**Chapitre 1 : Caractérisation du canal de propagation radioélectrique en régions polaire**

Objectif du chapitre : Introduire et caractériser la propagation des ondes radio dans la troposphère aux hautes latitudes

# Caractérisation des régions polaires

## Climat polaire

Présentation du climat polaire et présentation des hydrométéores spécifiques à ces régions

### La troposphère

### Définition et caractéristique du climat polaire

### Classification du climat polaire

## Impact du climat sur la propagation radioélectrique dans la troposphère

Présentation des caractéristiques spécifique aux régions polaire les plus (précipitation, nuages…)

# Modèle d’atténuation troposphériques

## Modèle d’atténuation due aux gaz atmosphériques

Présentation des différents modèles existant dans la littérature pour le calcul d’atténuation due aux gaz atmosphériques

## Modèle d’atténuation due aux nuages

Présentation des différents modèles existant dans la littérature pour le calcul d’atténuation due aux nuages

## Modèle d’atténuation due à la pluie

Présentation des différents modèles existant dans la littérature pour le calcul d’atténuation due à la pluie

## Modèle d’atténuation due à la neige

Présentation des différents modèles existant dans la littérature pour le calcul d’atténuation due à la neige

# Données utiles à la caractérisation du canal de propagation

## Données de réanalyse

### 1.3.1.1. ERA5

### 1.3.1.2. Carra

### 1.3.1.3. AromeArctic

Présentation des différentes bases de données de références de réanalyse : ERA5, AROME, CARRA

## Données météorologiques et radioélectriques expérimentales

Présentation des données ORG/WX/THOR7

# 1.4 Conclusion

**Chapitre 2 : Utilisation d’un modèle de prévision numérique du temps pour recréer une atmosphère polaire**

Objectif du chapitre : Présentation des simulations atmosphériques

# 2.1. Les modèles de prévision numérique du temps dans les études de propagation radioélectrique

## 2.1.1. Etudes de propa à toutes les latitudes

## 2.1.2. Etudes Julien aux latitudes polaires

Etat de l’art des études de propagation utilisant un modèle atmosphérique

# 2.2. Weather Research and Forecasting (WRF)

## 2.2.1. Presentation de WRF

Présentation de GEOGRID, UNGRIB, METGRIB, REAL, WRF et son architecture (graph archi : Skamarock et al. 2019)

## 2.2.2. Paramètres d’entrée et de sortie de WRF

Explication des entrées WPS/WRF (variables ERA5) et des sorties utiles pour les calculs d’atténuations

## 2.2.3. Configurations des simulations atmosphériques

Explications des principales config WRF : Microphysic scheme, Cumulus schemes, Planetary Boundary Layer (PBL) schemes, Surface layer schemes, Radiative schemes, Land-Surface Models (LSM). Figure interactions entre les modules physiques(Skamarock et al. 2019)

## 2.2.4. Schémas microphysiques

Explication schéma microphysique, état de l’art des schémas utilisées dans les zones polaires, schémas sélectionnés pour la suite

# 2.3. Polar Weather Research and Forecasting (PWRF)

Présentation des principales différences entre WRF et PWRF et les points d’intérêts de PWRF pour les zones polaires

# 2.4 Conclusion

**Chapitre 3 : Mise à jour d’un modèle de post traitement électromagnétique pour la conversion des caractéristiques de la troposphère polaire en atténuation**

Objectif du chapitre : Présenter le module EMM et expliquer la mise a jour pour la prise en compte des hydrométéores polaires

# 3.1. Module de post traitement électromagnétique

## 3.1.1. Présentation générale du module électromagnétique

3 étapes de calculs 🡪 Calcul des atténuations dans chaque cellules de la grille atmosphérique ; azimut élévation maps ; intégration sur le trajet station-satellite

## 3.1.2. Atténuations spécifiques due aux gaz atmosphériques

Présenter en détail la méthode utilisé dans le module EMM pour calculer l’atténuation spécifique due à l’oxygène et la vapeur d’eau

## 3.1.3. Atténuations spécifiques due aux nuages

Présenter en détail la méthode utilisé dans le module EMM pour calculer l’atténuation spécifique due aux nuages

## 3.1.4. Atténuations spécifiques due à la pluie

Présenter en détail la méthode utilisé dans le module EMM pour calculer l’atténuation spécifique due à la pluie 🡪 Introduction des PSD 1 et 2 moments et les paramètres de chacun des schémas microphysiques pour la pluie

