CHAPITRE 2 : WRF-EMM

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 radio dans la littérature. Au cœur de notre analyse se trouve l'étude de J. Queyrel 2019, particulièrement intéressante pour ces travaux puisqu'elle est la seule à se pencher exclusivement sur les défis posés par les régions polaires. Dans la première section, nous dresserons un panorama des études préliminaires qui utilise cette stratégie pour créer des statistiques de propagations. Par la suite, la seconde partie de notre chapitre plongera dans les détails des simulations météorologiques spécifiquement employées au sein de l'étude THOR7. Enfin, dans la troisième section, nous décortiquerons le module électromagnétique utilisé pour transformer les données météorologiques en informations d'atténuation. Cette exploration nous aidera à mieux comprendre comment les conditions atmosphériques affectent les ondes radio dans les régions polaires.

# 2.1 Antériorité de la stratégie de coupable d’un modèle numérique météorologique à un module électromagnétique

# 2.1. Weather Research and Forecasting (WRF)

Cette section fournit une explication détaillée du modèle de prévision numérique du temps très largement utilisé dans les travaux de recherches de prédiction d’atténuation basé sur des simulations météorologiques numériques, à savoir le modèle Weather Research and Forcecasting (WRF). Après une brève description de l'architecture du modèle et des données d'entrée requises, nous présentons les données météorologiques produites par le modèle, pertinentes pour les calculs de propagation. Ensuite, nous examinons la configuration physique du modèle, en mettant en évidence les paramètres macrophysiques ayant le plus grand impact sur le modèle. Enfin, nous mettons l'accent sur le schéma microphysique utilisé dans le cadre de WRF, tout en fournissant un aperçu des schémas couramment employés dans les régions polaires.

## 2.1.1 Présentation de WRF

Le modèle WRF est un système de prévision numérique du temps à échelle régionale, également qualifié de modèle à méso-échelle. Ce modèle a été développé pour servir à la fois de moyen de recherche et de prédiction météorologique numérique. Il est capable de reproduire une portion tridimensionnelle spécifique de l'atmosphère avec des résolutions spatiales et temporelles élevées. L'architecture de ce modèle peut être divisée en deux modules distincts, à savoir le Système de Prétraitement WRF (WPS) et le Noyau WRF. Le module WPS englobe trois programmes qui rassemblent et traitent les données géographiques et météorologiques, préparant ainsi les informations d'entrée pour le Noyau WRF. Ce dernier, constitué de deux programmes, génère les conditions initiales et les limites de simulation requises avant d'amorcer la propre simulation météorologique.

Le module WPS se constitue de trois programmes distincts : geogrid, ungrib et metgrid. Le premier, geogrid, configure la grille physique en prenant en compte divers paramètres d'entrée tels que la projection utilisée, les coordonnées de latitude et de longitude, le nombre et la résolution des points de grille, ainsi que les emplacements des domaines. Ce programme réalise également l'interpolation des champs géographiques statiques vers les différentes grilles de simulation. Le deuxième programme, ungrib, joue un rôle de transformation des données météorologiques. Ces données, issues d'une base de données de réanalyse, sont converties depuis le format grib vers un format binaire interne requis par le programme metgrid. Ce dernier, le troisième programme du module WPS, effectue une interpolation horizontale des données météorologiques sur les domaines projetés, en utilisant les sorties des programmes geogrid et ungrib.

L'objectif principal du module WPS consiste à fournir une représentation tridimensionnelle complète de l'atmosphère sur la grille de simulation, à des intervalles de temps spécifiques tout au long de la simulation. Les sorties de ce module, contenant des champs tridimensionnels tels que la température, l'humidité relative, la hauteur géopotentielle, la pression et le vent horizontal, sont ensuite transmises au cœur du modèle WRF, appelé WRF Core.

Le WRF Core, quant à lui, se compose de deux programmes distincts. Avant de lancer le programme wrf.exe, qui entame la simulation atmosphérique en utilisant divers schémas physiques, le programme real.exe est exécuté. Ce dernier a pour double objectif d'effectuer une interpolation verticale des différents champs météorologiques issus du module WPS sur les 37 niveaux de pression de la simulation, et de générer les conditions initiales ainsi que les conditions aux limites de la simulation à chaque intervalle temporel, dépendant des données de réanalyse météorologique utilisées.

