



RADIOSCIENCES AU SERVICE DE L'HUMANITE

Pour une meilleure gestion de la ressource en eau : restitution de champs de pluie par assimilation de données satellite

François Mercier¹, Nawal Akrou², Laurent Barthès³, Cécile Mallet⁴, Ruben Hallali⁵

¹ LATMOS-UVSQ, now at CNRM-Météo France ; francois.mercier@meteo.fr

² LATMOS-UVSQ ; nawal.akrou@latmos.ipsl.fr

³ LATMOS-UVSQ ; laurent.barthes@latmos.ipsl.fr

⁴ LATMOS-UVSQ ; cecile.mallet@latmos.ipsl.fr

⁵ LATMOS-UVSQ, now at DSO-Météo France ; ruben.hallali@meteo.fr

Estimation de la pluie, assimilation de données, mesures opportunistes

Rain estimation, data assimilation, opportunistic measurements

Résumé/Abstract

Nous présentons dans ce papier une technique de restitution de cartes de pluie à fine échelle ($500 * 500m^2$, $1min$) basée sur l'assimilation de mesures opportunistes de l'atténuation subie par des signaux issus de satellites de télévisions dans un modèle de transport spatiotemporel des champs de précipitations. Aux fréquences considérées (bande Ku), l'atténuation durant la traversée de l'atmosphère est principalement due à la pluie. En disposant un récepteur (analyseur de champs) au sol, on mesure ainsi la pluie sur la liaison. Cette technique est ici appliquée à un réseau simulé de tels capteurs disposés de manière réaliste en région parisienne sur une zone représentative d'un espace à forts enjeux socio-économiques (prévention des crues, gestion de la ressource en eau). Nous montrons ainsi, en comparant les cartes de pluie simulées et celles restituées par notre algorithme, la faisabilité de notre approche pour la mesure haute résolution des précipitations en milieu urbain.

We present in this paper a method for rebuilding rainfall maps at high resolution ($500 * 500m^2$, $1min$). This method is based on the assimilation of opportunistic measurements of the attenuation that affects the signals coming from TV satellites in a model of spatiotemporal advection of rainfall fields. At the frequencies we use (Ku band), the attenuation affecting the signals in the atmosphere is mainly due to rain. We set a sensor (field analyzer) on the ground, and then measure the mean rainfall over the link. This method is applied to a simulated network of sensors. These simulated sensors are set realistically over the Paris area, on a zone assumed to be typical of an area with high socio-economic issues (flood prevention, water resources management). We compare the simulated rainfall maps with the maps rebuilt by our algorithm. We then show the feasibility of our approach for measuring with high resolution the rainfall in urban areas.

1 Introduction

L'objectif du travail présenté ici est de construire des cartes de précipitations (taux de pluie) à fine échelle (typiquement $500 * 500 m^2$ et $1 min$) à partir de mesures opportunistes des atténuations des ondes électromagnétiques en bande Ku issues de satellites de télévision.

La production de telles cartes se fait généralement à partir de mesures réalisées par pluviomètres, par radars, ou par combinaison de ces deux types d'instruments. Or ces instruments présentent un certain nombre de défauts. Par exemple, les pluviomètres ne fournissent que des données ponctuelles qui ne permettent pas de saisir correctement la variabilité des précipitations. Il faut donc déployer un réseau dense, ce qui augmente significativement les coûts et les difficultés d'entretien. Les radars sont quant à eux bloqués par les reliefs (entre autres), et ces instruments coûtent cher, à la fois à l'achat, à la maintenance, et à l'exploitation. Les zones montagneuses ou difficilement accessibles ainsi que les pays en voie de développement ne sont pas souvent couverts par des réseaux opérationnels. Leur utilisation en hydrologie pose également encore beaucoup de questions ([1]). L'utilisation de l'atténuation subie par des signaux électromagnétiques micro-ondes pour mesurer la pluie est un sujet étudié de plus en plus intensément par la communauté scientifique depuis une vingtaine d'années. La plupart des études réalisées sur ce sujet se sont cependant focalisées sur les liaisons télécom ([2], [3], [4]). Quelques-unes se sont focalisées sur des ondes provenant de satellites géostationnaires de

