**CHAPITRE 2 : Antériorité de l’utilisation de la stratégie de coupage d’un modèle numérique météorologique à un module électromagnétique pour les hautes latitudes**

Le premier chapitre a introduit les caractéristiques climatiques observées dans les régions polaires qui ont un impact sur la propagation radio, ainsi que les différents modèles d'atténuation disponibles dans les recommandation ITU pour prédire le comportement statistique du canal de propagation radio. Comme expliqué, le manque de données expérimentales dans de telles régions pose problème à la fois pour valider les modèles d'atténuation couramment utilisés (généralement développés à partir de données de propagation aux latitudes moyennes) et pour développer des modèles plus adaptés. Comme mentionné dans l'introduction, l'utilisation des modèles de Prévision Numérique Météorologique (PNM) dans les études de propagation est une nouvelle tendance qui semble très prometteuse pour produire des données de propagation synthétiques partout dans le monde tout en tenant compte de la climatologie locale, ce qui pourrait contribuer à pallier le manque de données expérimentales dans toutes les régions. Par conséquent, dans ce chapitre, nous allons étudier la stratégie de couplage entre un modèle météorologique et un module électromagnétique, déployée pour calculer avec précision l'atténuation troposphérique subie par les ondes électromagnétiques. Dans un premier temps, nous plongerons dans les détails des simulations météorologiques en présentant le modèle numérique WR. Ce modèle est largement utilisé pour tous types d’applications nécessitant des détails sur les conditions atmosphériques du milieu et à les avantages d’être open source et d’avoir une communauté active. Par la suite, la seconde partie du chapitre décortiquera le module électromagnétique (EMM) utilisé pour transformer les données météorologiques en informations d’atténuations. Enfin, la troisième partie présentera la comparaison des données en atténuations obtenus par l’application de la stratégie de couplage du modèle numérique météorologique WRF avec le module électromagnétique (EMM) et celles issue de la campagne expérimentale sur l’archipel des Svalbard présenté dans le chapitre 1. Cette exploration nous aidera à mieux comprendre comment les conditions atmosphériques affectent les ondes radio, mais aussi de mettre en avant les spécificités des régions polaires liées à cette étude.

# Weather Research and Forecasting (WRF)

Le Modèle de Recherche et de Prévision Météorologique WRF est un système de modélisation atmosphérique open-source utilisé pour la recherche et les prévisions météorologiques. Il a été développé dans les années 1990 dans le but de créer un système partagé entre la recherche et les opérations météorologiques, surmontant ainsi les limitations des systèmes existants. WRF a été développé grâce à un partenariat impliquant le National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), l'United States Air Force, le Naval Research Laboratory, l'Université de l'Oklahoma et l'Administration fédérale de l'aviation.

WRF est un modèle flexible et modulaire, pouvant être utilisé sur différents types d'ordinateurs, du portable aux supercalculateurs. Il offre diverses options de physique et de dynamique, ce qui en fait un outil puissant pour les prévisions numériques du temps (NWP). Il dispose également d'un système d'assimilation de données et prend en charge des applications spécialisées telles que la modélisation chimique, hydrologique et des incendies de forêt, ainsi que la prévision de l'énergie solaire.

Le modèle WRF est largement utilisé dans la recherche, les opérations météorologiques en temps réel, les études sur les événements météorologiques et les processus atmosphériques, ainsi que pour la modélisation climatique régionale et d'autres applications spécialisées. Le système WRF se compose de composants principaux, dont le WRF Software Framework (WSF), le solveur dynamique Advanced Research WRF (ARW) et le solveur NMM (Modèle Nonhydrostatique à Mésoéchelle). Ces composants permettent au modèle de fonctionner sur différentes échelles, de la petite turbulence à l'échelle mondiale.

