



Apport du système AROME-France pour une exploitation de tirs de missiles

par

Laurent CAZENAVE

RAPPORT DE STAGE DE MASTER 2 RECHERCHE
OCEAN ATMOSPHERE ET SURFACE CONTINENTALE

Université Toulouse III Paul Sabatier

TOULOUSE, LE 21 NOVEMBRE 2012

Pierre Brousseau *Responsable de stage*

**METEO-FRANCE
CNRM-GAME/GMAP
TOULOUSE, FRANCE
42, AVENUE G. CORIOLIS - 31 057 TOULOUSE CEDEX 1**

Remerciements

Ce stage de fin de cycle vient clôturer deux années de master à l'Université Paul Sabatier et à l'École Nationale de Météorologie. Je souhaite remercier ici toutes les personnes qui m'ont permises de mener à bien ce projet.

Avant tout, je tiens à présenter toute ma gratitude à mon responsable de stage, Pierre Brousseau, qui a su simultanément terminer son doctorat de façon brillante et assurer mon encadrement en se rendant disponible. Merci aussi à tous ceux qui m'ont aidé au quotidien et notamment à Hubert Varella et Benjamin Ménétrier, mes chaleureux collègues de bureau.

Ce stage n'aurait pas été possible sans l'écoute et les conseils avisés de Claire Doubremelle, l'aide de Joël Poitevin pour m'avoir ouvert les portes des différents laboratoires susceptibles de me proposer un projet. Je suis très reconnaissant pour l'engagement et la disponibilité de Pierre Huguet (DGA) et Gaëlle Casagrande (DGA).

La cohérence professionnelle de ce projet a pu se concrétiser grâce au dynamisme de Florence Rabier. Je lui adresse mes vifs remerciements pour m'avoir soumis cette étude. Je remercie mes collègues de Bruz pour la préparation et le suivi du projet et plus particulièrement Hugues Paumard et Mathieu Voisine.

Mes remerciements s'adressent également à Olivier Baour (DGA/DRH) pour son soutien continu en pleine tourmente de restructuration du ministère. Merci aussi à Thierry Marot et Olivier Lecointe qui m'auront permis de terminer ce cycle de Master 2.

Je tiens aussi à nommer François Vandenberghe (NCAR), Michel Aïdonidis (Météo-France) et Armand Albergel (ARIA Technologies) pour nos échanges professionnels et leur soutien moral.

J'adresse aussi mes plus sincères remerciements à mon ami Lionel Rage qui a toujours été moralement présent pendant ces deux années et a su me solliciter pendant le stage pour des besoins de données météorologiques de « système d'arme ».

Je ne pourrai oublier tous les membres de l'équipe GMAP que j'ai côtoyés durant ces trois mois. Merci aux membres de l'équipe de beach-volley, Stéphanie, Thibault, Fabrice, Yann, Hubert et Benjamin et à Anaïs et tous les doctorants rencontrés le midi.

Je ne saurai oublier mes collègues étudiants fréquentés pendant ces deux années. Avec une mention spéciale pour Delphine Bossy et Jérémie Guerbette et pour notre petite contribution quotidienne environnementale de deux-roues ! Un grand merci à Lisa Marchand et Romain Bergougnoux pour tous les moments chaleureux partagés, sans lesquels le stage n'aurait pas été aussi plaisant. Et à Florent Garnier pour nos divers échanges et parties disputées de « bad ».

Je ne saurai terminer sans une grande reconnaissance et une pensée affectueuse à ma famille et plus particulièrement à ma femme Christine et mes deux filles Marie et Alice qui, malgré la distance, m'ont apporté un soutien indéfectible sans lequel cette expérience de reprise d'études n'aurait pas été possible.

Résumé

Dans le cadre des programmes d'armement, les industriels de la Défense et la Direction Générale de l'Armement (DGA) simulent les capacités ou performances des systèmes d'arme à base de missile par l'intermédiaire de modèles dynamique de référence.

Ces modèles nécessitent d'être alimentés par des données atmosphériques proches de la réalité afin de ne pas dégrader les résultats de sortie par manque de représentativité. Les tirs de missile en cours de développement servent entre autres à recalibrer le modèle dynamique pour tendre à l'issue de plusieurs versions vers une configuration mature validant l'ensemble des chaînes fonctionnelles du système d'arme.