télévision ([5]). Par nature, ces mesures fournissent une information indirecte et intégrée sur le taux de précipitation. Indirecte via l'utilisation de lois puissances pour convertir atténuations en taux de pluie (voir [5]), et intégrées sur les liaisons émetteur – récepteur (généralement quelques kilomètres, que ce soit pour les liaisons télécom ou les liaisons satellites). Pour reconstituer des cartes de précipitations maillées, elles doivent donc être couplées à un algorithme de restitution. Les premières études sur ce sujet assimilent les liaisons à des points situées en leur centre et utilisent des algorithmes de krigeage ou de tomographie pour restituer des cartes de pluie ([6]), en supposant les mesures entre pas de temps successifs indépendantes (c'est-à-dire qu'elles n'utilisent pas de modèle de propagation pour lier les mesures dans le temps et l'espace). Les études disposant de jeux de données denses et/ou à résolution temporelle médiocre procèdent de même (voir par exemple [3] pour une restitution de la pluie à l'échelle des Pays-Bas).

[7] a le premier appliqué l'assimilation de données à des mesures télécom. Celle-ci consiste grossièrement à utiliser un modèle de propagation (advection des champs de pluie) pour lier les mesures obtenues à des dates successives et à rechercher l'état initial (à un instant t_0) du modèle le mieux à-même d'expliquer les mesures enregistrées (les atténuations). Ce système permet de travailler avec des réseaux de mesures moins denses – la bonne résolution temporelle des mesures étant utilisée via le modèle pour compenser leur mauvaise résolution spatiale.

L'étude présentée ici utilise des mesures d'atténuations de signaux satellites, qu'elle couple avec un modèle d'advection dans un algorithme d'assimilation 4D-VAR. Ce travail appliqué à des mesures expérimentales en Ardèche dans le cadre de la campagne HyMeX (Hydrological Cycle in the Mediterranean Experiment), a été publié ([8]). Il a ensuite été étendu, sur données simulées, à un réseau plus dense et réaliste de capteurs en milieu urbain. Dans la suite, nous rappelons rapidement la méthode de mesure et l'algorithme de restitution (section 2). Ensuite, dans la section 3, nous présentons les derniers résultats obtenus sur ce réseau urbain simulé.

2 Méthodologie

2.1 Système de mesure

La bande de fréquence *Ku* (10 – 12GHz) est principalement atténuée dans l'atmosphère par les gouttes d'eau liquide (voir [5]). Cette atténuation a donc lieu principalement dans la pluie, c'est-à-dire sous la bande brillante (isotherme 0°). L'idée dans cette étude est de disposer au sol des récepteurs capables de mesurer l'atténuation subie par des signaux provenant de satellites géostationnaires de télévision. La figure 1 représente schématiquement cette situation pour un tel capteur. Les mesures d'atténuations ainsi réalisées sont donc des mesures intégrées sur des segments Terre-satellites longs de quelques kilomètres.

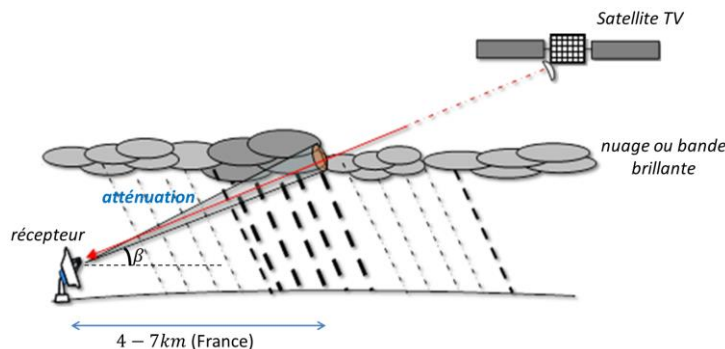


Figure 1 : Représentation schématique du système de mesure d'atténuations de signaux satellites utilisé dans cette étude (« liaison Ku »).

L'atténuation K (en dB) est ensuite reliée au taux de pluie moyen sur la liaison (R , en mm/h), par une relation puissance (voir [5] ou [8]) :

$$K = aR^b$$

Avec a et b des coefficients dépendant notamment de la fréquence, de la polarisation, ou de la distribution en taille des gouttes de pluie.

