

## Equations du flux d'Euler

À partir des équations définies ci-dessus, nous pouvons écrire le système d'équations d'Euler suivant :

$$\partial_t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial_x(p\partial_\eta\phi) + \partial_\eta(p\partial_x\phi) = F_U \text{ [04]}$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot Vv) - \partial_y(p\partial_\eta\phi) + \partial_\eta(p\partial_y\phi) = F_V$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot Vw) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V\theta) = F_\theta$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(V \cdot \nabla \phi) - gW] = 0$$

où les termes  $F_U, F_V, F_W, F_\theta$  représentent respectivement la résultante des forces à la limite du modèle, le mélange turbulent, les projections sphériques et la force de rotation de la Terre.

Nous avons aussi:  $\partial_t \phi = -\alpha \cdot \mu$  et l'équation d'état :  $p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma$  [05]

où  $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$  : le rapport des capacités calorifiques pour l'air sec

$R_d$  est la constante de gaz pour l'air sec

$p_0$  est la pression de référence qui est en général  $10^5$  Pascal

et

$$\nabla \cdot Va = \partial_x(Ua) + \partial_y(Va) + \partial_\eta(\Omega a)$$

$$\nabla \cdot Va = U\partial_x a + V\partial_y a + \Omega\partial_\eta a$$

Dans ces équations,  $a$  désigne une variable quelconque.

Concernant les équations d'humidité, il faut maintenir les équations relatives à la masse d'air sec. Alors, les coordonnées sont celles utilisées dans le cas des masses d'air sec.

En effet :

$$\eta = \frac{(p_{dh} - p_{dht})}{\mu_d} \text{ [06]} \quad (2.1.16)$$

Où  $\mu_d$  représente la masse d'air sec dans la colonne d'air

$p_{dh}$  et  $p_{dht}$  désignent respectivement la pression hydrostatique de l'atmosphère sèche et la pression au niveau supérieur de l'atmosphère sèche.

Avec cette définition, le système d'équations d'Euler peut s'écrire comme suit :

$$\partial_t U + (\nabla \cdot V u) - \mu_d \alpha \partial_x p + (\alpha / \alpha_d) \partial_\eta p \partial_x \phi = F_U \quad [07]$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot V v) - \mu_d \alpha \partial_y p + (\alpha / \alpha_d) \partial_\eta p \partial_y \phi = F_V$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot V w) - g[(\alpha / \alpha_d) \partial_\eta p - \mu_d] = F_W$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V \theta) = F_\theta$$

$$\partial_t \mu_d + (\nabla \cdot V) = 0$$

$$\partial_t \phi + \mu_d^{-1} [(V \cdot \nabla \phi) - gW] = 0$$

$$\partial_t Q_m + (\nabla \cdot V q_m) = F_{Q_m}$$

Et l'équation de diagnostic pour la densité inverse et l'équation d'état s'écrivent comme suit :

$$\begin{aligned} \partial_t \phi &= -\alpha_d \cdot \mu_d [08] \\ p &= p_0 (R_d \theta_m / p_0 \alpha_d)^\gamma \end{aligned}$$

### Les systèmes de projections

Le noyau ARW supporte plusieurs méthodes de projections : Lambert, Polaire, Mercator, Latitude-Longitude. La transformation est isentropique pour les trois (03) de ces projections. C'est-à-dire Lambert, Polaire et Mercator. Cette transformation isentropique nécessite des pas  $\Delta_x$  et  $\Delta_y$  constants dans tous les points de grille. La projection est alors définie suivant une échelle de carte bien précise :

$$(m_x, m_y) = \frac{(\Delta_x, \Delta_y)}{\text{distance sur le Globe}}$$

Où  $m_x, m_y$  sont les facteurs d'échelles de la carte

$\Delta_x, \Delta_y$  sont des constantes qui représentent les distances sur la carte.