Dans cette phase expérimentale, la DGA exploite les mesures acquises pendant le tir du missile, effectué depuis les centres d'essai des sites de Biscarrosse (Landes) et du Levant (Var). Il est fourni au minimum les données d'observations le jour du tir. Ces données d'observations permettent d'évaluer l'état de l'atmosphère sur la trajectoire et proviennent de radiosondages effectués juste avant et après le tir. Ces observations sont complétées par des mesures d'avion suiveur assurant l'acquisition des paramètres atmosphériques au plus près du missile et éventuellement la validation des observations de radiosondage.

La démarche actuelle consiste à extraire les paramètres souhaités à partir de profils de radiosondages. Le profil de radiosondage ne donnant qu'une information très localisée, il est opportun d'examiner le gain que pourrait apporter un modèle de mésoéchelle tel que celui développé au sein de Météo-France. Le modèle non-hydrostatique AROME-France, opérationnel depuis fin 2008, avec une résolution spatiale de 2,5 km permet d'aller dans ce sens.

La méthodologie adoptée pendant ce stage a permis, à l'aide de plusieurs configurations, de montrer les qualités successives des simulations opérationnelle, de réanalyse et d'assimilation des radiosondages DGA. En faisant usage des outils du CNRM/GMAP comme la réduction de variance d'erreur d'estimation, il a été montré le bénéfice apporté par les radiosondages des tirs. Par ailleurs, les mesures avion ont servi à tester l'évolution qualitative des différentes configurations de simulations, montrant le gain apporté par celles assimilant les radiosondages DGA effectués lors des tirs.

La chaîne opérationnelle AROME-France complétée des mesures acquises par la DGA assurent un cadre cohérent satisfaisant pour une utilisation future dans l'implémentation des modèles dynamiques relatifs aux futurs systèmes d'arme.

Table des matières

1	Introduction et contexte scientifique	1
2	La Prévision Numérique du Temps	3
2.1	Le modèle atmosphérique AROME-France	5
2.1.1	Domaine et résolution	5
2.1.2	Dynamique non-hydrostatique	6
2.1.3	Paramétrisations physiques	7
2.2	Le système d'assimilation de données AROME-France	7
2.2.1	Généralités sur l'assimilation de données	7
2.2.2	Caractéristiques du système de données AROME-France	10
2.2.3	Diagnostics de l'impact des observations sur les analyses	13
3	Méthodologie	14
3.1	Déroulement des tirs aux centres d'essai et observations météorologiques DGA	14
3.1.1	Radiosondages « DGA »	15
3.1.2	Mesures avion « DGA »	16
3.2	Simulations AROME-France	16
3.3	Evaluation des performances de simulations AROME-France	19
3.3.1	Intérêt des champs 2D par rapport aux RS DGA	20
3.3.2	Comparaison des configurations opérationnelle et de réanalyse	20
3.3.3	Qualité des observations de radiosondages	20
3.3.4	Impact des RS DGA dans le système d'assimilation	21
3.3.5	Impact des RS DGA sur la qualité des prévisions	21
3.4	Apport des simulations AROME-France pour la DGA	22
3.4.1	Modèle Dynamique de Référence MdcN	22
3.4.2	Données d'entrée pour le MDR	22
4	Résultats et discussion	23
4.1	Apport des champs 2D par rapport aux RS DGA	23
4.2	Comparaison des expériences XP_OPER et XP_REA	23
4.3	Contrôle de la qualité des observations RS DGA	24
4.4	Impact des RS supplémentaires dans le système d'assimilation	24
4.4.1	Réduction de variance	25
4.4.2	Diagnostics entre les expériences XP_REA, XP_C3 et XP_C1	27
4.5	Impact des radiosondages supplémentaires sur la qualité des prévisions	29
4.5.1	Comparaison objective	29
4.5.2	Comparaison subjective	30
5	Conclusion - Perspectives	33