L'objectif de ce travail est de restituer des cartes de pluviométrie, en combinant de telles mesures (réalisées à des dates successives par un ou plusieurs capteurs) avec un modèle de propagation des champs de

pluie. Afin d'éviter d'utiliser la relation puissance dans l'algorithme d'assimilation, nous ne travaillerons qu'avec des atténuations linéiques (en dB/km). Nous reproduirons ainsi des cartes d'atténuations, qui ne seront transformées en taux de pluie qu'à la toute fin du processus. Pour plus de détails sur ce système de mesure, nous invitons à nouveau le lecteur à consulter [5] ou [8].

2.2 Algorithme de restitution des cartes de pluie

Modèle de propagation

L'assimilation de données 4D-VAR (voir par exemple [9]) consiste à coupler des observations distribuées dans le temps et un modèle numérique de propagation de l'information pour restituer des grandeurs compatibles à la fois avec les observations (et permettant de les fusionner), et avec la dynamique incluse dans le modèle.

Il convient donc tout d'abord de définir un modèle susceptible de simuler la dynamique des champs de pluie. Pour cela, nous utiliserons ici un modèle simple d'advection à vitesse constante. Notant $K(t, x, y)$ le champ d'atténuation à toute date et en tous points du plan (on se restreint ici à un plan en supposant la pluie homogène sur la verticale), et u et v les vitesses d'advection vers le nord et vers l'est, ce modèle s'écrit :

$$\frac{\partial K}{\partial t} = u \frac{\partial K}{\partial x} + v \frac{\partial K}{\partial y}$$

Nous suivons en cela [7], qui utilisait déjà un tel modèle. On peut noter que ce modèle, en supposant les champs de pluie non déformés et les vents constants et homogènes, convient uniquement sur de courtes périodes temporelles (typiquement 30 min à 2 h, selon notamment la topographie de la zone étudiée). Utiliser un modèle plus complexe nécessiterait un réseau d'observations plus dense pour régler ses paramètres, ce qui n'était pas disponible dans la première étude réalisée dans ce contexte ([8]). Concernant le vent (paramètres u et v), on a montré (voir [8]) que 2 capteurs d'atténuation judicieusement disposés devrait permettre de le déterminer directement à partir de nos mesures (lorsqu'il y a des précipitations). On suppose donc dans toute la suite ces paramètres parfaitement connus. On note qu'un tel modèle de propagation demande pour être bien posé des conditions aux limites et des conditions initiales. Les premières ne sont pas considérées ici (les atténuations entrant dans la zone d'étude durant l'advection sont supposées nulles et celles qui sortent sont relâchées). Reste donc à déterminer la condition initiale : $K(0, x, y)$. C'est l'objet de l'algorithme 4D-VAR. On note enfin qu'il convient de discrétiser cette équation aux dérivées partielles pour l'exécuter numériquement. Cela est fait suivant le schéma anti diffusif proposé par [10]. Les pas de discrétisation sont de 500m et 1s.

Algorithme d'assimilation

Ayant défini une dynamique pour les champs d'atténuation, nous allons à présent introduire l'algorithme 4D-VAR utilisé pour restituer le champ initial d'atténuations $K(0, x, y)$. Une introduction à l'assimilation 4D-VAR peut être trouvée par exemple dans [9]. Cet algorithme consiste essentiellement à minimiser une fonction de coût, notée J , évaluant d'une part l'écart entre les observations disponibles et le champ initial propagé par le modèle jusqu'aux instants où elles sont disponibles, et d'autre part des termes comprenant des informations a priori sur le champ initial ou ses caractéristiques (régularisation par exemple). Dans cette étude, on utilise la fonction de coût suivante :

$$J(K^0) = \alpha \|K^0 - m(K^0)\|^2 + \sum_n \|y^n - H^n K^n\|^2$$

Où K^0 est le champ d'atténuations à l'instant initial réécrit sous forme vectorielle, K^n est le champ de pluie à l'instant t_n (sous forme vectorielle également). K^n est obtenu en propageant le champ initial K^0 jusqu'à la date t_n via le modèle d'advection discrétisé M^n . H^n est l'opérateur d'observations permettant de transformer l'atténuation linéique dans chaque point de maille en atténuations intégrées le long de chaque liaison Ku. y^n désigne les observations mesurées à la date t_n (atténuations). $m(K^0)$ est la moyenne locale du champ K^0 (moyenne sur les 9 points de maille voisins). Le premier terme composant $J(K^0)$ est donc un terme de

régularisation, le second un terme d'écart aux observations. On renvoie à l'article [8] pour une description plus détaillée de ces opérateurs. La minimisation de la fonction de coût se fait ensuite via l'annulation de son gradient. Le calcul de celui-ci fait intervenir les opérateurs adjoints (transposée du linéaire tangent) de l'opérateur d'observations H^n et du modèle M^n .

