extratropical singular vectors. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 195–209.
- Descamps, L., 2007 : Définition des conditions initiales des prévisions d'ensemble. liens avec l'assimilation de données., Ph.D. thesis, Université Paris VI.
- Puri, K., J. Barkmeijer, and T. Palmer, 2001 : Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 709–731.
- Rivière, O., 2007 : Prévisibilité de l'écoulement atmosphérique aux échelles synoptiques : influence des non-linéarités et de l'humidité, Ph.D. thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées.

## Glossaire

### 4D-VAR

Assimilation VARIationnelle 4D

### AEARP

Assimilation d'Ensemble ARPEGE

### ARPEGE

Application de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

### CEPMMT

Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme

### CNRM

Centre National de Recherches Météorologiques

### ECT

Energie Cinétique Turbulente

### ENM

Ecole Nationale de la Météorologie

### GMAP

Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision

### NCEP

National Centers for Environmental Prediction

### NHC

National Hurricanes Center

### $P_{mer}$

Pression Réduite au niveau de la mer

### PEARP

Prévision d'Ensemble ARPEGE

### PENSE

Prévision d'ENSEmble Expérimentale

### PI

Perturbation Initiale

### VS

Vecteur singulier

## Liste des tableaux

1	Tableau résumant les caractéristiques de chaque expérience dans les moyennes latitudes (ET : énergie totale (sèche), ETH : énergie totale humide) . . . . .	14
2	Tableau résumant les caractéristiques de chaque expérience dans les tropiques (ET : énergie totale (sèche), ETH : énergie totale humide, EC : énergie cinétique, ENS : enstrophie) . . . . .	23
3	Période de formation des cyclones selon le bassin . . . . .	ii

## Table des figures

1	Zones de calcul des vecteurs singuliers (EDA : Ensemble Data Assimilation, SV : Vecteur Singulier) . . . . .	6
2	Diagrammes des différentes étapes de calcul de la PENSE . . . . .	7
3	Diagrammes des différentes étapes de calcul de la PENSE pour l'étude dans les tropiques (même principe pour les moyennes latitudes, en remplaçant Tropiques par Europe Atlantique) . . . . .	12
4	Analyse ARPEGE du champ de pression réduite au niveau de la mer ( $P_{mer}$ ) le 19 janvier 2009 à 18h UTC . . . . .	15
5	Vecteurs singuliers 1 (à gauche) au niveau 44 (vers 850hPa) et 2 (à droite) au niveau 29 (vers 320hPa) à l'instant initial, champ de température. Valeurs positives en traits pleins, valeurs négatives en tiretés, une isoligne égale à 0.03K. . . . .	15
6	Analyse ARPEGE du champ de vent zonal le 19 janvier 2009 à 18h UTC au niveau modèle 30 (environ 10km) seuillé à 50m/s. Une isoligne égale à 6m/s . . . . .	16
7	Profils verticaux des deux premiers vecteurs singuliers à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite). . . . .	16
8	Taux d'amplification en fonction du numéro des vecteurs singuliers de la zone Europe Atlantique (expérience REF) . . . . .	17
9	Spectres des deux premiers vecteurs singuliers à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REF . . . . .	17
10	Evolution dans le modèle linéaire des vecteurs singuliers 1 (à gauche) niveau 44 (environ 800hPa) et 2 (à droite) niveau 30 (environ 350hPa) au bout de 24h, champ de température, expérience REF. Même légende que la figure 5 . . . . .	18
11	Vecteur singulier 1 à l'instant initial, niveau 1 (60km environ), champ de température, expérience A. Même légende que la figure 5 . . . . .	19
12	Matrice de similarité entre les vecteurs issus de Buizza et ceux de la physique simplifiée du 4D-VAR à l'instant initial (expériences REF et A) . . . . .	19
13	Profil vertical d'énergie du premier vecteur par niveau modèle (à gauche) et son spectre d'énergie (à droite) à l'instant initial . . . . .	19
14	Matrice de similarité entre les vecteurs issus de Buizza et ceux de la physique simplifiée avec les précipitations de grande échelle à l'instant initial (expériences REF et B1) . . . . .	20
15	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ de géopotentiel à 500hPa (en mgp) au bout de 60h pour l'expérience REF . . . . .	21
16	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ de géopotentiel à 500hPa (en mgp) au bout de 60h pour l'expérience B1 . . . . .	22
17	Matrice de similarité entre les vecteurs issus des expériences B1 et B2 à l'instant initial . . . . .	22
18	Trajectoire du cyclone Bill du 15 au 24 août 2009 . . . . .	23