Table des figures

1	Discrétisation d'un maillage de modèle de PNT.	3
2	Représentation de l'orographie pour le domaine AROME-France (graphe de gauche) et comparaison de la résolution verticale des niveaux modèle en fonction de l'altitude pour ARPEGE, ALADIN et AROME-France (graphe de droite)	6
3	Principes de l'approche variationnelle avec contribution des J^b et J^o sur l'état estimé pour le 3D-Var et le 4D-Var.	10
4	Schéma logique de la chaîne de prévision opérationnelle d'AROME-France	11
5	Pointage des observations assimilées à 12 UTC le 8 juin 2011 dans le système d'assimilation AROME-France : observations des réseaux de mesure SYNOP, RADOME, par bateaux et par radiosondage (graphe de gauche) , observations par avion (graphe de droite)	12
6	Pointage des observations assimilées à 12 UTC le 8 juin 2011 dans le système d'assimilation AROME-France pour la zone de l'île du Levant : observations des réseaux de mesure de surface (cyan), avion (rouge), vent SATOB (orange), bouée (violet), radiosondage (bleu marine), sondeur (olive) et radar (bleu ciel).	15
7	Pour Biscarrosse, trajectoire du missile et radiosondages DGA (Ballons 1 et 2) pour la journée du 28 mai 2010.	16
8	Schéma temporel des observations provenant du centre d'essai de Biscarrosse (a) et de l'île du Levant (b) dans la chaîne d'expérimentation AROME-France mise en oeuvre et de leur prise en compte dans les analyses en fonction du cyclage	18
9	Profils verticaux des contributions de chaque type d'observation à $Tr(\mathbf{KHB})$ (plages de couleur) sur l'analyse du 8 juin 2011 12h00 pour la zone comprenant le site du Levant ; pour les champs de température sans assimilation de radiosondage supplémentaire (a) et avec (b) et pour le champ de vent sans assimilation supplémentaire de RS DGA (c) et avec (d).	25
10	Profils verticaux des valeurs RMS et de biais des écarts (obs-ébauche) et (obs-analyse) pour les observations de radiosondage pour les expériences XP_REA (ref en rouge) et XP_C3 (exp en noir) sur le domaine entier d'AROME-France pour la date du 28 mai 2010 à Biscarrosse.	27
11	Profils verticaux des valeurs RMS et de biais des écarts (obs-ébauche) et (obs-analyse) pour les observations de radiosondage pour les expériences XP_C3 (ref en rouge) et XP_C1 (exp en noir) sur le domaine entier d'AROME-France pour la date du 8 juin 2011 au Levant.	28
12	Profils verticaux des scores de prévision (Biais (a) et RMS (b)) pour le champ de température (AIREP-T) et de module du vent (AIREP-FF) ; issus de la vérification des expériences XP_REA, XP_C3 et XP_C1 par rapport aux observations avion.	29
13	Analyse Météo-France pour le 8 juin 2011 12h00 UTC du géopotential à 500 hPa.	31

14	Réfectivités radar simulées (a et b) et observées (c et d) pour une échéance à 14h00 et à 16h00 (attention à la différence d'échelle entre images simulées et d'observations).	32
----	--	----

1 Introduction et contexte scientifique

Le concept de la prise en compte des conditions météorologiques dans les opérations militaires fait aujourd'hui partie du déroulement d'un programme d'armement. Il n'en a pas toujours été ainsi et de nombreux exemples historiques abondent dans ce domaine. Le 14 novembre 1854, lors de la guerre de Crimée, une tempête très violente coule une partie de la flotte alliée (française, anglaise et turque) qui assiège Sébastopol. Urbain Le Verrier, directeur de l'Observatoire de Paris, se saisit de cet évènement pour montrer que, grâce à l'invention récente du télégraphe, il aurait été possible de suivre cette dépression qui a traversé l'Europe et donc de s'en protéger. En 1860, le vice-amiral Fitzroy utilise le télégraphe pour tracer les premières cartes synoptiques sur la base des données météorologiques collectées de toute l'Angleterre et alimente même, dès 1861, via des bulletins d'avertissement la Marine impériale française ([9]). Ce type de service se mettra en place à l'Observatoire de Paris en 1863 et il faudra toutefois attendre 1916 pour voir la création d'un service météorologique militaire français.

De nos jours, les armées utilisent de façon opérationnelle l'information météorologique. Celle-ci doit couvrir diverses échéances ; la plus longue, sur la base des prévisions saisonnières ou des climatologies, est destinée à la planification des opérations militaires ; une intermédiaire allant du mois jusqu'à 2 jours intéressent par exemple la préparation de mission des missiles et enfin la très courte échéance, relevant de la prévision immédiate, va servir à la conduite ou la mise en oeuvre de systèmes d'armes.

En amont, la Direction Générale de l'Armement (DGA), garantissant la réponse des industriels aux besoins opérationnels des Etats-Majors des Armées, va utiliser l'information météorologique essentiellement à des fins de spécification de dimensionnement des futurs systèmes d'armes et pour des notions de disponibilité en terme de performances. Certains programmes vont contribuer à l'élaboration et la diffusion de cette information météorologique (ex. stations déployables des Armées : SMD (Air), PROMETHEE (Terre), CALYPSO (Marine)) alors que d'autres en seront les clients (ex. missiles SCALP, MDCN).