Ces facteurs d'échelles sont introduits dans les équations régissantes en redéfinissant les variables comme suit :

$$U = \mu_d u / m_y ;$$

$$V = \mu_d v / m_x ;$$

$$W = \mu_d w / m_y ;$$

$$\Omega = \mu_d \dot{\eta} / m_y$$

En utilisant ces variables, nous avons alors les équations, incluant les facteurs d'échelle et les termes de rotationnelle, suivantes :

$$\begin{aligned}
\partial_t U + m_x [\partial_x(Uu) + \partial_y(Vu)] + \partial_\eta(\Omega u) + \mu_d \alpha \partial_x p + (\alpha/\alpha_d) \partial_\eta p \partial_x \phi &= F_U \quad [09] \\
\partial_t V + m_y [\partial_x(Uv) + \partial_y(Vv)] + (m_x/m_y) \partial_\eta(\Omega v) + \mu_d \alpha \partial_y p + (\alpha/\alpha_d) \partial_\eta p \partial_y \phi &= F_V \\
\partial_t W + \left( \frac{m_x m_y}{m_y} \right) [\partial_x(Uw) + \partial_y(Vw)] + \partial_\eta(\Omega w) - m_y^{-1} g [(\alpha/\alpha_d) \partial_\eta p - \mu_d] &= F_W \\
\partial_t \Theta + m_x m_y [\partial_x(U\theta) + \partial_y(V\theta)] + m_y \partial_\eta(\Omega \theta) &= F_\theta \\
\partial_t \mu_d + m_x m_y [U_x + V_y] + m_y \partial_\eta(\Omega) &= 0 \\
\partial_t \phi + \mu_d^{-1} [m_x m_y (U \partial_x \phi + V \partial_y \phi) + m_y \Omega \partial_\eta \phi - m_y g W] &= 0 \\
\partial_t Q_m + m_x m_y [\partial_x(Uq_m) + \partial_y(Vq_m) + m_y \partial_\eta(\Omega q_m)] &= F_{Q_m}
\end{aligned}$$

## II.2.4 Les équations régissantes sous forme perturbée

Pour réduire les erreurs de troncation et les erreurs d'arrondissement dans le calcul du gradient de la pression, il est avantageux d'utiliser les équations en introduisant les variables perturbées. Dans ce but, des nouvelles variables sont définies comme des perturbations à partir de l'état de référence hydrostatique.

$$p = \bar{p}(\bar{z}) + p' \quad \phi = \bar{\phi}(\bar{z}) + \phi' \quad \alpha = \bar{\alpha}(\bar{z}) + \alpha' \quad \mu_d = \bar{\mu}_d(x, y) + \mu_d' \quad [10]$$

En utilisant ces approximations, nous avons :

### II.2.4.1 Les équations du mouvement :

Les équations du mouvement sont écrites comme suit :

$$\begin{aligned}
\partial_t U + m_x [\partial_x(Uu) + \partial_y(Vu)] + \partial_\eta(\Omega u) + (\mu_d \alpha \partial_x p' + \mu_d \alpha' \partial_x \bar{p}) + (\alpha/\alpha_d) (\mu_d \partial_x \phi' + \partial_\eta p' \partial_x \bar{\phi} - \mu_d' \partial_x \phi) &= F_U \quad [11] \\
\partial_t V + m_y [\partial_x(Uv) + \partial_y(Vv)] + (m_x/m_y) \partial_\eta(\Omega v) + (\mu_d \alpha \partial_y p' + \mu_d \alpha' \partial_y \bar{p}) &+ (\alpha/\alpha_d) (\mu_d \partial_y \phi' + \partial_\eta p' \partial_y \bar{\phi} - \mu_d' \partial_y \phi) = F_V \\
\partial_t W + \left( \frac{m_x m_y}{m_y} \right) [\partial_x(Uw) + \partial_y(Vw)] + \partial_\eta(\Omega w) - m_y^{-1} g (\alpha/\alpha_d) [\partial_\eta p' - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r)] &+ m_y^{-1} \mu_d' g = F_W
\end{aligned}$$

**II.2.4.2 L'équation de conservations de masse :**

$$\partial_t \mu'_d + m_x m_y [\partial_x U + \partial_y V] + m_y \partial_\eta (\Omega) = 0 \quad [12]$$

**II.2.4.3 L'équation géo-potentielle :**

$$\partial_t \phi' + \mu_d^{-1} [m_x m_y (U \partial_x \phi + V \partial_y \phi) + m_y \partial_\eta (\Omega \phi) - m_y g W] = 0 \quad [13]$$

**II.2.4.4 Les équations de la température potentielle et de la chaleur restent inchangées**

$$\partial_t \Theta + m_x m_y [\partial_x (U \theta) + \partial_y (V \theta)] + m_y \partial_\eta (\Omega \theta) = F_\theta \quad [14]$$

$$\partial_t Q_m + m_x m_y [\partial_x (U q_m) + \partial_y (V q_m) + m_y \partial_\eta (\Omega q_m)] = F_{Q_m} \quad [15]$$

La relation hydrostatique s'écrit comme suit :

$$\partial_t \phi' = -\overline{\mu_d} \alpha'_d - \alpha_d \cdot \mu'_d \quad [16]$$

Ces équations perturbées avec l'équation d'état représentent les équations à résoudre dans WRF ARW.

