

# LES FONCTIONS AMF

Camille Desjardins

**08 septembre 2015**  
**Séminaire GRGS sur la géodésie millimétrique**

# LA CORRECTION TROPOSPHÉRIQUE

Corriger la mesure géodésique des effets de l'atmosphère neutre

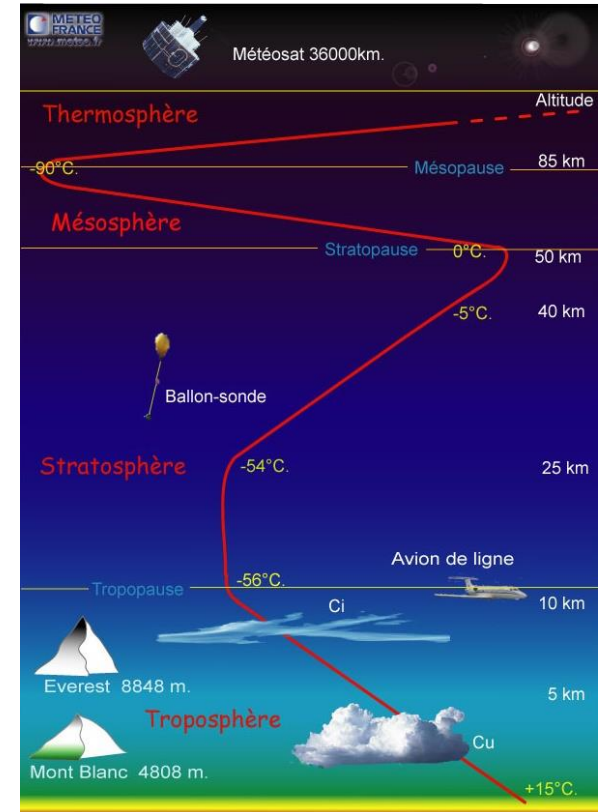
Atmosphère neutre :

- 0 – 85 km d'altitude
- Mélange uniforme de gaz
- Appelée troposphère
- Ralentissement et courbure du trajet
- Engendre un retard de propagation
- Délai troposphérique

Pour les ondes micro-ondes

Diffusion et diffraction négligeables :

- Optique géométrique
- Délai troposphérique solution de l'éq. Eikonale
- Utilisation du ray-tracing



# LA CORRECTION TROPOSPHÉRIQUE

## Délai dû aux hydrométéores

- Eau liquide et cristaux de glace
- jusqu'à 2cm au zénith et 16 cm à 5°

## Délai géométrique

- Courbure de la trajectoire
- nul au zénith et ~16 cm à 5°

$$\Delta L = \Delta_H L + \Delta_N L + \Delta_M L + \Delta_g L$$

## Délai hydrostatique

- Contribution de la densité
- ~2,3 m au zénith et 24 m à 5°
- Variation spatiale et temporelle lente (1cm / 6 h )
- En première approximation fonction de la pression au sol

## Délai non-hydrostatique

- Contribution du moment dipolaire de la vapeur d'eau
- jusqu'à 15 cm au zénith et 1,7 m à 5°
- variation temporelle et spatiale rapide (5-10 cm / h)
- fonction de la densité de vapeur d'eau

## QU'EST CE QUE LES AMF ?

AMF = Adaptive Mapping Function : fonctionnelle

$$AMF = S_f \frac{N_f}{D_f} [1 + (D^c \cos \alpha + D^s \sin \alpha) \cot \varepsilon]$$

$$D_f = \sin \varepsilon + \frac{a_2}{\sin \varepsilon + \frac{a_2}{\sin \varepsilon + \dots}}$$

$$N_f = 1 + \frac{a_1}{1 + \frac{a_2}{1 + \dots}}$$

$$a_i = a_{i,0} + \sum_{j=1}^{j=n} C_{i,j} \cos j\alpha + S_{i,j} \sin j\alpha$$

$\varepsilon$  élévation  
 $\alpha$  azimut

- Regroupe à la fois le délai zénithal et la fonction de rabattement
- Dépendance en élévation et en azimut
- Les AMF s'adaptent aux conditions météorologiques et/ou au site en modifiant la troncature et/ou le nombre de fractions successives
- Les AMF permettent de représenter les délais (y compris géométrique et dû aux hydrométéores) d'un site à un instant donné dans toutes les directions à une précision mm avec quelques dizaines de coefficients

## COMMENT SONT CALCULEES LES AMF ?

Le logiciel **Horizon** calcule les AMF pour les sites géodésiques pour les techniques micro-ondes à partir des assimilations ECMWF en niveaux modèle disponibles toutes les 3h

- Les délais sont calculés par la méthode de **ray-tracing** avec un pas d'intégration suffisamment petit (qq m) pour avoir erreur < mm à 5°  
~ 150 000 pas pour un délai à 5°
- Les hypothèses de calcul (géométrie de la Terre, gravité, ...) du ray-tracing entraînent des biais < au mm sur les délais à 5°
- Les AMF sont calculées à partir des résultats du ray-tracing avec des résidus < mm grâce à l'**adaptation du nombre de coefficients au site et aux conditions météo.**
- La courbure du trajet de l'onde est prise en compte
- Permet une correction d'altitude de la position du site jusqu'à qq mètres pendant le traitement géodésique
- Ne fait aucune présupposition sur la nature et la position de l'objet spatial (satellite ou quasar).

