

Rapport de stage

**Diagnostics de sortie du modèle : évaluation du nouveau
diagnostic de visibilité, test de l'interpolation à 4 points dans
FULLPOS**

Toulouse – Météo-France/CNRS
24. Juin 2019 – 12. Juillet. 2018

*Encadrants scientifiques : Ingrid ETCHEVERS CNRM/GMAP/PROC
Rapport Rédigé par : Najla MARASS : Météo-Maroc CNRMSI/SSC*

Objectif du stage :

Mon stage s'inscrit dans le cadre des efforts visant à évaluer la mise en place du nouveau diagnostic de visibilité et aussi le test et validation de l'interpolation horizontale à 4 points dans le post-traitement FULLPOS pour le modèle AROME 2.5 km.

Les sous-routines FULL-POS permettent de faire le post-traitement de différents types de variables sur différents types de surfaces et sur différents types de domaines horizontaux. Il traite deux parties principales : l'interpolation verticale, après l'interpolation horizontale.

L'interpolation horizontale peut être bilinéaire à 4 points ou bien quadratique à 12 points (K. Yessad, 2015). La première permet de calculer la valeur du champ en un point quelconque (ne coïncidant pas avec un pixel.), à partir de ses quatre plus proches voisins points de la grille dans chaque direction. La seconde permet de calculer cette valeur à partir des 12 points les plus proches de la grille dans chaque direction.

Le post-traitement FULLPOS a fait l'objet d'une récente mise à jour réalisée par Ingrid ETCHEVERS et Ryad EL-KHATIB pour tenir compte de l'interpolation à 4 points des champs de la physique dans les codes modèles. La modification a été testée dans le modèle AROME sur le domaine France avec calcul de scores pour les mois d'août et d'octobre 2017. Les résultats obtenus ont montré une très légère amélioration sur les champs de température à 2m, de vents à 10m et d'humidité relative à 2m. Pour la visibilité, l'amélioration a été encore meilleure avec l'interpolation à 4 points.

Pour le champ visibilité, un nouveau diagnostic de calcul de visibilité sur le modèle AROME 2.5 km a été mis en place récemment dans la physique des modèles par Ingrid ETCHEVERS dans le cadre des développements des nouveaux champs diagnostiques pour l'aéronautique. En effet, la baisse de visibilité peut engendrer des conséquences économiques et sécuritaires importantes. Car c'est la première cause d'accidents et son impact a considérablement augmenté durant ces dernières années.

Le travail réalisé consiste à établir un diagnostic pour tester et évaluer l'apport sur la qualité de la prévision suite à l'activation de l'interpolation à 4 points et l'intégration du diagnostic de calcul de visibilité sur le cy41t1 d'AROME pour un domaine couvrant le Maroc.

Pour atteindre cet objectif, deux configurations du modèle Arome (Adaptation dynamique) ont été réalisées sur le domaine du Maroc et à résolution de 2.5km. Une configuration similaire à l'opérationnel et l'autre avec activation de l'interpolation à 4 points et intégration du diagnostic de calcul de visibilité. Et pour procéder à la vérification de la qualité prédictive du modèle vis-à-vis des changements effectués, des simulations numériques ont été menées sur deux cas typiques de baisse de visibilité observée sur quelques stations du réseau synoptique pour le domaine du Maroc.

Ensuite, l'étude est étendue sur une grande période pour évaluer la qualité prédictive de certains paramètres météorologiques près de la surface à savoir la température à 2m, l'humidité relative à 2m, la vitesse et la direction du vent à 10m et aussi le nouveau champ de visibilité prévue. Cette évaluation fait l'objet de score de vérification les plus utilisés dans la littérature : le BIAIS et le RMSE.

Dans ce rapport de stage, nous allons résumer le travail qui a été effectué. Dans un premier temps nous présentons un petit rappel sur l'interpolation à 4 points dans les codes modèles de prévision, et

un autre rappel sur le nouveau diagnostic de calcul de visibilité. Nous parlons aussi des différentes étapes effectuées durant ce stage, les problèmes rencontrés, les différentes solutions apportées, et en clôturant le rapport par une synthèse, conclusion et perspectives.

I. Rappel sur l'interpolation horizontale et le diagnostic de visibilité :

Dans cette section nous allons présenter un petit rappel sur l'interpolation horizontale (K. Yessad, 2015). Aussi celui sur le nouveau diagnostic mis en place dans la physique des modèles pour calculer le champ de la visibilité (I. Etchevers, 2019).

1. Interpolation horizontale :

L'interpolation horizontale peut être bilinéaire à 4 points ou quadratique à 12 points. (K. Yessad, 2015).

⇒ L'interpolation bilinéaire : Pour une grille horizontale à 16 points définie comme indiqué sur la figure 1. Le point O se trouve entre B1, C1, B2 et C2. Λ et Θ sont les longitudes et latitudes sur la sphère de calcul. Les poids d'interpolation sont définis comme suit :

- Le poids zonal num 1 : $ZDLO1 = \frac{\Lambda_O - \Lambda_{B1}}{\Lambda_{C1} - \Lambda_{B1}}$

- Le poids zonal num 2 : $ZDLO1 = \frac{\Lambda_O - \Lambda_{B2}}{\Lambda_{C2} - \Lambda_{B2}}$

- Le poids méridien : $ZDLAT = \frac{\Theta_O - \Theta_{B1}}{\Theta_{B2} - \Theta_{B1}}$

Pour une quantité X, sont calculés successivement :

- L'interpolation linéaire suivant la longitude num 1 :

$$X_1 = X_{B1} + ZDLO1 (X_{C1} - X_{B1})$$

- L'interpolation linéaire suivant la longitude num 2 :

$$X_2 = X_{B2} + ZDLO1 (X_{C2} - X_{B2})$$

- L'interpolation linéaire méridienne :

$$X_{interpolé} = X_1 + ZDLAT (X_2 - X_1)$$

Dans le code FULL-POS, les poids sont pré-calculés dans les routines SUHOW2 et SUHOWLSM. Par conséquent, le fractionnement (splitting) entre interpolation zonale et méridienne n'est pas visible dans les routines d'interpolation.

⇒ L'interpolation quadratique à 12 points : Pour une grille horizontale à 16 points définie comme indiqué sur la figure 2. Le point O se trouve entre B1, C1, B2 et C2. Λ et Θ sont les longitudes et latitudes sur la sphère de calcul.

Les poids d'interpolation sont définis comme suit :

- Le poids zonal num 0 : $ZDLO\ 0 = \frac{\Lambda_O - \Lambda_{B0}}{\Lambda_{C0} - \Lambda_{B0}}$

- Le poids zonal num 1 : $ZDLO\ 1 = \frac{\Lambda_O - \Lambda_{B1}}{\Lambda_{C1} - \Lambda_{B1}}$

- Le poids zonal num 2 : $ZDLO\ 2 = \frac{\Lambda_O - \Lambda_{B2}}{\Lambda_{C2} - \Lambda_{B2}}$

- Le poids zonal num 3 : $ZDLO\ 3 = \frac{\Lambda_O - \Lambda_{B3}}{\Lambda_{C3} - \Lambda_{B3}}$

- Le poids méridien : $ZCLA\ 1 = \frac{((\Theta_O - \Theta_{B0})(\Theta_O - \Theta_{B1})(\Theta_O - \Theta_{B3}))}{((\Theta_{B2} - \Theta_{B0})(\Theta_{B2} - \Theta_{B1})(\Theta_{B2} - \Theta_{B3}))}$

$$ZCLA\ 2 = \frac{((\Theta_O - \Theta_{B0})(\Theta_O - \Theta_{B2})(\Theta_O - \Theta_{B3}))}{((\Theta_{B1} - \Theta_{B0})(\Theta_{B1} - \Theta_{B2})(\Theta_{B1} - \Theta_{B3}))}$$

$$ZCLA\ 3 = \frac{((\Theta_O - \Theta_{B0})(\Theta_O - \Theta_{B1})(\Theta_O - \Theta_{B2}))}{((\Theta_{B3} - \Theta_{B0})(\Theta_{B3} - \Theta_{B1})(\Theta_{B3} - \Theta_{B2}))}$$

On définit les fonctions suivantes :

- $f\ 1(\alpha) = (\alpha + 1)(\alpha - 2)(\alpha - 1)/2$
- $f\ 2(\alpha) = -(\alpha + 1)(\alpha - 2)\alpha/2$
- $f\ 3(\alpha) = \alpha(\alpha - 1)(\alpha + 1)/6$

Pour une quantité X, sont calculés successivement :

- L'interpolation linéaire suivant la longitude num 0 :

$$X_0 = X_{B0} + ZDLO\ 0(X_{C0} - X_{B0})$$

- L'interpolation cubique à 4 points suivant la longitude num 1 :

$$X_1 = X_{A1} + f\ 1(ZDLO\ 1)(X_{B1} - X_{A1}) + f\ 2(ZDLO\ 1)(X_{C1} - X_{A1}) + f\ 3(ZDLO\ 1)(X_{D1} - X_{A1})$$

- L'interpolation cubique à 4 points suivants la longitude num 1 :

$$X_2 = X_{A2} + f\ 1(ZDLO\ 2)(X_{B2} - X_{A2}) + f\ 2(ZDLO\ 2)(X_{C2} - X_{A2}) + f\ 3(ZDLO\ 2)(X_{D2} - X_{A2})$$

- L'interpolation linéaire suivant la longitude num 3 :

$$X_3 = X_{B3} + ZDLO\ 3(X_{C3} - X_{B3})$$

- L'interpolation cubique à 4 points méridienne :

$$X_{interpolé} = X_0 + ZCLA1(X_1 - X_0) + ZCLA2(X_2 - X_0) + ZCLA3(X_3 - X_0).$$

Dans le code FULL-POS, les poids sont pré-calculés dans les routines SUHOW2 et SUHOWLSM. Par conséquent, le fractionnement (splitting) entre interpolation zonale et méridienne n'est pas visible dans les routines d'interpolation.

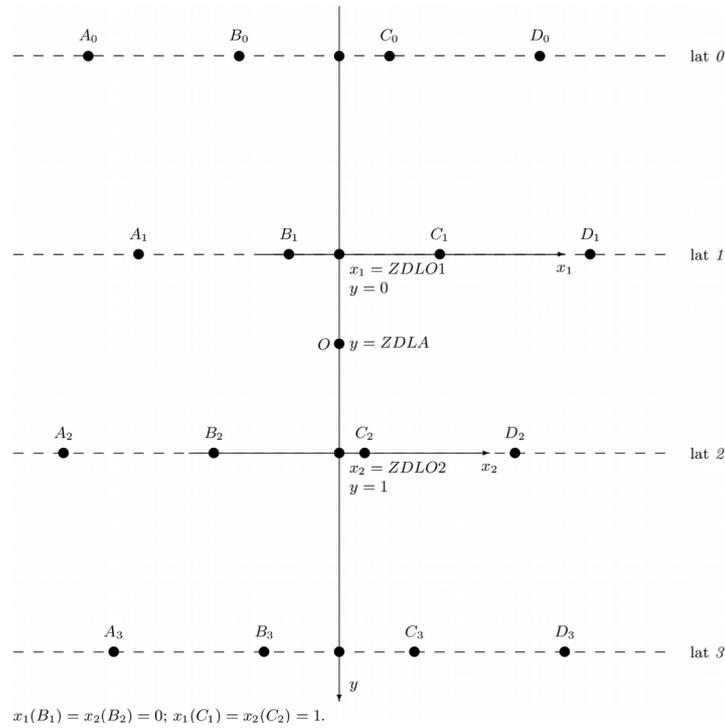


Fig 1: Grille horizontale pour les interpolations bilinéaire

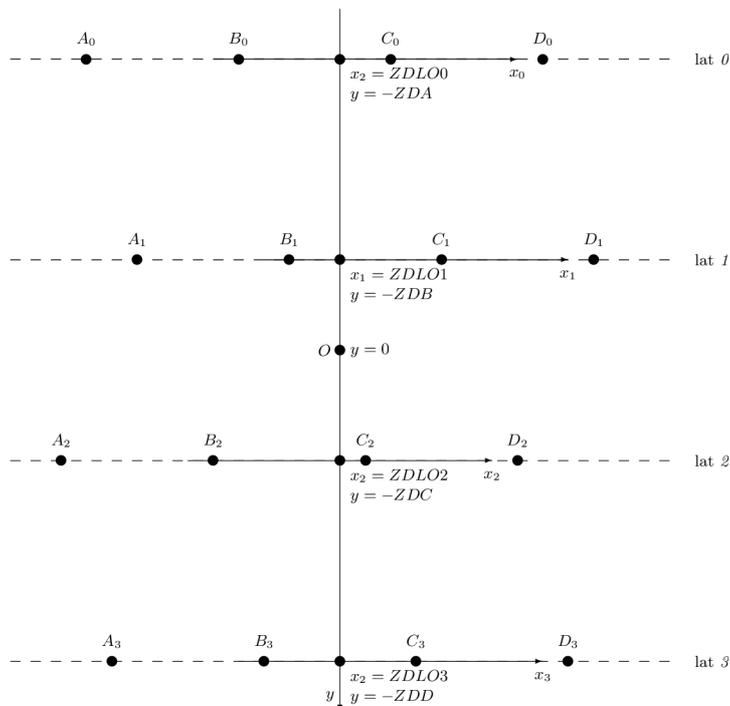


Fig 2: Grille horizontale pour les interpolations à 12 points.