Le département « Cycle de vie opérationnel », du centre de DGA Maîtrise de l'Information (DGA-MI) à Bruz (Ille-et-Vilaine) auquel j'appartiens, intervient à la fois sur ces domaines de dimensionnement des systèmes d'armes et de façon plus récente pour les études de calculs de performances (portée, précision, pénétration).

Ce stage se situe dans ce deuxième périmètre dans le cadre spécifique de l'exploitation de deux tirs de développement du missile de croisière naval (MdCN). Le MdCN, de type « mer-sol », est conçu pour la frappe dans la profondeur à partir de frégate multi-missions ou de sous-marins dont les livraisons respectives à la Marine française sont prévues en 2014 et 2017 par le maître d'oeuvre industriel MBDA-F. Dans le contexte de besoins des armées, des tirs de missiles sont donc effectués depuis les centres d'essai de métropole. Ils servent à valider la conception des systèmes d'arme et à s'assurer qu'ils pourront remplir leur mission avant la mise en service dans les forces. Les tirs expérimentaux sont exploités par DGA-MI, en parallèle de l'industriel, pour quantifier par l'intermédiaire de simulations ou modèle dynamique de référence industrielle (MDR) les performances des différentes chaînes fonctionnelles

du système d'arme. Les paramètres mesurés pendant le tir et leurs exploitations via le MDR permettent de recalibrer le modèle pour conduire au travers de plusieurs étapes à un MDR de qualification répondant à la tenue des exigences des forces. Pour rejouer les tirs par simulations avec le MDR et tester par exemple la chaîne fonctionnelle « Aérodynamique », DGA MI utilise des mesures météorologiques basées sur des observations atmosphériques acquises pendant le tir comme les radiosondages. Ces données d'observations permettent d'évaluer l'état de l'atmosphère sur la trajectoire juste avant et après le tir expérimental et sont utilisées pour renseigner les champs atmosphériques du MDR. Ces observations sont complétées par des mesures d'avion suiveur assurant l'acquisition des paramètres atmosphériques au plus près du missile.

L'objectif de ce stage est d'estimer le gain que pourrait apporter l'utilisation d'un modèle de prévision numérique de mésoéchelle maillé 3D tel qu'AROME-France (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à MésoEchelle), par rapport à la démarche actuelle d'exploitation d'un champ de ballon-sonde 1D. La proposition de stage au sein de GMAP (Groupe Modélisation et Assimilation pour la Prévision) du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo-France, lieu où le modèle a été développé, constitue une réelle opportunité.

Le chapitre 2 de ce rapport décrit de façon synthétique la prévision numérique du temps en abordant une présentation du modèle AROME-France et son système d'assimilation de données.

S'appuyant sur ces notions, le chapitre 3 vient dégager la démarche méthodologique pour mener les différentes évaluations du modèle de prévision AROME-France selon des configurations graduelles en données d'entrée. Dans un premier temps, il s'agit de l'intérêt d'utiliser les sorties de modèle de mésoéchelle plutôt qu'un profil vertical. Puis d'examiner le bénéfice apporté par les prévisions AROME-France avec la prise en compte de toutes les observations disponibles (version de réanalyse) en regard de la version opérationnelle. Pour finir par l'évaluation des prévisions ayant assimilé des observations supplémentaires. En dernier lieu, nous nous focaliserons sur l'impact de l'ajout de ces assimilations d'observation des radiosondes DGA sur les plans quantitatifs et qualitatifs. Au delà du stage, l'objectif recherché devrait conduire à une étude d'impact des données d'entrée atmosphérique du MDR du Missile de Croisière Naval (MdCN).

Le chapitre 4 présente les divers résultats issus des simulations du modèle AROME-France en montrant l'importance des observations assimilées. Afin de prolonger cette évaluation, une comparaison subjective est menée pour la situation particulière de la journée de tir du 8 juin 2011 réalisé à l'île du Levant.

Enfin, le chapitre 5 fait une synthèse des enseignements tirés de ce stage en guise de conclusion et apporte des perspectives d'évolution pour les simulations de performances des systèmes d'arme avec une utilisation des modèles numériques de mésoéchelle tel qu'AROME-France.