# 3.2. Atténuation spécifique des hydrométéores polaires

## 3.2.1. Atténuation spécifiques dues aux hydrométéores polaires

Présenter end détail la méthode utilisé dans le module EMM pour calculer l’atténuation spécifique dues aux hydrométéores polaires

## 3.2.2. Particule size distribution des hydrométéores polaires

Présentation des PSD 1 et 2 moments et les paramètres de chacun des schémas microphysiques pour la neige, graupel, ice, hail

## 3.2.3. Extinction cross section des hydrométéores polaires

Explication de 𝜎\_ext pour les hydrométéores polaires et choix de considérations des hydrométéores (pure liquide, pure glace ou mixte)

### 3.2.3.1. Modèle de Rayleigh

Explication modèle de Rayleigh

### 3.2.3.2. Théorie de Mie

Explication modèle de Mie

### 3.2.3.3. Théorie de la Tmatrix

Explication modèle de la Tmatrix

## 3.2.4. Permittivité des hydrométéores polaires

### 3.2.4.1. Permittivité de l’eau et de la glace

Description du modèle de Debye

### 3.2.4.2. Lois de mélanges asymétriques pour la permittivité des hydrométéores à phase mixte

Description des modèles asymétriques avec schémas de géométrie asymétrique

### 3.2.4.3. Lois de mélanges symétriques pour la permittivité des hydrométéores à phase mixte

Description des modèles symétriques avec schémas de géométrie symétrique

### 3.2.4.4. Choix de la loi de mélange

Explication pourquoi on choisit Sihvola symétrique

### 3.2.5. Processus de fonte et humidité des hydrométéores polaires

### 3.2.5.1. Modèle de Mitra

Explication comment on considère la fonte d’un flocon et présentation du modèle Mitra

### 3.2.5.2. Rapport d’axe

Description rapport d’axe des hydrométéores polaires

### 3.2.5.3. Vitesse de chute

Description vitesse terminal de chute des hydrométéores polaires

### 3.2.5.4. Capacitance

Description Capacitance des flocons de neige

### 3.2.5.5. Coefficient de ventilation

Coefficient de ventilation des flocons de neige

## 3.2.6. Géométrie des hydrométéores polaires

### 3.2.6.1. Travail sur la DDA

Explication que jusqu’à X GHz la forme n’a pas d’impact. Préciser pour chaque type d’hydrométéore

### 3.2.6.2. Géométrie des hydrométéores polaires

Explication du choix final de géométrie des hydrométéores polaires

### 3.2.6.3. Orientation des hydrométéores polaires

Explication et choix de l’orientation des particules polaire précipitantes

# 3.3. Conclusion

**Chapitre 4 : Potentialités du modèle PWRF-EMM à reproduire le canal de propagation radioélectrique en région polaire**

Objectif du chapitre : Etudier la capacité du modèle à créer des statistiques d’atténuation fiables aux hautes latitudes

# 4.1. Choix de la configuration finale du modèle PWRF-EMM

## 4.1.1. Etude des capacités du modèle sur une douzaine de journées

Explication du besoin de travail sur quelques journées dans un premier temps et choix des journées

## 4.1.2. Première étude de la capacité du modèle atmosphérique à reproduire l’atmosphère polaire sur les 12 journées

### 4.1.2.1. Surface pressure et température

### 4.1.2.2. Contenu intégré en vapeur d’eau et nuages

### 4.1.2.3. Précipitations accumulations

## 4.1.2. Première étude de la capacité du modèle PWRF-EMM à reproduire des statistiques d’atténuations en excès sur les 12 journées

### 4.1.2.1. Atténuation spécifiques

### 4.1.2.2. Série temporelles d’atténuations

### 4.1.2.3. CCDFs sur la douzaine de journée

## 4.2.3. Conclusion et choix de la configuration finale des simulations météorologiques

# 4.2. Capacité du modèle PWRF-EMM à reproduire des statistiques d’atténuation en région polaire

## 4.2.1. Méthodes et data

## 4.2.2. Capacité du modèle à reproduire l’atmosphère polaire

## 4.2.3. Capacité du modèle à reproduire des statistiques d’atténuations pluriannuelles

### 4.2.3.1. Résultats annuels

#### 4.2.3.1.1. Atténuation due aux gaz atmosphériques

#### 4.2.3.1.1. Atténuation due aux nuages

#### 4.2.3.1.1. Atténuation due à la pluie

#### 4.2.3.1.1. Atténuation due aux hydrométéores polaires

### 4.2.3.2. Résultats mensuels

# 4.3 Conclusion

Conclusion et perspectives

Bibliographie