

**RAPPORT DE STAGE**

**Discipline: Météorologie Dynamique**

**TESTS DE SENSIBILITE DU PROTOTYPE AROME**



**Présenté par: Dalila Saadaoui  
Encadrée par: Yann Seity**

Soutenu le 31 Mars 2005 à Toulouse

*A la mémoire de mon père*

### **Remerciements**

Je tiens à remercier vivement Mr Yann Seity, pour son dévouement au travail et sa gentillesse sans faille. Il a su me transmettre son enthousiasme, son soutien m'a été précieux.

Un grand merci à Mr Joel Hoffman, qui m' a permis de pouvoir suivre cette formation et approfondir mes connaissances dans les différents domaines de la météorologie, qu'il puisse trouver ici ma gratitude pour sa disponibilité le long de ces six mois passés à l'école de météorologie de Toulouse.

Un remerciement particulier à Mr Ahmed. Lagha, qui m'a offert cette occasion de venir ici à Toulouse.

Je n'oublie pas de remercier toute l'équipe du GMAP pour son accueil chaleureux.

Un grand merci pour tous ceux qui m'ont soutenu le long de ces six mois.

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
1.1	La dynamique d'ALADIN-NH .....	5
1.2	La physique de Méso-NH : .....	5
<b>2</b>	<b>PRESENTATION DU SUJET :.....</b>	<b>7</b>
2.1	Contexte du Travail:.....	7
2.2	Objectifs et Méthodologie:.....	7
<b>3</b>	<b>ETUDE TECHNIQUE :.....</b>	<b>7</b>
3.1	Fonctionnement du modèle : .....	7
3.2	Les caractéristiques du modèle:.....	7
3.3	Les étapes pour réaliser une expérience numérique : .....	8
3.4	Schéma technique d'AROME : .....	9
<b>4</b>	<b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE : .....</b>	<b>9</b>
4.1	Les systèmes convectifs de méso-échelle (MCS):.....	9
4.2	Les hydrométéores:.....	12
<b>5</b>	<b>SIMULATION ET ANALYSE:.....</b>	<b>14</b>
5.1	Première partie : Cas académique 2D.....	14
5.2	Deuxième partie : Cas réel 3D:.....	30
<b>6</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>34</b>

## RESUME

L'objectif de ce stage est de tester la sensibilité d'AROME aux grands pas de temps d'intégration, à la résolution verticale et à la diffusion horizontale. Cela consiste à comparer les différentes simulations AROME, avec celles faites avec le modèle de recherche MESONH.

Notre travail s'est porté initialement sur la simulation d'un cas académique 2D de ligne de grains, en utilisant des pas de temps allant de 7.5s à 60s, pour 46 niveaux verticaux au début, puis pour 92 niveaux. Nous avons utilisé le schéma de diffusion horizontale standard pour les premiers tests, et ensuite testé le nouveau schéma de diffusion SLHD (Semi Lagrangien Horizontal Diffusion).

En dernier lieu, une simulation 3D d'un cas réel sur le cas des inondations du Gard a été effectuée.

## 1 INTRODUCTION

L'augmentation de la puissance des supercalculateurs, conjointement aux progrès réalisés dans la compréhension des phénomènes atmosphérique de fine échelle permettent aujourd'hui d'envisager la prévision numérique opérationnelle à 2-3km. Les bons résultats obtenus par le modèle Méso-NH dans la simulation de la convection, a poussé les chercheurs du CNRM (GMME/GMAP) à faire converger leurs progrès vers un projet de développement de système d'assimilation et de prévision qu'ils ont appelé AROME (Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso Echelle).

Un tel modèle doit avoir un noyau dynamique non hydrostatique, puisqu'il vise les phénomènes de petites échelles.

Un autre modèle opérationnel Aladin non hydrostatique (Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Développement International) a déjà prouvé son efficacité pour les grands pas de temps.

La dynamique d'Aladin, ainsi que la physique du modèle Méso-NH ont été retenues pour bâtir AROME.

### 1.1 La dynamique d'ALADIN-NH

Aladin-NH modèle non hydrostatique, compressible est une extension d'Aladin, version hydrostatique. De résolution 10km, Aladin hydrostatique est lui-même une adaptation d'Arpège (23km de résolution) qui recouvre l'Europe de l'Ouest dans un carré de 2800km de côté centré sur la France. Arpège et Aladin partagent la même dynamique et la même paramétrisation physique. L'état initial d'ALADIN ainsi que les conditions aux limites sont obtenues à partir des champs ARPEGE. Aladin France a une résolution horizontale de 10km, et sa grille verticale, étirée afin d'avoir une meilleure description des basses couches de l'atmosphère, possède 41 niveaux de résolution. Avec un pas de temps de 7mn, il permet de fournir opérationnellement des prévisions météorologiques sur deux jours, à moyenne échelle sur l'Europe de l'ouest. Aladin-NH a été développé pour les résolutions horizontales de quelques km, pour lesquelles l'approximation hydrostatique n'est plus valide. Il basé sur un schéma d'intégration semi-implicite, semi-lagrangien, qui permet d'utiliser des pas de temps longs sans dégrader les résultats de la simulation.

### 1.2 La physique de Méso-NH:

Méso-NH est un modèle anélastique, non-hydrostatique, couvrant une gamme d'échelle étendue 1m à 100km. Développé, en 1993, en coopération par le CNRM et le Laboratoire

d'Aérologie de Toulouse. Il est doté d'une représentation très avancée de la physique et d'un module de chimie. Il est fondé sur le système d'Euler dérivé du système Navier Stocks. Meso-NH, utilise un filtrage théorique des ondes sonores par approximation de l'équation de continuité: approximation anélastique. Les contraintes de stabilité du schéma Eulérien lui imposent un pas de temps plus petit que celui d'Aladin.

Le modèle AROME intègre six équations d'évolution temporelle pour mieux représenter les processus microphysiques au sein des nuages. Ainsi, en plus de la vapeur d'eau, l'eau liquide nuageuse, l'eau liquide précipitante, la glace primaire, le grésil et les graupels sont les catégories d'hydrométéores que simulera le modèle, permettant par exemple de représenter à la fois les processus de givrage au sein des cellules convectives et les processus d'agrégation dans zones de précipitations stratiformes associées aux systèmes convectifs.

Donc AROME diffère:

- physiquement d'Aladin-NH par l'ajout de ces nouvelles variables pronostiques; la micro-physique, qui sont ces cinq sortes d'eau condensée (l'eau liquide nuageuse non précipitante, l'eau liquide précipitante, la glace, la neige et les graupels), et l'énergie cinétique turbulente.
- dynamiquement de Méso-NH par le schéma d'advection semi-lagrangien, discrétisation temporelle semi-implicite, qui lui permettent de rester stable avec des pas de temps beaucoup plus long, et donc de réduire son coût en temps de calcul.

Voici, donc présenté le contexte dans lequel s'est déroulé mon travail, qui a joint le grand projet AROME, (qui sera opérationnel en 2008, et déjà engagé sous la forme d'un prototype qu'il faut améliorer et optimiser), et le modèle de recherche Meso-NH qui déjà a prouvé son efficacité de simulation des phénomènes atmosphériques sur une très large gamme de résolution, allant de la mesoéchelle (100km) à la microéchelle (quelques mètres).

## Chapitre I

### 2 PRESENTATION DU SUJET:

#### 2.1 Contexte du Travail:

AROME, future modèle opérationnel sur la France en 2008, est un modèle non hydrostatique à résolution 2.5km. Il est basé sur la dynamique d'Aladin –NH, et sur la physique de Méso-NH. Le prototype AROME, développé en 2004 par GMAP/GMME sur une version du code Arpège/Aladin de fin 2003, vient d'être phasé sur le dernier cycle Arpège/Aladin (CY29T1). Cette version mise à jour doit permettre d'approfondir certains tests du prototype, tout en offrant la possibilité d'en effectuer de nouveaux.

#### 2.2 Objectifs et Méthodologie:

Mon stage consiste à effectuer différents tests de sensibilité d'AROME (pas de temps, dynamique, discrétisation verticale...), pour tirer meilleur profit du modèle et aboutir à des résultats proches de ceux de Méso-NH auquel on le compare.

Deux cas d'étude sont prévus, un cas académique 2D de ligne de grain : 8 heures de simulation, sur un domaine de résolution horizontale 2.5km, et un autre cas réel 3D porté sur les inondation du GARD. La simulation de référence Méso-NH est disponible, donc le travail de simulation portera sur AROME.

### 3 Etude technique:

#### 3.1 Fonctionnement du modèle:

##### 3.1.1 Le lancement d'une simulation AROME:

Il s'agit d'une succession d'opérations que doit effectuer l'utilisateur. Il fait appel à deux outils de travail; un job et une nameliste,

##### • Le job:

Le job est un script qui détermine la procédure de calcul, le temps, la mémoire nécessaires et le pas de temps à appliquer,

Il définit l'environnement de la stimulation la version du binaire, les répertoires de stockage et les programmes à exécuter.

##### • La namelist:

La namelist est une liste descriptive, définissant les caractéristiques du programme ce qui permet de choisir les éléments indispensables pour le fonctionnement du modèle:

- les fichiers historiques
- fréquence de couplage
- paramétrisation activée
- gestion des différentes options du modèle sans avoir à recompiler le binaire
- les variables à prendre en compte.

#### 3.2 Les caractéristiques du modèle:

- Les sources sont écrites en fortran,
- Les fichiers sources sont gérés avec logiciel de gestion de code : clear case

### 3.3 Les étapes pour réaliser une expérience numérique:

#### 3.3.1 Préprocessing (pré-traitement):

AROME a besoin d'un fichier initial et de fichiers de couplage du même type qu'ALADIN pour démarrer une simulation. Ces fichiers, au format FA, contiennent les champs pronostiques du modèle ainsi que les champs climatologique (relief par exemple). Dans le cas d'un run 2D, la création des fichiers est réalisée par un programme spécial: acadfa2D.

#### 3.3.2 Run:

Une fois les fichiers préparés, le job est lancé sur supercalculateur. Le modèle donne en sortie des fichiers historiques ( ICMESH\_AROMENH ) et un retour listing, ce dernier rend compte du déroulement des opérations, il contient:

- Les différentes procédures de calcul,
- Le temps nécessaire pour que le job crée et archive les fichiers résultats de simulation,
- La mémoire en Mbites, utilisée pour l'exécution.

#### 3.3.3 Post-processing (post-traitement):

Les fichiers historiques sont codés en binaire, nous les traiterons par un programme en fortran appelé FLUX, pour obtenir les valeurs des champs en points de grille ASCII, au format GMT:

- Les champs 3D: N° de point Altitude Valeur du champs
- Les champs 2D: N° de point Valeur du champs

Enfin pour tracer les différents champs avec metview, il convient de convertir les fichiers GMT en matrice (x, z), en utilisant un autre programme adéquat.

P  
R  
E  
T  
R  
A  
I  
T  
E  
M  
E  
N  
T

R  
U  
N

P  
O  
S  
T  
T  
R  
A  
I  
T  
E  
M  
E  
N  
T

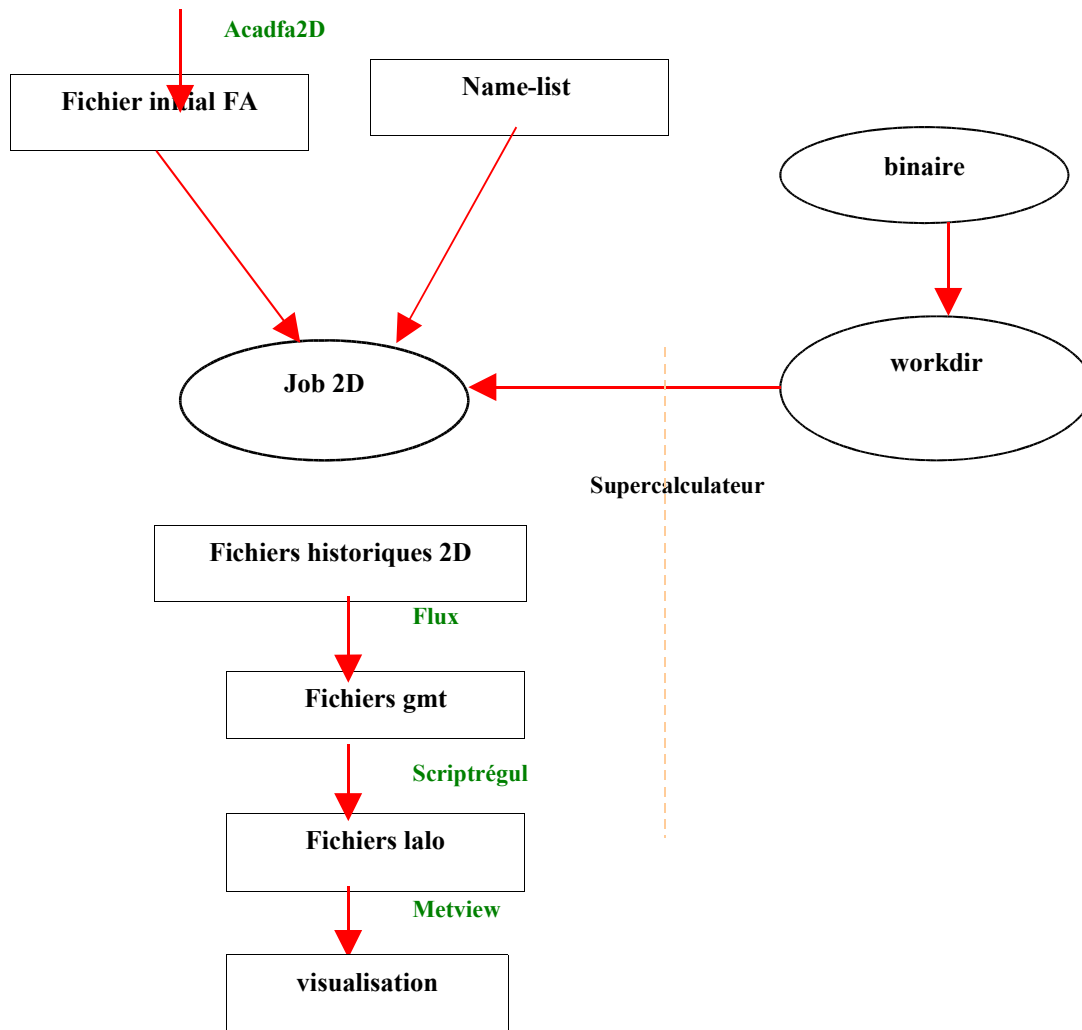


figure1 : \_ Organigramme d'une simulation numérique AROME \_



### 3.4 Schéma technique d'AROME:

La méthode spectrale consiste à représenter un champ sous la forme d'un développement en séries de fonctions trigonométriques. La connaissance d'un champ en tous points de l'espace est remplacée par la connaissance des coefficients spectraux.

L'intérêt de la méthode spectrale est qu'elle permet de calculer à moindre coût les dérivées spatiales.