**II.2.5 Discrétisation****II.2.5.1 Méthode d'intégration de Runge-Kutta**

Cette méthode décrite dans Wicker et Skamarock (2002) intègre un ensemble d'équation différentielle.

À ce faite, la formulation procède à trois (03) étapes pour arriver de  $\phi(t)$  à  $\phi(t + \Delta t)$  :

$$\phi^* = \phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\phi^t) \quad [17]$$

$$\phi^{**} = \phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\phi^*) \quad [18]$$

$$\phi^{t+\Delta t} = \phi^t + \Delta t R(\phi^{**}) \quad [19]$$

Où  $\Delta t$  est le pas de temps et les indices supérieurs qui dénotent les niveaux de temps.

En outre, la grille d'Arakawa de type C montrée dans la figure suivante, est employée pour le système de grille horizontale. Cette grille produit des résultats plus précis que la grille de type B dans le traitement de l'ajustement géostrophique et de la convection.

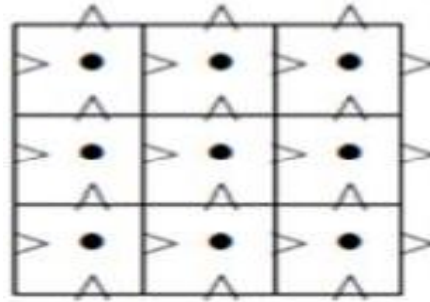


Figure 21 : Grille d'Arakawa-type C

• : Points masses au centre de la grille

> : Points u à l'interface

^ : Points v à l'interface

### II.2.5.2 Discrétisation spatiale

Dans la figure suivante,  $\Delta x, \Delta y$  et  $\Delta \eta$  indiquent les pas de grille. Par conséquent, les variables de position  $x, y, \eta$  sont repérées respectivement par  $i\Delta x, j\Delta y$  et  $k\Delta \eta$ . Ensuite, les variables  $u, v, w$  et les masses sont localisées respectivement par l'intermédiaire des points  $u, v, w$  et les points masses notés  $\theta$  où les variables de diagnostiques comme  $P, \phi, \gamma$  sont calculées.

Les indices  $(i, j, k)$  indiquent des emplacements variables avec  $(x, y, \eta) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta \eta)$ .  $\theta$  définis les points de masse et  $u, v$ , et  $w$  les points  $u$ , les points  $v$  et les points  $w$ . Les variables de diagnostiques utilisés dans le modèle, la pression  $p$  et les densités inverses  $\alpha$  sont déterminées à partir des points de masse. Les longueurs de grille  $\Delta x$  et  $\Delta y$  sont des constantes dans la formulation du modèle.

La longueur verticale de la grille  $\Delta \eta$  n'est pas une constante fixe ; on l'indique dans l'initialisation. L'utilisateur est libre de spécifier les valeurs de  $\eta$  selon les niveaux,  $\eta=1$  à la surface et  $\eta=0$  aux frontières et  $\eta$  diminue monotoniquement entre la surface et les frontières. Ainsi nous pouvons définir la discrétisation spatiale pour le noyau ARW.