2 La Prévision Numérique du Temps

La prévision numérique du temps (PNT), discipline datant de la moitié du XX^e siècle ([3]), a pour principe de simuler l'état de l'atmosphère plus vite qu'il n'évolue dans la réalité. Cette simulation repose sur des lois physiques basées sur la mécanique des fluides, les processus de changements d'état de l'eau, de turbulence et d'interactions de l'atmosphère avec la surface et aussi l'espace. A partir d'hypothèses cohérentes formulées mathématiquement, il s'agit de décrire les différentes interactions d'une particule fluide pendant un temps infinitésimal. Ceci conduit à l'obtention d'un système d'équations différentielles non-linéaires faisant apparaître des termes inconnus liés à la méconnaissance de l'état initial du système. Trouver des solutions revient à déterminer les valeurs futures de l'état de l'atmosphère en partant de valeurs initiales connues constituées par les observations météorologiques et aussi à connaître les lois d'évolution de cet état.

Cette démarche en deux temps correspond au principe émis par Vilhem Bjerknes en 1904, confronté cependant à l'impossibilité de pouvoir résoudre analytiquement les équations différentielles de l'atmosphère. Lewis Fry Richardson travailla sur une idée novatrice proposant des méthodes numériques pour résoudre ces équations (Richardson, 1922). Il resta, entre autres limitations, face au problème de ne pouvoir calculer plus vite que l'atmosphère n'évolue... Cependant, cette piste préconisée par Richardson constitua la base du fondement de la PNT car l'analyse numérique, utilisant des méthodes de discrétisation (pour l'espace, voir figure 1), permis la réalisation d'un algorithme assurant le calcul de solutions approchées de l'état à venir. La puissance des calculateurs engendra quelques décennies plus tard (Charney et al., 1950) l'élaboration des deux premières prévisions opérationnelles historiques sur la base des algorithmes semblables au schéma de Richardson et ceux de ses successeurs (Courant et al., 1928), (Rossby et al., 1939) et (Charney, 1948) ([5]).

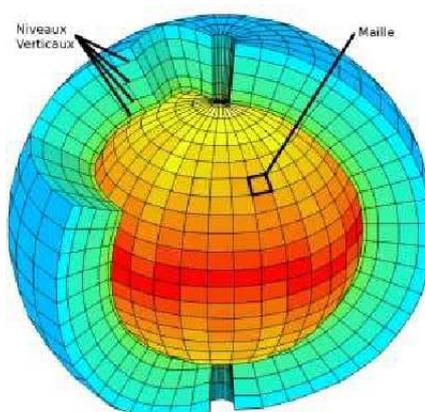


FIGURE 1 – Discrétisation d'un maillage de modèle de PNT.

Depuis ces prévisions de 1950, les progrès scientifiques auront été révolutionnaires dans de nombreux domaines concourant à la PNT. Ainsi en 2000, coexistent une douzaine de modèles à l'échelle synoptique sur tout le globe et un système de prévision comme IFS (Integrated Forecast System) du CEPMMT (Centre Européen

de Prévision Météorologique à Moyen Terme) permet une diffusion des prévisions atmosphériques jusqu'à une échéance de 10 jours pour une résolution horizontale de 25 km et comportant 91 niveaux verticaux du sol jusqu'au delà de 50 km d'altitude.

Parallèlement, les modèles de recherche tels que MM5 (5th generation Mesoscale Model, PSU-NCAR), WRF (Weather Research and Forecasting model, partenariat américain NCEP, NCAR et universités) ou Méso-NH (partenariat entre Météo-France et CNRS/Laboratoire d'Aérodynamique), évoluaient à cette période avec une résolution horizontale du km et démontraient l'amélioration des prévisions opérationnelles pour des situations particulières (ex. en France, les inondations - événements cévenols - frappant le sud-est) ([1]).

Les modèles opérationnels au maillage plus fin voient le jour en 2007 en Angleterre avec le U.K. Unified Model de résolution 4 km et en Allemagne avec COSMO (CONsortium for small Scale MOdelling) de résolution 2,8 km.

AROME-France devient le modèle français opérationnel en décembre 2008. Il vient ainsi compléter la panoplie des modèles de PNT, en termes de couverture de superficie et de résolutions spatio-temporelle, auxquels ont recours quotidiennement les prévisionnistes de Météo-France :

- pour la moyenne échéance (de 4 à 10 jours) et une résolution de 25 km : modèle global IFS du CEPMMT,
- pour la courte échéance (1 à 4 jours) et une résolution de 10 km au dessus de la France : modèle global ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle),
- pour la très courte échéance (30 heures) et une résolution de 2,5 km : modèle régional AROME-France.

Avec cet ensemble de modèles, AROME-France apporte à Météo-France une capacité supplémentaire pour prévoir le plus tôt possible le maximum de phénomènes météorologiques au dessus de la France et pour les localiser avec une meilleure précision.