2. Le nouveau diagnostic de visibilité :

Pour des besoins de la prévision météorologique en général et surtout en aéronautique, un nouveau diagnostic de visibilité a été intégré dans la physique des modèles par Ingrid ETCHEVERS (Mai, 2019). Ce diagnostic se base sur la formule de visibilité donnée par (Koschmieder, 1924) :

$$Visibilité = - \ln \varepsilon \beta \quad \text{Où}$$

- ε est le seuil de contraste (qui doit être valoir 0,05 selon l'OMM, l'OACI et le CIE (et non 0,02 comme généralement trouvé dans la bibliographie, ex (Kunkel, 1984))
- β est le coefficient d'extinction

Ce coefficient d'extinction, β , peut être décomposé en coefficients partiels afin d'obtenir des visibilités partielles.

AROME utilise le schéma microphysique (ICE3) du modèle Més0-NH (Pinty and Jabouille, 1998) qui distingue trois espèces glacées et deux espèces liquides (Kessler, 1969). ICE3 repose sur l'utilisation de 5 variables pronostiques pour représenter 5 catégories de condensats en plus de la vapeur d'eau :

- Le contenu en eau liquide nuageuse
- Le contenu en glace nuageuse
- Le contenu en pluie
- Le contenu en graupels
- Le contenu en neige

Et donc pour le nouveau diagnostic, la visibilité dans ARPEGE et AROME est décomposée en :

1- Une visibilité liée au brouillard (notée $Visi_{cld}$) qui dépend du contenu en eau liquide nuageuse (cld) et du contenu en glace nuageuse (icecld) :

$$Visi_{cld} = - \ln(0.05) / (\beta_{cld} + \beta_{icecld}) \quad \text{Où}$$

Expressions des β en fonction des contenus en hydrométéores selon la littérature :

$$\beta_{cld} = a * C^b * \exp(c * (\log C)^2) * \exp(d * (\log C)^3)$$

a, b, c et d sont des coefficients différents selon ARPEGE et AROME, pouvant dépendre de la force du vent, calculés par régression statistique par Olivier Mestre (DirOP/COMPAS/DOP) (Voir Fig3)

$$\beta_{ice} = 163.9 C^{(1.0)}$$

C = cloud ice water content [gm-3]) adapté de (Stoelinga, 1999)

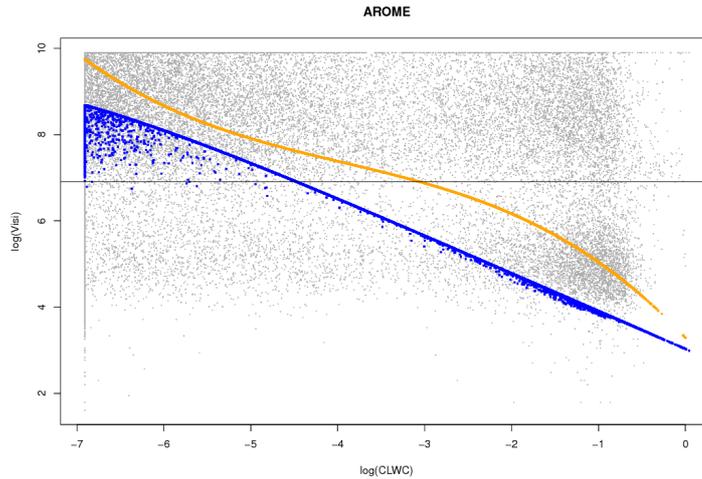


Fig3 : Régression statistique entre LWC prévus et visibilité observées. Par O. Mestre. (En bleu suivant la formule de kunkel 1984, en orange suivant une formule polynomiale)

2- Une visibilité liée aux précipitations (notée $VISI_{Hydro}$) qui dépend du contenu en pluie (R_C) en neige (S_C) et en graupel (G_C)

$$VISI_{Hydro} = -\ln(0.05) / (\beta_{rain} + \beta_{snow} + \beta_{graupel})$$

$$\beta_{rain} = 2.5 R_C^{(0.75)} \text{ (Nieme} \ddot{a}, 2014)$$

$$\beta_{snow} = 10.4 S_C^{(0.78)} \text{ (Stoelinga, 1999)}$$

$$\beta_{graupel} = 2.4 G_C^{(0.78)} \text{ (Nieme} \ddot{a}, 2014)$$

Ensuite, chacune de ces deux visibilités partielles ($VISI_{Cld}$ et $VISI_{Hydro}$) est calculée dans la physique des modèles à chaque pas de temps à 10 m (pour ARPEGE) et 5 m (pour AROME) et on prend le minimum entre deux fichiers de sortie du modèle (15 min pour AROME-PI, 1 heure pour AROME, 1 heure puis 3 heures pour ARPEGE). On obtient 2 minima de visibilités : Minimum horaire $VISI_{Cld}$ et Minimum horaire $VISI_{Hydro}$.

Rq : On peut prendre le minimum des deux si on ne souhaite qu'une seule visibilité (selon la méthode dans WRF)

II- Présentation du travail effectué :

Dans cette section nous allons présenter le travail réalisé et les différentes étapes effectuées durant ce stage.

1. Les modifications apportées au code AROME :

Le modèle AROME-Application de la Recherche à l'Opérationnel à Mésos-Echelle (Seity et al., 2011 [29]) est un modèle de prévision numérique du temps à maille fine. Pour le domaine Maroc, la résolution du modèle opérationnel (cycle 41t1) a été récemment améliorée de 2.5 km à 1.3 km pour

la grille horizontale et de 60 à 90 niveaux verticaux où le premier niveau passe de 10 m à 5 m au-dessus du sol. Il a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux tels que les fortes pluies méditerranéennes, les orages violents et le brouillard.

Le travail sur l'interpolation à 4 points et le diagnostic de visibilité a été réalisé avec AROME cy41t1 notamment dans les routines :

```
src/local/arpifs/adiab/cpg.F90
src/local/arpifs/adiab/cpg_dia.F90
src/local/arpifs/control/cnt4.F90
src/local/arpifs/dia/cpxfu.F90
src/local/arpifs/fullpos/sufpfxu.F90
src/local/arpifs/fullpos/fpcorphy.F90
src/local/arpifs/fullpos/sufptr2.F90
src/local/arpifs/fullpos/fpintdyn.F90
src/local/arpifs/fullpos/fpintphy.F90
src/local/arpifs/fullpos/hpos.F90
src/local/arpifs/module/yomafn.F90
src/local/arpifs/module/yomparar.F90
src/local/arpifs/module/yomphy2.F90
src/local/arpifs/module/ptrxfu.F90
src/local/arpifs/module/yomxfu.F90
src/local/arpifs/namelist/namafn.nam.h
src/local/arpifs/namelist/namparar.nam.h
src/local/arpifs/namelist/namphy2.nam.h
src/local/arpifs/namelist/namxfu.nam.h
src/local/arpifs/phys_dmn/suparar.F90
src/local/arpifs/phys_dmn/aplpar.F90
src/local/arpifs/phys_dmn/initaplpar.F90
src/local/arpifs/phys_dmn/suphy2.F90
src/local/arpifs/phys_dmn/mf_phys.F90
src/local/arpifs/phys_dmn/aroclia.F90
src/local/arpifs/phys_dmn/apl_arome.F90
src/local/arpifs/setup/suafn1.F90
src/local/arpifs/setup/suafn2.F90
src/local/arpifs/setup/suafn3.F90
src/local/arpifs/setup/suxfu.F90
```

2. Expériences réalisées :

Le but du stage était d'évaluer la qualité de la prévision en utilisant l'interpolation à 4 points et aussi en intégrant le nouveau diagnostic de visibilité dans le code Arome. Pour ce faire, nous avons lancé des prévisions AROME cy41t1 (adaptation dynamique) sur le domaine Maroc et à la résolution de 2.5 km. Nous les avons classés en prévisions OPER pour les prévisions qui utilise le MASTERODB opérationnel et en prévisions EXPER pour celle qui utilise le nouveau MASTERODB.

3. Diagnostics utilisés pour la validation des prévisions :

Pour procéder à la vérification de la qualité prédictive du modèle Arome vis-à-vis des changements effectués, il fallait choisir des dates sur le Maroc présentant une variabilité du temps sensible assez importante et aussi des cas de baisse de visibilité observée au cours de certains phénomènes météorologiques comme par exemple le phénomène de brouillard qui est classé parmi les premiers des événements atmosphériques responsables des variations de condition de visibilité (Définition de l'OMM).

Nous avons commencé l'étude par choisir deux cas typique là ou de faibles valeurs de visibilité observées sont enregistrées à cause des formations brumeuses:

- La nuit de la journée du 07/10/2018 et la matinée de la journée du 08/10/2018.
- La période allant du 04 au 09 Décembre 2018. Ce cas d'étude présente un très bon exemple d'étude de cas, vue l'étendue spatio-temporelle important des formations brumeuses qui ont été observées durant cette période.

Pour cette partie, La méthode de vérification entreprise se base tout simplement sur une représentation graphique des observations et des prévisions pour pouvoir examiner les valeurs de visibilité prévus au cours de ces deux situations.

L'analyse a été faite sur la base des produits élaborés par le service CNMRSI/STTD à partir des observations horaires reçus d'un ensemble de stations synoptiques du réseau national et traités par la BDM du serveur synergie. Le produit est sous forme d'un tableau indiquant pour chaque station synoptique l'évolution du temps présent au moment de l'observation sur 24 heures (Voir Fig4 et Fig5).