Pour réaliser ces opérations et minimiser cette fonction de coût, on utilise l'outil YAO, développé au LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat), décrit par exemple dans [11]. Cette outil, écrit en C++, facilite la programmation de tels algorithmes 4D-VAR, en décomposant ses composantes (opérateurs d'observations et modèle non linéaire) en « briques élémentaires » (opérations analytiques réalisées en chaque point de maille), appliquées séquentiellement selon un graphe prédéfini (concept de graphe modulaire, voir [11]). La minimisation en elle-même est effectuée via l'algorithme quasi-Newton m1qn3 développé par [12]. L'application de l'algorithme 4D-VAR ainsi défini permet donc de restituer la carte d'atténuations à l'état initial K^0 , puis les cartes d'atténuations à toutes dates via le modèle M^n et donc la carte de pluie à toutes dates via la relation puissance.

3 Résultats sur des simulations en milieu urbain

Après sa première application réussie sur des données réelles, mais éparées, en Ardèche (voir [8]), l'idée était d'évaluer les performances possibles de cette méthode sur un réseau dense de capteurs caractéristique de ce que l'on trouve en milieu urbain. Ne disposant pas de données expérimentales (il faudrait pour cela installer un grand nombre de récepteurs directement sur les antennes personnelles), nous avons travaillé sur un réseau et des cartes de pluie simulées..

3.1 Génération des données simulées

Pour effectuer une expérience d'assimilation sur données simulées, il convient successivement :

- 1/ De définir une zone d'étude.
- 2/ De placer des récepteurs Ku sur cette zone, de manière réaliste.
- 3/ De simuler des cartes de pluie « vraies », c'est-à-dire les cartes que l'on cherchera ensuite à restituer via notre algorithme d'assimilation.
- 4/ De simuler un vent (conditions d'advections u et v) pour exécuter le modèle d'advection.
- 5/ De simuler, à partir de ces cartes de pluie vraies, et en utilisant le modèle et l'opérateur d'observations, des observations (atténuation le long des liaisons définies au point 2) simulées, éventuellement bruitées.

Ces premières étapes permettent de simuler pour différentes tailles de cartes et configurations de capteurs ce que donnerait un système réel. On pourra ensuite appliquer notre algorithme d'assimilation aux observations simulées (créées au point 4), et étudier la capacité de notre algorithme à restituer les cartes de pluie (simulées en point 3) à partir de ces observations. Examinons d'abord ces différents points.

1/ Comme zone d'étude, on choisit l'Ile-de-France, et plus précisément le département des Yvelines, sur une zone d'environ $30km$ sur 30 centrée sur la ville de Trappes. Cette zone est densément peuplée mais la répartition de la population est assez inhomogène sur le territoire entre les centres urbains et les zones agricoles. Les enjeux sociaux-économiques liés aux précipitations sont doubles, à la fois du côté de la prévention des inondations dans les centres urbains en vallée de Seine que du côté de la gestion de la ressource pour les besoins de la population et de l'agriculture. On peut donc s'attendre à des zones très densément couvertes en récepteurs Ku , et d'autres zones pauvrement dotées.

2/ Il s'agit ensuite de positionner dans cette zone des liaisons Ku . La Figure 2 présente les 4 configurations testées dans cette étude. Dans tous les cas, le positionnement des récepteurs au sol est fonction de la densité de population autour du point considéré, et les liaisons pointent vers des satellites réellement accessibles depuis l'Ile de France. D'une configuration à l'autre, on fait varier le nombre de récepteurs disponibles (17, 45, 79 et 122 pour les configurations 1 à 4). Ces configurations représentent donc des situations possibles, selon l'investissement qui serait réalisé en termes d'installation de récepteurs.