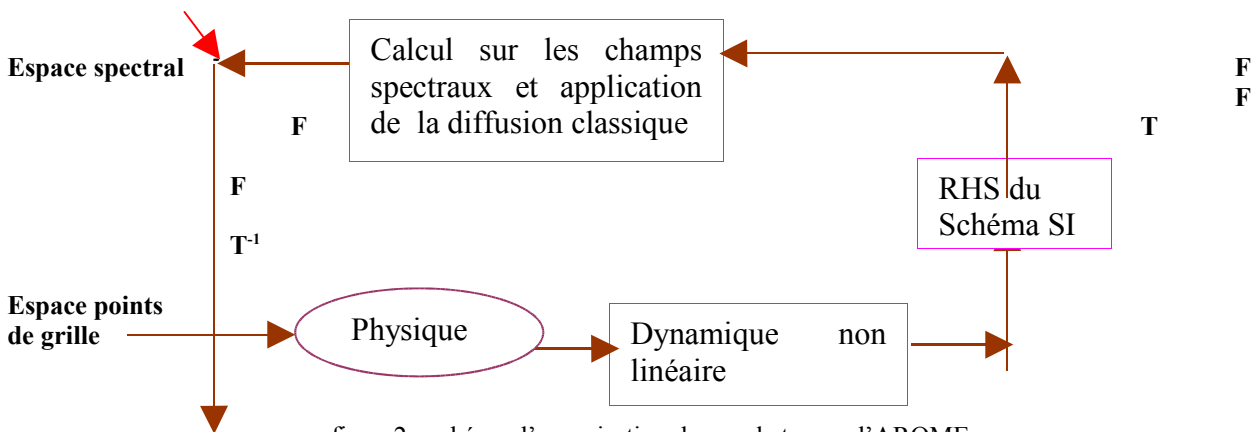


figure2 : schéma d'organisation du pas de temps d'AROME

Le pas de temps débute par une transformée spectrale inverse pour convertir tous les champs spectraux en points de grille. Ensuite, sont effectués les calculs des paramétrisations physiques ainsi que la dynamique non linéaire. On termine les calculs en points de grille par le calcul du membre de droite du schéma semi-implicite. On convertit alors les champs devant passer en spectral par une transformée de Fourier directe, puis on effectue les calculs nécessaires sur ces champs pour terminer le pas de temps.

Dans AROME pour économiser du temps de calcul, les variables microphysiques ainsi que l'énergie cinétique turbulente n'ont pas de représentation spectrale. La diffusion horizontale standard est appliquée seulement aux champs spectraux et pas sur ces variables,

Un nouveau schéma de diffusion horizontale appliquée aux champs en points de grille, c'est la SLHD (Semi-Lagrangien Horizontal Diffusion), vient d'être intégré par Filip Vana dans le code Arpège/Aladin/Arôme. Il sera testé dans AROME pour la première fois pendant ce stage.

## 4 Etude bibliographique:

### 4.1 Les systèmes convectifs de méso-échelle (MCS):

Les systèmes convectifs de moyenne échelle concernent surtout les régions continentales, sous tropiques et les moyennes latitudes, ce sont des systèmes très grands, très complexes, constitués de plusieurs cellules orageuses. Ils sont composés d'une partie convective et une vaste étendue stratiforme. Ces systèmes ont une plus grande durée de vie que les orages isolés, et ils sont difficiles à prévoir et ont un potentiel destructeur important. Heureusement, ils sont assez rares.

#### 4.1.1 Type de cellules convectives:

Selon la taille et l'orientation relative de leur partie convective et stratiforme, on distingue trois types de CMS:

- Partie convective et stratiforme sont mêlées,
- Ligne asymétrique, la partie stratiforme est plus développée d'un côté,
- Ligne symétrique (ligne de grains), la vitesse de propagation est rapide.

#### 4.1.2 Evolution des MCS:

Le principe de formation d'un MCS est basé sur la formation et l'évolution d'une cellule orageuse isolée. Donc il va passer par trois phases: formation, maturité et dissipation.

- Phase de formation (cumulus)

Dans cette phase les cellules isolées se regroupent en un cumulus, et on observe une prédominance des ascendances.

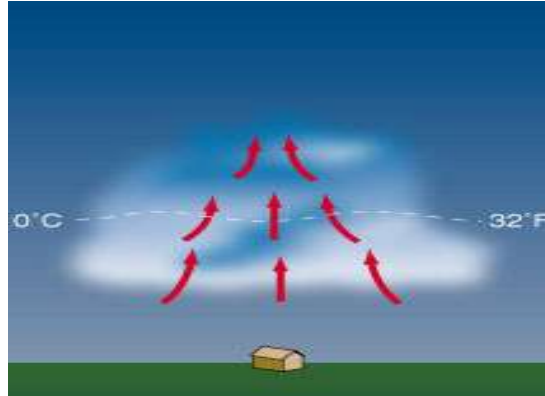


Figure 3 Phase de formation

- Phase de maturité

Extension maximale, avec une coexistence de courants descendants et ascendants.

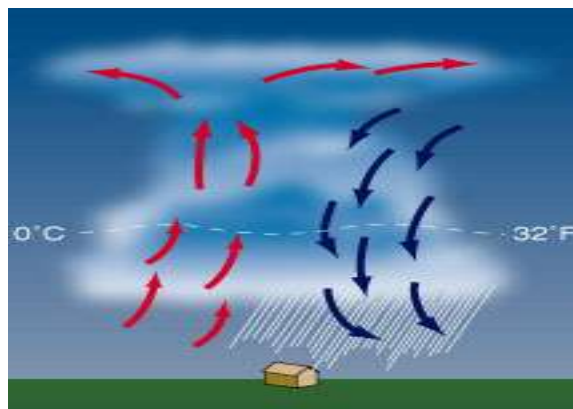


Figure 4 Phase de maturité

- Phase de dissipation:

Cette phase comprend de moins en moins de cellules convectives, les précipitations stratiformes dominant, et il ne reste presque que les courants descendants.

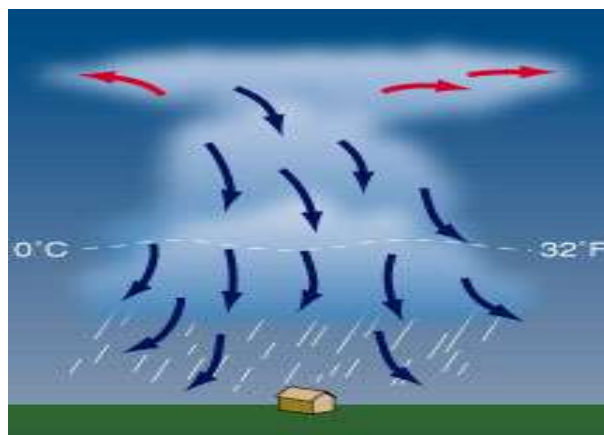


Figure 5 Phase de dissipation

Parmi les MCS, on distingue les lignes de grains, systèmes particulièrement organisés et responsables de précipitations intenses.

#### 4.1.3 Les lignes de grains:

Une ligne de grain est l'un des plus puissants phénomènes météorologiques. Elle est constituée d'un alignement de plusieurs cumulonimbus sur une distance pouvant atteindre un millier de kilomètre. A son origine il y'a de la convection avec une formation nuageuse, qui peut avoir pour cause la circulation synoptique, ou des particularités géographiques comme le relief.

Ces lignes de grains se maintiennent parfois le temps d'une journée.

- Caractéristiques essentielles d'une ligne de grains:

On retrouvera dans toutes les lignes de grains:

- Une partie convective:

Caractérisée par de fortes ascendances, précipitations intenses et rapides, et une dépression relative vers les 3 km.

- Une partie stratiforme:

Caractérisée par des précipitations plus faibles, qui peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètre à l'arrière de la partie convective.

- Un courant de densité:

On appelle courant de densité la poche d'air dense s'étalant au sol. Elle est composée d'air froid et humide, produit par l'évaporation des précipitations aussi bien dans la partie convective que dans la partie stratiforme. Cette masse d'air s'écoule vers la surface puis s'étale d'une manière dissymétrique à cause du profil du vent.

- Un courant entrant (rear flow):

Ce courant va accroître le cisaillement, et intensifie les ascendances au contact du courant de densité.

- Formation et dissipation des lignes de grains:

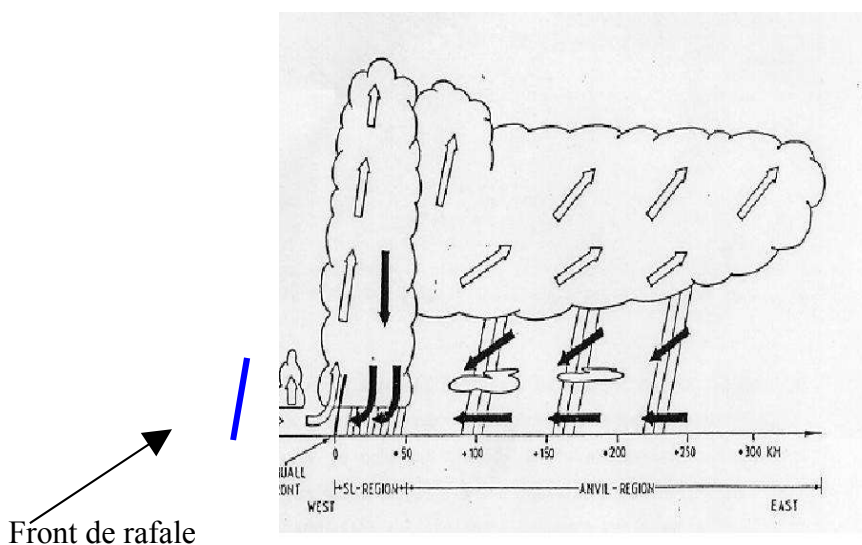


Figure6 coupe verticale d'une ligne de grains. Les flèches représentent Les flux de vent relatif au sol (tiré de Gnamien, 1990)

➔ Subsidence d'air froid rencontrant le flux sud-ouest

⇒ Ascendance d'air chaud et développement de la convection

Chaque cellule convective individuelle a une durée de vie relativement brève de l'ordre de 30 mm, mais son déclin engendre la naissance d'une nouvelle cellule. La dynamique des systèmes qui regroupent de telles cellules dépend de l'alimentation en air chaud et humide disponible dans les basses couches et du cisaillement du vent. En effet dans une cellule non cisillée, le poids des précipitations détruit l'ascendance, par contre dans une cellule cisillée la circulation verticale de l'air est modifiée. L'air est attiré vers l'enclume, l'ascendance s'incline et devient ainsi décalée par rapport aux précipitations. En outre un pseudo front apparaît au niveau du sol, entre le courant de

densité lié aux précipitation et l'ascendance d'air chaud et humide. La convergence formée au niveau de ce front renforce l'ascendance.

La présence d'air sec en moyenne atmosphère a aussi son importance, puisque l'évaporation des précipitations va renforcer le courant de densité

➤ Conditions favorables à la formation d'une ligne de grains:

- ✓ Un champ de pression relativement faible à l'avant,
- ✓ Un champ de température élevé à l'avant ( $T > 27^{\circ}\text{C}$ ),
- ✓ Masses d'air convectivement instable, mais dont l'instabilité convective est faible,
- ✓ Un fort cisaillement de vent
- ✓ Flux d'humidité dans les basses couches,
- ✓ Mécanisme de déclenchement dynamique.

➤ Conditions favorables à la dissipation d'une ligne de grains:

- ✓ Une hausse de pression se produit à l'avant,
- ✓ Une forte instabilité orageuse à l'avant,
- ✓ Un champ de vent hétérogène en direction, à la verticale de la ligne,
- ✓ Une orientation non méridienne de ligne de grains qui, de ce fait infléchit sa trajectoire vers le sud ou le nord.

#### 4.1.4 Description de la ligne de grains.

La ligne de grains est un système auto-entretenu dans sa phase maturité, une fois que le courant de densité a atteint une taille et une intensité suffisante, il va soulever l'air chaud et humide provenant du secteur sud à l'avant de la ligne de grains de puissant cumulonimbus sont ainsi formés, générés le long des bords d'attaque avant du courant de densité et provoquant de fortes pluies, dont l'évaporation alimente partiellement le courant densité, et provoque de violentes rafales près du sol. Cependant une partie importante des hydrométéores formés par ces orages se trouvent expulsés sous formes de particules glacées dans l'enclume.

Le passage d'une ligne de grains se manifeste par la succession des évènements suivants:

- ✓ Le vent au sol se ralentit jusqu'à devenir calme,
- ✓ Apparition d'une barrière nuageuse de cumulonimbus pouvant être précédé d'un enroulement noir qui se déplace rapidement,
- ✓ Fort coup de vent qui peut avoir des conséquences dévastatrices,
- ✓ Probabilité de violentes averses,
- ✓ Présence de nuages Ns, Ac, As
- ✓ Retour à des conditions normales une fois la ligne passée.

L'étude de ces cellules convectives comprend deux domaines principaux:

- ✓ La dynamique qui traite les mouvements atmosphériques
- ✓ La microphysique qui concerne l'évolution des contenus en eau.

Les deux aspects sont étroitement liés au sein des perturbations pluvio-nuageuse.

La microphysique concerne l'étude des processus de formation, de croissance, dissipation et de sédimentation des hydrométéores, au sein des nuages chauds ( $T > 0^{\circ}\text{C}$ ) formés uniquement d'eau liquide, et des nuages froids ou les phases liquides et glaces peuvent coexister.

## 4.2 Les hydrométéores:

Les hydrométéores sont des particules d'eau liquide ou solide, en chute ou en suspension au sein d'un nuage. Il s'agit de:

- ✓ **Gouttes de pluie:** leur diamètre varie entre 200 $\mu\text{m}$  à 5 $\mu\text{m}$ , leur taille est grande et leur vitesse de chute ne peut être négligée, pouvant atteindre 12m/s
- ✓ **Gouttelette de nuage:** elles ont un diamètre entre 10 et 40 $\mu\text{m}$ , résultant directement de la condensation de la vapeur d'eau. Leur formation est favorisée par la présence de petites

particules, appelées noyau de condensation, elles restent en suspension dans l'air et s'évaporent rapidement dès qu'elles rencontrent des régions plus sèches.

- ✓ **Neige:** un flocon de neige est un agglomérat de plus de 100 cristaux de glace. On le trouve dans la partie du nuage où les températures sont négatives.
- ✓ **Cristaux de glace:** ce sont des petites particules de glace qui résultent de la condensation solide de la vapeur d'eau, ou de la congélation de gouttelettes de nuage
- ✓ **Graupel:** (neige roulée) : précipitation de grains de glace, blancs et opaques, ces grains sont relativement plats ou allongés, de diamètre inférieur à 1mm,
- ✓ **Grésil:** précipitation de granules de glace, transparents, et dont le diamètre est inférieur ou au plus égal à 5mm
- ✓ **Grêle:** précipitation de globules ou morceaux de glace (grêlon), dont le diamètre est de l'ordre de 5 à 50 mm, parfois plus, et qui tombent séparés les uns des autres, ou agglomérés en bloc régulier.

