

# Impact de l'assimilation des observations GPS dans un modèle de prévision numérique du temps

F. HDIDOU<sup>1,2</sup>, S. MORDANE<sup>1</sup>

1. LPPPC, Faculté des Sciences Ben M'SIK, Université Hassan II Casablanca Maroc mordanesoumia@yahoo.fr.

2. CNRMSI, Direction de la météorologie Nationale, Casablanca Maroc hdidou\_fatima@yahoo.fr.

## Résumé

Ce travail a pour but d'exploiter le potentiel des observations GPS dans l'assimilation des données à meso-échelle. L'objectif étant d'améliorer l'état initial d'un modèle de prévision numérique du fluide atmosphérique. Le système d'assimilation utilisé est le système variationnelle tridimensionnelle (3D-Var) qui prend son origine du contrôle optimal. En premier lieu, une seule observation GPS est assimilée pour voir son influence sur les paramètres météorologiques. Ensuite, l'impact de l'assimilation des dix stations GPS permanentes du réseau Marocain est étudié pour la situation pluvieuse du 20 au 22 Septembre 2014. La comparaison des expériences d'assimilation et de prévision montre un impact positif des observations GPS pour la vapeur d'eau notamment dans la basse et la moyenne troposphère.

**Mots clés :** *Fluide atmosphérique, ALADIN-MAROC, Assimilation de données, observations GPS*

## 1 Introduction

La qualité d'une prévision numérique dépend de plusieurs facteurs, en particulier de la représentation des processus physiques, des conditions initiales et des conditions aux limites latérales. Une assimilation de données variationnelle (3D-Var) a été développée pour le modèle ALADIN<sup>1</sup>-MAROC, en vue d'améliorer ses conditions initiales. Cette méthode repose sur la théorie du contrôle optimal, et son objectif est de rechercher un état de l'atmosphère : état initial ou analyse qui soit le plus optimale possible entre une ébauche du modèle et un ensemble d'observations décrivant l'état réel de l'atmosphère.

Un grand souci des météorologues est la prévision des événements de pluies intenses qui peuvent causer dans certains cas de forts dégâts humains et matériels. La prévision de ces événements est fortement tributaire des conditions initiales, et en particulier de la description du champ d'humidité. Les radiosondages qui permettent d'avoir une observation de la distribution verticale de

l'humidité ont cependant une faible résolution spatiale et temporelle (3 radiosondages sur le Maroc).

Dans ce contexte pauvre en observations d'humidité, le système Global de Positionnement (GPS) est utilisé comme instrument de mesure de la vapeur d'eau troposphérique. En effet, les signaux émis par les satellites GPS et traversant l'atmosphère, subissent un retard. Ce retard projeté au zénith : délai total zénithal (ZTD<sup>2</sup>), donne une estimation du contenu en vapeur d'eau intégré sur la verticale.

L'objectif de ce travail est de montrer l'impact de l'assimilation des données ZTD déduite du GPS sur la prévision météorologique.

## 2 Assimilation variationnelle des données GPS dans le modèle ALADIN-MAROC

### 2.1 Le modèle ALADIN-MAROC

Le modèle ALADIN-MAROC[?] est une version, centrée sur le Maroc, du modèle ALADIN développé pour prévoir les phénomènes météorologiques à l'échelle synoptique. Le schéma de discrétisation par la méthode spectrale basée sur les séries de Fourier est utilisé sur l'horizontal. Par rapport à la verticale, un schéma en différences finies est utilisé pour des niveaux correspondant à la cordonnée verticale hybride  $\eta$  suivant la pression de surface. La résolution horizontale est de 10km et la résolution verticale est de 60 niveaux.

Les équations primitives du modèle ALADIN prennent leurs origines des lois physiques agissant sur un fluide en mouvement. Elles s'écrivent comme suit :

- L'équation de continuité :

$$\frac{d(\frac{\partial P}{\partial \eta})}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial \eta} (\text{div}(\vec{V}) + \frac{\partial \eta}{\partial t}) \quad (1)$$

avec  $P$  la pression hydrostatique,  $\vec{V}$  est la composante horizontale du vecteur vent.

1. Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International

2. Zenith Total Delay

- l'équation du mouvement sur le plan horizontal :

$$\frac{d(\vec{V})}{dt} = -2\vec{\Omega} \wedge \vec{V} - \vec{\nabla}\Phi - RT\vec{\nabla}\log(P) + \vec{F}_{\vec{V}} \quad (2)$$

avec  $\Phi$  le géopotentiel,  $\vec{\Omega}$  la vitesse angulaire de la rotation de la terre,  $T$  la température,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $\vec{F}_{\vec{V}}$  correspond à l'effet de la partie physique sur le vent (incluant le frottement).

- l'équation hydrostatique :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

$\rho$  correspond à la masse volumique de l'air.