La structure architecturale de ce modèle est illustrée dans la figure 2.1, où les deux composantes distinctes du modèle sont représentées. La section qui suit aborde en détail les données d'entrée requises par le modèle, ainsi que les sorties pertinentes pour l'étude de la propagation des ondes radio dans l'atmosphère.

**Figure 2.1: Architecture du module WPS et du WRF Core, (Skamarock et al., 2019)**

## 2.1.2 Paramètres d’entrée et de sortie de WRF

Le modèle WRF, plus précisément le module WPS, requiert des données météorologiques d'entrée pour amorcer la simulation. Ces champs d'entrées jouent un rôle primordial dans le calcul des conditions aux limites initiales et latérales nécessaires à la simulation. Cette nécessité découle du fait que le modèle WRF se focalise sur les prévisions numériques du temps à l'échelle régionale. Contrairement aux prévisions numériques globales qui fonctionnent comme des systèmes fermés et bénéficient de conditions aux limites périodiques du fait de l'intégration de l'ensemble de l'atmosphère mondiale dans la simulation, le modèle WRF requiert des informations détaillées sur les frontières de la région d'intérêt.

Les données essentielles pour lancer le modèle WRF sont énumérées dans le tableau 2.1. Ces paramètres météorologiques sont généralement extraits de bases de données de réanalyse telles qu'ERA-Interim (Berrisford et al., 2011) ou ERA5 (Hersbach et al., 2020) de l'ECMWF, ainsi que du Global Forecast System (GFS) de la NOAA (GFS, 2003). Le modèle WRF effectue une multitude de calculs météorologiques, car il s'agit d'un simulateur atmosphérique complexe. Cette complexité lui permet de générer un large éventail de paramètres afin de fournir des informations variées pour les prévisions et les analyses. Les sorties peuvent englober des champs tridimensionnels tels que la pression et la température, des caractéristiques du sol, des composantes du vent et les accumulations de précipitations. La nature de la sortie peut varier entre des champs bidimensionnels et tridimensionnels, en fonction du paramètre simulé.

En ce qui concerne le calcul des atténuations troposphériques, seuls un nombre limité de sorties sont nécessaires. En ce qui concerne la propagation Terre-espace, les paramètres suivants sont indispensables :

- Pour l'atténuation due aux gaz atmosphériques : pression 𝑃, température 𝑇, rapport de mélange vapeur d'eau 𝑄𝑣 et densité de l'air 𝜌𝑎.

- Pour l'atténuation due aux nuages : température 𝑇, rapport de mélange des nuages 𝑄𝑐 et densité de l'air 𝜌𝑎.

- Pour l'affaiblissement dû aux hydrométéores de catégorie : température 𝑇, rapport de mélange de la catégorie d’hydrométéore 𝑄 et densité de l'air 𝜌𝑎.

Les méthodes pour calculer les contributions à l'atténuation totale troposphérique provenant des gaz, des nuages et des hydrométéores à partir des sorties du modèle WRF, comme mentionné précédemment, sont expliquées en détail dans la section 2.2.

**Table 2.2: Données météorologiques requise pour le lancement d’une simulation WRF**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Symbole | Dimension | Description |
| 3 dimensions | T | K | Température de l’air |
| RH | % | Humidité relative de l’air |
| SPEHUM | kg.kg-1 | Humidité spécifique de l’air |
| U | m.s-1 | Vitesse du vent dans la direction u |
| V | m.s-1 | Vitesse du vent dans la direction v |
| GHT | m | Hauteur géopotentielle |
| P | Pa | Pression |
| 2 dimensions | P2m | Pa | Pression à 2m |
| SSP | Pa | Pression à la surface du sol |
| SKINT | K | Température à la surface du sol |
| SHGT | m | Hauteur du sol |
| T2m | K | Température de l’air à 2m |
| RH2m | % | Humidité relative de l’air à 2m |
| SPEHUM2m | kg.kg-1 | Humidité spécifique de l’air à 2m |
| U2m | m.s-1 | Vitesse du vent dans la direction u à 2m |
| V2m | m.s-1 | Vitesse du vent dans la direction v à 2m |
| LANDSEA | / | grille de terre ou mer (0=eau, 1=terre) |