19	Analyse ARPEGE de la pression réduite au niveau de la mer du 17 août 2009 à 18h (expérience REFT). Une isoligne représente 5hPa. Sur l'agrandissement, une isoligne représente 2hPa. . . . .	24
20	Taux d'amplification pour chaque vecteur singulier (expérience REFT) . . . . .	25
21	Profils verticaux d'énergie des vecteurs singuliers 1 et 2 à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REFT . . . . .	25
22	Spectres d'énergie des vecteurs singuliers 1 et 2 à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REFT . . . . .	26
23	Vecteur singulier 1 au niveau 25 (vers 250hPa), à l'état initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REFT. Champ de température. Valeurs positives en traits pleins, valeurs négatives en tiretés, une isoligne représentant 0.05K. . . . .	26
24	Vecteur singulier 3 au niveau 20 (vers 200hPa) à l'état initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) : expérience REFT. Même légende que la figure 23. . . . .	27
25	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 6h (expérience REFT). . . . .	27
26	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 60h (expérience REFT). . . . .	28
27	Matrice de similarité entre l'expérience REFT (avec $h_0 = 1000m$ ) et l'expérience C1 (avec $h_0 = 4000m$ ) . . . . .	29
28	Profils verticaux d'énergie en fonction des niveaux modèle du premier et du septième vecteur singulier (expérience C1). À gauche, à l'instant initial, à droite à l'instant final. . . . .	29
29	Spectres d'énergie en fonction des niveaux modèle du premier et du septième vecteur singulier (expérience C1). À gauche, à l'instant initial, à droite à l'instant final. . . . .	30
30	Vecteur singulier 1 à l'état initial au niveau 42 (vers 750hPa), champ de température (expérience C1). Même légende que la figure 23. . . . .	30
31	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 60h (expérience C1). . . . .	31
32	Vecteur singulier 1 à l'état initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite) au niveau 35 (vers 500hPa) : expérience C2, champ de température. Même légende que la figure 23. . . . .	31
33	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 60h (expérience C2). . . . .	32
34	Profil vertical (à gauche) et spectre (à droite) d'énergie du premier vecteur singulier à l'instant initial : expérience C2. . . . .	32
35	Matrice de similarité entre les normes énergie totale et énergie cinétique après 24h dans le modèle linéaire (expériences C2 et D1) . . . . .	33
36	Vecteur singulier 4 à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite), au niveau 45 (vers 850 hPa), champ de vent zonal (expérience D1). Même légende que la figure 23. . . . .	33
37	Profils verticaux des quatre premiers vecteurs singuliers à l'instant initial : expérience D1	34
38	Spectres d'énergie des quatre premiers vecteurs singuliers à l'instant initial : expérience D1 . . . . .	34
39	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 60h (expérience D1) . . . . .	35
40	Vecteur singulier 1 à l'instant initial (à gauche) et après 24h dans le modèle linéaire (à droite), au niveau 45 (vers 850 hPa), champ de vent zonal (expérience D2). Valeurs positives en traits pleins, valeurs négatives en tiretés, une isoligne représentant 0.01 K. . . . .	36
41	Profils verticaux des deux premiers vecteurs singuliers à l'instant initial : expérience D2	36

42	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 60h (expérience D2) . . . . .	37
43	Vecteurs singuliers 1 (à gauche) et 2 (à droite) au niveau 43 (vers 800 hPa), champ de vent zonal (expérience E). Même légende que la figure 23. . . . .	37
44	Profils verticaux (à gauche) et spectres d'énergie (à droite) des deux premiers vecteurs singuliers à l'instant initial : expérience E . . . . .	38
45	Matrice de similarité sur l'influence du ciblage sur un bassin (expériences D1 et E) . .	38
46	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 60h (expérience E) . . . . .	39
47	Matrice de similarité entre les expériences E et F1 . . . . .	40
48	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 6h (expérience F1). . . . .	40
49	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 60h (expérience F1). . . . .	41
50	Vecteur singulier 1 (à gauche) et 4 (à droite) au niveau 45 (vers 850hPa) : expérience F2. Champ de température. Même légende que la figure 23. . . . .	41
51	Profils verticaux (à gauche) et spectres d'énergie (à droite) des 2 premiers vecteurs singuliers : expérience F2. . . . .	42
52	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 6h (expérience F2) . . . . .	42
53	Moyenne de l'ensemble et dispersion pour le champ $P_{mer}$ (en hPa) au bout de 60h (expérience F2) . . . . .	43
54	Trajectoire du cyclone Bill prévue par le NHC (National Hurricane Center) le 17 août à 15UTC (prévision à 5 jours). . . . .	44
55	Ensemble de trajectoires issues de la configuration PENSE, expérience REFT. En losange, la trajectoire déterministe. En trait plein les dix prévisions perturbées. En cercle, la trajectoire observée. Pas de temps de 6h. Echéance maximale 108h. . . . .	45
56	Ensemble de trajectoires issues de la configuration PENSE, expérience D2. Même légende que la figure 54. . . . .	45
57	Ensemble de trajectoires issues de la configuration PENSE, expérience E. Même légende que la figure 54. . . . .	46
58	Prévisions émises le 19 janvier à 18UTC pour le 24 janvier 2009 à 6UTC. Ensemble PENSE. Expérience REF. Champ $P_{mer}$ . En haut, prévision déterministe, puis, de gauche à droite les prévisions perturbées de 1 à 10. . . . .	47
59	Prévisions émises le 19 janvier à 18UTC pour le 24 janvier 2009 à 6UTC. Ensemble PENSE. Expérience B1. Même légende que la figure 58. . . . .	48
60	Correspondance entre les niveaux verticaux du modèle et l'altitude pour l'atmosphère standard . . . . .	i
61	Carte des différents bassins de formation des cyclones dans le monde . . . . .	ii