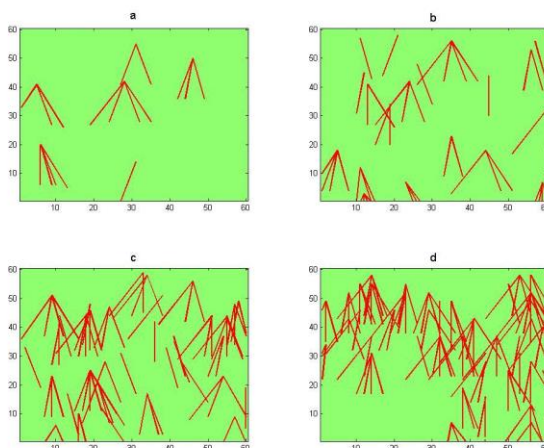


Figure 2 : Liaisons Ku simulées pour les configurations 1 (a), 2 (b), 3 (c) et 4 (d).

3/ Concernant la simulation des cartes de pluie, on utilise la méthode développée par [13] permettant de simuler des champs de précipitations 2D réalistes. Dans cette étude, on travaillera avec la carte de pluie présentée sur la Figure 3. Cette carte est pluvieuse à 37%, avec une pluviométrie maximale de 38mm/h et moyenne de 1.1mm/h .

4/ Pour le vent, nous supposons ici que les cellules se déplacent de l'ouest vers l'est, à une vitesse de 10m/s .

5/ Tous les paramètres du problème étant maintenant définis, nous utilisons le vent défini au point 4 dans le modèle d'advection pour transporter la carte de pluie de la Figure 3 à toutes dates. Ensuite, on transforme cette carte de pluie en carte d'atténuations linéiques et on simule les atténuations subies par les liaisons présentées Figure 2 à chaque instant. On ajoute ensuite éventuellement un bruit à ces mesures simulées (voir plus bas). On dispose ainsi de données d'entrée pour notre algorithme d'assimilation.

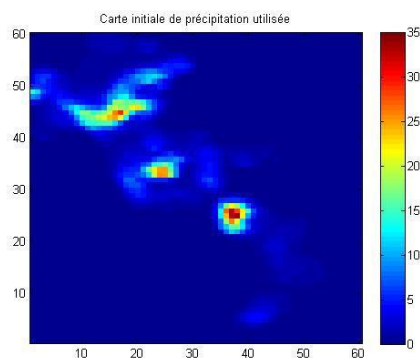


Figure 3 : Carte de pluie simulée utilisée comme état vrai dans cette étude.

3.2 Résultats

Données non bruitées – dépendance à la densité de capteurs

Dans un premier temps, nous ne bruitons pas les mesures simulées. Nous supposons par ailleurs que celles-ci sont échantillonnées à 10s (comme les données réelles utilisées dans [8]). Nous testons les résultats de notre algorithme sur les 4 configurations présentées sur la Figure 2, de la plus éparse (configuration 1, Figure 2a), à la plus dense (configuration 4, Figure 2d).

La Figure 4 présente les cartes initiales vraie (a) et restituées par notre algorithme (b à e) pour chacune de ces configurations. Le Tableau 1 donne quelques résultats statistiques d'erreurs produites par notre algorithme en terme de biais et de RMSE (root mean square error) par rapport à la carte vraie, et en distinguant les zones de la carte où il pleut sur la carte vraie et celles sèches.

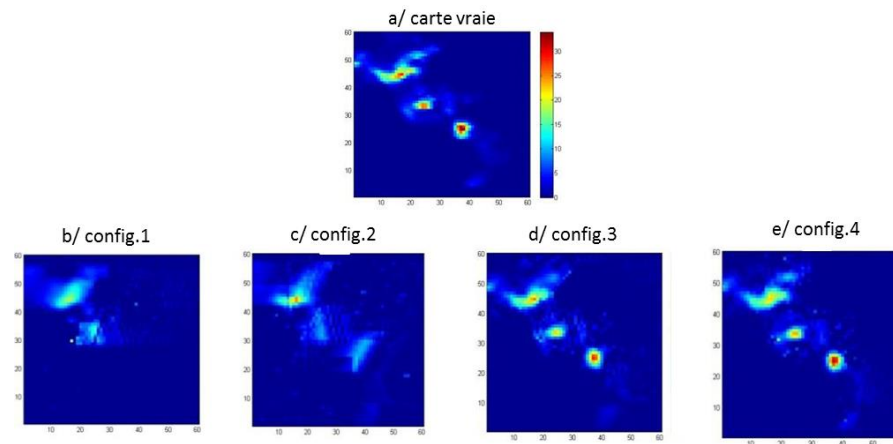


Figure 4 : Résultats de l'assimilation pour une expérience non bruitée, avec échantillonnage des observations à 10s, et selon les 4 configurations instrumentales présentées sur la Figure 2.