## 2.1.3 Configurations des simulations atmosphériques

Le modèle WRF comprend sept ensembles de schémas physiques qui sont utilisés pour configurer la simulation, chacun étant spécifiquement dédié à une fonction particulière. Ces rôles sont décrits en détail dans (Skamarock et al., 2019) et sont également énumérés ci-dessous :

* Microphysique : La microphysique dans WRF englobe les processus de vapeur d'eau, de nuages et de précipitations explicitement résolus. Les schémas de microphysique utilisent des tableaux quadridimensionnels pour transporter les variables de mélange massique et d'autres grandeurs, et ces schémas sont exécutés à la fin de l'intervalle de temps pour ajuster les états sans fournir de tendances. Les schémas gèrent la condensation et le chauffage latent, et les processus de sédimentation sont inclus pour les précipitations. Différentes options de microphysique existent en fonction des processus en phase glace et mixte, recommandées pour des résolutions de grille inférieures à 10 km. Pour une explication plus approfondie, voir à la section 2.1.4.
* Nuage : Responsables des effets des nuages, qu'ils soient de nature convective, superficielle et non précipitante. Les schémas de nuage ont pour but de représenter les flux verticaux dus aux courants ascendants et descendants non résolus ainsi qu'aux mouvements compensatoires en dehors des nuages. Théoriquement, leur validité est limitée aux tailles de grille supérieures à 10 km, mais ils sont parfois employés pour calculer la convection avec des résolutions de grille de 5 à 10 km. Pour une résolution de grille inférieure à 4 km, leur utilisation n'est pas recommandée (Skamarock et al., 2019).
* Nuage peu profond : De manière similaire à la paramétrisation des cumulus profonds, ces schémas représentent le transport de la chaleur et de l'humidité dans les nuages peu profonds, et parfois non précipitants. Étant donné que l'échelle du nuage convectif peu profond est généralement plus petite que celle de son homologue profond, ces schémas doivent être utilisés dans les modèles lorsqu’un schéma de cumulus profond est désactivé.
* Couche de surface : Les schémas de couche de surface calculent les vitesses de friction et les coefficients d'échanges, permettant ainsi le calcul des flux de chaleur et d'humidité à la surface par les modèles de surface terrestre. Pour les surfaces d'eau, les flux de surface et les champs diagnostiques de surface sont calculés directement dans le schéma de couche de surface. Actuellement, chaque option de couche de surface est liée à des options spécifiques de couche limite, mais à l'avenir, plus d'interchangeabilité et d'options pourraient être disponibles. Les schémas utilisent la théorie de similarité de Monin-Obukhov avec des variations dans les fonctions de stabilité et dans les méthodes de calcul des longueurs de rugosité. La théorie de similarité relie les informations au niveau le plus bas du modèle à la surface via un profil de vent et de grandeurs scalaires approximativement logarithmique. Les sorties diagnostiques des quantités à 2 mètres et 10 mètres sont calculées de manière cohérente avec les profils de ces schémas.
* Surface terrestre : Les modèles de surface terrestre utilisent les informations atmosphériques provenant du schéma de couche de surface, les forçages radiatifs provenant du schéma de rayonnement, et les forçages de précipitations issus des schémas de microphysique et de convection. Ils combinent ces informations avec des données internes sur les variables d'état du sol et les propriétés de surface pour fournir des flux de chaleur et d'humidité sur les points terrestres et les points de glace de mer. Ces flux servent de condition limite inférieure pour le transport vertical effectué dans les schémas de couche limite planétaire. Les modèles de surface terrestre présentent différents niveaux de sophistication pour traiter les flux thermiques et d'humidité dans plusieurs couches du sol, et peuvent également prendre en compte les effets de la végétation, des racines, de la canopée et prédire la couverture neigeuse à la surface. Le modèle de surface terrestre ne fournit pas de tendances, mais il met à jour les variables d'état du sol, qui comprennent la température de surface, le profil de température du sol, le profil d'humidité du sol, la couverture neigeuse, et éventuellement les propriétés de la canopée. Il n'y a pas d'interaction horizontale entre les points voisins dans le schéma de surface terrestre, de sorte qu'il peut être considéré comme un modèle unidimensionnel de colonne pour chaque point de grille terrestre du WRF.
* Limites planétaires : Le schéma de couche limite planétaire gère les flux verticaux à petite échelle dus aux mouvements turbulents dans toute la colonne atmosphérique, et non seulement dans la couche limite. Lorsqu'un PBL est activé, la diffusion verticale explicite est désactivée, car le PBL est censé prendre en charge ce processus. Les flux de surface sont fournis par les schémas de couche de surface et de surface terrestre. Les schémas de couches limites planétaires déterminent les profils de flux dans la couche et dans la couche stable, fournissant ainsi les tendances atmosphériques de température, d'humidité (y compris les nuages) et de moment horizontal dans toute la colonne atmosphérique. Ces schémas sont unidimensionnels et supposent une séparation claire entre les tourbillons sous-résolus et résolus. Dans des résolutions de grille inférieures à quelques centaines de mètres, où les tourbillons de la couche limite commencent à être résolus, les schémas perdent leur validité et devraient être remplacés par des schémas de turbulence sous-résolue entièrement tridimensionnels.
* Radiations atmosphériques : Les schémas de rayonnement dans WRF sont responsables des transferts radiatifs dans l'atmosphère, comprenant la radiation à ondes longues et courtes. Ils influencent les tendances de température et fournissent la radiation descendante à la surface, tout en tenant compte des nuages, de la vapeur d'eau, et des gaz traces. Ces schémas sont unidimensionnels et traitent chaque colonne indépendamment, en utilisant des plans uniformes horizontalement infinis avec des fractions de nuages pour chaque couche. Ils incluent des sorties diagnostiques pour différents aspects du rayonnement solaire et thermique. En plus des schémas de transfert radiatif, WRF dispose de méthodes de relaxation de température idéalisées pour des cas de test spécifiques.