Beaucoup d'avancées ont eu lieu dans les différents domaines concourant à la PNT. La détermination de l'état initial en est un car la qualité de ces conditions initiales impacte fortement la qualité des prévisions. Ces conditions initiales sont à la fois déterminées par l'ensemble des observations disponibles et surtout par leurs « transformations » dans l'espace discrétisé du modèle de PNT. Si le réseau d'observations constitue un élément essentiel, il n'en demeure pas moins une source d'informations très hétérogènes. L'assimilation de données est l'étape complémentaire venant garantir la transformation cohérente de l'ensemble des observations pour construire l'état initial de l'atmosphère (appelé analyse). L'assimilation de données relève donc d'un processus mathématique par lequel l'évolution d'un modèle numérique est contrainte à rester proche d'une réalité partiellement observée. On parle ainsi d'analyse objective associée à des notions de cycles d'assimilation (enchaînement de plusieurs analyses objectives en opérationnel) et de temps de coupure (en anglais Cut-Off¹ qui détermine la quantité d'observations prises en compte dans la fenêtre d'as-

1. Durée entre l'heure du réseau et celle de l'extraction des observations correspondantes

similation). L'activité du groupe GMAP porte, entre autres, sur le développement des techniques d'assimilation variationnelle, appelées 3D-Var et 4D-Var, ainsi qu'aux réglages de ses composants les plus importants, dont la matrice des covariances spatiales d'erreurs de la prévision qui sert d'ébauche à l'analyse.

Comme tout modèle de PNT, le modèle numérique AROME-France est constitué de :

- un modèle de prévision constitué de deux parties :
 - la dynamique permettant de calculer les processus de l'évolution de l'atmosphère, résolus explicitement par ses équations aux échelles du modèle,
 - la physique (ou paramétrisations physiques), constituée par un ensemble de modèles simplifiés pour la prise en compte de certains processus non négligeables et ne pouvant être décrits explicitement par la dynamique.
- un système d'assimilation de données.

Ces différentes parties sont détaillées ci-après et de façon un plus prononcée pour le système d'assimilation de données qui représente une partie essentielle de l'activité de GMAP (CNRM).

2.1 Le modèle atmosphérique AROME-France

Débuté en 2002, le projet AROME est un concept original développé grâce à d'étroites collaborations nationales et internationales. Mêlant des outils opérationnels et de recherche déjà existants, le dernier né des modèles de PNT exploités opérationnellement par Météo-France permet d'améliorer la prévision des phénomènes convectifs dangereux (orages, crues soudaines, rafales, précipitations intenses), des événements locaux et de la météorologie de basses couches. Ainsi, AROME-France fournit des représentations réalistes des nuages en restituant les mouvements verticaux violents à petite échelle associés au développement des nuages d'orages (cumulonimbus). Grâce à une modélisation du cycle de vie des systèmes précipitants dans le domaine de sa maille, il s'affranchit des hypothèses statistiques et physiques sur la répartition spatiale des nuages.

2.1.1 Domaine et résolution

AROME-France, modèle à aire limitée, intervient sur un domaine en projection Lambert constitué d'une grille régulière de pas de résolution de 2,5 km centré sur la France (46,4°N - 2,2°E). C'est une grille de 720 par 750 points physiques (1875 km par 1800 km) respectivement est-ouest et nord-sud. Une zone périphérique de 12 points est présente pour l'interfaçage avec le modèle coupleur extérieur. Le domaine est divisé verticalement en 60 niveaux allant de 10 m du sol, dont 28 niveaux jusqu'à 3000 m, jusqu'à 1 hPa. Les niveaux, donnés en coordonnée η de pression hybride de suivi de terrain, sont plus resserrés que ceux d'ARPEGE dans la troposphère et avec une résolution plus lâche dans la stratosphère (voir figure 2).