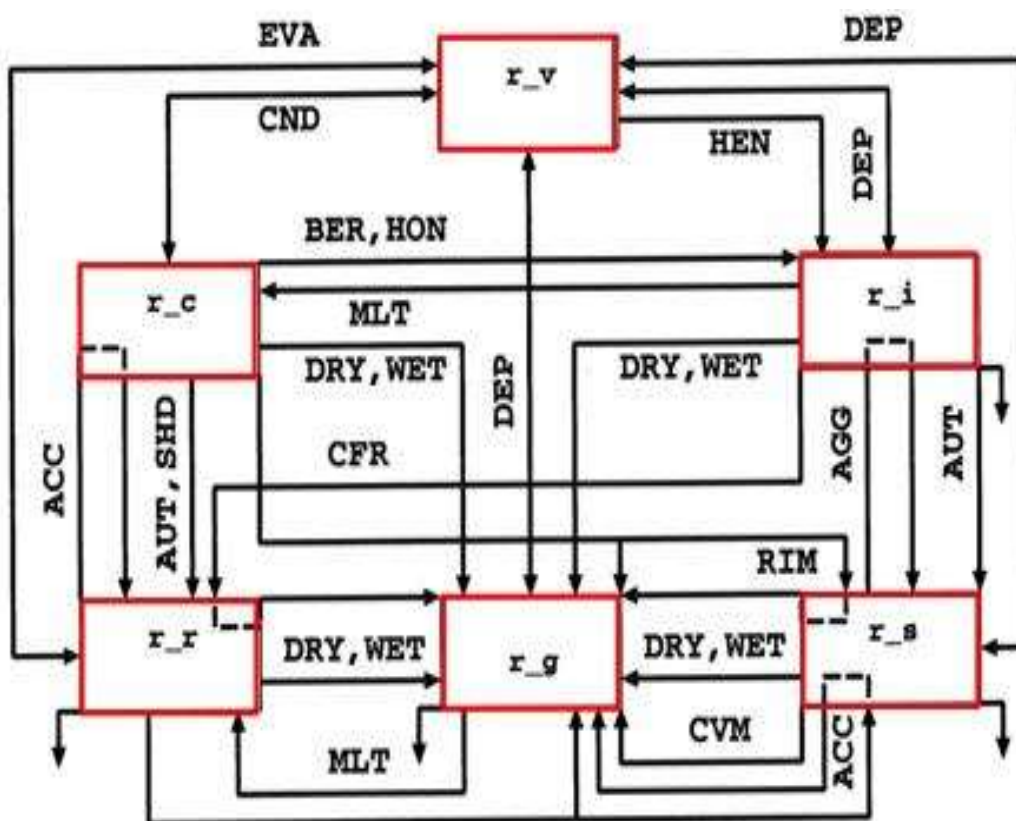


Figure 7 Schéma du processus microphysique

## Chapitre II

### 5 Simulation et analyse:

Après une brève introduction, nous allons décrire les travaux réalisés pendant notre période de stage.

Les deux grandes parties du travail sont les simulations AROME avec les différents tests dans le cas académique et le cas réel.

#### 5.1 Première partie: Cas académique 2D

Comme nous l'avons dit précédemment, notre travail repose sur l'étude d'un cas académique de ligne de grain 2D. Le domaine de simulation a une maille horizontale de 2.5km et 180 points. La discrétisation verticale comporte 46 niveaux. Le déclenchement de la ligne de grains est forcé par un refroidissement de  $0.001^{\circ}\text{K/s}$ , appliqué pendant 10mn sur une petite portion du domaine (4km d'épaisseur entre les points 50 et 55).

Le fichier initial de pression, température, vent et humidité, est pris d'un radiosondage, issu de l'expérience COPT81. Il a été mesuré dans l'environnement proche d'une ligne de grains. Il est homogène horizontalement sur tout le domaine.

Nous tracerons les champs après huit heures de simulation.

##### 5.1.1 La simulation MESO-NH:

###### • Les champs dynamiques :

On remarque sur la figure 1.1 une dépression vers les 3 km, un courant de densité au sol, s'étalant sur une épaisseur d'environ 1km, et un flux ascendant de l'avant vers l'arrière du système, accompagné dessous d'un flux subsident de l'arrière vers l'avant du système. Ces caractéristiques correspondent à la circulation typique associée aux lignes de grains, décrite en 4.1.4.

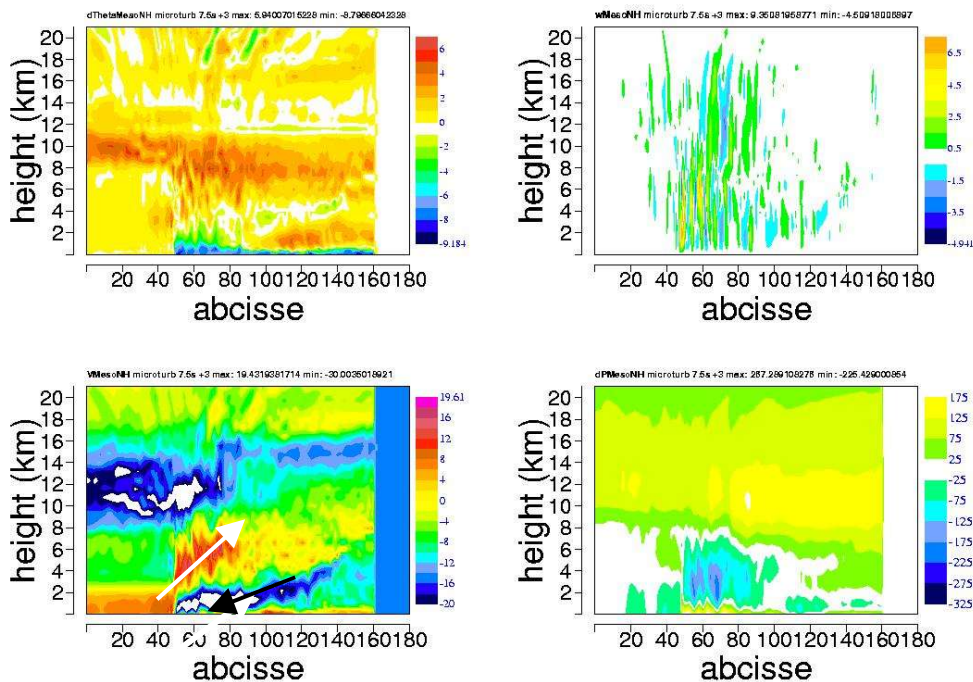


Figure 1.1 champs dynamique de mesonh

###### • La microphysique:

Chaque hydrométéore est représenté par son rapport de mélange. On voit dans la figure 4, le cumul des différents hydrométéores après 8 heures de simulation. On voit nettement les différentes cellules individuelles qui composent la ligne de grains. Les cellules les plus jeunes sont sur la gauche. Avec les cellules matures un peu plus à droite, elles constituent la partie convective de la



ligne de grains, la partie stratiforme se développant quant à elle, encore plus à droite. On retrouve là encore le schéma typique décrit en 4.1.4.

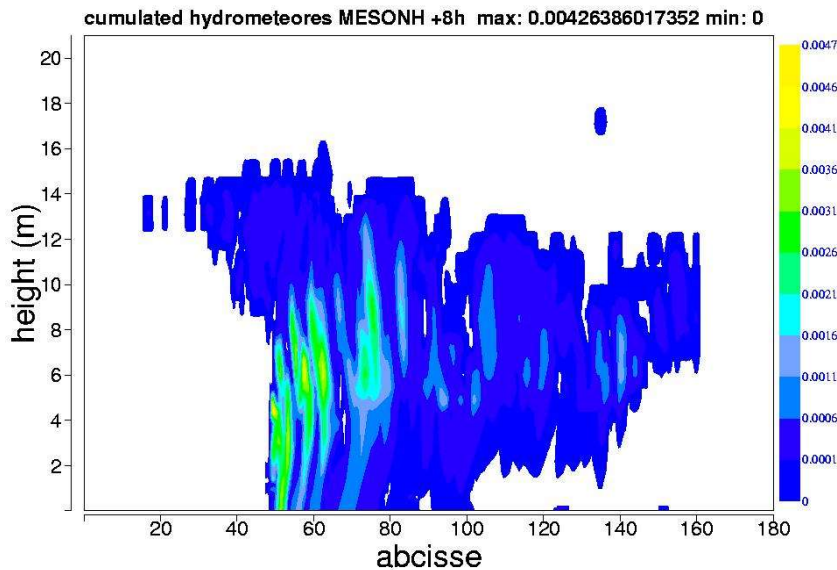


Figure 8 cumul\_mn\_8H

### 5.1.2 La simulation AROME:

- Nombre de niveaux verticaux: 46:
  - Nombre de points de grille 180
  - ✓ La dynamique:
    - Pas de temps est de 7.5s:

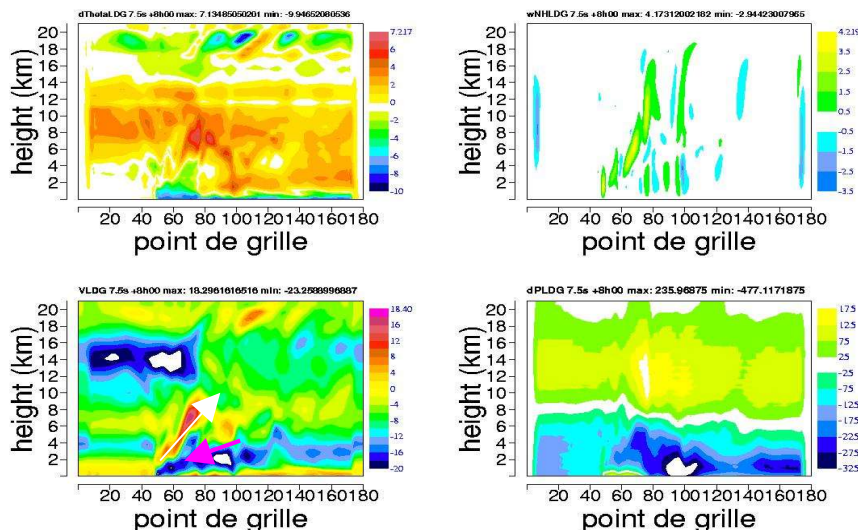


Figure 1.2 champs dynamiques\_7.5s Arome

On retrouve comme avec Meso-NH les caractéristiques d'une ligne de grains: un refroidissement au sol, les deux courants ascendant et subsident. Les champs de différence de pression sont un peu différents de Meso-NH, avec une dépression au niveau du sol plus marquée. Les vitesses verticales sont aussi plus faibles que dans Meso-NH.

Pas de temps est de 60s :

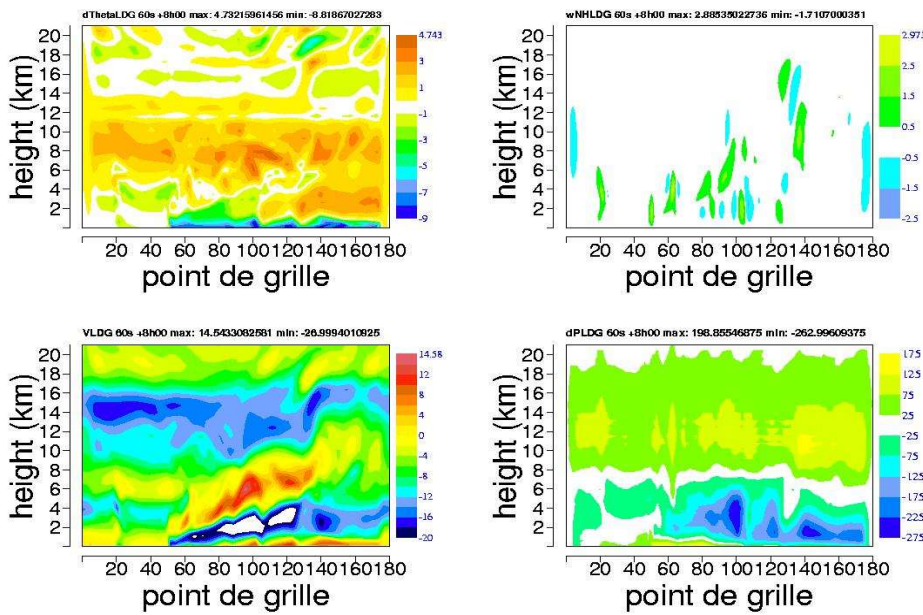


Figure 1.3 champs dynamiques Arome 60s

La ligne de grains produite avec 60s de pas de temps est moins intense que celle produite avec 7.5s : les vitesses verticales notamment sont beaucoup plus faibles.

✓ La microphysique :

Les champs de la microphysique sont représentés par leurs humidités spécifiques, qui est défini par le rapport de la masse de la substance à la masse totale.

$$q_i = \frac{m_i}{m_a + m_i}$$

Où  $m_i$  est la masse de la substance,  $m_a$  est la masse de l'air sec

On a tracé sur les figures 9 et 10 le cumul des hydrométéores.

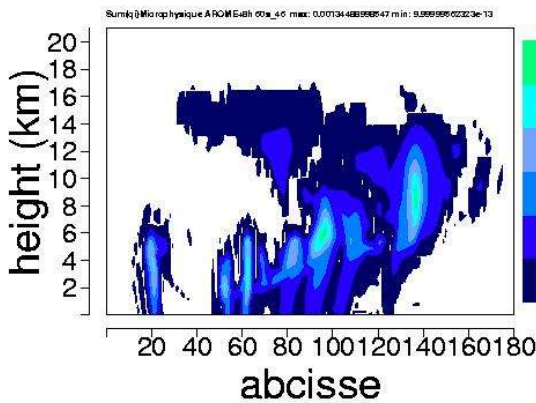


Figure 9 cumul\_60s\_8H

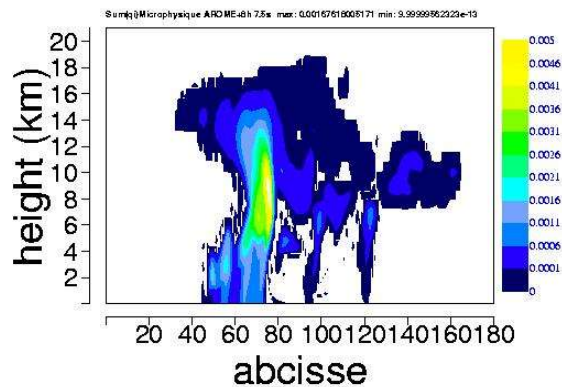


Figure10 cumul\_7.5s\_8H

On remarque qu'il y a plus de développement horizontal de cellules dans le cas de 60s de pas de temps. Pour 7.5s de pas de temps les cellules ont tendance à se développer verticalement, elles atteignent les 19km d'altitude, avec de fortes valeurs néanmoins aux environs de 10km.

La comparaison avec la figure 7 issue de Meso-NH montre de très nettes différences avec une ligne de grains moins bien organisée dans Arome.

➤ Nombre de points est égal à 400:

Dans Arome, les champs doivent être périodiques pour pouvoir être transformés en spectral. Cette périodicité est assurée par une zone tampon de part et d'autre du domaine. Cette contrainte



n'existe pas dans Meso-NH. Pour atténuer l'effet de cette différence, nous avons essayé d'éloigner la ligne de grains des bords du domaine, en augmentant le nombre de points de 110 points de chaque côté du domaine. Seuls les 180 points de la partie centrale seront visualisés par la suite.