Bien que les paramétrisation de la physique du modèle soient catégorisées de manière modulaire, il convient de noter qu'il existe de nombreuses interactions entre elles via les variables d'état du modèle (température, humidité, vent, etc.) et leurs tendances, ainsi que via les flux de surface, comme illustré à la figure 2.2.

Figure 2.2: Interactions directes entre chaque module de physique, (Skamarock et al., 2019)

## 2.1.4 Schémas microphysiques

La microphysique englobe de manière explicite les processus de la vapeur d'eau, des nuages et des précipitations. Le modèle est suffisamment général pour accueillir un nombre quelconque de variables de rapport de mélange de masse, ainsi que d'autres quantités telles que le nombre de particules par unité de masse d'air sec. Des tableaux quadridimensionnels avec trois indices spatiaux et un indice d'espèce sont utilisés pour transporter de telles grandeurs scalaires. La taille de la quatrième dimension dans ces tableaux est allouée en fonction des besoins du schéma choisi. Par exemple, le schéma microphysique initial adopté dans le cadre de WRF, appelé schéma Kessler, prenait en compte seulement trois types d'eau : la vapeur d'eau, les nuages et la pluie (Kessler, 1969). Suite à plusieurs années de recherche et de développement, des modèles capables de traiter jusqu'à sept types d'espèces d'eau ont été introduits, tel que le modèle WSM7 (Bae et al., 2019). Dans la version actuelle de WRF, la microphysique est effectuée à la fin de l'étape de temps en tant que processus d'ajustement, et par conséquent, elle ne fournit pas de tendances mais met à jour directement les variables d'état.

Les différentes options de microphysique ont des nombres variables d'humidité, en fonction des processus de phase de glace et de phase mixte inclus. Les processus de phase mixte sont ceux qui résultent de l'interaction des particules de glace et d'eau, tels que le givrage qui produit de la grêle ou du grésil. En règle générale, pour des tailles de grille inférieures à 10 km, où des ascendances peuvent être résolues, des schémas de phase mixte devraient être utilisés, en particulier dans des situations de convection ou de givrage. Pour des grilles plus grossières, il peut ne pas être justifié d'utiliser ces schémas plus coûteux car le givrage n'est pas susceptible de se produire avec le mouvement vertical relativement faible qui est résolu. De nombreux schémas sont également à double moment pour certaines espèces et incluent le nombre par unité de masse d'air sec en tant que variables adentées supplémentaires.

## 2.1.4.1 Les schémas microphysiques simple moment

## 2.1.4.2 Les schémas microphysiques double moments

# 2.2 Module de post traitement électromagnétique (EMM)

# 2.3 Etat de l’art de WRF-EMM pour les études de propagation radio