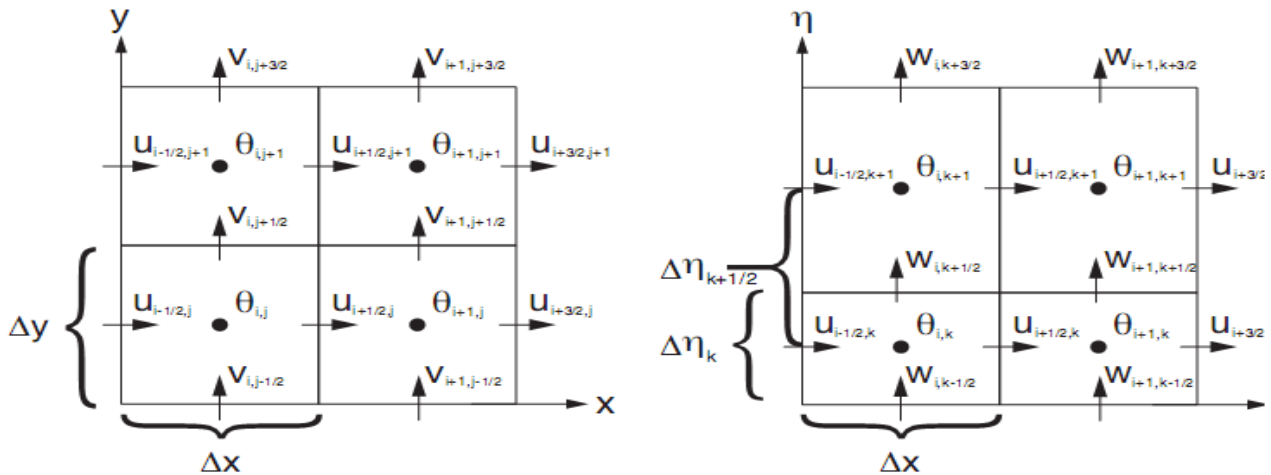


Figure 22 : Grille d'ARAKAWA

## II.2.6 Condition aux limites

L'ARW peut être tourné avec des conditions initiales définies par l'utilisateur pour des simulations idéalisées, ou il peut être tourné en utilisant des données interpolées d'une analyse ou d'une prévision pour le cas de données réel. Les deux cas 2D et 3D pour des simulations idéalisées sont fournis. Plusieurs cas d'essais de simulations pour des données réels sont fournis.

Les programmes qui donnent les conditions initiales spécifiques fournissent au noyau ARW :

- des données d'entrées ;
- un état de référence hydrostatiquement équilibré et des champs de perturbation ;
- des métadonnées spécifiant une telle information comme la date, les caractéristiques physiques de la grille, et les détails de projection.

### Utilisation du système de prétraitement de WRF (WPS)

Le WPS est un ensemble de programmes qui prend des données terrestres et météorologiques (typiquement dans le format de GriB) et les transforme pour l'entrée au programme d'ARW pour le cas des données réelles. La figure suivante montre la circulation des données dans et hors du système de WPS.

La première étape pour le WPS est de définir une grille physique (y compris le type de projection, l'endroit sur le globe, le nombre de points de grille et les distances de grille) et interpoler les champs statiques au domaine prescrit. Indépendant de la configuration de domaine, une analyse externe ou de prévision est traitée par le décodeur de WPS GriB, qui diagnostique les champs exigés et restructure les données GriB en format binaire interne.

Avec un domaine spécifié, WPS interpole horizontalement les données météorologiques sur le domaine projeté.

Les données de sortie de WPS fournissent des images complètes à trois dimensions de l'atmosphère, qui sont ensuite traitées par le programme de prétraitement d'ARW pour les cas de données réelles. L'entrée des données réelles d'ARW de WPS contient des champs à trois dimensions (surface y comprise) de la température (k), de l'humidité relative et des composants horizontaux de la vitesse (m/s).

Les champs terrestres statiques à deux dimensions incluent : albédo, paramètres de Coriolis, altitude de terrain, type de végétation, angle de rotation de carte, catégorie de texture de sol, fraction de verdure de végétation, température significative annuelle, et latitude/longitude.

Les champs à deux dimensions dépendant du temps du modèle externe, après traitement par WPS, incluent : pression et pression de niveau de la mer (Pa), température de sol (k), humidité de sol, profondeur de neige (m) et température de surface de la mer (k).