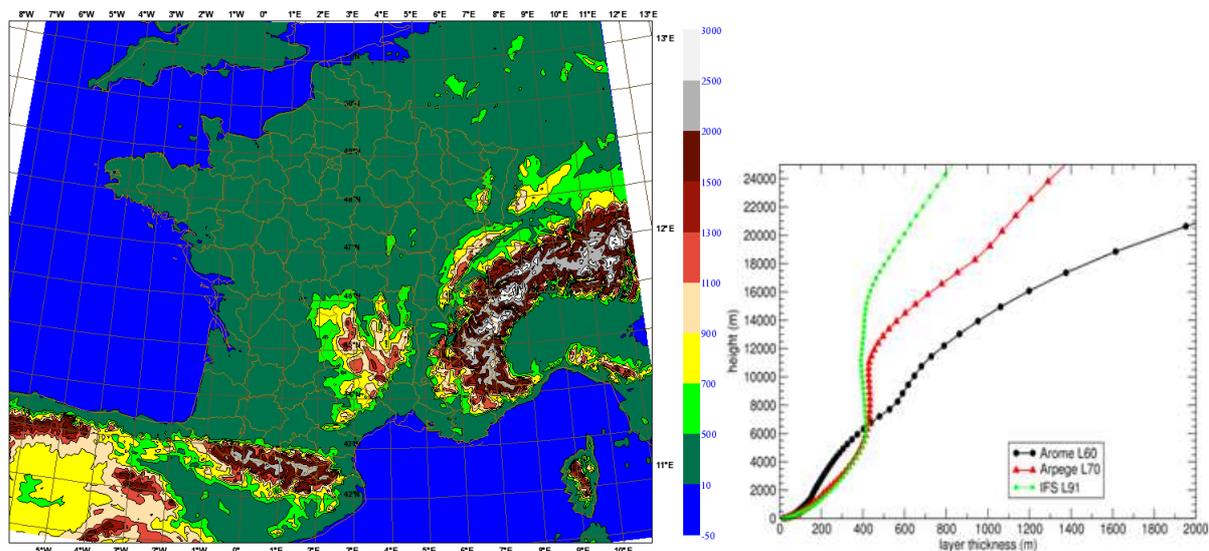


FIGURE 2 – Représentation de l’orographie pour le domaine AROME-France (graphe de gauche) et comparaison de la résolution verticale des niveaux modèle en fonction de l’altitude pour ARPEGE, ALADIN et AROME-France (graphe de droite)

2.1.2 Dynamique non-hydrostatique

Contrairement aux modèles ARPEGE et ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational)² qui utilisent l’approximation hydrostatique, AROME-France se base sur les équations non-hydrostatiques dont le noyau dynamique est la version non-hydrostatique de celui d’ALADIN.

Les équations du modèle AROME-France sont basées sur les éléments suivants :

- la loi des gaz parfaits,
- la conservation de la masse pour toutes les « quantités » (air sec, vapeur d’eau),
- la conservation du moment cinétique,
- la conservation de l’énergie (1er principe de la thermodynamique)
- la prise en compte de l’humidité dans la contribution aux constantes des gaz (R_v) et de chaleur massique (C_v)

La dynamique est traité par méthode de numérisation spectrale (espace spectral) afin que le calcul numérique des dérivées spatiales dans le modèle numérique soit plus simple et exact. L’intégration numérique comporte un schéma temporel semi-lagrangien (numérisation directe de la dérivée lagrangienne d’un champ ($\frac{d}{dt}$) au lieu de calculer sa tendance en un point ($\frac{\partial}{\partial t}$) et un schéma semi-implicite (les termes responsables de l’advection par le vent sont traités explicitement alors que les termes responsables de la propagation des ondes rapides le sont de façon implicite). Les variables sont décomposées en variables pronostiques, prédites par des équations du modèle, et en variables diagnostiques, diagnostiquées à la fin du pas de temps à

2. ALADIN : développé par la communauté du même nom au sein du logiciel IFS et ARPEGE, lui-même le fruit d’une collaboration entre Météo-France et le CEPMMT

partir des variables pronostiques. AROME-France dispose de :

- 12 variables pronostiques 3D (2 composantes du vent, température, humidité spécifique, énergie cinétique turbulente, 5 espèces d'eau condensée dont 3 précipitantes (pluie, neige et graupel) et 2 non précipitantes (eau liquide et glace nuageuses) et la pression)
- une large variété de variables 2D (comme la pression et la température de surface, la hauteur de neige, les flux de surface en précipitations (pluie, neige, graupel et leur accumulation pendant la prévision), les flux radiatifs au sommet de l'atmosphère, ...)
- des informations physiographiques (masque terrain/océans, altitude de surface, albédo de surface et émissivité, climatologies d'aérosols et de teneur en ozone)

Les conditions latérales proviennent du modèle coupleur global ARPEGE avec un forçage à chaque pas de temps du modèle rafraîchi toutes les heures. Le modèle est post-traité sur une grille régulière en longitude et latitude d'une résolution horizontale de $0,0025^\circ$ par pas de 1 h jusqu'à l'échéance 30 h.