Tableau 1: Erreurs produites par l'assimilation par rapport à la carte initiale vraie pour les expériences présentées Figure 4.

| | Carte entière | | Zones de pluie | | Zones sèches | |
|----------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| | RMSE (mm/h) | Biais (mm/h) | RMSE (mm/h) | Biais (mm/h) | RMSE (mm/h) | Biais (mm/h) |
| Config.1 | 0.88 | -0.09 | 1.95 | -0.75 | 0.16 | +1.16 |
| Config.2 | 0.82 | -0.10 | 1.71 | -0.24 | 0.18 | +0.18 |
| Config.3 | 0.40 | +0.01 | 0.99 | -0.08 | 0.07 | +0.07 |
| Config.4 | 0.37 | -0.01 | 0.93 | -0.11 | 0.10 | +0.10 |

On peut noter plusieurs points à partir de ces résultats visuels et numériques. Tout d'abord, seules les configurations 3 et 4 sont capables de reproduire les 3 cellules principales de pluie de la carte vraie (voir Figure 4). Les configurations 1 et 2 manquent la cellule située la plus au sud. C'est normal dans la mesure où cette cellule ne traverse que des zones très peu densément peuplées et qui ne sont pas couvertes par les liaisons sur les configurations 1 et 2. Dans les quatre cas, la quantité d'eau totale tombée sur la zone est reproduite de manière satisfaisante (biais dans la 3^{ème} colonne du Tableau 1). C'est particulièrement vrai pour les configurations 3 et 4, où les liaisons couvrent bien le domaine. Encore une fois, le biais légèrement négatif sur les configurations 1 et 2 indique qu'une partie de la pluie tombée n'a pas été vue dans ces cas-là. La RMSE générale diminue à mesure que l'on ajoute des liaisons. Elle reste néanmoins assez forte dans tous les cas (entre 0.4 et 0.8mm/h pour un taux de pluie moyen de 1.1mm/h). Néanmoins, cela peut être dû à un bruit (oscillations) en sortie d'assimilation sur la carte initiale. Ce bruit est rapidement lissé lors de l'advection (diffusion numérique) et ne coûte donc pas cher en terme de fonction de coût. On pourrait refaire ces calculs en considérant des RMSE à toutes dates et pas seulement sur la carte initiale. Les opérateurs de régularisation introduits dans la fonction de coût ayant néanmoins comme objectif de limiter ces phénomènes, on s'en tient ici à des considérations sur l'état initial du système. On note néanmoins, en particulier sur les configurations 3 et 4, que les caractéristiques (intensité, étendue géographique et localisation) de la carte de pluie vraie sont très bien reproduites par l'assimilation. Enfin, on remarque (Tableau 1) que notre algorithme a tendance à sous-estimer la pluie dans les zones où il pleut, et à faire légèrement pleuvoir dans des zones sèches. Cela traduit un également des cellules de pluie plus lissées sur l'assimilation comparée à l'état vrai (à biais général à peu près nul).

Notre algorithme d'assimilation reproduit donc bien les caractéristiques des cartes de pluie vraies à condition d'avoir suffisamment de capteurs pour couvrir toute la zone considérée (on ne peut reproduire que ce

que l'on voit). On note néanmoins que les zones où la pluie est mal restituée dans cette étude sur les configurations 1 et 2 sont précisément les zones peu peuplées, et donc sujettes a priori à des enjeux moins forts.

Données bruitées et dépendance à la fréquence d'échantillonnage

Nous allons à présent illustrer deux phénomènes pouvant affecter la qualité des restitutions : le bruit présent sur les mesures et l'influence de la fréquence d'échantillonnage des observations. Pour cela, nous allons ajouter à nos observations simulées un bruit de $0.5dB$, compatible avec les caractéristiques du capteur utilisé dans l'étude [8] (cf. [9]). Nous allons ensuite effectuer des expériences d'assimilation avec des fréquences d'échantillonnage successives de $10s$ (comme précédemment), $1min$, et $4min$. On utilise ici la configuration 3 décrite précédemment (minimum de capteurs permettant de bien couvrir la zone d'étude).