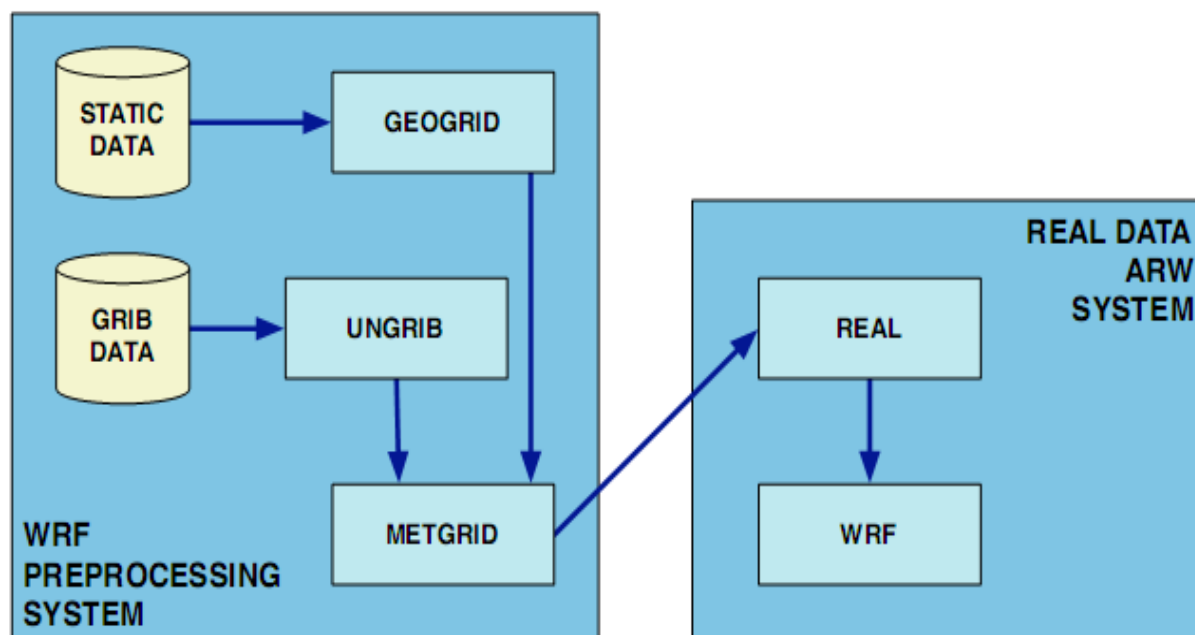


Figure 23 : Circulation des données

La figure ci-dessus montre la circulation des données et les composants de programme WPS et nous indique comment WPS alimente les données initiales à l'ARW.

- GEOGRID : définit le domaine du modèle et crée les fichiers statiques des données terrestres.
- UNGRIB : décode les données de format GriB.
- METGRID : interpole les données météorologiques au domaine du modèle.

### II.3 MISE EN ŒUVRE DU MODELE ARW WRF

Le modèle WRF est un modèle climatique à aire géographique limitée. Le modèle résout explicitement les équations de la dynamique qui assure la conservation et implémente les principaux processus physiques en lien avec le climat (Skamarock et al. (2008)) à savoir :

- Simulations idéalisées (convection, vagues barocline),
- Recherche de paramétrisation,
- Recherche d'assimilation de données,
- Recherche de prévision,
- Applications de modèle couplé

La figure suivante montre l'organigramme du modèle WRF :