[thèse Desjardins, 2014]

# DIFFÉRENCES ENTRE GPT2/VMF1 ET AMF

GPT2 / VMF1	AMF
Terre sphérique	Ellipsoïde WGS84
Atmosphère symétrique et gradients horizontaux nord-sud & est-ouest ajustés 3 profils verticaux de données météo utilisés	Prise en compte de toute l'asymétrie de l'atmosphère ~15 000 profils verticaux
GPT2 : terme annuel et semi-annuel VMF1 : coefficients toutes les 6h	Prise en compte de la variabilité temporelle toutes les 3 h
Modélisation du délai hydrostatique uniquement avec GPT2 délai non hydrostatique avec GPT2w [Boehm et al., 2014]	Modélisation des Délai hydrostatique Délai non-hydrostatique Délai dû aux hydrométéores Délai géométrique

# BILAN D'ERREUR DE LA CORRECTION TROPOSPHERIQUE

Données météorologiques :

Quel est l'impact de l'incertitude des données sur les délais ?

Conversion entre coordonnées météo. et géodésiques :  
(dépendant du modèle de gravité utilisé, de la forme de la Terre)

Précision mm pour AMF, cm pour GPT2/VMF1

Interpolations spatiales des données météorologiques :

Quelle est leur précision ?

Conversion entre données météorologiques et réfractivité

Utilisation d'une formule avec coefficients empiriques

Jeux de coefficients avec des différences cm sur les délais zénithaux et dm sur ceux à  $5^\circ$

Quels coefficients sont les plus pertinents à utiliser ?

# BILAN D'ERREUR DE LA CORRECTION TROPOSPHERIQUE

Ray-tracing :

Les hypothèses de calcul :

- terre sphérique ou ellipsoïdale
- atmosphère asymétrique ou non
- délai géométrique négligé ou non

et la valeur du pas d'intégration entraînent

une **erreur < mm pour AMF** et cm pour GPT2/VMF1

Représentation des délais sous forme de fonction de rabattement

**Résidus mm pour AMF** et cm pour VMF1

Interpolation temporelles des délais :

**Quelle est sa précision ?**

Le délai non-hydrostatique a une variation temporelle rapide (5-10 cm/h). Les données météo sont connus toutes les 3h.



# AMF : VERS SYSTÈME OPERATIONNEL ?

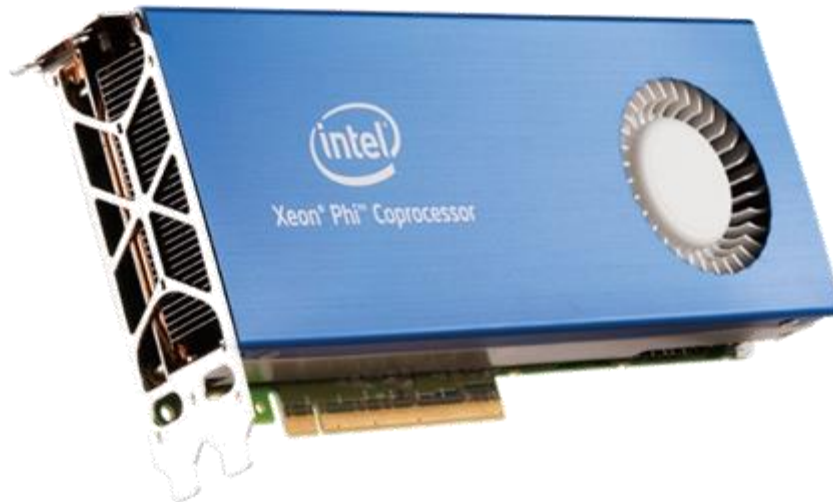
## Un investissement matériel :

- Temps de calcul :

Pour 1 jour (8 échéances) et 100 sites géodésiques :  
6 h sur 2x(2 Xeon E5-2680v2 + Xeon Phi 7120P)) et  
86 h sur un Intel(R) Core(TM) i7-2670QM ...

- Espace de stockage :

Données météorologiques : ~ 1 To / mois



# AMF : VERS SYSTÈME OPERATIONNEL ?

## Un investissement humain :

### Au départ :

- Rendre automatique la récupération de données de l'ECMWF, le calcul des AMF et leur mise à disposition
- Développer le moyen de mise à disposition des AMF
- Développer les routines de traitement (lecture des AMF et ajustement de ses coefficients) pour les techniques autres que GPS
- Générer des tests automatiques pour garantir le bon fonctionnement du logiciel Horizon à long terme

### En routine :

- Adapter le logiciel Horizon en fonction des modifications des données météorologiques (changement de la résolution, de format, ...)
- Améliorer le logiciel Horizon et la modélisation des délais pour répondre aux besoins de la géodésie millimétrique

# CONCLUSION

## La correction troposphérique pour la géodésie millimétrique :

- Prendre en compte le délai géométrique
- Utiliser des délais calculés avec un modèle qui considère la Terre (au moins) ellipsoïdale avec une gravité dépendante en altitude et qui prend en compte toute l'asymétrie de l'atmosphère
- Préférer utiliser des délais calculés à un instant donné à partir de cartes météorologiques plutôt que des fonctions à termes (semi-)annuels

## Quelles améliorations ?

- Conversion entre données météorologiques et réfractivité : déterminer quelle formule et quels coefficients sont les plus pertinents
- Interpolation temporelle des délais (notamment non-hydrostatiques)
- Evaluation de l'impact de l'incertitude des données météorologiques sur la valeur des délais troposphériques