## Annexes

## A - Niveaux verticaux du modèle

Niveau	Altitude (en m)	Niveau	Altitude (en m)
55	17.08235545362124	27	9551.835609532489
54	63.69565885080517	26	9990.104744688675
53	138.5047695265949	25	10424.80000984882
52	241.8087062273709	24	10861.69435905278
51	369.4957998136884	23	11308.71706252179
50	520.0380955992516	22	11777.45851368031
49	692.8073001819316	21	12276.21148653572
48	887.6987105030079	20	12813.18214637324
47	1104.987474824658	19	13396.54117860132
46	1345.268385070540	18	14034.20399975066
45	1606.731545458221	17	14733.59980872474
44	1888.053052968527	16	15501.38034740139
43	2193.712573570283	15	16342.99310331222
42	2529.175071637039	14	17262.00304262522
41	2896.798819863753	13	18258.97449188695
40	3296.494070161094	12	19329.62715827354
39	3726.266998517127	11	20469.20312083384
38	4182.667886007323	10	21687.08600059100
37	4661.169939090937	9	22997.61553997514
36	5156.507564475060	8	24414.60010014789
35	5662.995968572580	7	25954.88206589581
34	6174.853831063861	6	27656.00396561406
33	6686.529669557388	5	29590.34833711661
32	7193.046228015458	4	31870.49985639358
31	7690.316748154023	3	34748.68211958089
30	8175.488223061085	2	38957.55548655495
29	8647.104495763888	1	47794.54167635048
28	9105.283751883964		

FIG. 60 – Correspondance entre les niveaux verticaux du modèle et l'altitude pour l'atmosphère standard

## B - Bassins cycloniques du monde

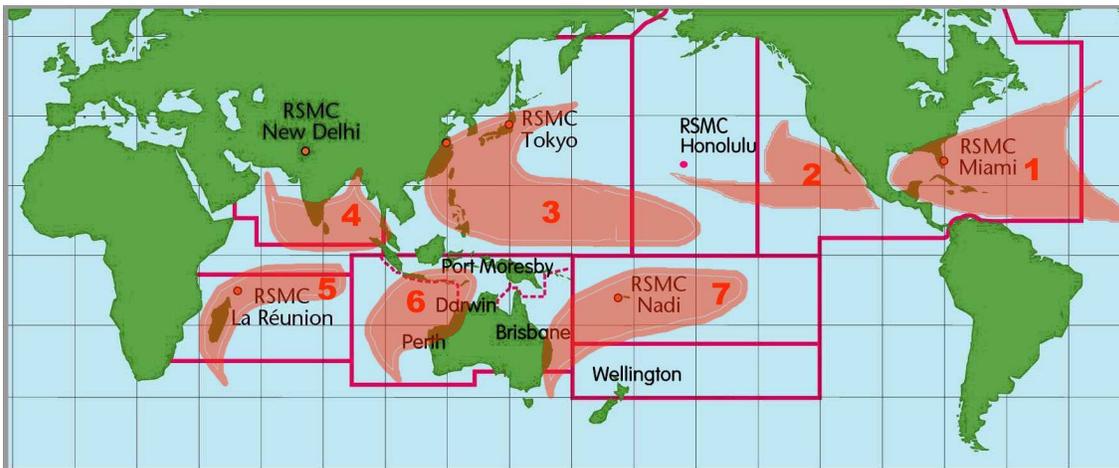


FIG. 61 – Carte des différents bassins de formation des cyclones dans le monde

Bassin	Début	Fin
1 - Océan Atlantique	Juin	Novembre
2 - Océan Pacifique Nord-Est	Mai	Novembre
3 - Océan Pacifique Nord-Ouest	Avril	Janvier
4 - Océan Indien Nord	Avril	Décembre
5 - Océan Indien Ouest	Octobre	Mai
6 - Océan Indien Sud-Est	Octobre	Mai
7 - Océan Pacifique Sud-Ouest	Octobre	Mai

TAB. 3 – Période de formation des cyclones selon le bassin