- l'équation thermodynamique :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{RT}{C_P} \frac{\omega}{P} + F_T \quad (4)$$

$\omega = \frac{dP}{dt}$  la dérivée totale de la pression hydrostatique,  $C_P$  la chaleur spécifique à pression constante de l'air,  $F_T$  la contribution de la partie physique à la température (incluant le rayonnement, la convection...etc).

- l'équation de l'humidité spécifique :

$$\frac{dq}{dt} = F_q \quad (5)$$

$q$  étant l'humidité et  $F_q$  la contribution de la partie physique à l'humidité.

La partie physique correspond aux processus physiques non traités par la dynamique, c'est à dire par une modélisation d'une atmosphère adiabatique et sans frottement.

## 2.2 L'assimilation variationnelle des ZTD

Le principe de l'assimilation variationnelle 3D-Var est de minimiser une fonction quadratique scalaire (fonction coût) mesurant la distance, au sens des moindres carrés, entre l'état estimé et les différentes sources d'information disponibles : les observations et l'ébauche. L'ébauche est une prévision du modèle à courte échéance qui permet d'apporter de l'information dans les zones pauvres en observations.

La fonction coût  $J(x)$  (Eq.??) est la somme de deux termes :  $J_o$  et  $J_b$ .  $J_o$  mesure la distance entre la trajectoire du modèle et les observations et  $J_b$  mesure la distance par rapport à l'ébauche. Ainsi,  $J(x)$  s'écrit :

$$J(x) = \underbrace{(x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b)}_{J_b(x)} + \underbrace{(y - \mathcal{H}x)^T R^{-1} (y - \mathcal{H}x)}_{J_o(x)} \quad (6)$$

avec  $x$  le vecteur d'état du modèle,  $y$  le vecteur d'observation,  $B$  et  $R$  sont respectivement, la matrice de variance covariance des erreurs d'ébauche, et d'observation.

$\mathcal{H}$  est l'opérateur d'observation qui permet de convertir un vecteur d'état  $x$  en un vecteur d'observation  $y$ .

La minimisation de cette fonction coût est effectuée à l'aide d'une méthode itérative qui permet d'approcher le minimum après plusieurs itérations. Ce minimum correspond à l'état initial recherché.

L'assimilation des observations ZTD requiert alors la détermination de l'opérateur d'observation  $\mathcal{H}^{ztd}$  qui permet de calculer ZTD à partir des variables du modèle. L'opérateur d'observation  $\mathcal{H}^{ztd}$  codé dans le modèle ALADIN-MAROC calcule l'équivalent modèle de ZTD en intégrant la réfractivité  $N$  sur la verticale d'une station GPS selon la formule suivante [?] :

$$ZTD = 10^{-6} \int_{z_{ant}}^{z_{top}} N dz \quad (7)$$

Où :  $z_{ant}$  et  $z_{top}$  sont les altitudes de l'antenne de la station GPS et du sommet de l'atmosphère, respectivement.  $N$  est calculée en utilisant la relation de Smith et Weintraub [?] :

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (8)$$

Où :  $P$  est la pression atmosphérique en hPa.  $e$  : la pression partielle en vapeur d'eau.  $T$  : la température atmosphérique en degré Kelvin.

## 3 Description et analyse des expériences

### 3.1 Expérience avec une seule observation

Dans un premier temps une expérience d'assimilation d'une seule observation ZTD (EXP-1obs) est réalisée. Il s'agit de l'observation de la station GPS de Casablanca pour la journée du 28 Mars 2013 à 00UTC. L'incrément d'analyse (écart entre l'analyse et l'ébauche) d'une seule observation permet de nous renseigner sur la portée de l'influence de l'observation.

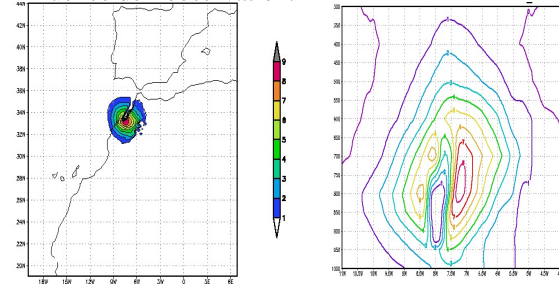


FIGURE 1 – Incrément d'analyse de l'humidité relative pour EXP-1obs au niveau 700hpa (à gauche) et coupe longitudinale verticale de cet incrément (à droite).

Il est remarquable sur la figure 1 que l'impact de l'assimilation d'une observation GPS est bien visible sur le champ de l'humidité. En effet, on constate que la donnée GPS apporte une humidification entre les niveaux 900hPa et 650hPa allant jusqu'à 9% au niveau 700hPa. Au delà de 500hPa, l'impact est faible. On remarque aussi que l'influence de l'observation en terme de portée horizontale atteint un cercle de 4°(environ 50km de diamètre).