Sur le tableau 1 est indiqué la description de quelques symboles du temps significatif selon le Tableau Washington des codes OMM)

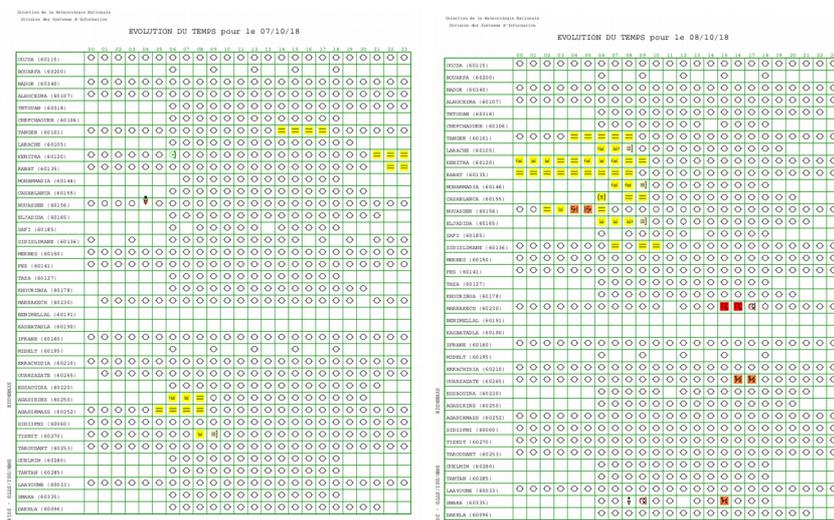


Fig4 : Evolution du temps présent pour la journée du 07/10/2018 à droite et du 08/10/2018 à gauche (Produit élaboré à partir des messages SYNOP reçus et traités par la BDM du serveur SYNERGIE)

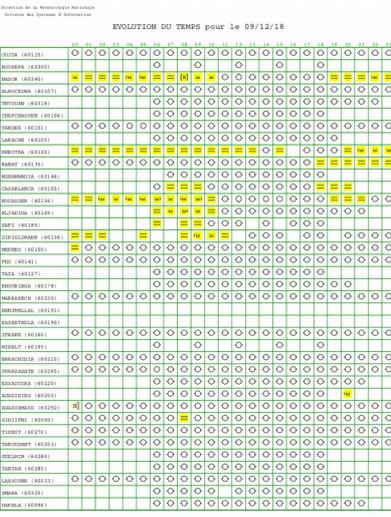
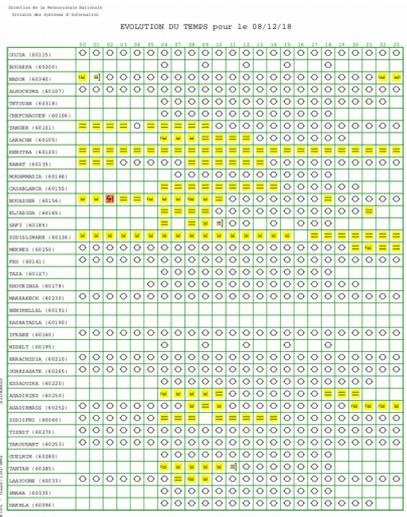
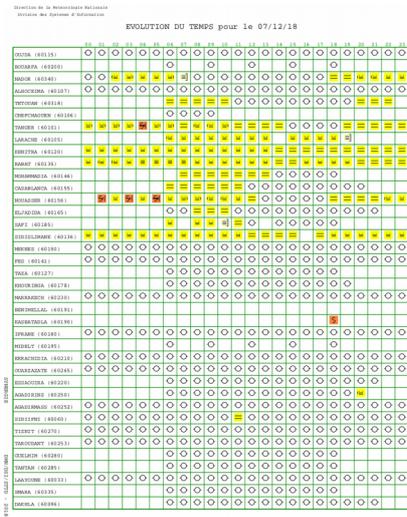
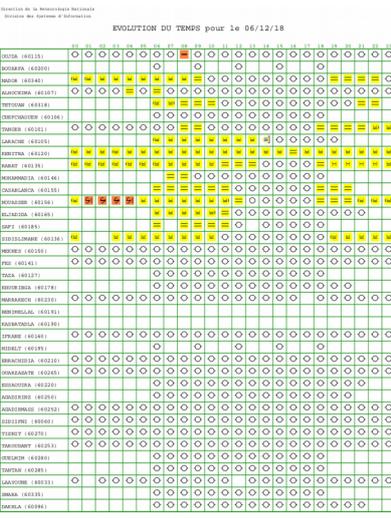
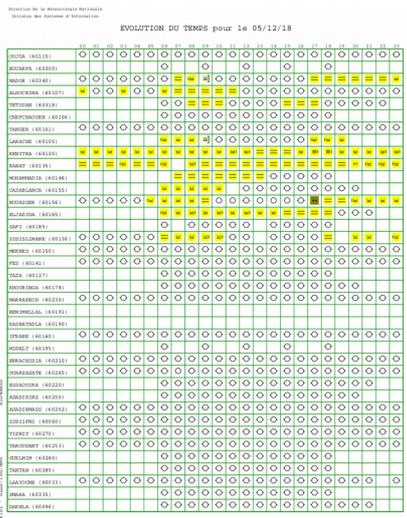
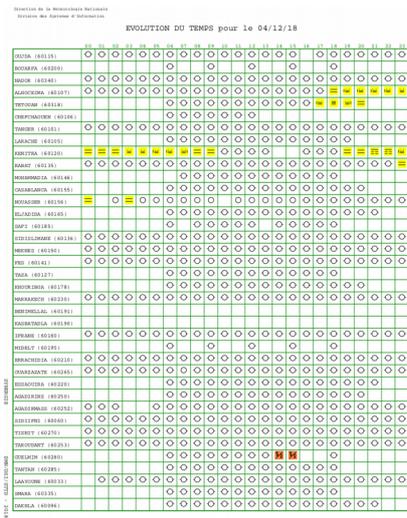


Fig 5 : Evolution du temps présent entre la journée du 04/12/2018 et la journée du 08/10/2018 (Produit élaboré à partir des messages SYNOP reçus et traités par la BDM du serveur SYNERGIE)

symbole	Description
☐	Du brouillard ou du brouillard glacé (plus correctement designé sous le nom de brume) est observé et la visibilité n'est ni inférieure à 5/8 de mille ni supérieure à 6 milles.
☐☐☐	Une mince couche de brouillard ou de brouillard glacé en bancs est observé à la station. L'épaisseur du brouillard ne doit pas réduire la visibilité au niveau de l'œil; le brouillard doit cependant avoir une densité telle que la visibilité apparente dans le brouillard soit inférieure à 5/8 de mille.
☐☐☐☐	Une mince couche de brouillard ou de brouillard glacé, plus ou moins continue, est observée à la station au moment de l'observation. L'épaisseur du brouillard ne doit pas réduire la visibilité au niveau de l'œil; cependant, le brouillard doit avoir une densité telle que la visibilité apparente dans le brouillard soit inférieure à 5/8 de mille.
☐☐☐☐☐	Il y a eu du brouillard ou du brouillard glacé, associé à une visibilité de moins de 5/8 de mille à la station au cours de l'heure précédente, mais il n'y en a pas au moment de l'observation.
☐☐☐☐☐☐	Un banc de brouillard ou de brouillard glacé d'une épaisseur estimée à plus de 2m est observé à une certaine distance de la station. La visibilité semble être inférieure à 5/8 de mille à l'intérieur du brouillard.
☐☐☐☐☐☐☐	Il y a des bancs de brouillard ou de brouillard glacé d'une épaisseur supérieure à 2m au moment de l'observation, et la visibilité dominante est réduite à moins de 5/8 de mille.

	Il y a du brouillard ou du brouillard glacé à la station au moment de l'observation, la visibilité est inférieure à 5/8 de mille, mais le ciel est visible et le brouillard est devenu plus mince au cours de l'heure précédente.
	Il y a du brouillard ou du brouillard glacé à la station au moment de l'observation, la visibilité est inférieure à 5/8 de mille, le ciel est invisible mais le brouillard est devenu plus mince au cours de l'heure précédente.
	Il y a du brouillard ou du brouillard glacé à la station au moment de l'observation, la visibilité est inférieure à 5/8 de mille, mais le ciel est visible et le brouillard n'a subi aucun changement d'intensité appréciable au cours de la dernière heure.
	Il y a du brouillard ou du brouillard glacé à la station au moment de l'observation, la visibilité est inférieure à 5/8 de mille, le ciel est invisible et le brouillard n'a subi aucun changement d'intensité appréciable au cours de la dernière heure.
	Il y a du brouillard ou du brouillard glacé à la station au moment de l'observation, la visibilité est inférieure à 5/8 de mille, le ciel est visible mais le brouillard a commencé ou est devenu plus épais lors de la dernière heure.
	Il y a du brouillard ou du brouillard glacé à la station au moment de l'observation, la visibilité est inférieure à 5/8 de mille, le ciel est invisible et le brouillard a commencé ou est devenu plus épais lors de la dernière heure.
	Il y a du brouillard ou du brouillard glacé à la station au moment de l'observation, la visibilité est inférieure à 5/8 de mille, le ciel est visible et le brouillard dépose du givre blanc.
	Il y a du brouillard ou du brouillard glacé à la station au moment de l'observation, la visibilité est inférieure à 5/8 de mille, le ciel est invisible et le brouillard dépose du givre blanc.

Tableau 1 Extrait de la description des symboles du temps significatif selon le tableau Washington

Pour le premier cas d'étude, nous avons aussi tracé le refroidissement et l'humidification pour qualifier le nouveau champ de visibilité et examiner sa corrélation avec le reste des champs prévus par le modèle. En effet, la prévision du brouillard dépend fortement de la capacité du modèle à reproduire correctement la succession des processus advectifs liés à la circulation de brise au cours de la journée et les processus radiatifs en début de nuit (Bari 2015). Donc dans cette partie, pour pouvoir évaluer les conditions thermodynamiques au cours du cycle de vie de l'événement observé, nous avons comparé l'évolution horaire du champ de visibilité prévue avec le taux de refroidissement et d'humidification prévue notamment lors de la formation, la maturité et la dissipation du phénomène.

Ensuite, une étude statistique est menée afin de généraliser les résultats obtenus et pour mieux comprendre le comportement du modèle en utilisant l'interpolation à 4 points et en intégrant le nouveau diagnostic de calcul de visibilité. Pour ce faire deux périodes ont été choisies :

- ✓ Période printanière : Février-Mars-Avril 2018.
- ✓ Période automnale Octobre-Novembre-Décembre 2018.

Les scores que nous avons choisis sont le biais et l'erreur quadratique moyenne débiaisée. Ils se répartissent en :

1. Scores calculés au point de grille le plus proche dédiés à examiner la qualité prédictive du modèle pour certains paramètres météorologiques mesurés en continu (quelques champs thermodynamiques près de la surface).
2. Scores calculés à partir de la valeur minimale des quatre plus proches voisins points de la grille dans chaque direction.

3. Scores calculés à partir de la valeur minimale des 12 points les plus proches de la grille dans chaque direction.

Pour évaluer la qualité prédictive du nouveau champs visibilité prévue par rapport au champs visibilité horizontale observée, nous avons utilisé les 3 approches. En effet, le champ visibilité reste un champ non local et du coup sa validation doit être faite à une échelle spatiale autour du point d'observation et non ponctuelle.

Comme outils de référence nous avons pu récupérer les observations horaires de tout le réseau synoptique national relatif aux champs T2m, Hu2m, vent10m. Par contre, pour la visibilité horizontale observée, nous n'avons reçu que les observations horaires relatives aux stations synoptiques de la région centre (Casablanca) et nord (Rabat).

Pour chaque type de score de vérification, la formulation utilisés dans cette étude, est comme suit :

- le Biais (B) représente la moyenne arithmétique des écarts de la prévision (F) à l'observation (O). Il indique le sens de la déviation par rapport à l'observation et reflète l'erreur systématique du modèle pour un paramètre météorologique donné. Ce score indique si le modèle a tendance à sous-estimer ($B < 0$) ou surestimer ($B > 0$) la prévision du paramètre étudié.

$$B = \frac{1}{N} \sum_1^N (F_i - O_i)$$

- L'écart type (ou RMSE débiaisé) mesure la dispersion des valeurs par rapport à l'observation, et reflète ainsi la variabilité au sein de l'échantillon de données. Plus ce score est faible, plus la dispersion du modèle est faible :

$$STD = \left[\frac{1}{N} \sum_1^N (F_i - B - O_i)^2 \right]^{1/2}$$

Où F_i et O_i sont les valeurs prévue et observée à l'échéance i pour le paramètre étudié et B son biais.

II- Résultats obtenus :

Dans cette section sont présentés l'ensemble des résultats obtenus lors de l'étude de cas et l'étude statistique.