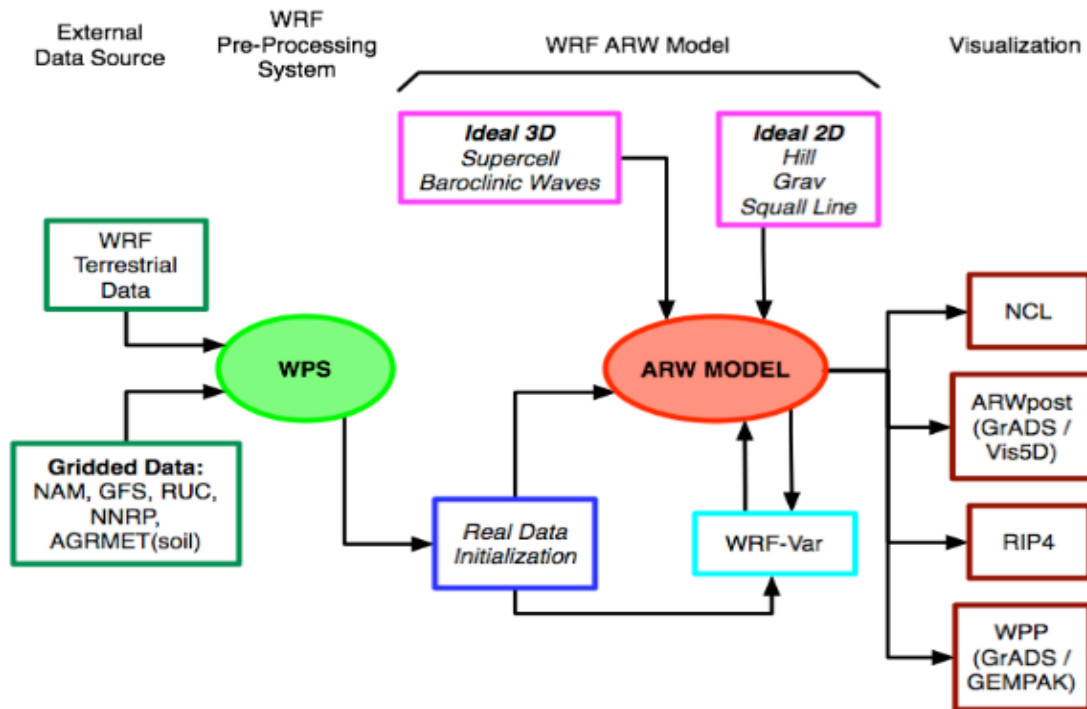


Figure 24 : Organigramme de WRF

Comme le montre la figure, le modèle WRF se compose de ces programmes principaux :

- WPS (WRF Preprocessing System),
- WRF-Var,
- Le noyau ARW,
- Graphiques et outils de vérification.

### II.3.1 WPS

Ce programme est employé principalement pour des simulations de données réelles. Ses fonctions incluent :

- 1) Définir des domaines de simulation,
- 2) Interpolation des données terrestres au domaine de simulation, et
- 3) Interpolation des données météorologiques d'un autre modèle à ce domaine de simulation.

Ses caractéristiques principales incluent :

- GRIB 1/2 données météorologiques de divers centres à travers le monde, Projections de carte (stéréographique polaire, Lambert-Conforma, Mercator et latitude-longitude),
- Nesting
- Interfaces utilisateurs pour entrer d'autres données statiques.



### II.3.2 WRF-VAR

Ce programme est facultatif, mais peut être employé pour ingérer des observations dans les analyses interpolées créées par WPS. Il peut également être employé pour mettre à jour les conditions initiales du modèle WRF quand celui-ci est tourné en mode cycle.

### II.3.3 Le noyau ARW

C'est la composante clé du modèle, qui se compose de plusieurs programmes d'initialisation pour des simulations idéalisée et de données réelles (voir chapitre précédent), et du programme numérique d'intégration. Les principales caractéristiques du modèle WRF incluent :

- 1) Équations non hydrostatiques entièrement compressibles avec l'option hydrostatique,
- 2) Applications régionales et globales
- 3) Les termes complets de Coriolis et de courbure,
- 4) Le Nesting bidirectionnel,
- 5) Le Nesting unidirectionnel,
- 6) L'espacement vertical de la grille peut changer avec la taille,
- 7) Forme de conservation scalaire de flux pour des variables pronostiques,
- 8) Options d'advection (horizontale et verticale) de 2èmes à 6èmes ordre,
- 9) Transport monotonique et option d'advection positive-définie pour l'humidité,
- 10) Conditions aux limites (cas idéalisés : périodiques, symétriques et radiatifs ; cas réels : précisés avec la zone de relaxation),
- 11) Pleines options physiques pour la surface de la Terre, la couche limite planétaire, la radiation surfacique et atmosphérique, la microphysique et la convection de cumulus,
- 12) Initialisation de filtre Numérique,
- 13) Progression adaptative de temps,
- 14) Vague de pesanteur
- 15) Un grand nombre d'exemples idéalisés.

### II.3.4 Graphiques et outils de vérification

Plusieurs programmes sont soutenus, à savoir RIP4 (basé sur des graphiques de NCAR), graphiques de NCAR en Langage de Commande (NCL), et programmes de conversion pour d'autres logiciels graphiques aisément disponibles : GrADS et Vis5D.

### II.3.5 CONFIGURATION DU MODÈLE

#### II.3.5.1 Étapes de compilation

Le modèle est codé en langage fortran90/95 et C massivement parallélisé. La parallélisation consiste à répartir la charge de calcul sur plusieurs processeurs. Les multiples tâches de calcul nécessitent des communications entre elles pour leur synchronisation et l'échange d'information.