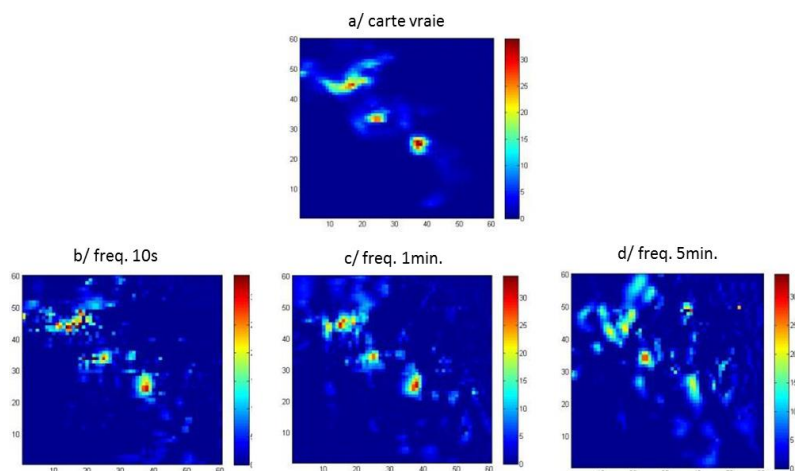


Figure 5 : Résultats de l'assimilation pour une expérience bruitée, selon la configuration 3 présentée sur la Figure 2, avec échantillonnage des observations variable entre 10s et 5min.

La Figure 5 et le Tableau 2 présentent les résultats sous la même forme que la Figure 4 et le Tableau 1 précédents (cartes de pluie, RMSE, et biais). On peut remarquer (Figure 5b comparée à la Figure 4d et Tableau 2) que l'ajout d'un bruit aux mesures bruite également les sorties de l'assimilation, sans affecter la bonne restitution générale des caractéristiques de la carte vraie (localisation des cellules principales par exemple), et sans affecter de manière significative le biais général ($+0.05mm/h$ contre $+0.01mm/h$ sans bruit). L'ajout d'un bruit a néanmoins tendance à créer artificiellement des zones de pluie faibles et très localisées éloignées de la cellule principale. Cette carte de pluie initiale sera ensuite advectée par un modèle numérique avant d'être comparée aux observations dans la fonction de coût de l'algorithme d'assimilation. Le modèle numérique va immédiatement (c'est-à-dire en quelques itérations temporelles) lisser les très forts gradients vus sur la carte initiale, si bien que ceux-ci seront quasiment transparents ensuite dans le processus d'assimilation (dans la fonction de coût).

Tableau 2 : Erreurs produites par l'assimilation par rapport à la carte initiale vraie pour les expériences présentées Figure 5.

| | Carte entière | | Zones de pluie | | Zones sèches | |
|------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| | RMSE (mm/h) | Biais (mm/h) | RMSE (mm/h) | Biais (mm/h) | RMSE (mm/h) | Biais (mm/h) |
| Freq. 10s | 0.84 | +0.05 | 2.19 | -0.04 | 0.24 | -0.07 |
| Freq. 1min | 1.03 | +0.18 | 2.17 | -0.18 | 0.39 | +0.39 |
| Freq. 5min | 1.52 | +0.46 | 2.99 | +0.07 | 0.69 | +0.66 |

Lorsqu'on change ensuite la fréquence d'échantillonnage, on dégrade progressivement les résultats, avec des RMSE devenant vite conséquentes ($1.52mm/h$ à 5min) et des biais également importants. De nombreuses fausses détections de pluie ont lieu (Figure 5d).

Nous concluons cette partie en notant qu'un bruit sur les observations de 0.5 dB ne perturbe pas de manière problématique les résultats : les résultats sont assez comparables (en particulier, le biais reste très faible). La carte initiale restituée est plus bruitée mais le lissage numérique apporté par le modèle réduit ce bruit rapidement. Au niveau de la fréquence d'échantillonnage, il semble en revanche qu'il faille rester en-dessous d'une minute (à 10 s dans la mesure du possible), sous peine de dégrader largement les résultats. Ceci n'est pas une surprise : le principe de cet algorithme d'assimilation est d'utiliser la haute résolution temporelle des mesures pour la transformer, via le modèle, en haute résolution spatiale. En supprimant cette bonne résolution temporelle, l'algorithme échoue. La simulation a permis de montrer la capacité de ce système à restituer des champs de précipitations avec une très bonne résolution spatiale. Compte tenu des coûts des capteurs et du modèle associé, ce système pourra être déployé dans les zones non couvertes par les moyens de mesure classiques, et servir à la protection des personnes et des biens face au risque d'inondation ou de sécheresse.