1. L'étude de cas:

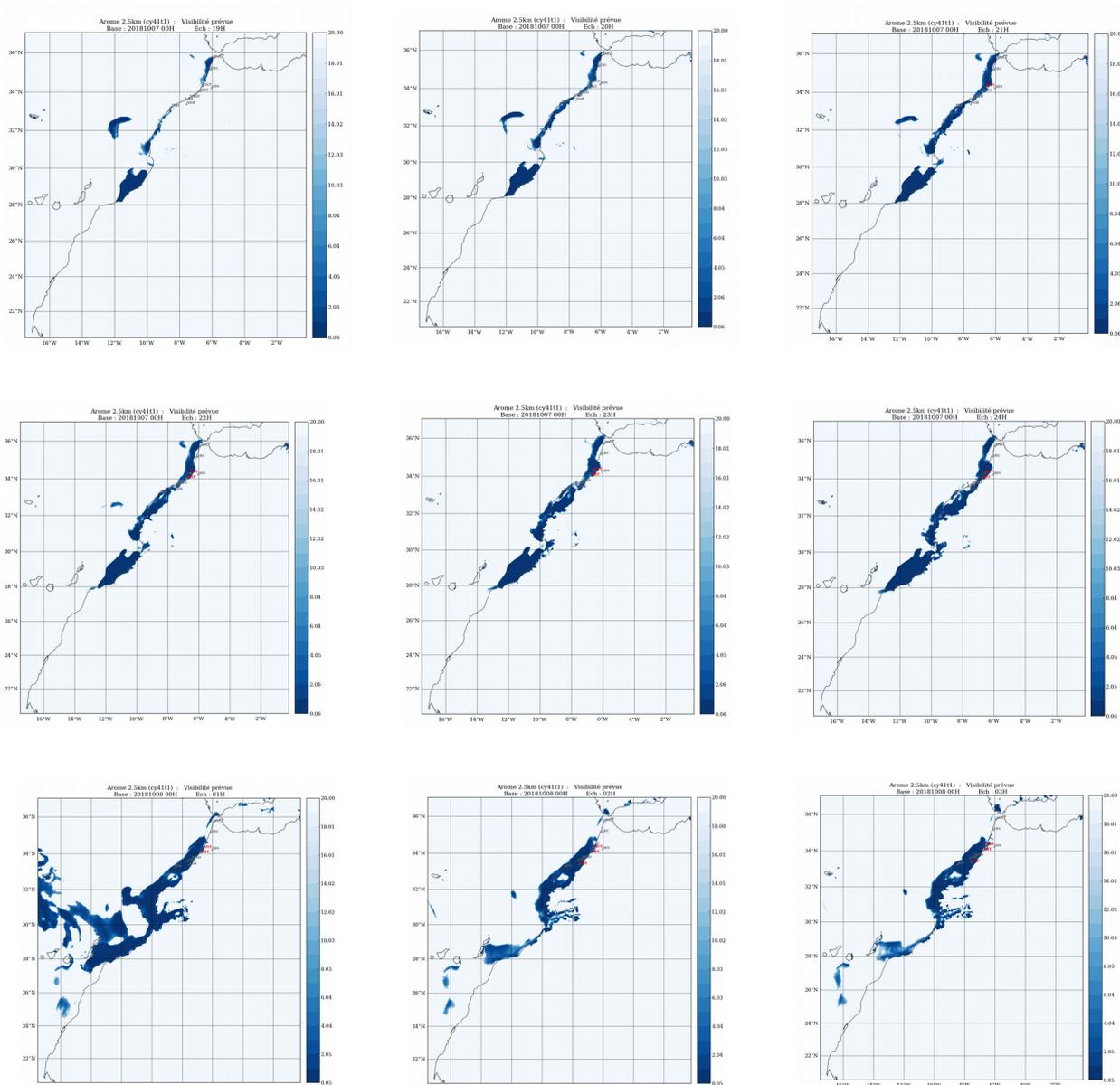
1.1. La nuitée du 07/10/2018 et la matinée du 08/10/2018

La Fig6 illustre l'évolution des valeurs simulées du champ visibilité prévu (en Kilomètres) issues du modèle Arome au cours de la nuitée du 07/10/2018 et la matinée de la journée du 08/10/2018. Sur chaque carte sont pointés aussi les stations synoptiques en couleur différente selon l'évolution du temps présent comme exposée dans la Fig4.

Pour la nuitée du 07/10/2018, on remarque que les simulations d’Arome ont prévu une zone de faibles valeurs de visibilité vers 20h près des côtes atlantiques au Nord d’Essaouira. Au fil des heures cette bande traduisant les faibles valeurs de visibilité s’élargie davantage sur l’intérieur de la bande côtière. Vers 10h du matin, cette zone commence à se rétrécir pour disparaître à partir de 11h du matin.

Par rapport à l’observation, des formations brumeuses étaient observées à partir de 21h de la nuitée du 07/10/2018 sur les stations de Kenitra et Rabat et ces formations brumeuses ont été observées aussi sur d’autres stations de la bande côtière du nord (Tanger, Larache, Casablanca, Mohammedia, et El-Jadida) durant la matinée de la journée du 08/10/2018. La dissipation de l’évènement a commencé à partir de 10h du matin.

Alors en comparaison avec l’observation, on peut dire que la simulation du champs visibilité pour ce type de cas a reproduit grossièrement le cycle de vie de l’évènement observé avec une anticipation de formation (une heure avant) et un retard de dissipation (1 heure après).



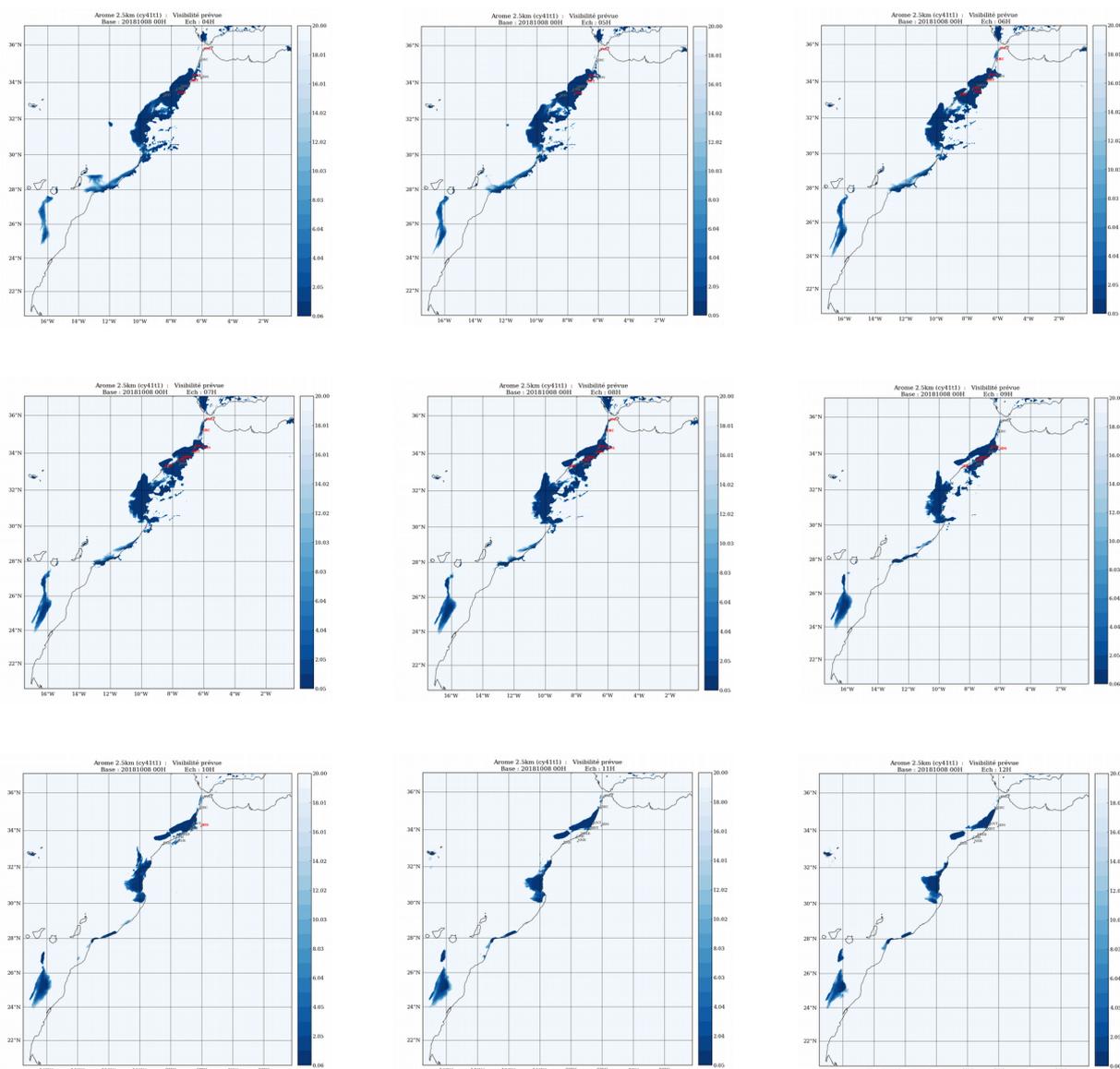


Fig6: Visibilité prévue au cours de la nuitée du 07/10/2018 et la matinée de la journée du 08/10/2018.

- Les stations synoptiques pointées en couleur rouge : Présence d'un événement réduisant la visibilité.
- Les stations pointées en couleur Gris : aucun événement observé.

Pour examiner l'interaction et la corrélation entre la visibilité simulée avec les autres processus advectifs, la figures Fig7, Fig8 et Fig9 présentent les cartes de visibilité simulée, de refroidissement et d'humidification sur une séquence couvrant le cycle de vie de l'événement observé durant le premier cas d'étude :

- Les échéances 20h et 21h de la nuitée du 07/08/2018 (formation de l'événement),
- Les échéances 08h et 09h de la journée du 08/10/2018 (maturité de l'évènement),
- Les échéances 10h et 11h de la journée du 08/10/2018 (dissipation de l'événement).

Le taux de refroidissement $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ désigne la tendance de la température à 2m par rapport à l'heure précédente. (Si $\frac{\Delta T}{\Delta t} < 0$ on parle du refroidissement)

Le taux d'humidification $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ désigne la tendance de l'humidité relative à 2m par rapport à l'heure précédente. (Si $\frac{\Delta H}{\Delta t} > 0$, on parle d'humidification)

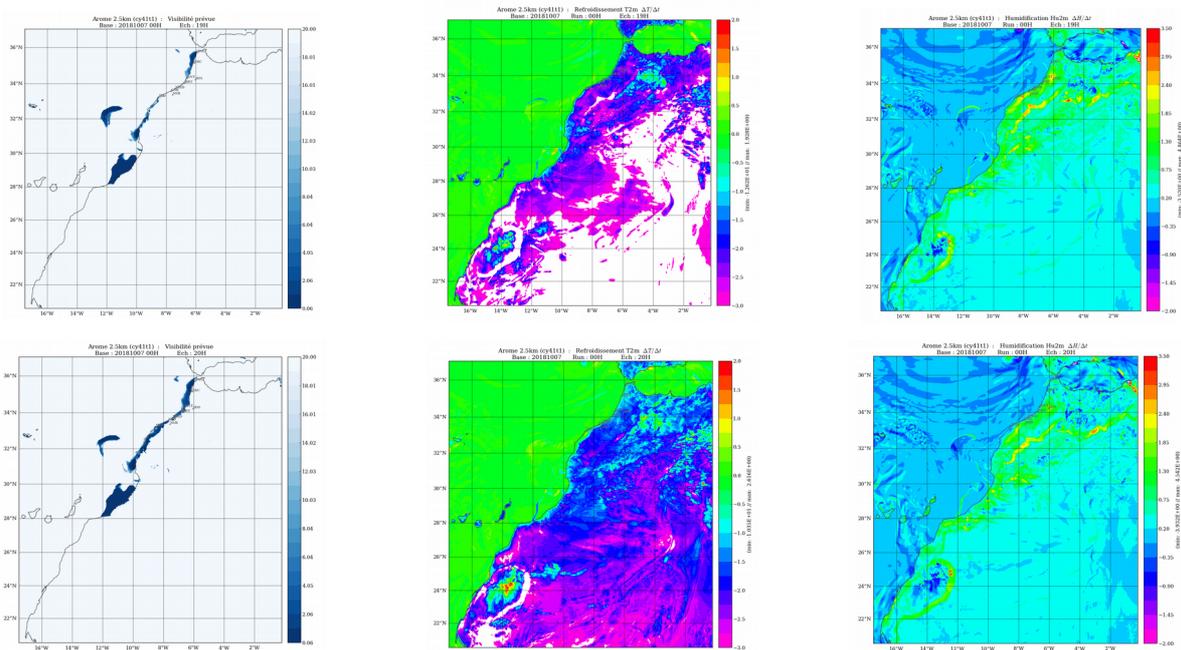


Fig7: Visibilité prévu (à droite), Refroidissement (au centre), Humidification (à gauche) pour la nuitée du 07/10/2018 :
 ■ Les échéances 20h : en haut
 ■ Les échéances 21h : en bas