Cela se fait à partir du protocole implémenté dans la librairie MPI (Message Parsing Interface) lorsqu'on utilise de la mémoire distribuée (distributed memory) et/ou avec la librairie OPENMPI lorsqu'on utilise de la mémoire partagée (shared memory). Même si la parallélisation massive permet de réduire le coût en calcul, l'utilisation du modèle n'est réaliste que dans un environnement de calcul scientifique intensif, c'est-à-dire au sein de supercalculateurs ou de grappes/fermes (cluster) de calcul. Son utilisation nécessite également des ressources mémoire très importantes et de disposer d'un espace de stockage conséquent.

La compilation de WPS doit obligatoirement être réalisée après celle du noyau ARW. La compilation se déroule en 2 étapes :

- ❖ la compilation du noyau ARW ;
- ❖ la compilation du système de pré-traitement WRF Preprocessing System (WPS).

Ces deux éléments partagent les routines d'entrées et de sorties WRF I/O API. La compilation se fait sur les machines performantes avec un système d'exploitation Linux.

Les librairies nécessaires à la compilation sont :

- ✓ Compilateur FORTRAN 90/95 : ici Intel ;
- ✓ Compilateur C : ici gcc ;
- ✓ Perl ;
- ✓ NetCDF ;
- ✓ MPI ;

La figure suivante résume les 3 étapes de simulations :



Figure 25 : Etapes de simulation

Nous disposons maintenant de deux nouveaux dossiers WRFV3 et WPS. Pour procéder à la compilation afin d'obtenir les exécutables du modèle, il faut :

- ❖ Définir les options de compilation en fonction du type de machine, du compilateur et des librairies ;
- ❖ Définir l'environnement de compilation parallèle ;
- ❖ Lancer la compilation.

Si la compilation est réussie, nous devons avoir 3 nouveaux exécutables : geogrid.exe, ungrib.exe et metgrid.exe.

- ☞ **geogrid.exe** : définit la taille/localisation des domaines et extrait les données d'entrée statiques ;
- ☞ **ungrib.exe** : extrait les champs météorologiques des fichiers GRIB ;
- ☞ **metgrid.exe** : réalise l'interpolation horizontale des champs météorologiques (issus de ungrib) à la maille de simulation des domaines (définis par geogrid).

### II.3.5.2 Compilation de geogrid, ungrib et metgrid

#### II.3.2.5.1 Geogrid

Le geogrid interpole les champs terrestres statiques à la maille de simulation (type de sol, taille de terrain, fraction mensuelle de végétation, l'albédo mensuel,...).

La préparation des données passe par la configuration du fichier « namelist.wps ». Ce fichier est la clé de voute pour la préparation des données. C'est dans ce fichier que :

- la période et l'aire géographique y sont définies
- les données d'entrée statiques et dynamiques utilisées y sont sélectionnées,
- l'interpolation des données à la maille de simulation est effectuée et le format des données est fixé.

Il existe deux manières de créer des domaines emboîtés :

- manuellement en ajustant les valeurs de la partie « &geogrid » du fichier « namelist.input » ;
- interactivement en utilisant l'interface « WRF Domain Wizard ».

Pour notre cas, les trois domaines se présentent comme suit :

#### **Domaine père :**

Latitude : 5°-35° Sud

Longitude : 25°E-70°Est

#### **Domaine fils 1 :**

Latitude : 10°-30° Sud

Longitude : 30°-55°Est

#### **Domaine fils 2 :**

Latitude :15-24 Sud

Longitude :39-49 Est

C'est le premier domaine qui fixe la fenêtre géographique de l'aire de simulation par l'intermédiaire des coordonnées géographiques du centre. Les domaines emboîtés ne sont localisés que par rapport au domaine parent (domaines fils).

Pour geogrid seuls les éléments &share et &geogrid de namelist.wps nécessitent d'être édités. La partie &share permet d'indiquer quel noyau est utilisé (ici ARW), le nombre total de domaines, le format de sortie des données (2=NetCDF) ; La partie &geogrid fixe le domaine géographique à simuler, le type de projection géographique et les chemins d'accès aux données de surface.

Avant de lancer « geogrid.exe », il faut s'assurer que le domaine est dans le bon endroit. Pour cela, il faut que les graphiques de NCAR soient préalablement installés.

Si une erreur survient lors de l'exécution, il faut analyser les messages contenus dans le fichier geogrid.log. Si l'exécution s'est bien déroulée, nous devons avoir dans notre répertoire autant de fichiers avec le préfixe « geo\_em.d0<numéro de domaine>.nc » que de domaine.