### 3.2 La situation météorologique étudiée

La situation du 20 au 22 septembre 2014 est caractérisée par une dépression associée à un bas géopotential en altitude relativement froid (-16°C) centrée sur le proche atlantique. Cette dépression a pivoté sur place le long de la période du 20 au 21. Le maintien du minimum sur place et son pivotement ont contribué à l'infiltration de l'humidité sur le littoral Nord-Ouest qui a connu un apport de nuages bas, denses et instables. Aussi, le flux de Sud-Ouest a fait remonter les nuages d'altitude depuis le Sud. Ces nuages sont devenus instables en rencontrant les reliefs de l'Anti-atlas. Ce qui a donné lieu à des précipitations sur les côtes Nord-Ouest, sur les versants Est et au Sud de l'Anti-Atlas. Les cumuls sur 24h à partir du 21/9/2014 à 6h00 ont atteint 42mm à Ouarzazate.

Pour étudier l'impact de ZTD, deux expériences d'assimilation et de prévision Exp-ref et EXP-gps sont réalisées. EXP-ref assimile les observations conventionnelles et satellitaires. Exp-gps assimile les observations ZTD, en plus des observations assimilées dans EXP-ref. Les observations ZTD assimilées sont les résultats du traitement local des 10 stations GPS [?] du réseau Marocain en plus du réseau IGS<sup>3</sup>.

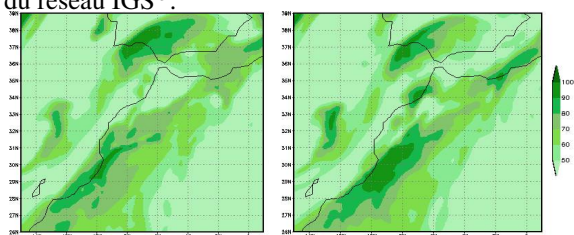


FIGURE 2 – L'humidité relative à 700hPa prévue pour le 21 Septembre à 6h pour EXP-ref (à gauche) et EXP-gps (à droite).

La figure 2 présente l'humidité relative au niveau 700hPa prévu pour le 21 Septembre 2014 à 06h00 pour les deux expériences EXP-ref et EXP-gps. L'analyse de ce champ montre une meilleure alimentation en humidité sur les côtes Atlantique Nord pour EXP-gps. L'humidité relative a été significativement augmenté de 50% à 100%. Ceci est concordant avec l'infiltration du flux chargé de l'humidité depuis l'océan. De même, sur les régions Sud-Ouest, on constate une forte alimentation en humidité pour EXP-

gps. Cette alimentation rejoint l'analyse de la situation qui a décelé des remontées de nuages depuis le Sud. Ceci confirme que l'expérience avec assimilation des données GPS a bien apporté un impact positif sur le champ de l'humidité.

## 4 Conclusions et perspectives

Dans la première partie de ce travail, nous avons cherché à caractériser l'influence de l'assimilation d'une seule observation de ZTD. Pour cela une expérience d'assimilation d'une seule observation ZTD dans ALADIN-MAROC est réalisée. Les résultats montrent une modification du champ d'humidité dans la basse et moyenne troposphère. L'assimilation des observations GPS a donc pour effet d'apporter une information sur la vapeur d'eau dans une partie de l'atmosphère peu documenté par les autres systèmes d'observation.

Par ailleurs, une expérience d'assimilation de plusieurs observations ZTD a permis d'évaluer cet impact sur la prévision d'un épisode pluvieux. Les résultats montrent que l'amélioration est nettement visible sur l'humidité par rapport l'assimilation sans les données GPS.

Ces résultats sont valable sur un modèle hydrostatique. Actuellement, la plateforme d'assimilation dans un modèle atmosphérique de haute résolution (2.5km) et non hydrostatique est en cours de développement. La prochaine étape est d'étudier dans un tel modèle l'impact de l'observation ZTD en terme d'analyse et de prévision.

## Références

- [1] P. Poli, P. Moll, F. Rabier, G. Desroziers, B. Chapnik, L. Berre, SB Healy, E. Anderesson, and FZ Guelai., *Forecast impact studies of zenith total delay data from European near-real time GPS stations in Météo France 4DVAR.*, J. Geophys. Res, 112 :D06114, 2007. Cité pages 39, 52 et 61.
- [2] EK Smith and S. Weintraub., *The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive index at Radio Frequencies*, proceeding of the IRE, 41(8) :1035-1037, 1953. Cité page 61.
- [3] S. Sbiï, *Apport dynamique des données de l'ozone autour de la tropopause*, Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Technique-Mohammedia, 2015.
- [4] FZ. Hdidou, S.Mordane and S. Sbiï, *Installation and processing of ground-based GPS stations of the Moroccan National Meteorological Service*, TECO2016, Madrid, Espagne, 2016, <https://www.wmocimo.net/eventpapers/session3>.