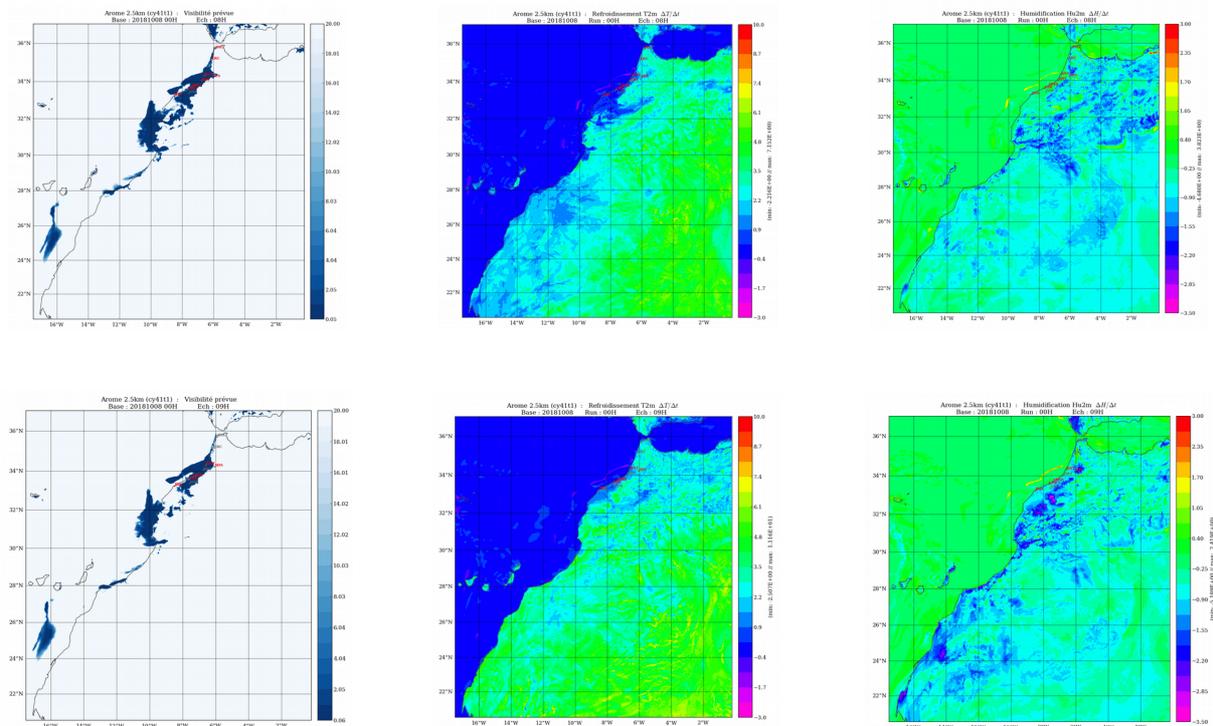


Fig8: Visibilité prévu (à droite), Refroidissement (au centre), Humidification (à gauche) pour la journée du 08/10/2018 :
 ■ Les échéances 08h : en haut
 ■ Les échéances 09h : en bas

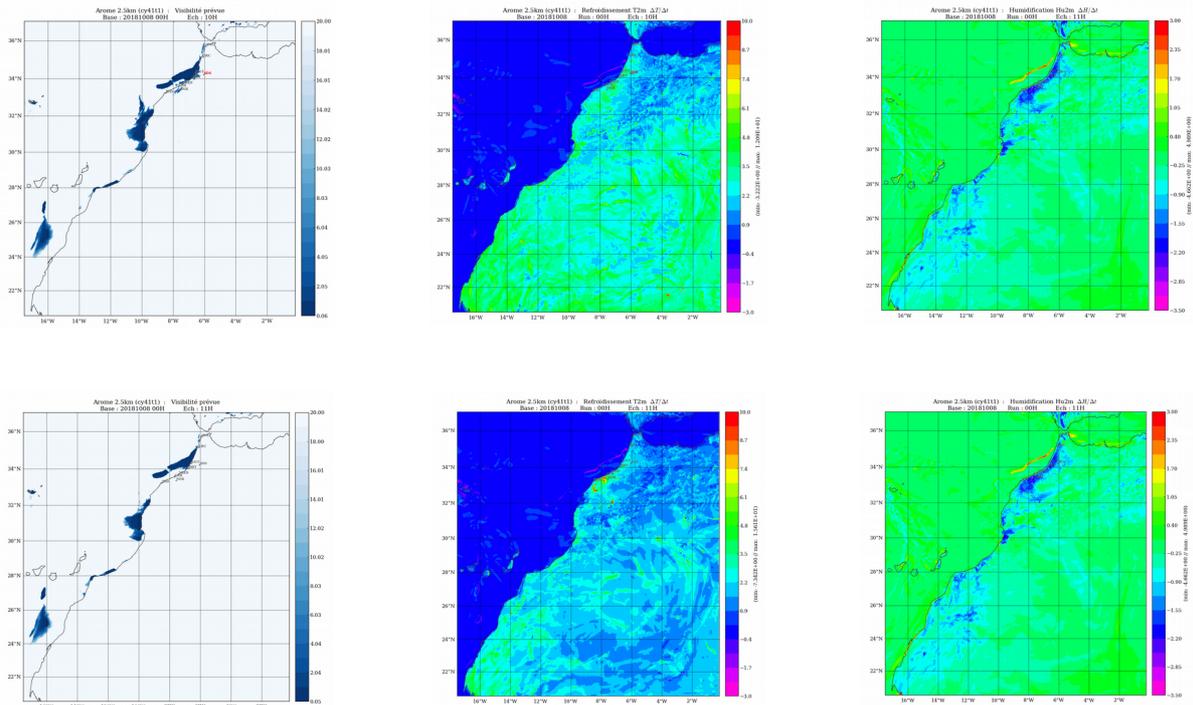


Fig9: Visibilité prévu (à droite), Refroidissement (au centre), Humidification (à gauche) pour la journée du 08/10/2018 :
 ■ Les échéances 10h : en haut
 ■ Les échéances 11h : en bas

Pour la simulation du 07/10/2019, les faibles valeurs de visibilité ont été simulé vers 20h sur la bande côtière atlantique (1 heure avant celui de la première occurrence de phénomène de brouillard observée sur la station de Kenitra (vers 21h). Sur la Fig7, le refroidissement et d'humidification étaient importants (respectivement de l'ordre de $-2.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ et de $+20\%.\text{h}^{-1}$) au cours de l'échéance de 19h. Ceci peut expliquer la formation précoce des bandes de faibles visibilité sur la zone côtière par rapport à l'observation.

L'évolution du taux de refroidissement montre que ses valeurs augmentent au fil des heures avec une diminution progressive de l'humidité. Vers 08h de la journée du 08/10/2018 la bande de faibles valeurs de visibilité simulée a couvert la globalité des stations ayant enregistrées des occurrences d'événements de brouillard. Sur la Fig8, le taux de refroidissement simulé pour cette même échéance est de l'ordre de $-0.075^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ et de celui de l'humidification est de l'ordre de $+0.075\%.\text{h}^{-1}$

Au-delà, on parle plutôt du réchauffement et d'assèchement. La Fig9 montre que vers 11h (L'heure de dissipation de la bande de faible visibilité simulée sur les zones côtières), le taux de refroidissement pour cette même échéance est de l'ordre de $+2.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ et de celui de l'humidification est de l'ordre de $-20\%.\text{h}^{-1}$

Le diagnostic qui précède montre qu'il y a une certaine sensibilité et corrélation entre les valeurs de la visibilité simulée et la succession des processus advectifs affluant la prévision du brouillard sur cette zone côtière

1.2. Les journées allant du 04 au 09 décembre 2018

Sur la Fig10, nous avons représenté l'évolution des valeurs simulées du champ de visibilité prévu par le modèle Arome (en Kilomètres), superposé aux noms des stations aux quelles des formations brumeuses ont été observée (en couleur rouge), pour quelques échéances allant de la nuitée du 04/12/2018 à la journée du 09/12/2018. Les échéances présentées dans cette partie ont été choisies de façon permettant de mieux comprendre le comportement du champ de visibilité au cours du cycle de vie du phénomène observé

Pour la journée du 04 Décembre 2018, on remarque que les simulations d'Arome ont prévu une zone de faibles valeurs de visibilité sur le bassin méditerranéen, notamment vers 16h. Cette zone de faible valeur s'est approché davantage de notre pays pour toucher les côtes méditerranéennes pendant la soirée et la nuit de la même journée, on note également la présence d'une petite zone de faible valeurs de visibilité prévue sur la région du Gharb entre 19h et 22h de la même journée.

En se référant aux observations issues du réseau synoptique (voir Fig5), des formations brumeuses ont été observées entre 19h et 22h du 04 Décembre 2018 sur les stations de Tetouan, Al Hoceima et Kenira. Ces observations collent parfaitement avec les zones touchées par les faibles valeurs de visibilité prévues par le modèle Arome.

Pour le 05 Décembre 2018 on remarque que durant les premières heures de la matinée, les faibles valeurs de visibilité persistent sur la partie Est du littoral méditerranéen aussi bien que sur la région du Gharb. Entre 06h et 09h du matin, cette bande traduisant les faibles valeurs de visibilité s'élargie davantage sur l'Ouest de la côte méditerranéenne et des nouvelles plages de faibles valeurs apparaissent près des côtes atlantiques au Nord d'Essaouira. Entre 12h et 16h, une nette amélioration de la visibilité est prévue par le modèle Arome sur l'Ouest du littoral méditerranéen, tandis que des zones localisées de faibles valeurs de visibilité persistent toujours sur les côtes entre Larache et Kenitra et entre EL Jadida et Essaouira. A 21h, le modèle arome prévoit une dégradation de la visibilité sur les côtes atlantiques entre Larache et Essaouira aussi bien que sur les côtes méditerranéennes notamment la partie Est.

Côté observation, les formations brumeuses ont été observées sur l'Est du littoral méditerranéen (Al Hoceima) et aussi sur Kenitra vers 3h du matin. Juste après durant le matin, ces formations ont gagné d'autres stations situées près des côtes (Tetouan, Nador, Larache, Rabat, Casablanca, El Jadida et Essaouira). Entre 12h et 16h ces formations brumeuses ont persisté localement sur les côtes notamment sur Kenitra, Essaouira et Tetouan. Et vers 21h des formations brumeuses ont été observées localement sur les côtes méditerranéennes et sur la région du Gharb.

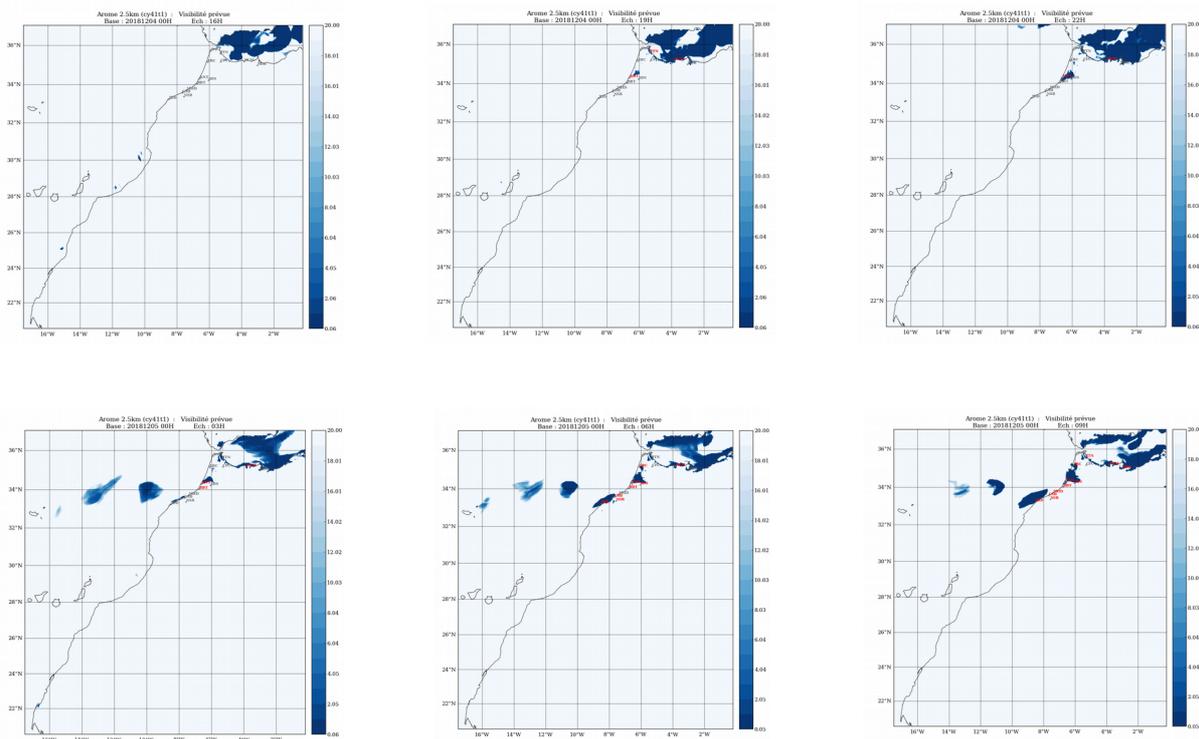
En conclusion pour cette journée, le champ de visibilité prévue par le modèle Arome, corrèle d'une manière générale avec les observations, néanmoins une surestimation du champ de visibilité est à signalée sur la partie Ouest de la méditerranée pendant l'après-midi du 05 Décembre 2018 et une sous-estimation est à noter vers 21h sur les côtes Atlantiques.