4 Conclusions

Nous avons dans cet article rappelé le contexte de l'étude de la mesure de la pluie et de la restitution de cartes de précipitation à partir des atténuations des microondes provenant de satellites de télévision. La méthode utilisée, via un modèle de propagation des champs de pluie et un algorithme d'assimilation 4D-VAR, et son application à un premier cas d'étude sur données expérimentales avaient déjà été présentées et publiées dans [8]. Nous avons ensuite présenté de nouveaux résultats sur une étude sur données simulées de mesures denses d'atténuations en milieu urbain. Nous avons ainsi montré la capacité de notre algorithme à s'adapter à un grand nombre de capteurs permettant une mesure d'atténuation, et donc à couvrir une zone plus étendue afin de reproduire avec une très bonne résolution des champs de pluie, le tout avec des densités de capteurs différentes. Nous avons montré que notre algorithme était robuste vis-à-vis de bruits d'observations réalistes, mais qu'il nécessitait d'avoir des mesures à haute résolution temporelle (typiquement moins d'une minute) pour fonctionner. L'étape suivante serait naturellement le déploiement d'un système réel de capteurs en milieu urbain, afin de pouvoir valider notre approche à plus grande échelle sur données réelles. Le prototype envisagé comportera environ 25 antennes et sera utilisé au-dessus d'une ville de taille moyenne, préférentiellement dans une zone où le risque lié aux inondations éclair est important. Les données ainsi recueillies, centralisées et traitées constitueront ainsi une base pour le développement de ce type de système dans les zones non couvertes par les moyens de mesures classiques et coûteux.

Références

- [1] Berne, A. and Krajewski, W. F. (2013). Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential? *Advances in Water Resources*, 51:357–366.
- [2] Chwala, C., Gmeiner, A., Qiu, W., Hipp, S., Nienaber, D., Siart, U., Eibert, T., Pohl, M., Seltmann, J., Fritz, J., et al. (2012). Precipitation observation using microwave backhaul links in the alpine and pre-alpine region of southern germany. *Hydrology & Earth System Sciences*, 16(8).
- [3] Overeem, A., Leijnse, H., and Uijlenhoet, R. (2013). Country-wide rainfall maps from cellular communication networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(8):2741–2745.
- [4] Doumounia, A., Gosset, M., Cazenave, F., Kacou, M., and Zougmore, F. (2014). Rainfall monitoring based on microwave links from cellular telecommunication networks: First results from a west african test bed. *Geophysical Research Letters*, 41(16):6016–6022.
- [5] Barthès, L. and Mallet, C. (2013). Rainfall measurement from the opportunistic use of an earth–space link in the ku band. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(8):2181–2193.
- [6] Giuli, D., Facheris, L., and Tanelli, S. (1999). Microwave tomographic inversion technique based on stochastic approach for rainfall fields monitoring. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 37(5):2536–2555.
- [7] Zinevich, A., Messer, H., and Alpert, P. (2009). Frontal rainfall observation by a commercial microwave communication network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(7):1317–1334.
- [8] Mercier, F., Barthès, L., and Mallet, C. (2015a). Estimation of finescale rainfall fields using broadcast tv satellite links and a 4dvar assimilation method. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(10):1709–1728.
- [9] Kalnay, E. (2003). *Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability*. Cambridge university press.
- [10] Smolarkiewicz, P. K. (1983). A simple positive definite advection scheme with small implicit diffusion. *Monthly Weather Review*, 111(3):479–486.
- [11] Nardi, L., Sorrow, C., Badran, F., and Thiria, S. (2009). Yao: a software for variational data assimilation using numerical models. In *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2009*, pages 621–636. Springer.
- [12] Gilbert, J. C. and Lemaréchal, C. (2006). The module m1qn3. *INRIA Rocquencourt & Rhone-Alpes*.
- [13] Akrou, N., Chazottes, A., Verrier, S., Mallet, C., & Barthes, L. (2015). Simulation of yearly rainfall time series at microscale resolution with actual properties: Intermittency, scale invariance, and rainfall distribution. *Water Resources Research*.