Ajouter plan

## Advanced Research WRF (ARW)

L'ARW (Advanced Research WRF) est une configuration spécifique du système WRF (Weather Research and Forecasting), comprenant le solveur dynamique ARW ainsi que d'autres composants compatibles pour produire une simulation atmosphérique. Il constitue un sous-ensemble du système WRF et inclut non seulement le solveur spécifique, mais également des schémas de physique, des options numériques/dynamiques, des routines d'initialisation et un package d'assimilation de données (WRFDA). Le solveur ARW partage le WSF (WRF Software Framework) avec le solveur NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) et tous les autres composants du système WRF.

Les packages de physique sont en grande partie partagés par les solveurs ARW et NMM, bien que la compatibilité spécifique puisse varier en fonction des schémas considérés. Il est important de noter que l'association d'un composant du système WRF avec l'ARW n'empêche pas ce composant d'être utilisé dans des configurations WRF utilisant le solveur NMM.

La version 4 de l'ARW, sortie en mai 2018, met l'accent sur les approches scientifiques et algorithmiques, notamment le solveur, les options de physique, les capacités d'initialisation, les conditions aux limites et les techniques de nichage de grille. Le WSF fournit l'infrastructure logicielle nécessaire. Le système d'assimilation de données pour le WRF, appelé WRFDA, a été adapté à partir du système 3DVAR (assimilation de données variationnelle tridimensionnelle) du modèle MM5 (Mesoscale Model 5) de l'Université de Pennsylvanie et du NCAR.

## Equations régissant le modèle

Le solveur dynamique ARW résout les équations d'Euler compressibles et non hydrostatiques en utilisant une approche de formulation de flux. Cette méthode, inspirée de la philosophie d'Ooyama (1990), implique l'utilisation de variables présentant des propriétés de conservation. Les équations sont exprimées en utilisant la pression hydrostatique comme variable indépendante, conformément à la méthode développée par Laprise en 1992. De plus, la coordonnée verticale est définie en suivant le relief du terrain, utilisant une formulation hybride sigma-pression. Dans les sections suivantes, nous abordons la définition de la coordonnée verticale et exposons les équations en forme de flux dans l'espace cartésien.

### Coordonnées verticales et variables en forme de flux

Les équations du modèle ARW (Advanced Research WRF) sont formulées en utilisant une coordonnée verticale suivant le relief, appelée coordonnée de pression hydrostatique, notée , aussi connue sous le nom de coordonnée de masse. Dans les versions antérieures du modèle ARW, était défini comme suit :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2. ) |

Où représente la composante hydrostatique de la pression de l'air sec, et et sont les valeurs de le long des limites de la surface et du sommet, respectivement. Cette définition de coordonnée, proposée par Laprise (1992) pour les équations non hydrostatiques, est la coordonnée sigma traditionnelle utilisée dans de nombreux modèles atmosphériques hydrostatiques. varie de 1 à la surface à 0 à la limite supérieure du domaine du modèle.

Dans la version 4 du modèle ARW, la coordonnée verticale a été généralisée pour permettre une influence plus rapide du relief sur les surfaces de coordonnées avec l'augmentation de l'altitude par rapport à la surface. Pour cette coordonnée verticale modifiée, on utilise une coordonnée hybride sigma-pression, telle que décrite par Park et al. (2013), similaire à celle utilisée dans le modèle atmosphérique communautaire du National Center for Atmospheric Research (NCAR):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2. ) |

Ici, est une pression de référence au niveau de la mer. La fonction définit la pondération relative entre la coordonnée sigma suivant le relief et une coordonnée de pression pure, de sorte que correspond à la coordonnée sigma (voir figure 2.1) pour et redevient une coordonnée de pression hydrostatique pour . Pour assurer une transition en douceur d'une coordonnée sigma près de la surface à une coordonnée de pression aux niveaux supérieurs, est défini par un polynôme du troisième ordre, soumis aux conditions aux limites suivantes :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2. ) |

Ici, est une valeur spécifiée de à laquelle elle devient une coordonnée de pression pure.