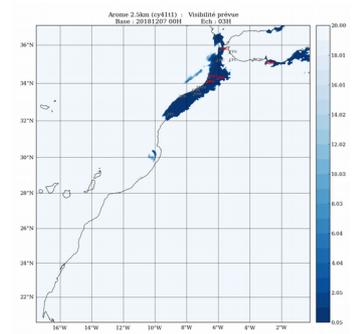
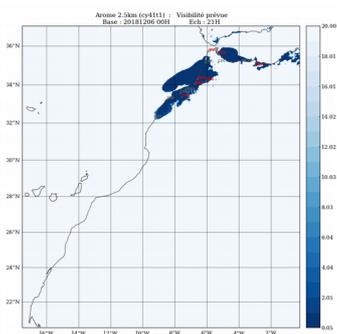
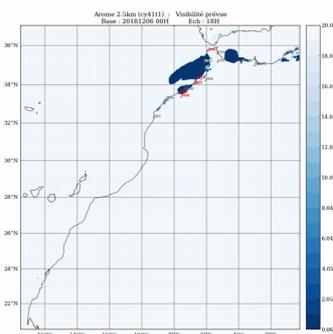
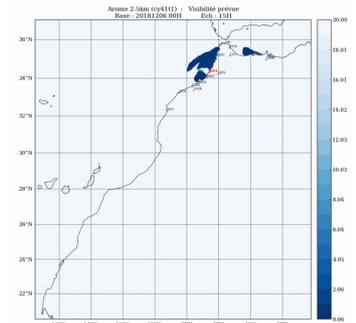
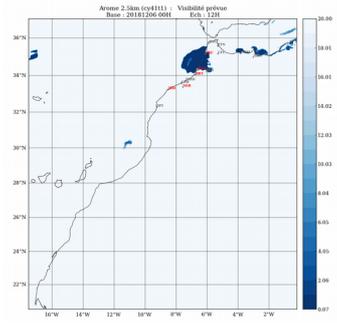
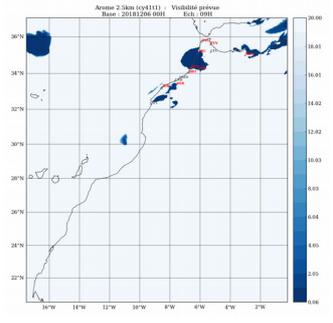
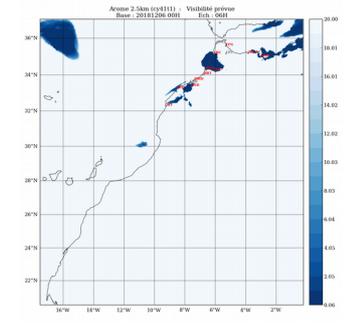
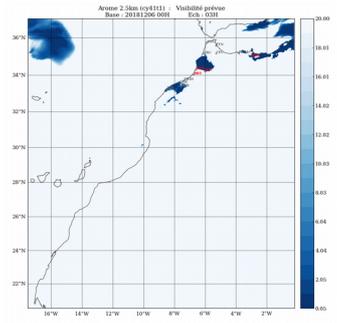
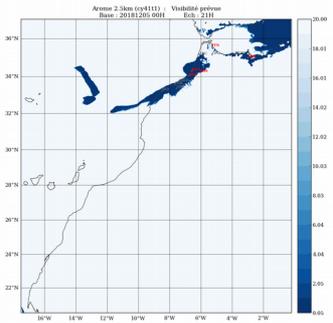
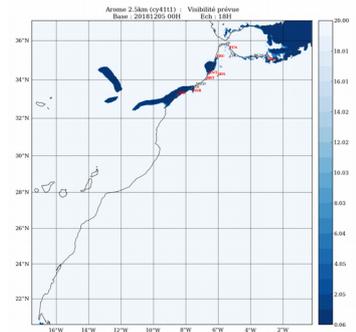
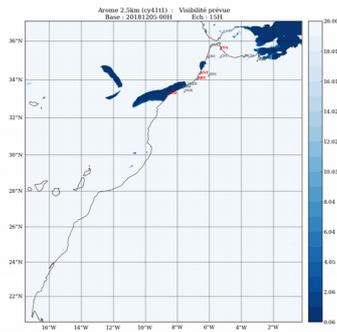
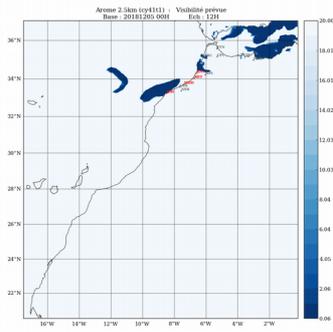
De la même manière pour les autres journées, En analysant le champ de visibilité prévue par le modèle Arome, on déduit que des phénomènes réduisant la visibilité sont prévus sur les côtes Atlantiques au nord d'Essaouira pendant les matinées et les nuits du 06 au 09/12/2018. Cette visibilité réduite a persisté même pendant l'après-midi du 06/12/2018. A partir de la matinée du 07 Décembre ces faibles valeurs de visibilité atteindront les côtes atlantiques centre et persisteront

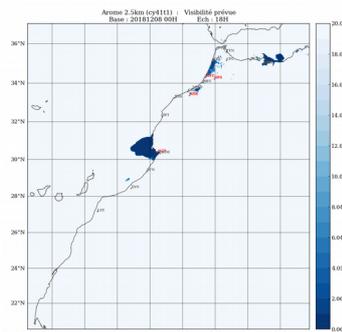
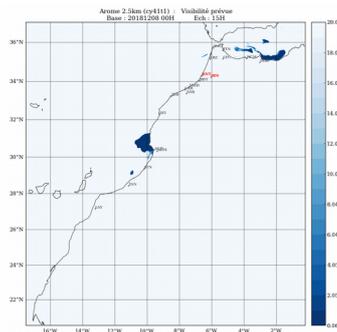
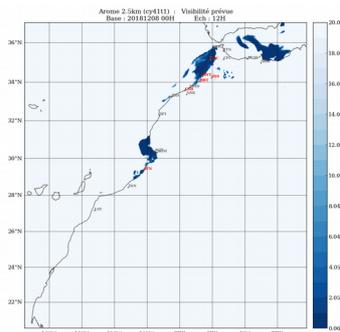
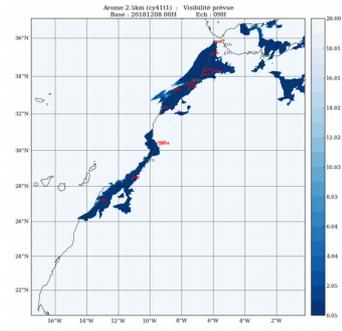
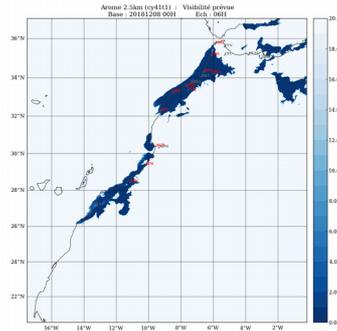
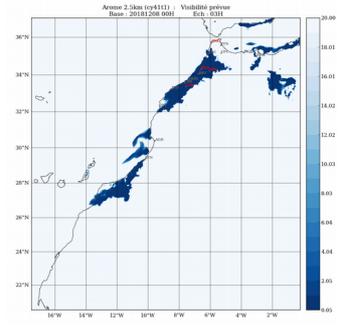
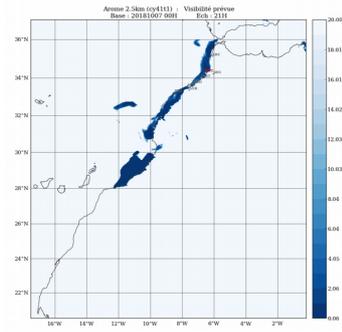
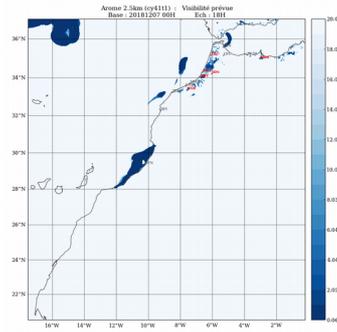
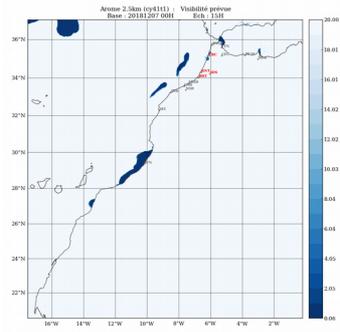
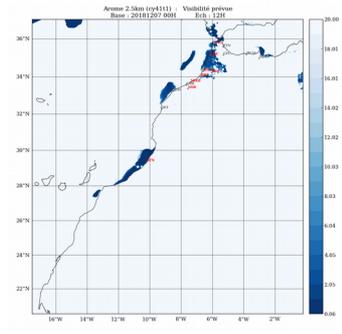
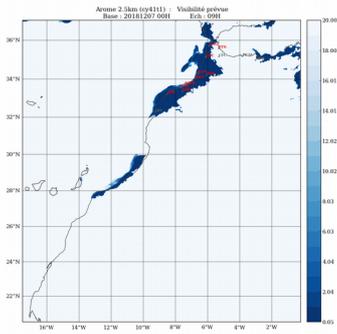
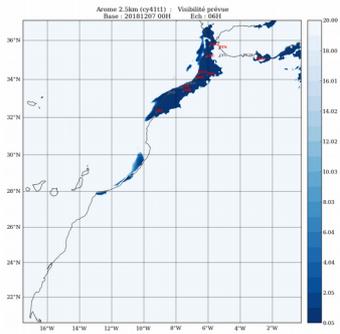
pendant l'après-midi et la nuit suivante sur la partie centre pour gagner les côtes atlantiques nord des provinces sahariennes pendant la matinée et la nuit suivante du 08/12/2018.

Pour les observations issues du réseau synoptique, on constate que pendant la matinée du 06/12/2018, des bancs de brume et de brouillard ont réduit la visibilité sur les côtes Atlantiques au nord d'Essaouira ainsi que sur le littoral méditerranéen. Pendant l'après-midi, on note la dissipation de cette bande brumeuse sur la majorité des stations à l'exception de la station de Kenitra qui signale toujours la persistance de ces formations sur la région. Pendant la soirée du 06/12/2018, ces bancs de brume et de brouillard ont été observés sur les côtes atlantiques au nord d'Essaouira et ont gagné les mêmes côtes centres pendant la matinée du 07/12/2018. Cette bande brumeuse a persisté sur les stations côtières située entre rabat et Larache pendant l'après-midi et la nuit suivante du 07 décembre. A partir de la matinée de la journée du 08/12/2018, d'autres formations brumeuses ont été signalés par d'autres stations pour gagner la majorité des stations côtières situées au Nord de Laayoune. Et puis vers l'après-midi, ces bancs de brume ont persisté sur la station de kenitra tandis qu'une nette amélioration de la visibilité a été signalé par les autres stations.

En conclusion, le champ de visibilité simulée a bien suivi l'évolution de cette situation caractérisée par des formations brumeuses observée sur un grand étendue spatio-temporelle. Cependant, on note que ce champ de visibilité a prévu la persistance des formations brumeuses près des côtes centre pendant l'après-midi du 07/12/2018 alors que ce sont les stations côtières nord qui ont enregistré des faibles valeurs de visibilité durant cette échéance.







