**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

## § ou partie 1.2 de transition : Impact du climat sur la propagation radioélectrique dans la troposphère

Présentation des caractéristiques spécifique aux régions polaire les plus (précipitation, nuages…) : gaz 🡪 turbulence (large et petite échelle) / nuages / hydrométéores en phase mixte

# 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

* CCDF

## Modèle d’atténuation due à la neige

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

# 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

## Comparaison données XP et ITU-R P. CCDF

# 1.4 Conclusion

**Chapitre 2 : WRF-EMM**

Objectif du chapitre : Présentation des simulations atmosphériques

# 2.1. 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

2.2. Module de post traitement électromagnétique

2.1.1. 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

2.1.2. 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

2.1.3. Atténuations spécifiques due aux nuages

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

2.1.4. 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 les paramètres de chacun des schémas microphysiques pour la pluie

* résultat CCDF d’atten

**Chapitre 3 : Nouveau modèle**

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

3.1. Polar-WRF

Polar-wrf

macrophysique : hydrostatique / domaines / données ERA5 / nudging

microphysique : cumulus schemes / radiation schemes / 1- et 2- moments schemes

# 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

## 3.2.4. 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

3.2.6.4. 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)

# 3.3. Conclusion

**Chapitre 4 : Validation évenementielle**

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

5. Validation statistique

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

météo / propa

## 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