La métrique de la coordonnée verticale est définie comme suit :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2. ) |

Puisque est proportionnel à la masse par unité de surface dans une cellule de grille, les formes de flux appropriées pour les variables pronostiques sont définies comme suit :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2. ) |

Où sont les vitesses covariantes dans les directions horizontales et verticales, tandis que est la vitesse verticale contravariante. est la température potentielle humide et ou représente les ratios de mélange des variables d'humidité (vapeur d'eau, eau nuageuse, eau de pluie, neige, etc.). Bien que le géopotentiel soit également une variable pronostique dans les équations gouvernant le modèle ARW, il n'est pas écrit sous forme de flux car n'est pas une quantité conservée.

Ajouter figure 2.1

### Equations d’Euler en forme de flux du modèle ARW

En utilisant les variables définies précédemment, les équations d'Euler en forme de flux peuvent être écrites comme suit :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2. ) |
|  |  | (2. ) |
|  |  | (1. ) |
|  |  | (2. ) |
|  |  | (2. ) |
|  |  | (2. ) |
|  |  | (2. ) |

avec l'équation diagnostique pour la pression hydrostatique sèche :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2. ) |

et la relation diagnostique pour la pression totale (air sec plus vapeur d'eau) :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2. ) |

Dans ces équations, est l'inverse de la densité de l'air sec et est l'inverse de la densité prenant en compte la densité totale de la colonne .

Dans les équations (2.6) - (2.12), les indices et indiquent la différenciation,

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1. ) |

et

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1. ) |

où représente une variable générique. est le ratio des capacités calorifiques pour l'air sec, est la constante des gaz pour l'air sec, et est la pression de surface de référence (typiquement 105 Pascals). Les termes du côté droit (RHS) , , , et représentent les termes de forçage provenant de la physique du modèle, du mélange turbulent, des projections sphériques et de la rotation de la Terre.

## Discrétisation du modèle

Le solveur ARW utilise un schéma d'intégration en temps à division temporelle. En général, les modes lents ou de basse fréquence (météorologiquement significatifs) sont intégrés à l'aide d'un schéma d'intégration temporelle de Runge-Kutta d'ordre trois (RK3), tandis que les modes acoustiques de haute fréquence sont intégrés sur des pas de temps plus courts pour maintenir la stabilité numérique. Les modes acoustiques se propageant horizontalement (y compris le mode externe présent dans les équations de coordonnées de masse utilisant une condition aux limites supérieures de pression constante) ainsi que les ondes gravitationnelles sont intégrés à l'aide d'un schéma d'intégration temporelle avant-arrière, tandis que les modes acoustiques se propageant verticalement et les oscillations de la flottabilité sont intégrés à l'aide d'un schéma implicitement vertical (utilisant le pas de temps acoustique). L'intégration en division temporelle pour les équations de forme de flux est décrite et analysée dans Klemp et al. (2007). La division temporelle est similaire à celle développée initialement par Klemp et Wilhelmson (1978) pour l'intégration temporelle en alternance et analysée par Skamarock et Klemp (1992). Cette approche de division temporelle a été étendue au schéma RK3, comme décrit dans Wicker et Skamarock (2002).

### Schéma d’intégration de Runge-Kutta

Le schéma RK3, tel que décrit dans Wicker et Skamarock (2002), intègre un ensemble d'équations différentielles ordinaires en utilisant une formulation de prédicteur-correcteur. En définissant les variables prognostiques dans le solveur ARW comme et les équations du modèle comme , l'intégration RK3 prend la forme de trois étapes pour faire progresser une solution à :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2. ) |
|  |  | (2. ) |
|  |  | (2. ) |

où ∆t est l'intervalle de temps pour les modes de basse fréquence (l'intervalle de temps du modèle). Dans (2.17) - (2.19), les indices en exposant représentent les niveaux de temps. Ce schéma n'est pas un vrai schéma de Runge-Kutta en soi, car bien qu'il soit précis à l'ordre trois pour les équations linéaires, il est seulement précis à l'ordre deux pour les équations non linéaires.

### Intégration acoustique