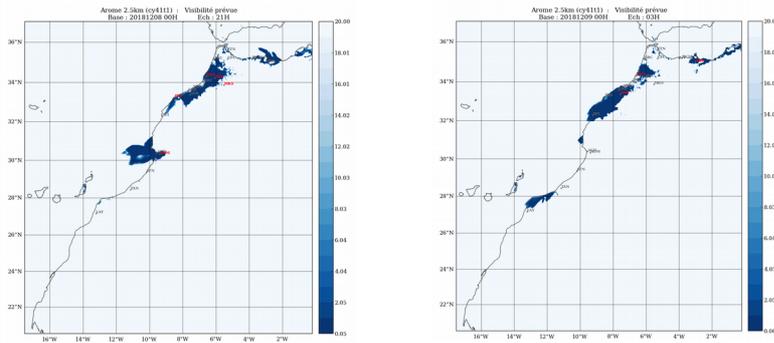


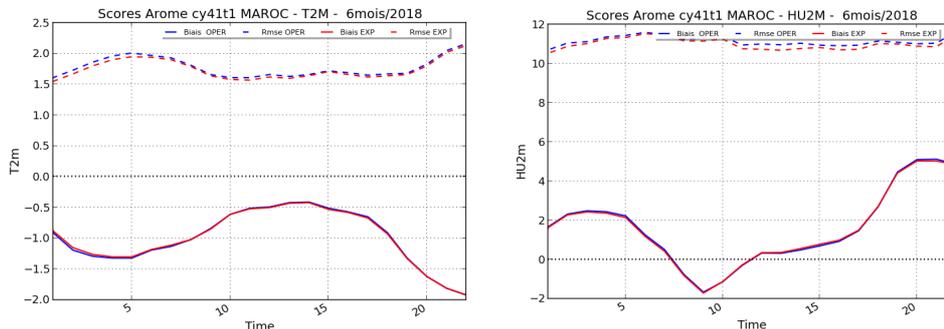
Fig10: Visibilité prévu au cours de la nuitée du 04/12/2018 et la matinée de la journée du 09/12/2018.

- Les stations synoptiques pointées en couleur rouge : Présence d'un événement réduisant la visibilité.
- Les stations pointées en couleur Gris : aucun événement observé.

1.3. Scores calculés pour les paramètres près de la surface

Dans cette partie sont présentés Le biais et l'erreur quadratique moyenne de la température à 2m, l'humidité à 2m, la force et direction du vent à 10m en fonction des échéances sur toutes la période d'étude. Par contre en annexes sont présentés les scores calculés à part pour chaque mois de la période: Février, Mars, Avril, Octobre, Novembre et Décembre.

Pour l'ensemble des champs sur la Fig11, la dispersion et le biais évoluent globalement de manière similaire de l'échéance 0h jusqu'à l'échéance 24h pour les deux simulations OPER et EXP. Pour la température à 2m on constate une légère amélioration de l'erreur quadratique moyenne en début de matinée, et aussi en début d'après-midi pour le champs humidité relative à 2m. Pour la force du vent à 10m les simulations EXP ont montré une légère amélioration de de l'erreur quadratique moyenne durant toutes les échéances. Cette amélioration constatée est plus importante en début et fin de la journée.



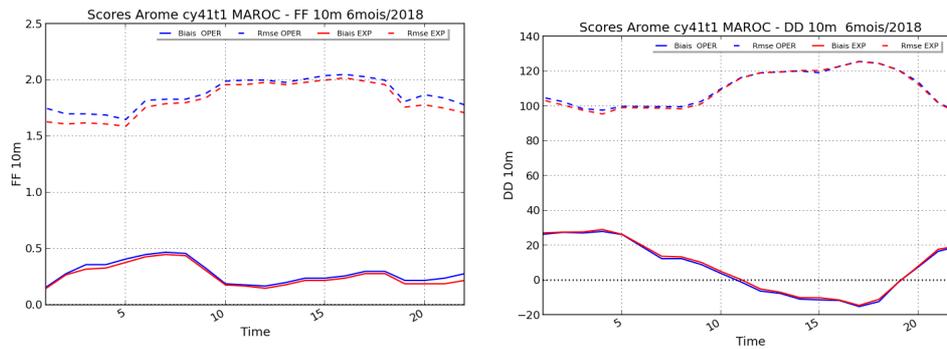


Fig 11: Evolution temporelle des scores (Biais et RMSE débiaisé) en fonction de l'échéance de prévision pour le paramètre température à 2m (En haut et à droite), l'humidité relative à 2m (en haut et à gauche), la force du vent à 10m (En bas et à droite) et la direction du vent à 10m (en bas et à gauche) calculée sur une période de 6mois de l'an 2018:

- En ligne bleu : Le biais du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,
- En ligne rouge : Le biais du modèle Arome 2.5km avec les modifications,
- En ligne bleu à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,
- En ligne rouge à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2.5km avec les modifications.

1.4. Scores calculés pour le nouveau champ visibilité prévue

Dans cette partie sont présentés Le biais et l'erreur quadratique moyenne calculés pour le champ visibilité simulé sur toutes la période d'étude par rapport aux observations horaires relatives des stations synoptiques de la région centre (Casablanca) et nord (Rabat).

Sur la Fig12, on remarque que pour l'ensemble des scores calculés, la prévision surestime la visibilité d'une moyenne de 7km. Reste à vérifier, car le champ visibilité observé utilisé reste approximatif, car il se base sur une estimation visuelle de l'observateur.

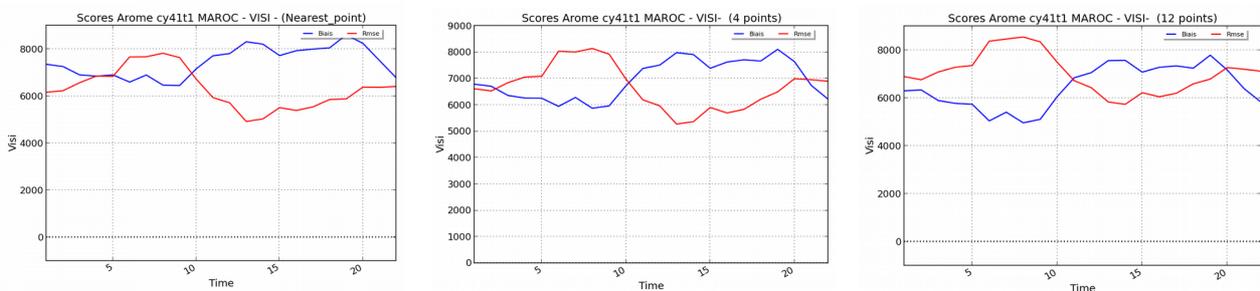


Fig 12: Evolution temporelle des scores Biais (en bleu) et RMSE débiaisé (en rouge) en fonction de l'échéance de prévision pour le paramètre visibilité simulé par rapport aux observations horaires relatives des stations synoptiques de la région centre (Casablanca) et nord (Rabat).

- Scores calculés au point de grille le plus proche (figure à droite)
- Scores calculés à partir de la valeur minimale des quatre plus proches voisins points de la grille dans chaque direction (figure au milieu).
- Scores calculés à partir de la valeur minimale des douzes plus proches voisins points de la grille dans chaque direction (figure à gauche).

Conclusion & perspectives :

Dans ce stage j'ai été appelé à évaluer la mise en place du nouveau diagnostic de visibilité et aussi de tester et valider l'interpolation à 4points dans le post-traitement FULLPOS pour le modèle Arome 2.5km.

Pour atteindre cet objectif, deux configurations du modèle Arome (adaptation dynamique) ont été réalisées sur le domaine du Maroc. Une configuration similaire à l'opérationnel et l'autre avec activation de l'interpolation à 4points et intégration du nouveau diagnostic de calcul de visibilité. Et pour procéder à la vérification de la qualité prédictive du modèle Arome vis-à-vis des changements effectués, des simulations numériques ont été lancées sur deux cas typiques de baisses de valeurs de visibilité enregistrées sur quelques stations du réseau synoptique. Ensuite une étude statistique est menée afin de généraliser les résultats obtenus et pouvoir évaluer la qualité prédictive de certains paramètres météorologiques près de la surface.

En général, pour l'étude des cas typique, la simulation du champs visibilité a reproduit grossièrement le cycle de vie des formations brumeuses observées. Le champ de visibilité prévues par le modèle Arome, corrèle d'une manière générale avec les observations horaires issues d'un ensemble de stations synoptiques du réseau national.

Pour l'étude statistique, les résultats des scores ont montré une légère amélioration sur les champs de température à 2m, de vent à 10m et d'humidité relative à 2m sur la période d'étude. Pour le champ visibilité, les valeurs simulées surestiment la visibilité observée d'une moyenne de 7km.

Comme perspectives à ce sujet, je propose de travailler sur le réglage et ajustement des coefficients utilisés dans la formule de visibilité pour trouver les valeurs qui seront plus adaptées au cy41t1 du modèle AROME pour le domaine du Maroc.

Annexes :

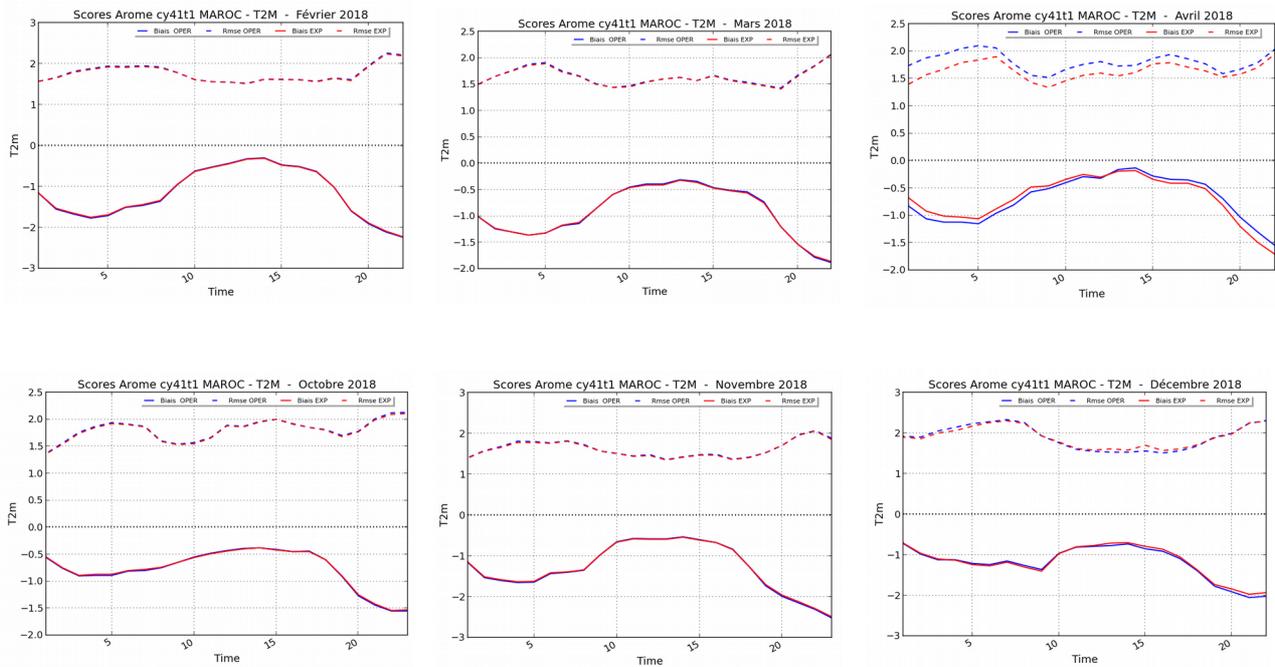


Fig 13: Evolution temporelle des scores (Biais et RMSE débiaisé) en fonction de l'échéance de prévision pour le paramètre température à 2m pour les mois Février, Mars, Avril, Octobre, Novembre et Décembre de l'année 2018 :

- En ligne bleu : Le biais du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,
- En ligne rouge : Le biais du modèle Arome 2.5km avec les modifications,
- En ligne bleu à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,
- En ligne rouge à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2.5km avec les modifications.