✓ Pas de temps est de 7.5s:

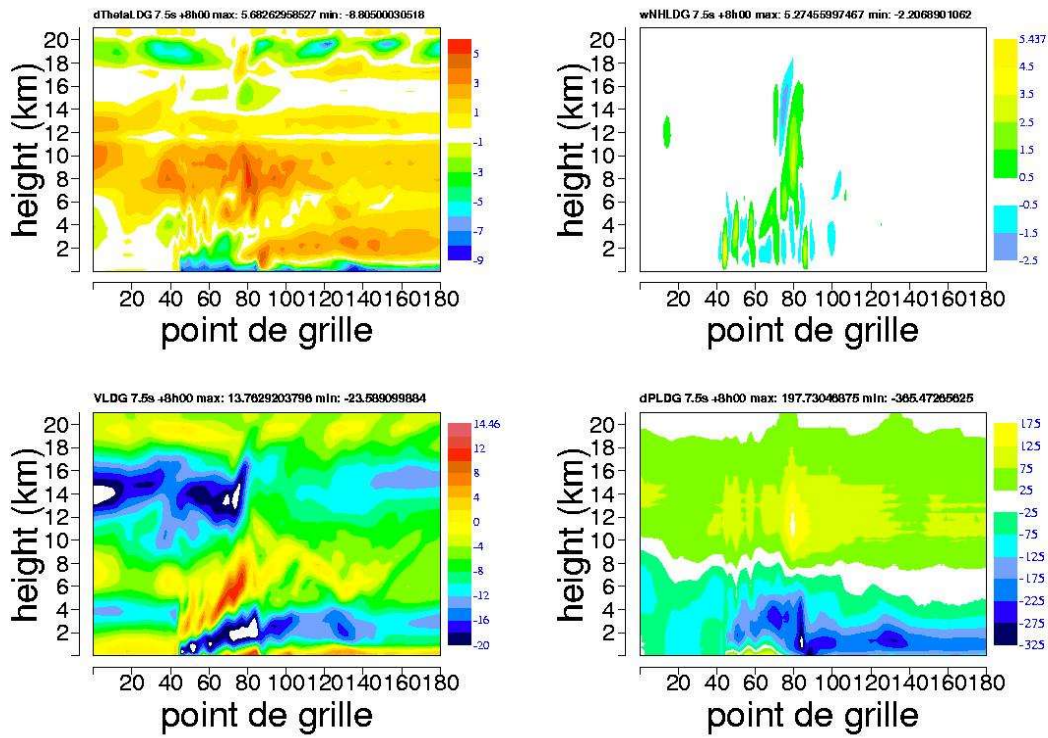


Figure 1.4 champs dynamique 7.5s de pas de temps

✓ Pas de temps est de 60s

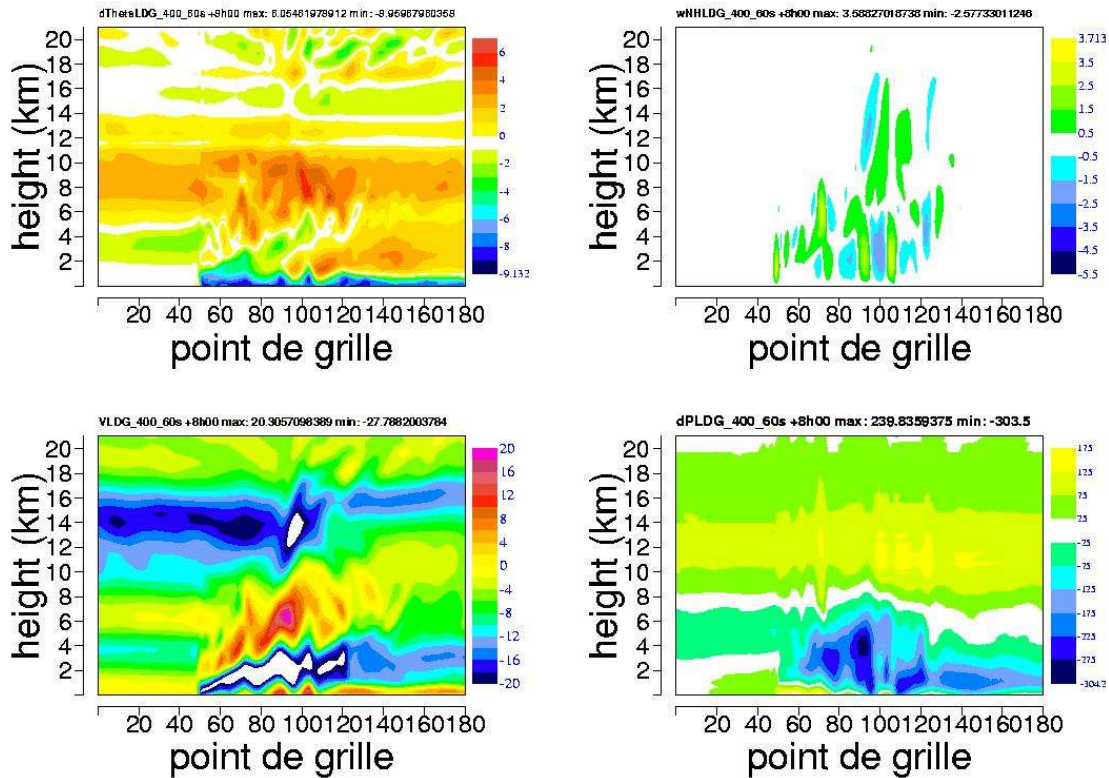


Figure 1.5 champ dynamique 60s de pas de temps

La simulation avec 400 points, donne les mêmes schémas dynamiques et physiques, mais avec plus d'intensité. Après huit heures de simulation, la vitesse verticale est de plus de 7m/s (pas de temps 7.5s), ce qui est plus proche de la simulation de Meso-NH(9.3m/s). Avec 60s néanmoins les vitesses sont trop faibles dans Arome (3.6m/s).

✓ Le cumul pour les deux pas de temps:

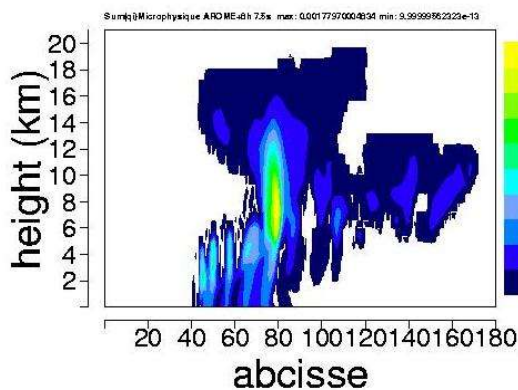


Figure 11 cumul\_7.5s\_8H

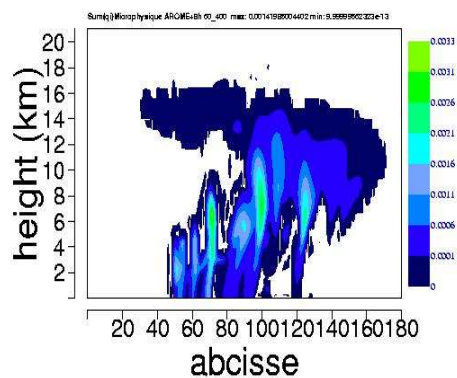


Figure 12 cumul\_60s\_8H

Avec 7.5s, les cellules sont plus développées verticalement qu'avec 60s. Les cellules convectives à l'avant du système sont néanmoins trop faibles par rapport à Meso-NH. De plus, la ligne de grains s'est déplacée de 10 points par rapport à sa zone de déclenchement initial, ce qui montre qu'elle n'est pas très stable.

✓ Les vitesses verticales:

Pour pouvoir suivre les cellules convectives dans leur activité, et étudier la sensibilité de la vitesse verticale, on a tracé l'évolution dans le temps de cette dernière, le long des 8 heures de simulation

Le refroidissement imposé génère de très grandes vitesses verticales, pendant la première heure, atteignant 12m/s, dans la simulation AROME avec un pas de temps de 7.5s. La variabilité temporelle de la vitesse est plus grande qu'avec 60s, mais reste inférieure à celle de MESO-NH.

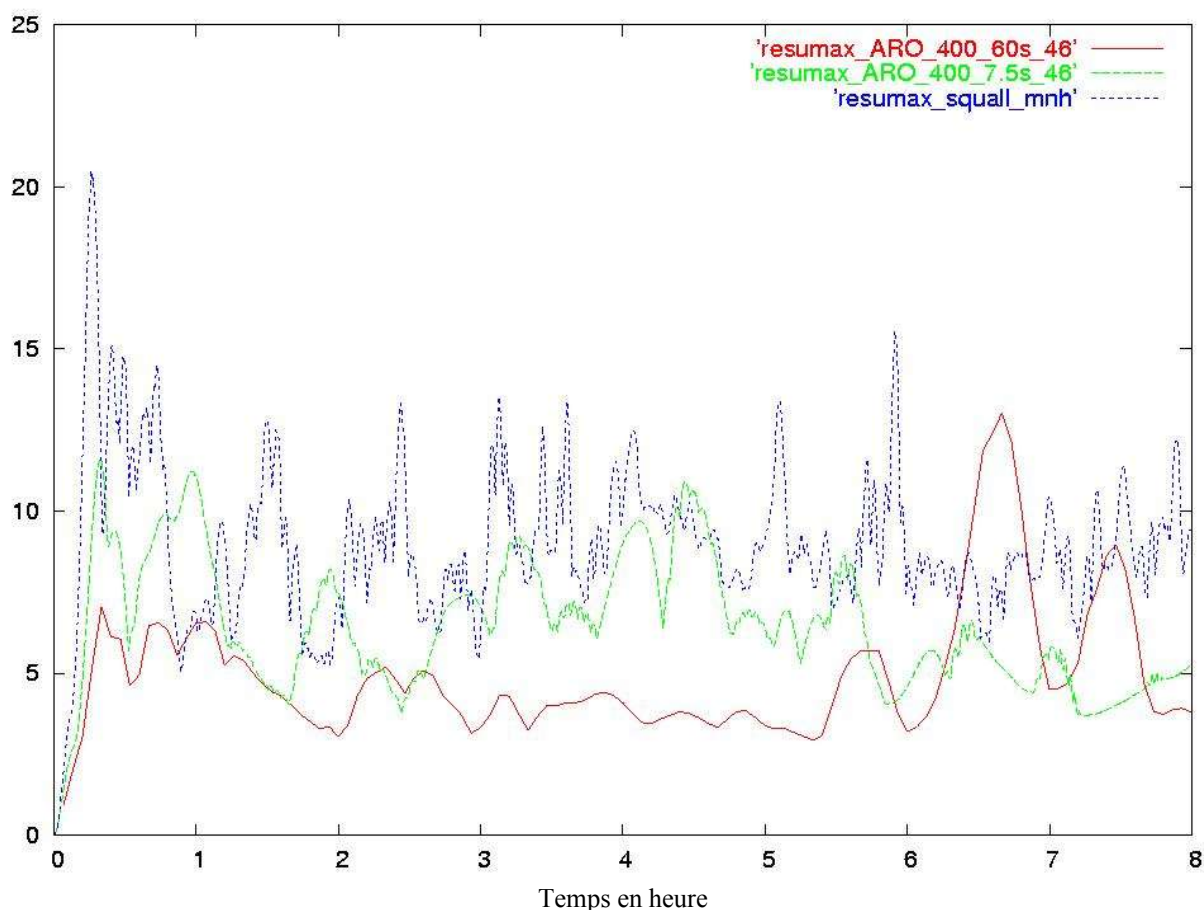


Figure 12 - l'évolution des vitesses verticales

➤ Réglage de la diffusion horizontale standard:

La diffusion horizontale est introduite pour représenter les échanges turbulents sur l'horizontale. Dans les simulations précédentes nous n'avions pas réglé ce paramètre en namelist. On utilisait donc les valeurs par défaut. Cette simulation a été réalisée en modifiant les valeurs par défaut pour ajouter ou retrancher la diffusion horizontale. Pour la diffusion standard les champs spectraux sont diffusés, mais pas les champs aux points de grille.



✓ Pas de temps 7.5s, 400 points:

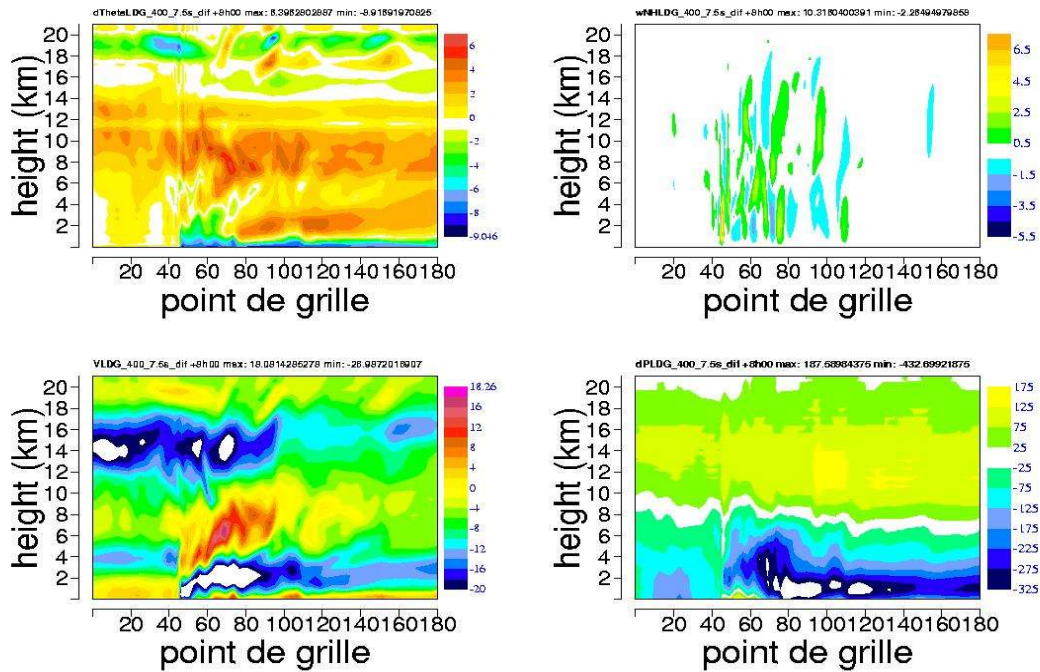


Figure 1.6 champs dynamique 7.5s de pas de temps avec 400points

✓ Pas de temps 60s, 400points:

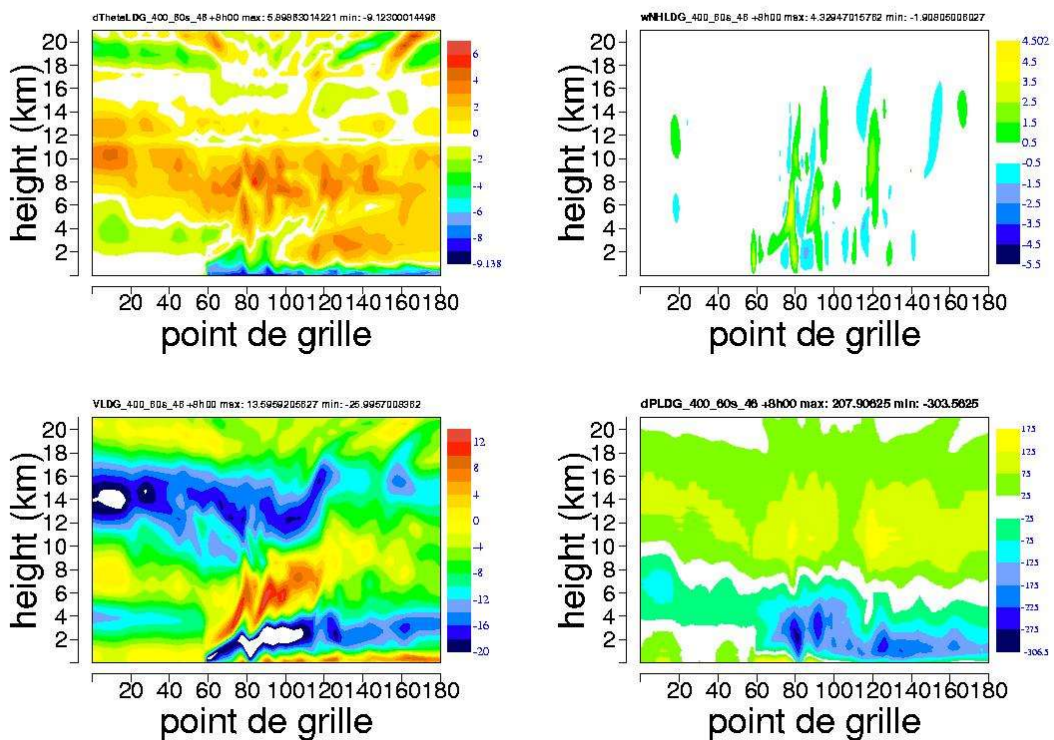


Figure 1.7 champs dynamiques 60s de pas de temps avec 400points

On observe après huit heures de simulation, des vitesses verticales beaucoup plus forte dans les simulations précédentes. Le bord d'attaque de la ligne de grains est aussi beaucoup plus net, surtout avec 7.5s

✓ La microphysique :

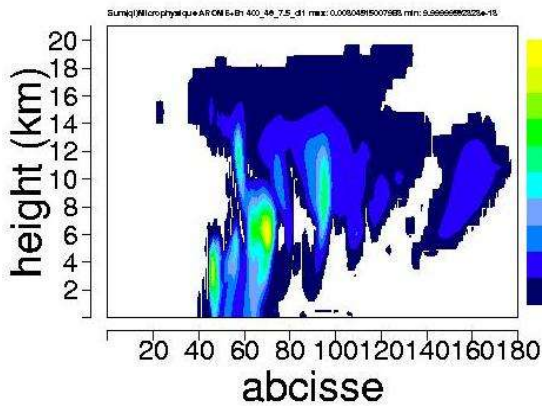


Figure14 cumul\_7.5\_dif\_8H

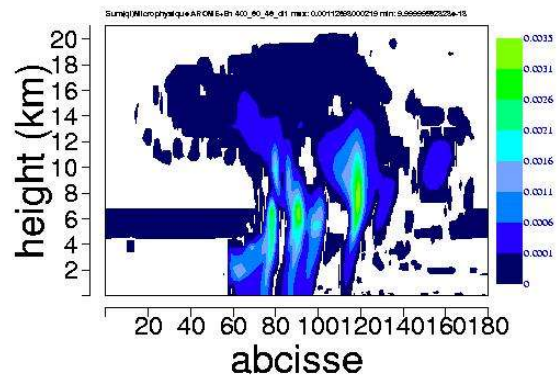


Figure 15 cumul\_60s\_dif\_8H

La structure microphysique observée ressemble à la simulation Meso-NH. Les premières cellules convectives sont plus intenses, donc le réglage de la diffusion a aidé à l'évolution verticale des cellules puisqu'elles atteignent 20km pour les deux pas de temps.

✓ Vitesses verticales

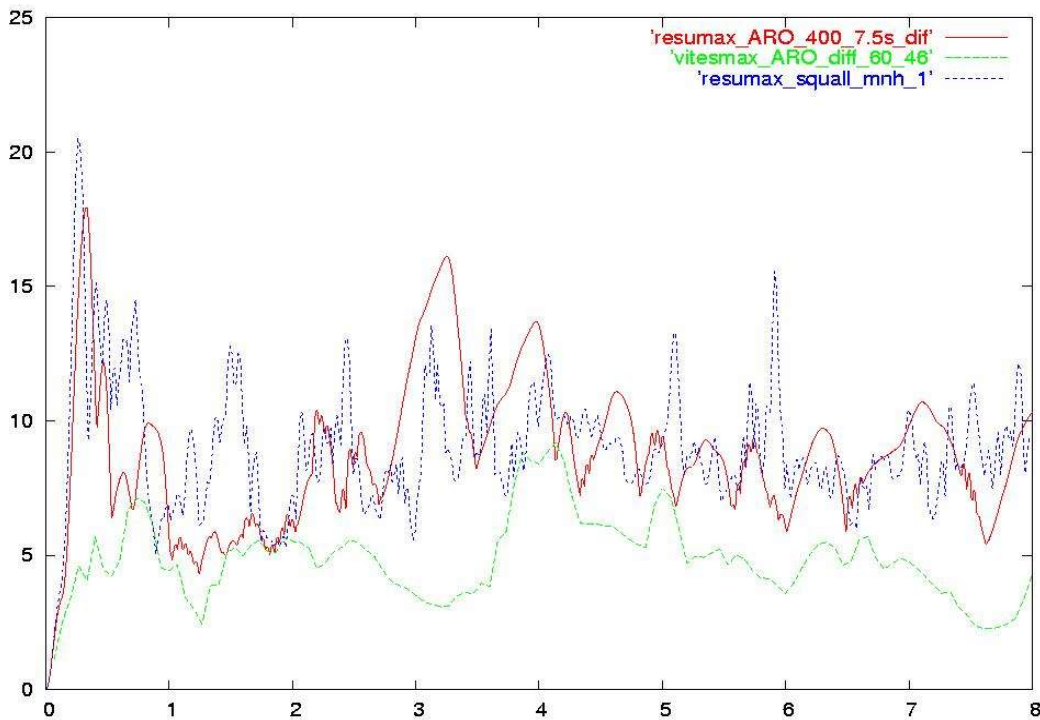


Figure 16 vitesses verticales avec diffusion

Pendant la première heure, les vitesses atteignent les 18m/s, dans ce cas de simulation, s'approchant de celles de Meso-NH qui dépasse les 20m/s. Il y a plus de variabilité des vitesses par rapport au premier cas (180points). Après le pic de vitesse verticale durant la première heure Arome semble mettre un peu plus de temps que Meso-NH à créer de nouvelles cellules intenses (Wmax pendant la deuxième heure plus faible que dans Meso-NH. Après trois heures, la variabilité s'est améliorée et la formation de cellules devient considérable, ce qui les rend plus productrices. Le réglage de la diffusion spectrale a un impact important sur les vitesses verticales.

- Nombre de niveaux: 92
- ✓ Interpolation de niveaux:

Le fichier utilisé est le fichier initial avec les différents champs pression, température, vent et humidité sur les 46 niveaux, dont on a doublé le nombre, en utilisant un programme d'interpolation qui donne les valeurs des champs en chaque point sur 92 niveaux.

On vérifie que le profil sur 46 niveaux est comparable avec celui 92 niveaux (figure 16) pour les différents champs interpolés.

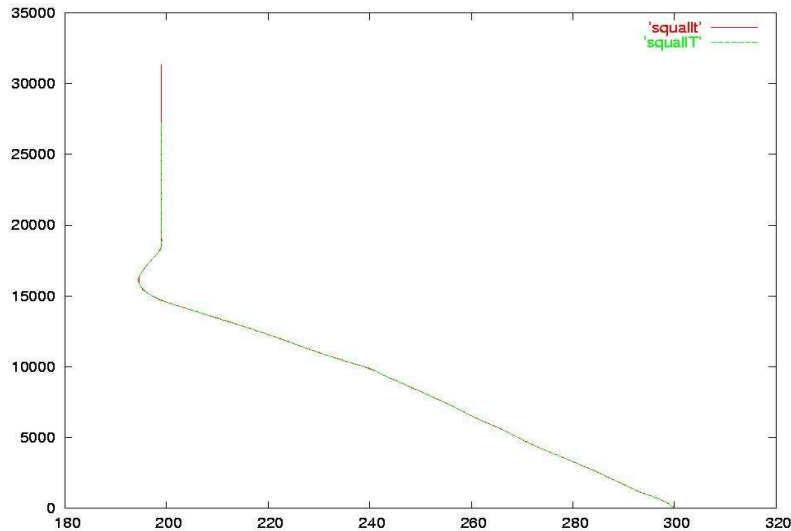


Figure 17\_ profil de température pour 46niveaux et 92niveaux

- ✓ Simulation de la ligne de grain en augmentant la résolution verticale à 92 niveaux  
Pas de temps 7.5s:

o Dynamique:

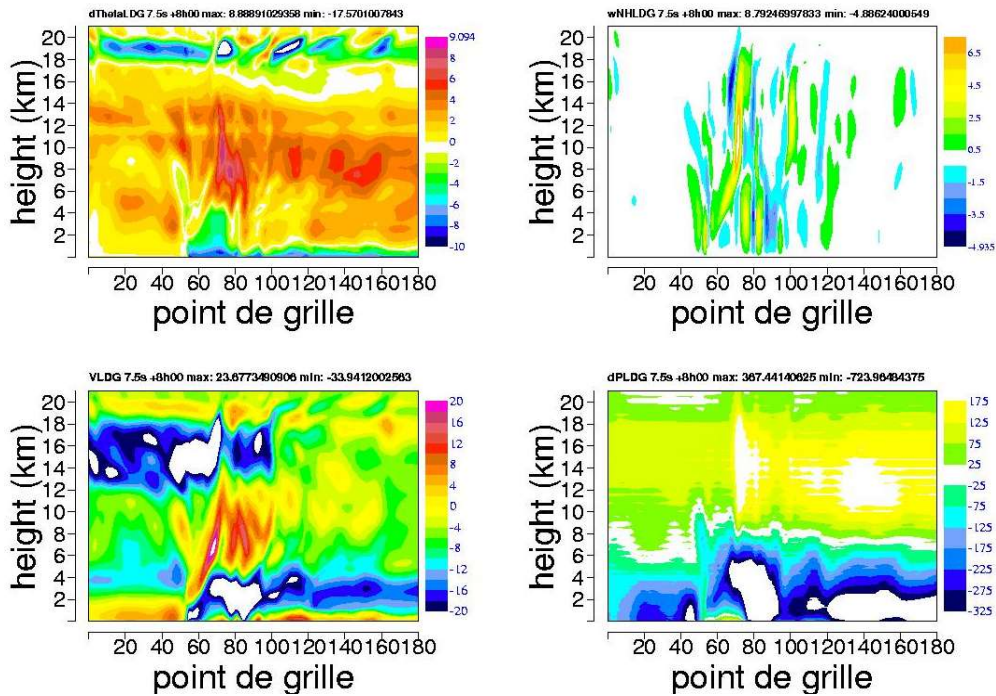


Figure1.8 champs dynamiques Arome 7.5s avec 92 niveaux



o La microphysique:

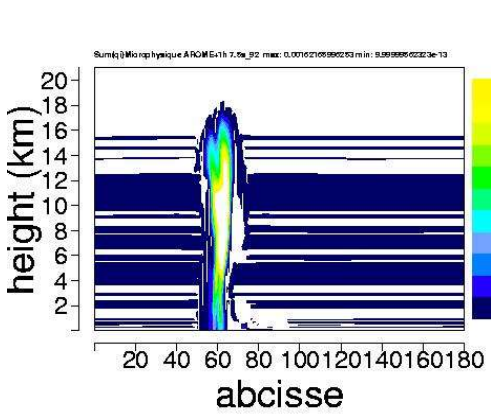


Figure 18 -cumul\_1H

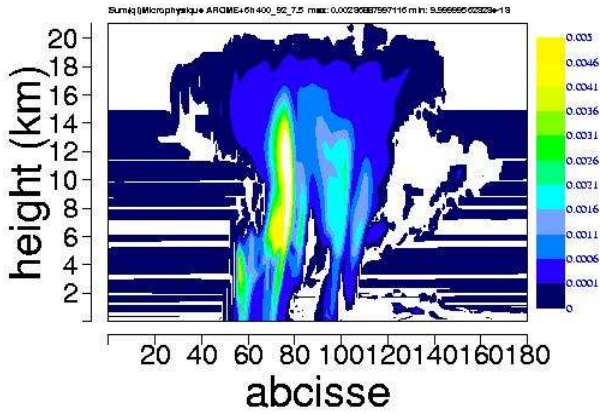


Figure 19- cumul\_6H

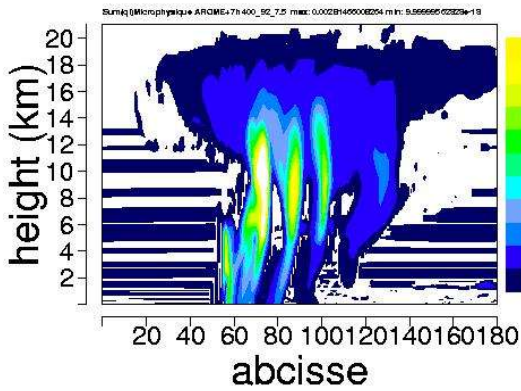


Figure 20 - cumul 7H  
Pas de temps de 60s:

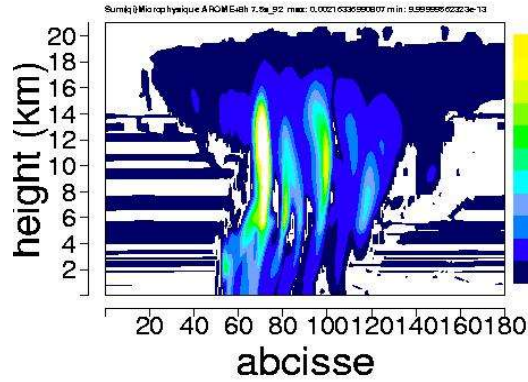


Figure 21- cumul 8H

o Dynamique:

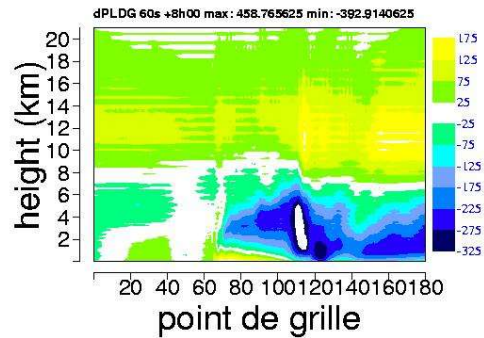
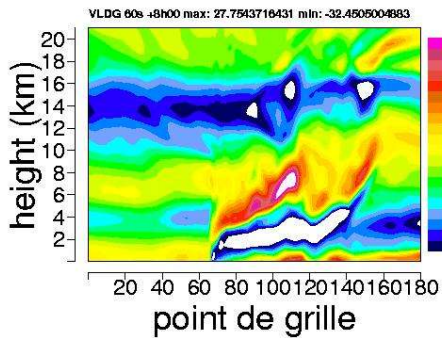
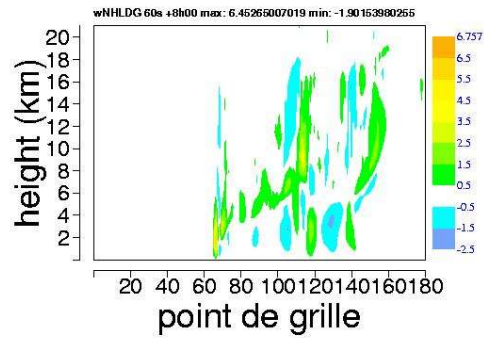
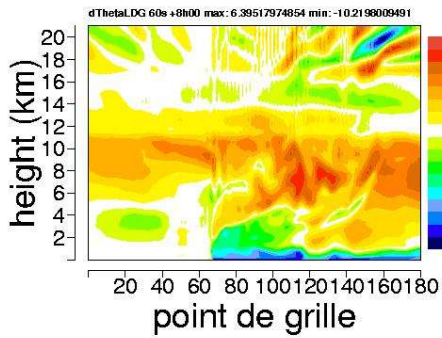


Figure 1.9 champs dynamique Arome 60s avec 92 niveaux

- o La microphysique:  
Cumul pour un pas de 60s

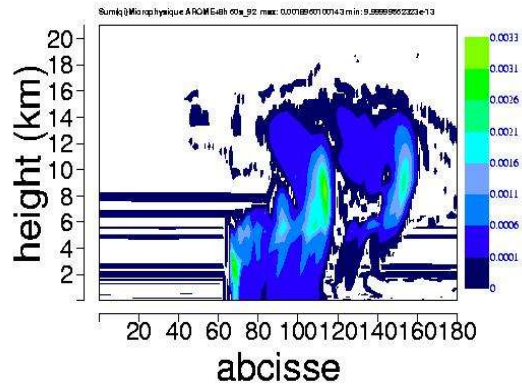
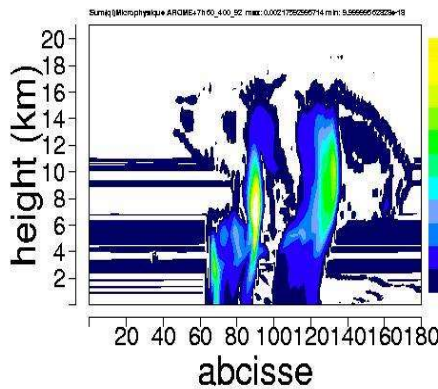
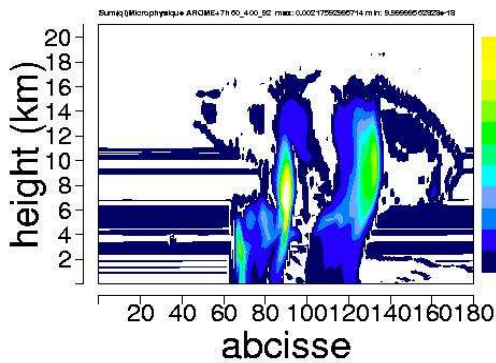
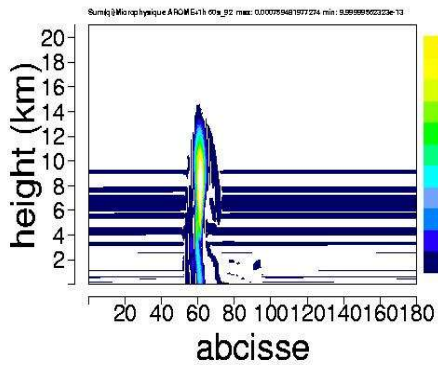


Figure 24- cumul

Figure 25 - cumul 8H -

On constate qu'avec 7.5s de pas de temps, la ligne de grains simulée par Arome est très développée verticalement et horizontalement (sommet atteint 20km sur la figure 21). Les vitesses verticales sont fortes après huit heure de simulation (8.4 m/s). La structure microphysique montre une très bonne organisation des cellules (figure 19). Avec 60s de pas de temps la ligne est moins vigoureuse et un peu moins organisée (figure 22 à 25)



o Vitesse verticale:

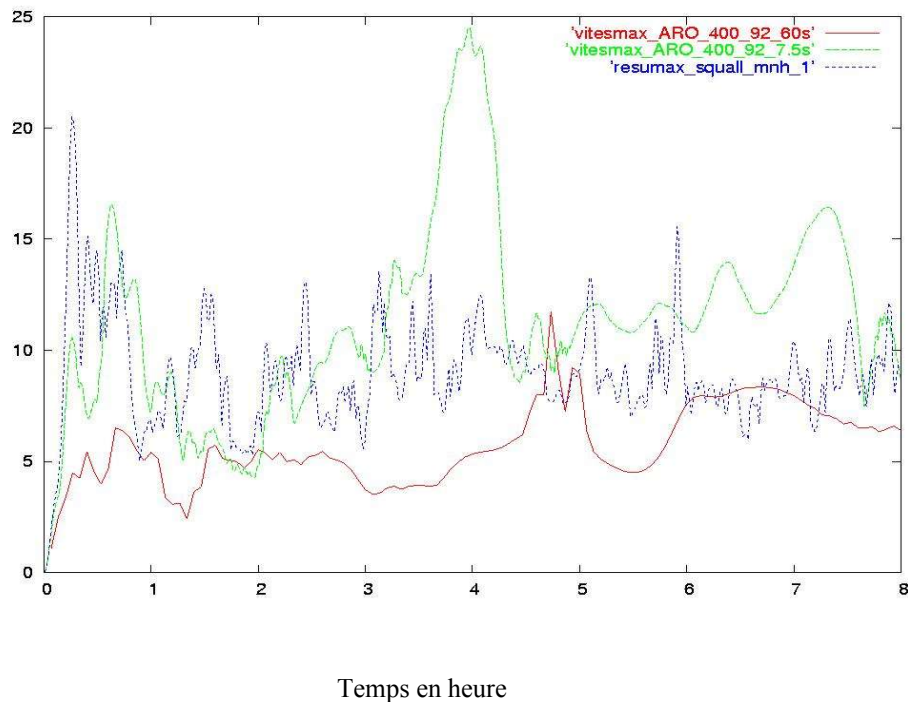


Figure26- schéma d'évolution temporelle de la vitesse verticale maximale

La figure26 montre la grande sensibilité de la vitesse maximale au pas de temps. En comparant avec la figure 16, on peut dire que la vitesse verticale est sensible à la résolution verticale avec 92 niveaux, elle approche 25m/s avec 7.5s alors qu'avec 46 niveaux, elle se limite à 16m/s (figure16).

o Distribution verticale des hydrométéores:  
Distribution verticale de la pluie

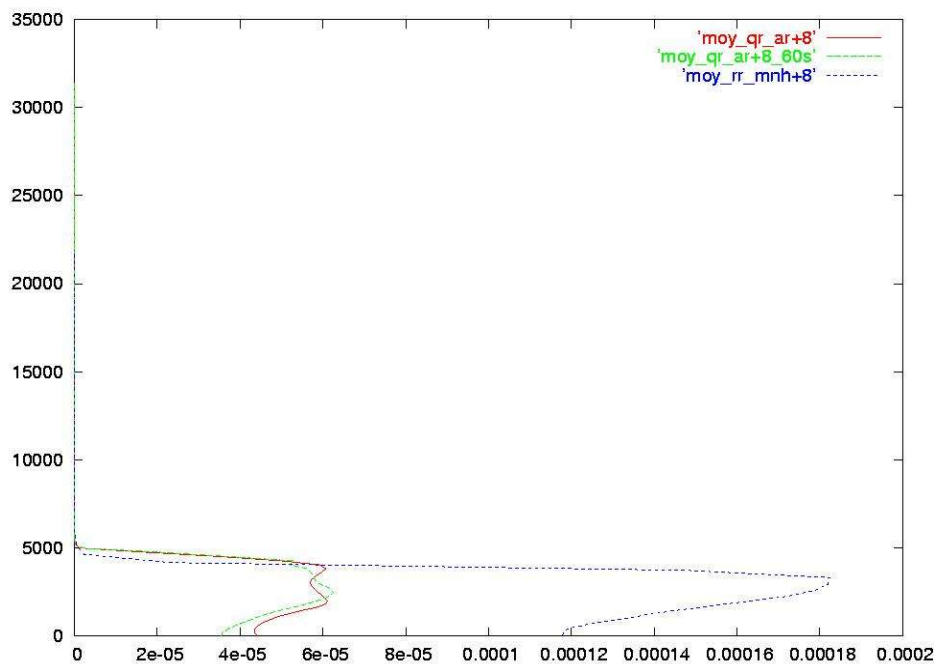


Figure 27 - schéma de la distribution verticale de la pluie dans le cas d'AROME (pour les deux pas de temps) et dans méso-NH

On remarque que pour des pas de temps de 60s et 7.5s, AROME donne la même quantité de pluie, ce qui est un bon signe quant à la stabilité du modèle aux larges pas de temps. D'un autre coté, il produit moins de pluie que Meso-NH qui donne presque le triple.

➤ La diffusion horizontales semi-lagrangienne (SLHD) :

Avec le nouveau schéma SLHD, la diffusion est appliquée aux champs points de grille, donc on a toute la microphysique qui est diffusée, ainsi que l'énergie cinétique turbulente.

On a fait varier, pour un pas de 60s et 46 niveaux, les coefficients de SLHD0 de 0.01 à 1 pour calculer le coefficient de diffusion KAPPA et trouver celui qui approprié pour AROME:

$$KAPPA = \frac{SLHD0 * d * dt}{SLHD0 * d * dt + 1}$$

dt pas de temps du modèle, et d est proportionnel à la quantité scalaire du flux du champ déformé.

✓ SLHD0 = 0.1:

La dynamique:

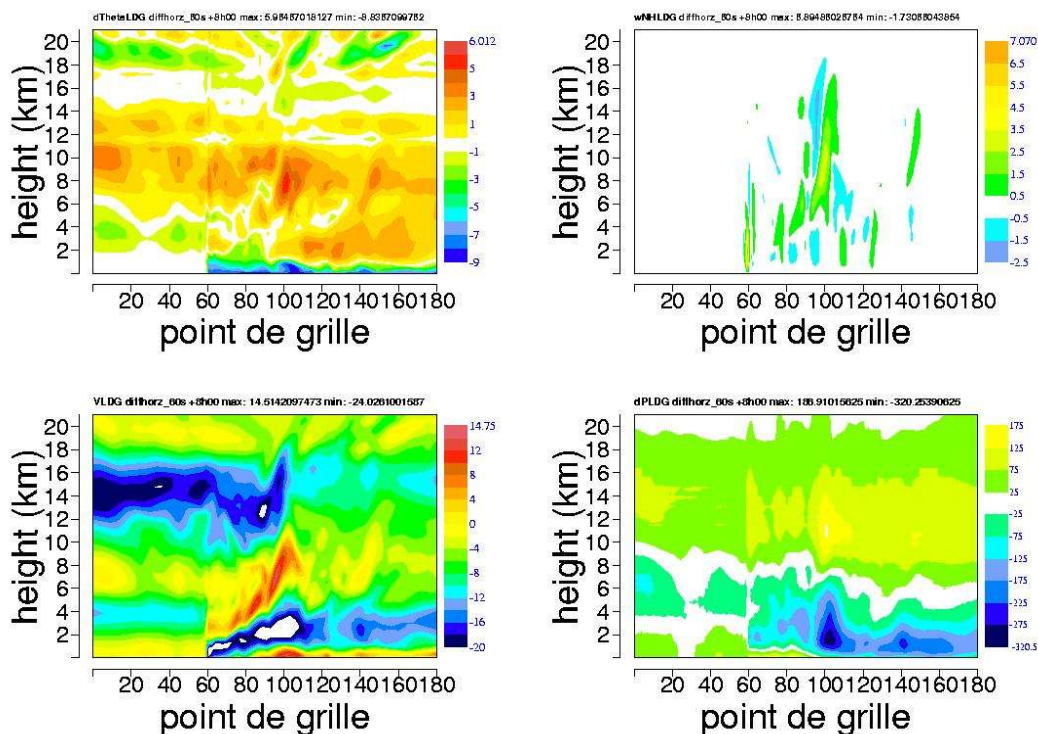


Figure 110 champs dynamiques Arome 60s avec SLHD 0.1

La microphysique:

- o Cumul à 8 heures de simulation

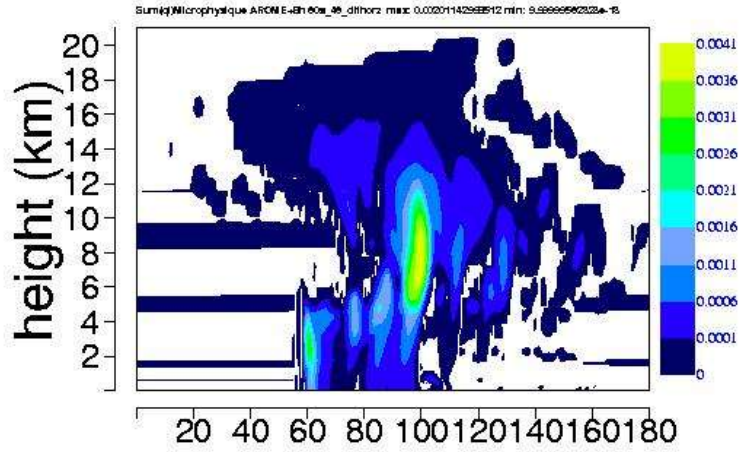


Figure 28- cumul\_8h\_dif0.1

- ✓ SLHD0 = 0.01:  
La dynamique:

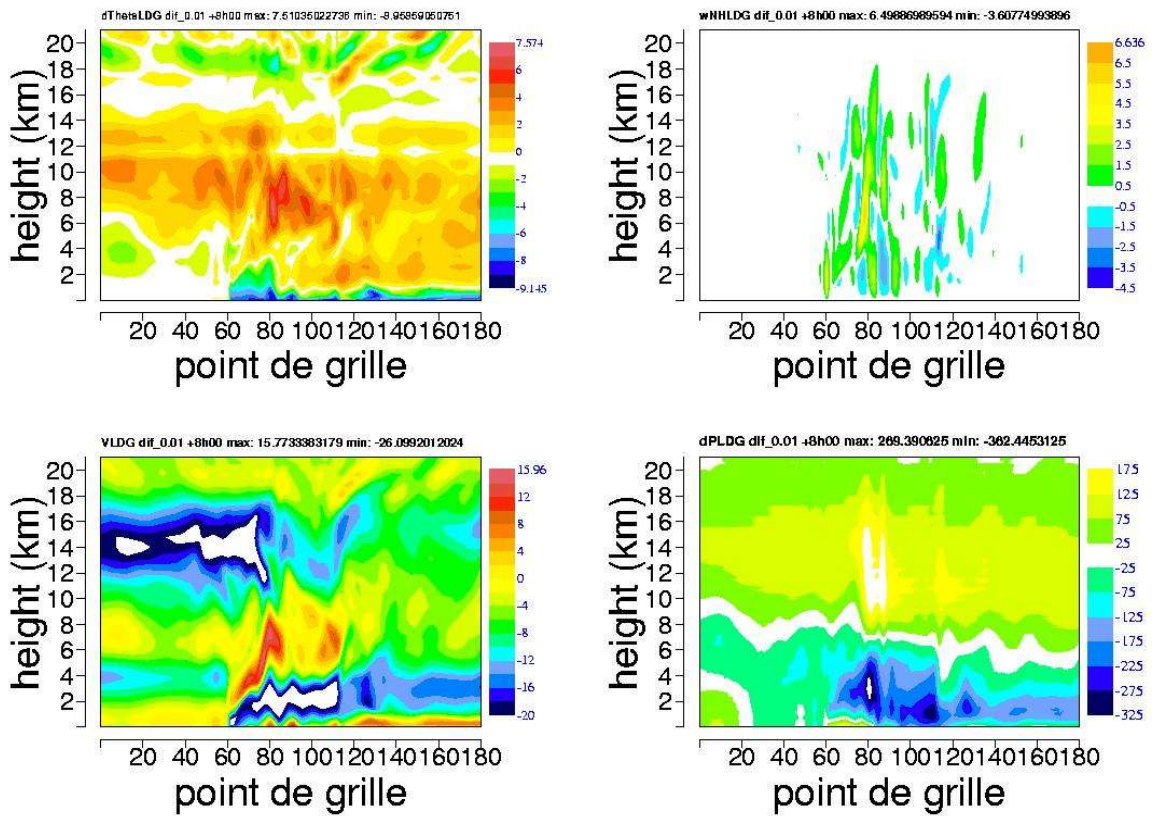


Figure 1.11 champs dynamiques avec SLHD0.01

La microphysique:

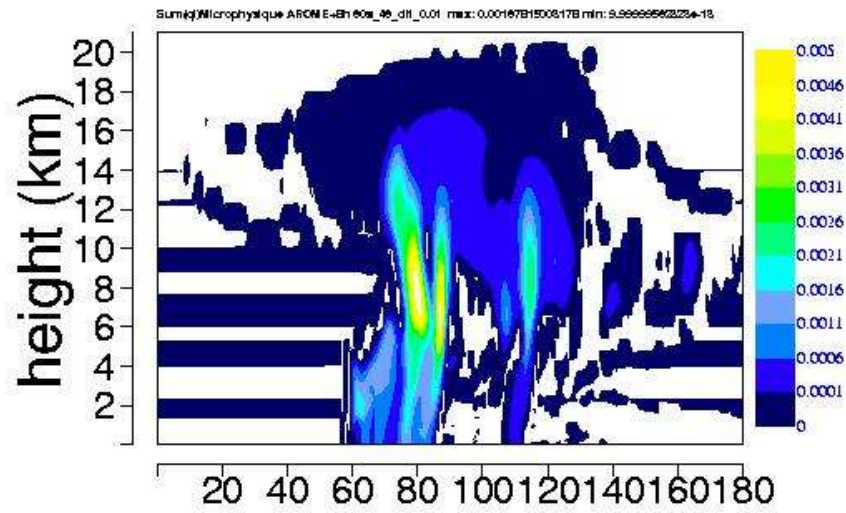


Figure29 cumul\_8h\_dif0.01

✓ 1SLHD0 = 1 :

La dynamique :

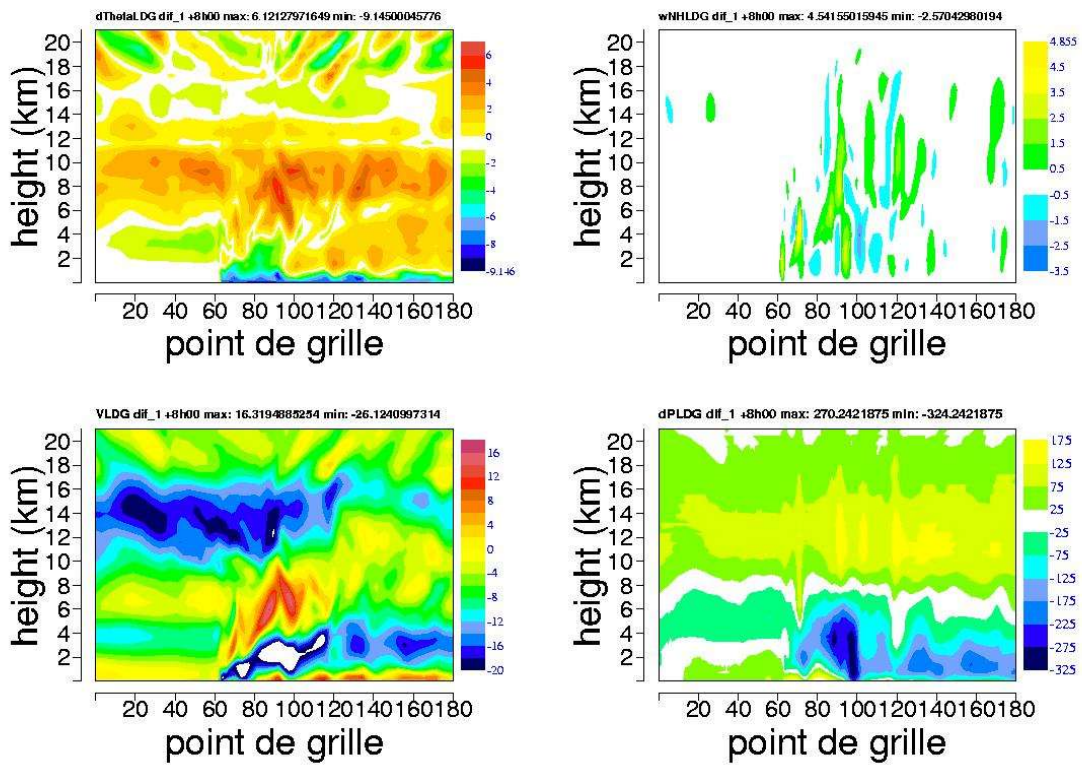


Figure 1.12 champs dynamiques avec SLHD 1



La microphysique:

- o Le cumul à 8h de simulations

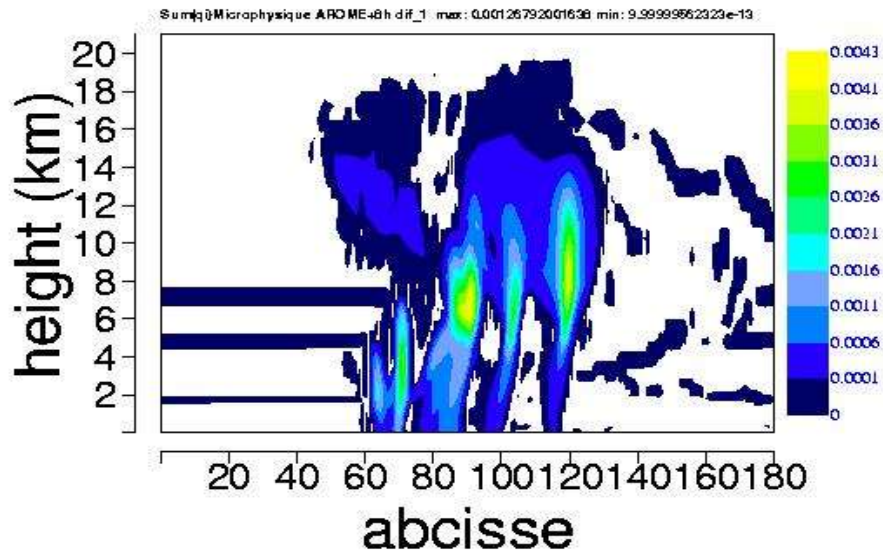


Figure 30 cumul\_8h\_difl

La distribution des hydrométéores :

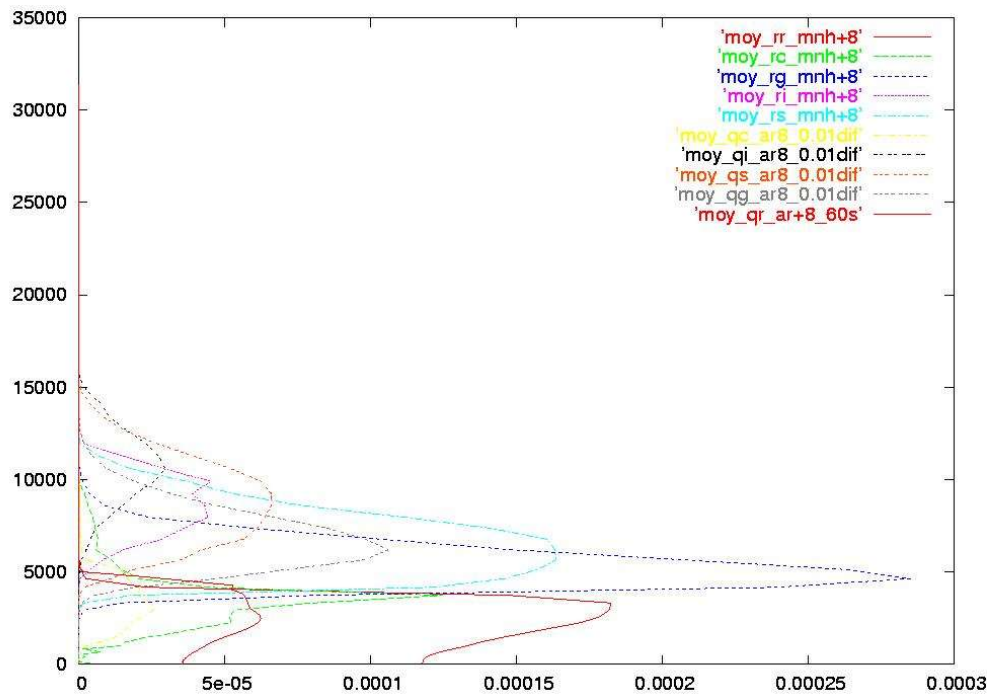


Figure 31 - distribution verticale des hydrométéores

Les résultats avec  $SLHD = 0.01$  et  $SLHD = 0.1$  sont assez semblables. La structure microphysique montrée par les figures 27 et 28 est bonne. Néanmoins, la figure 30 montre qu'AROME produit moins d'hydrométéores que Meso-NH. Avec  $SLHD=1$ , les cellules sont dissociées les unes des autres (figure 29). Cette valeur semble trop élevée.

### 5.1.3 Analyse:

Toutes les simulations faites avec AROME, reproduisent, à une différence près, les mêmes champs, avec une amélioration remarquable en intensité, quand on a réglé la diffusion des champs spectraux, et augmenté la résolution verticale, (les vitesses verticales sont plus grandes, et les cellules convectives ont un développement vertical très fort atteignant des altitudes de plus de 20km).

En le comparant à MESO-NH, on remarque sa faible sensibilité à la pluie et aux autres hydrométéores (figure 12), le champs de température montre une situation très chaude, avec des tendances différents et une limite très froide.

Les tests réalisés en 2D sur un cas académique de ligne de grains montrent qu'AROME est sensible aux réglage de la diffusion horizontale, au pas de temps et à la résolution verticale.

Avec un pas de temps long il n'est pas capable de produire des vitesses maximales aussi fortes que Meso-NH. Il produit aussi moins d'hydrométéores. Néanmoins la quantité d'hydrométéores produits par AROME est beaucoup moins sensible au pas de temps et à la discrétisation verticale que ne l'est la vitesse verticale.

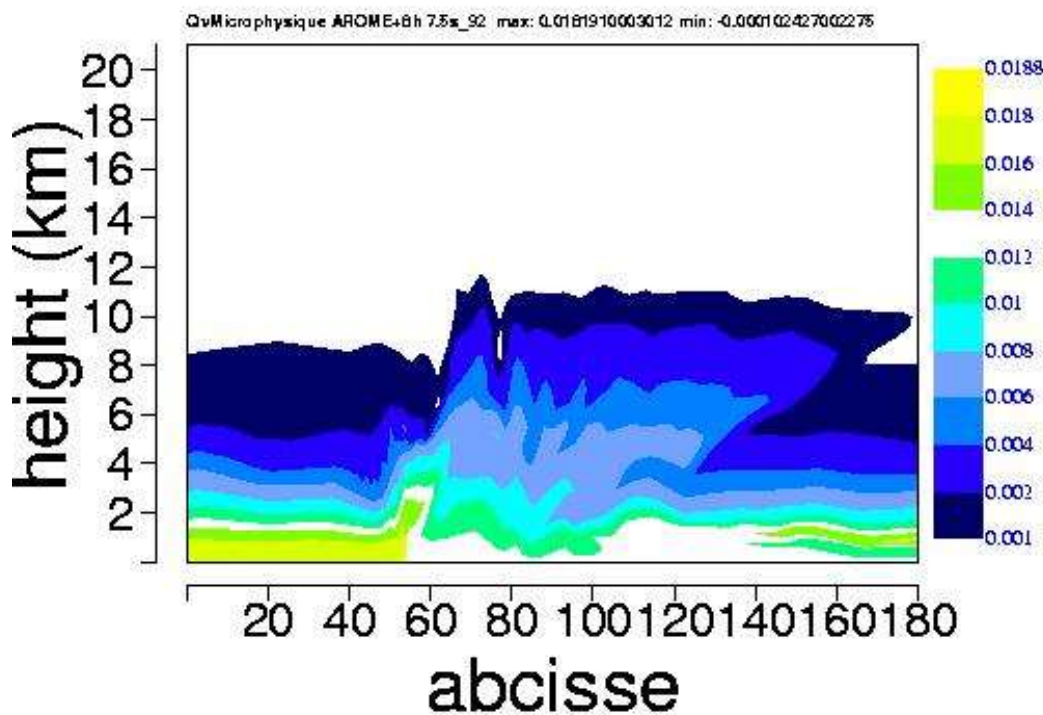


Figure32 champ de vapeur d'eau à 7.5s de pas de temps et 92niveaux

Le schéma du champ vapeur d'eau reproduit bien la convection, on voit la forme avec l'enclume à 10km d'altitude (tropopause) figure31. Donc le modèle AROME simule bien une ligne de grain.

Nous allons maintenant tester le schéma SLHDsur un cas réel: les inondations du GARD de septembre 2002.

## 5.2 Deuxième partie: Cas réel 3D:

Après les différents tests effectués sur AROME, pour le cas idéal 2D de ligne de grains, en le comparant au modèle Meso-NH, nous avons pensé à étendre certains tests pour le cas réel 3D, et les comparer à la fois à Meso-NH et à l'observation. Nous avons choisi comme cas d'étude les inondations du GARD..