## WPS Domain Configuration

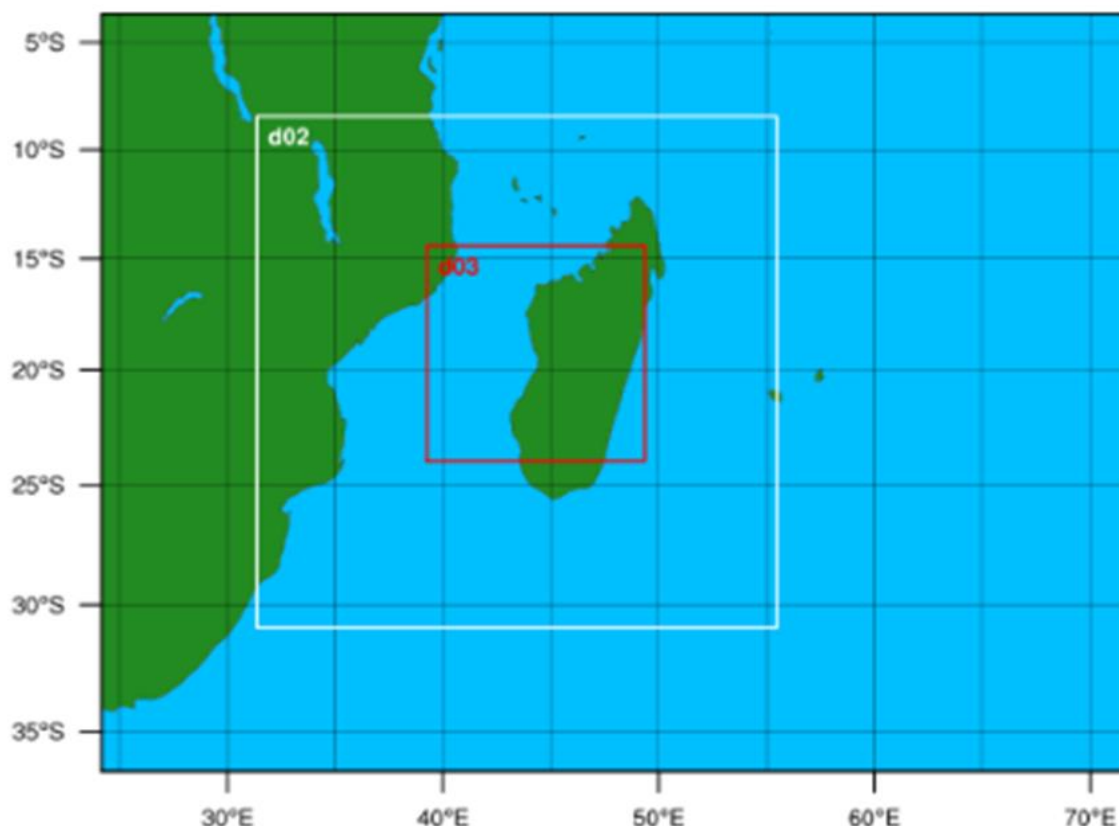


Figure 26 : WPS domaine

### II.3.2.5.2 Ungrib

L'ungrib édite les parties &share et &ungrib de namelist.wps. La partie « &share » permet d'indiquer la période d'extraction des données (2015-02-25 au 2015-02-27) et le pas de temps des données (21600=6hrs).

La partie « &ungrib » indique dans quel format binaire intermédiaire seront les données (WPS, SI, MM5). Le format WPS est recommandé (voir annexes).

Il faut faire un lien sur les fichiers GRIB car ils contiennent les variables météorologiques, de surface terrestre et des océans de large échelle qui sont utilisés pour fixer les conditions aux bornes.

Si l'exécution est un succès, les fichiers intermédiaires préfixés ont été générés et sont utilisés pour la dernière étape du preprocessing.

#### II.3.2.5.3 Metgrid

Ici on s'assurera que tous les préfixes des fichiers intermédiaires sont présents. Si le calcul s'est bien déroulé, les fichiers préfixés « met\_em » ont été créés pour chaque pas de temps et pour tous les domaines. L'étape de préparation des données est terminée. Les fichiers « met\_em » vont maintenant servir pour l'étape de création des "inputs" nécessaires pour l'initialisation et la simulation.

Pour gagner de l'espace disque, il est possible (mais bien sûr pas obligatoire), à ce stade, de supprimer les fichiers temporaires générés par WPS.