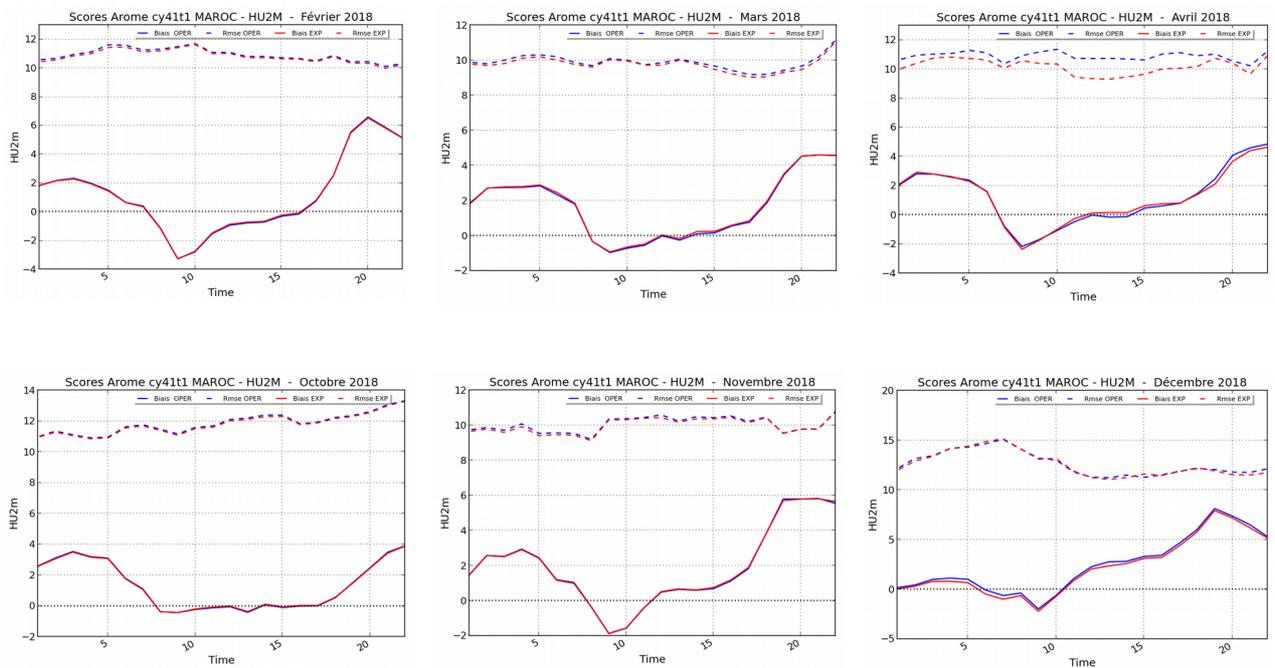


Fig 14: Evolution temporelle des scores (Biais et RMSE débiaisé) en fonction de l'échéance de prévision pour le paramètre humidité relative à 2m pour les mois Février, Mars, Avril, Octobre, Novembre et Décembre de l'année 2018 :

- En ligne bleu : Le biais du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,
- En ligne rouge : Le biais du modèle Arome 2.5km avec les modifications,
- En ligne bleu à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,

- En ligne rouge à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2.5km avec les modifications.

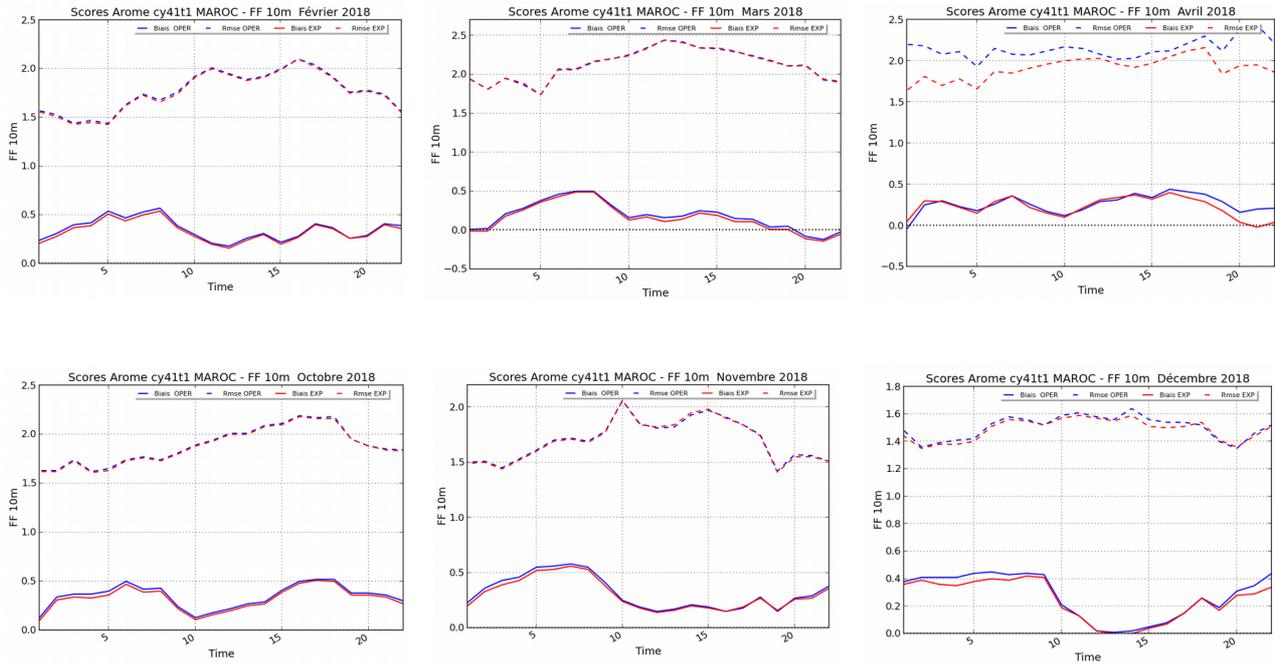
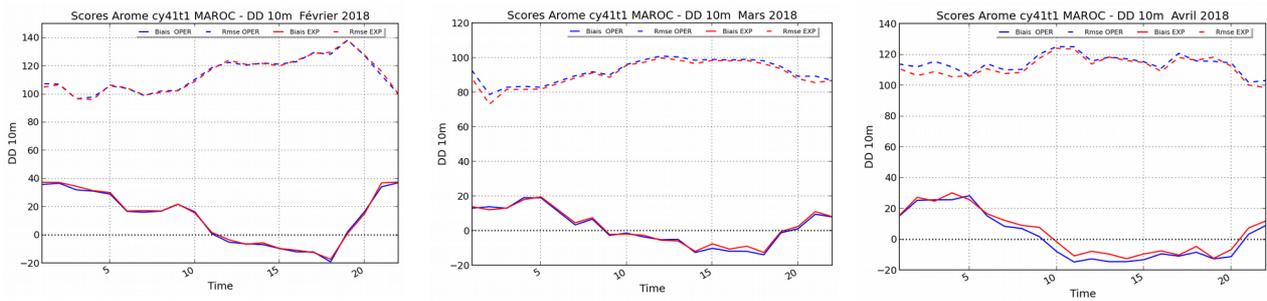


Fig 15: Evolution temporelle des scores (Biais et RMSE débiaisé) en fonction de l'échéance de prévision pour le paramètre direction du vent à 10m pour les mois Février, Mars, Avril, Octobre, Novembre et Décembre de l'année 2018 :

- En ligne bleu : Le biais du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,
- En ligne rouge : Le biais du modèle Arome 2.5km avec les modifications,
- En ligne bleu à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,
- En ligne rouge à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2.5km avec les modifications.



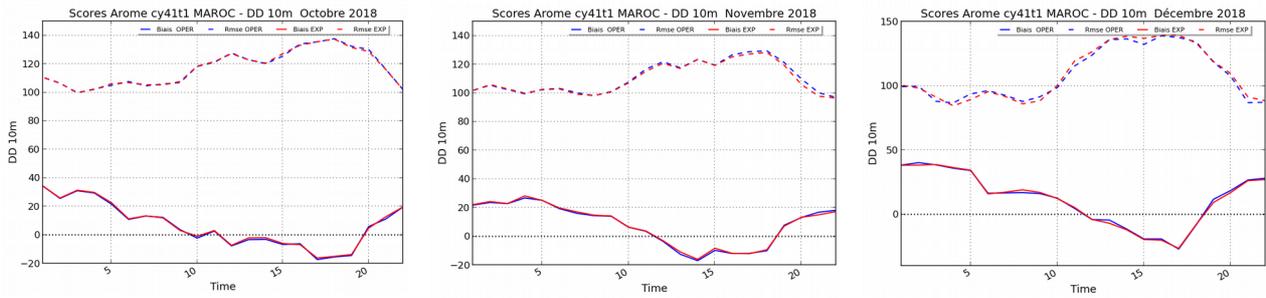


Fig 16: Evolution temporelle des scores (Biais et RMSE débiaisé) en fonction de l'échéance de prévision pour le paramètre direction du vent à 10m pour les mois Février, Mars, Avril, Octobre, Novembre et Décembre de l'année 2018 :

- En ligne bleu : Le biais du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,
- En ligne rouge : Le biais du modèle Arome 2,5km avec les modifications,
- En ligne bleu à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2,5 km en opérationnel,
- En ligne rouge à tirets : Le RMSE débiaisé du modèle Arome 2,5km avec les modifications.

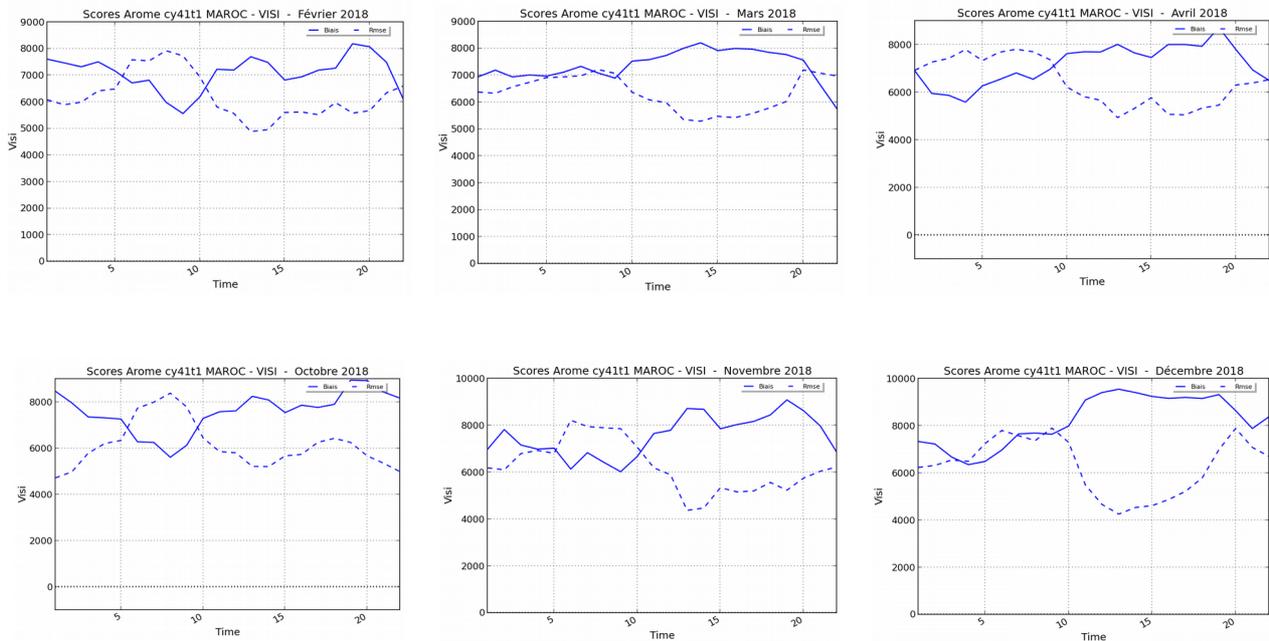


Fig 17: Evolution temporelle des scores (Biais et RMSE débiaisé) en fonction de l'échéance de prévision pour le nouveau paramètre de visibilité prévue pour les mois Février, Mars, Avril, Octobre, Novembre et Décembre de l'année 2018 :

- En ligne bleu : Le biais,
- En ligne bleu à tirets : Le RMSE débiaisé.