### 5.2.1 Inondations du GARD:

Le 8 et 9 septembre 2002, le département du Gard a été le siège de pluies diluviennes, avec des cumuls qui ont atteint 600-700mm en 48h. Cet événement pluvieux est caractérisé par son étendue (plusieurs régions ont été touchées) et son intensité qui était très forte dépassant 400mm en 24h sur les 2/3 de ce département.

Toutes ces pluies ont été produites par un système convectif de mésoéchelle (MCS) qui a stationné sur la région Sud-Est de la France.

Cet événement météorologique, épisode méditerranéen, a commencé la matinée du 8 septembre par la formation des premières cellules convectives en méditerranée. Ces cellules se sont développées au cours de leur progression vers le nord pour former le MCS. Ce dernier a été renforcé par le passage d'un front.

### 5.2.2 L'observation :

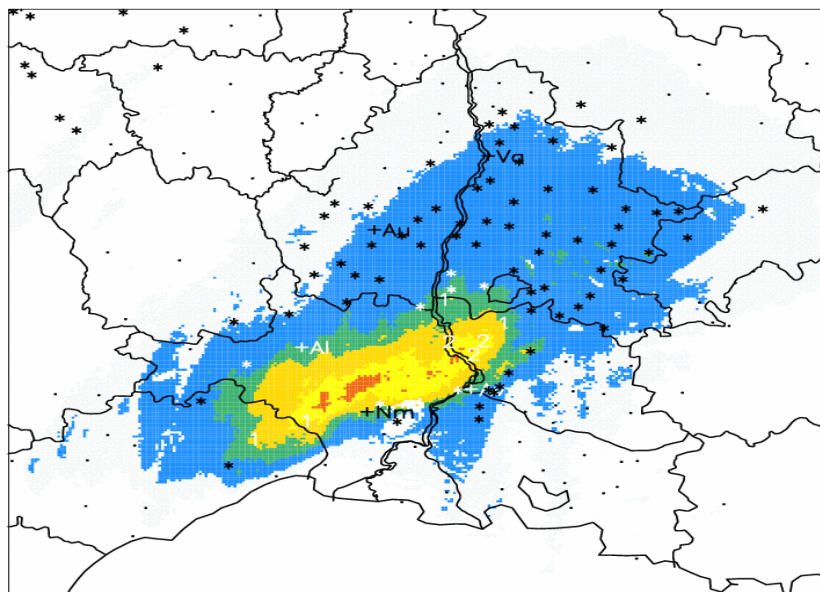
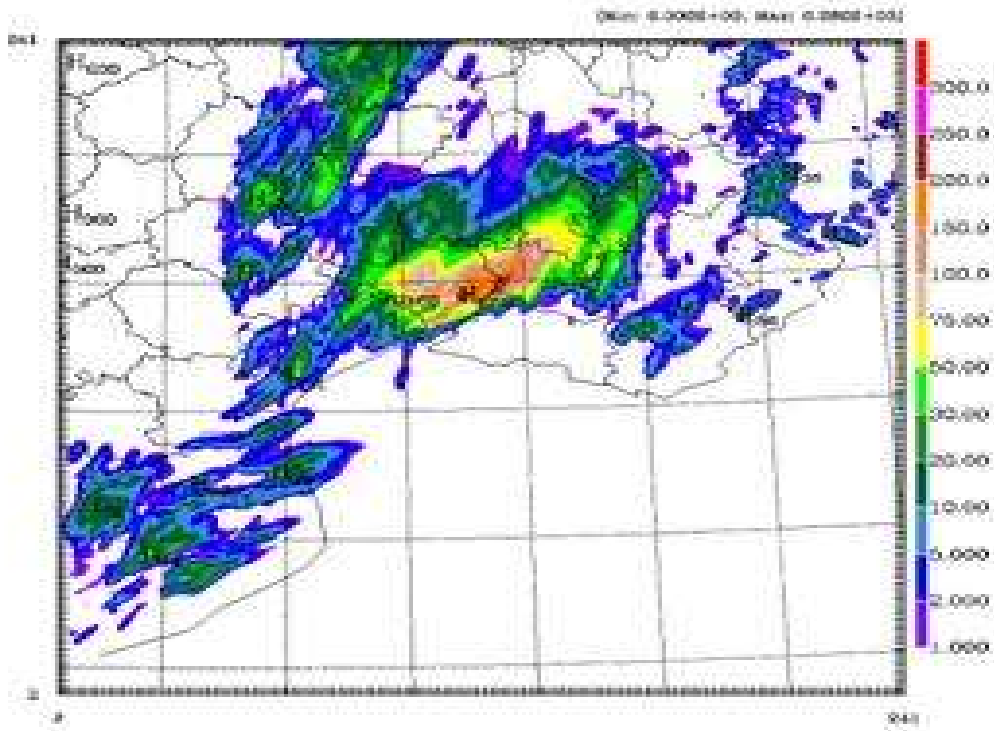


Figure II-1 cumul de précipitations image radar 12-22UTC, 08sept, 2002

En rouge cumuls >300mm, jaune>60mm, vert >30mm et bleu >5mm

D'après l'image radar on distingue un maximum du cumul qui est supérieur à 300mm centré sur le Gard, avec une extension selon un axe Sud-Ouest/Nord-Est.

### 5.2.3 La simulation avec Meso-NH:



FigureII-2 cumul 12H-22H Meso-NH (V. Ducrocq et al.)

La figure II-2 montre un cumul de plus 200mm avec un épocentre légèrement décalé vers le sud par rapport à la figure II-1. On constate aussi une plus grande extension des cumuls vers l'Est. On observe aussi des précipitations plus faibles sur les Alpes et le Massif central.

### 5.2.4 La simulation avec AROME :

Nous avons simulé cette situation avec le modèle AROME avec et sans diffusion horizontale semi-lagrangienne et pour le pas de temps 60s. Nous avons utilisé comme conditions initiales les mêmes fichiers que ceux de la simulation MésoNH de V. Ducrocq. Dans les deux cas l'extension et l'intensité de la zone de plus forts cumuls (> 100 mm) sont assez bien simulées par le modèle AROME avec une légère sous-estimation des cumuls (>200 prévu contre >300 observé). En le comparant à l'observation, on remarque en revanche le redressement du système et son orientation vers le Nord de la zone des précipitations. Les figures II-3 et figureII-4 montrent plus d'intensité pour le cas avec SLHD, avec un décalage de l'épicentre des précipitations vers le nord-ouest. Les cumuls sur les Alpes sont aussi plus forts, ce qui n'est pas en accord avec les observations



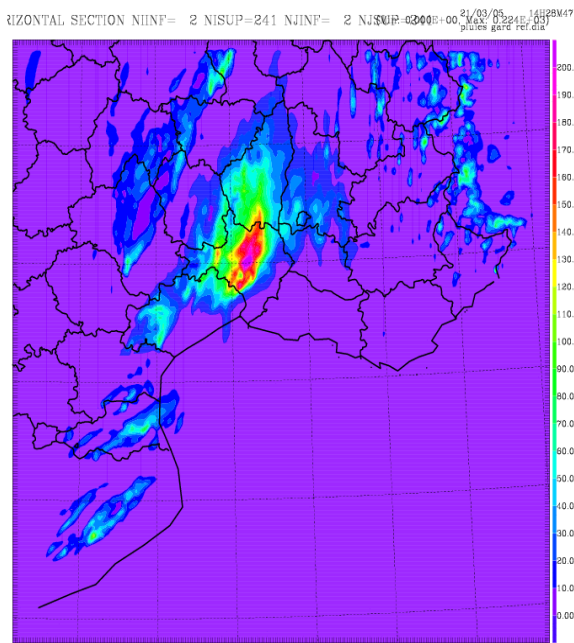


Figure II-3 cumul 12H-22H AROME F

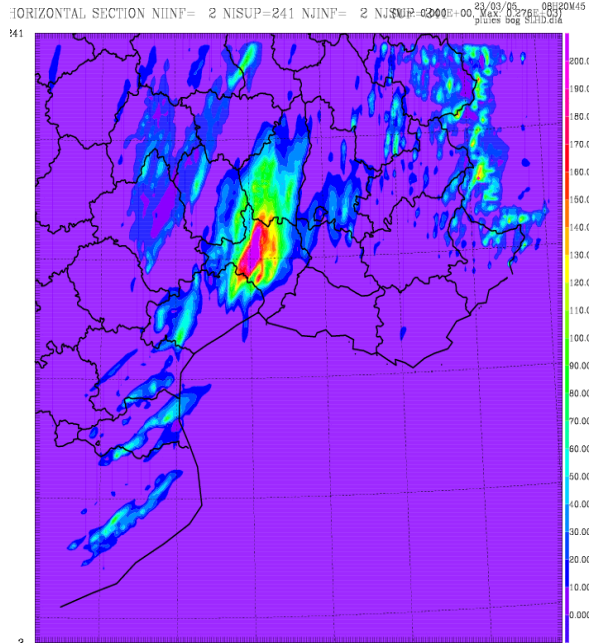


Figure II-4 cumul 12H-22H AROME avec SLHD

### 5.2.5 Analyse:

Dans ce cas réel, pour 60s de pas de temps et dans les deux cas avec et sans SLHD AROME a pu simuler la situation du 08/09/2002 et estimer le maximum de précipitations. D'un autre coté, le système convectif prévu est différent dans la taille, l'orientation et la localisation de la zone de maximum de cumul.

La diffusion horizontale semi- lagrangienne n'a pas amélioré les résultats. La figure II.5 montre plus de cumul sur les Alpes avec plus d'intensité dans la zone de forts cumuls.

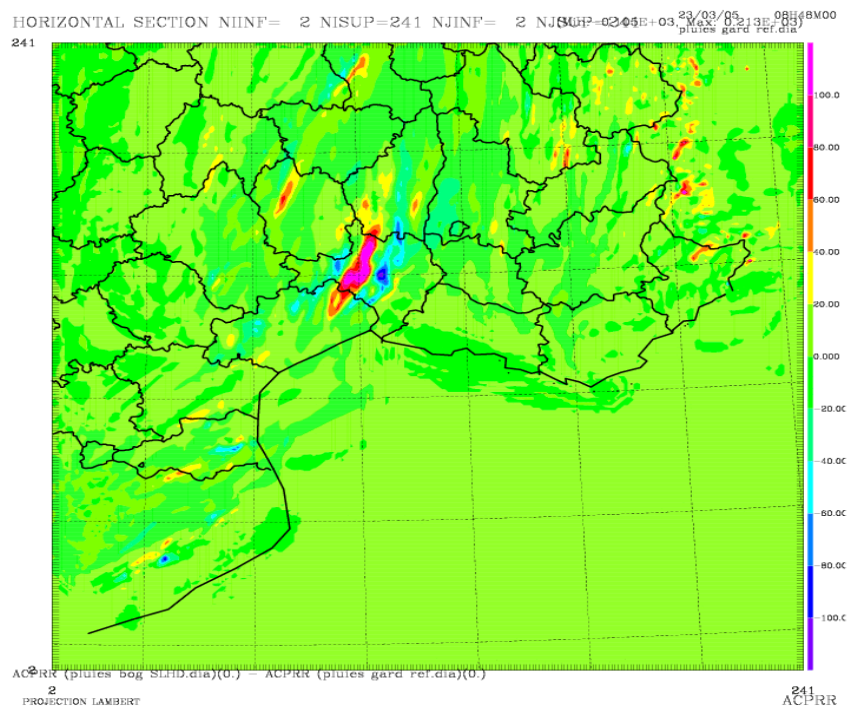


Figure 5 différence de cumul des deux simulations AROME

## 6 Conclusion

Plusieurs tests ont été effectués sur AROME lors de mon travail en utilisant deux pas de temps, un petit de 7.5s et un long de 60s. On voulait surtout tester le deuxième pas de temps 60s, objectif d'AROME, et étudier la sensibilité du modèle à différents paramètres : nombre de points, résolution verticale, diffusion horizontale spectrale ou points de grille.

Les tests réalisés en 2D sur un cas académique de ligne de grain montrent la grande sensibilité d'AROME au pas de temps, au réglage de la diffusion horizontale standard quand les champs spectraux seulement sont diffusés, et à la diffusion en point de grille SLHD, quand les champs microphysique sont diffusés.

AROME simule une ligne de grains dans tous les cas, mais ne produit pas les mêmes champs dynamiques, avec la même intensité que le modèle Meso-NH, (par exemple les vitesses verticales sont plus faibles et les champs de vent, pression et température montrent quelques différences). La microphysique est moins active. Néanmoins la quantité d'hydrométéores produite par AROME est beaucoup moins sensible aux pas de temps et à la discrétisation verticale que ne l'est la vitesse verticale.

L'impact de la diffusion SLHD a été testé sur un cas réel : les inondations du Gard 2002. L'impact est plutôt négatif, avec un léger décalage de la zone précipitante vers le Nord-Ouest et plus de précipitations sur les Alpes.

Le prototype AROME évalué pendant ce stage a montré qu'il était capable de produire des simulations réalistes avec un pas de temps de 60s. Il montre cependant une grande sensibilité aux divers réglages effectués en 2D ou en 3D, plus sur les champs dynamiques que microphysiques. Nous avons été limité par le manque de diagnostics actuellement codés dans AROME pour comparer avec MésoNH et il serait intéressant de poursuivre ces tests une fois les diagnostics disponibles.

## REFERENCES

- Caniaux G., J.L.Redelsperger, and J.P.Lafore: Numerical study of the stratiform region of a fast- moving squall line. Part I: General description and water and heat budgets.
- Donghai Wang, Ming Xue, Dingchen Hou and Kelvin K .Droegemeier: Midlatitude squall line propagation and structure as simulated by a 3D non hydrostatic stormscale model.
- Sylvie Malardel et Yann Seity :Projet AROME, quelles équations pour le modèle AROME?
- J.Stein, S.Malardel et P.Benard :Dérivation of AROME équations
- François Bouttier, Joel Stein et Pierre Benard : Etude dynamique non hydrostatique à résolution kilométrique pour le projet AROME
- Yann Seity,Sylvie Malardel et Gwenaelle Hello:The AROME/ALARO prototype : technical documentation
- La météorologie: Spécial prévision numérique du temps -Schéma numérique d'avance temporelle
- J.P.Lafore, J.Stein, N .Asencio, P.Bougeault, V. Ducrocq, J.Duron, C.Ficher, P.Hereil et P.Mascart ::The Meso-NH atmospheric simulation system, partI adiabatic formulation and control simulation
- Koffigan Attits :Systèmes météorologiques : Afrique tropicale
- Chris Smith:A lower boundary conditions for non hydrostatic Aladin
- Frank Roux:Cours de physique des nuages
- J.Cuxaert, A.A.M, R.J.Bear, E.Bazile:Single column model intercomparaison for a stably stratified atmospheric boundary layer
- Jean Philippe Lafore:Atmosphérique : orage en fanfare
- Véronique Ducrocq, François Bouttier, Sylvie Malardel, Thibault Montmerle et Yann Seity:Le projet AROME
- V. ducrocq, C.Lebeaupin, T.Thouvenin, H.Giordani : L'événement des 8-9 septembre 2002 : Situation météorologique et simulation à mésoéchelle