2.1.3 Paramétrisations physiques

Les paramétrisations physiques consistent à prendre en compte des processus physiques, plus ou moins complexes, intervenant en tant que termes sources ou puits et qui doivent être introduits dans les équations pour reproduire de façon réaliste l'évolution de l'atmosphère. Ces processus agissant à des échelles inférieures à la taille de la maille (échelles dites sous-maille) sont paramétrisés pour représenter de façon moyenne l'effet des processus physiques sur les variables du modèle.

Les paramétrisations physiques sont principalement issues du modèle de recherche non-hydrostatique Méso-NH développé conjointement par Météo-France et le Laboratoire d'Aérodynamique du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) : microphysique (ICE3), turbulence, convection peu profonde (EDKF), interaction avec la surface (schéma SURFEX). Le modèle de transfert radiatif (RRTM) est celui du CEPMMT.

2.2 Le système d'assimilation de données AROME-France

2.2.1 Généralités sur l'assimilation de données

Une analyse est la production d'une image aussi fidèle que possible de l'état réel de l'atmosphère à un instant donné, représenté dans un modèle dans un espace discrétisé. Le résultat peut être utilisé comme condition initiale d'une prévision. L'analyse se doit donc d'être la plus précise possible. Pour cela, un schéma d'assimilation va utiliser différentes sources d'information. La première est constituée des mesures effectuées dans l'atmosphère réelle à partir de différents instruments. Ces observations, de nature très différente et avec une répartition spatio-temporelle hétérogène ne sont pas suffisamment nombreuses pour déterminer complètement l'analyse. Elles sont donc combinées à une première estimation de l'état de l'atmosphère, de la dimension de l'état recherché, appelée ébauche. Il s'agit le plus souvent d'une prévision à courte échéance du modèle concerné, issue de la précédente

phase d'assimilation. Concrètement, le processus d'assimilation consistera à modifier cette ébauche en fonction de l'information tirée des observations pour former l'analyse.

Les notations suivantes sont traditionnellement utilisées en assimilation de données :

- \mathbf{y}^o est le vecteur d'observations, de dimension p ,
- \mathbf{x}^t l'état réel du système discrétisé qui est inconnu et de dimension n ,
- \mathbf{x}^b le vecteur d'ébauche, de dimension n ,
- \mathbf{x}^a le vecteur d'analyse, de dimension n ,
- \mathcal{H} l'opérateur d'observation qui simule les grandeurs observées aux points d'observation à partir de l'état modélisé, $\mathcal{H}(x)$ étant appelé l'équivalent modèle.

Les écarts $\mathbf{y}^o - \mathcal{H}(\mathbf{x}^b)$ représentent la différence entre l'image de la réalité donnée par les observations et celle donnée par l'ébauche dont aucune des deux images n'est parfaite ([6]). Il s'agit alors d'estimer l'incertitude associée à chacune d'elles pour déterminer une correction (l'incrément d'analyse noté où $\delta\mathbf{x}^a$) à apporter à l'ébauche selon la relation :

$$\mathbf{x}^a(t) = \mathbf{x}^b(t) + \delta\mathbf{x}^a(t) \quad (1)$$

Les deux sources d'information (observations et ébauche) utilisées dans le système d'assimilation de données sont associées à des erreurs qui se retrouvent exprimées dans des matrices de covariances. Il s'agit de :

- la matrice \mathbf{R} : covariances d'erreurs d'observations regroupant les erreurs de mesure et de représentativité,
- la matrice \mathbf{B} : covariances d'erreurs de champ d'ébauche regroupant les erreurs de modélisation et des conditions initiales,

L'analyse est, elle aussi, associée à une erreur d'analyse, dont la matrice de covariance est notée \mathbf{A} .

Les processus physiques décrits par le modèle de PNT sont non-linéaires. Plusieurs méthodes opérationnelles d'estimation optimale pour l'analyse existent sur la base d'algorithmes d'assimilation qui ont été développés pour la météorologie et l'océanographie, pour des approches d'assimilation temps réel et pour de l'analyse rétrospective.

L'hypothèse linéaire tangente (petites perturbations se propageant linéairement, au premier ordre, dans l'atmosphère) permet de se placer dans un cadre linéaire. Nous nous limitons ici à cette hypothèse et présentons très succinctement, pour les équations de l'analyse, la théorie de l'estimation linéaire et, pour leurs résolutions, l'approche variationnelle.

a) Théorie de l'estimation linéaire

Dans cette approche, basée sur la minimisation de la variance d'erreur d'estimation, on cherche une estimation de l'état de l'atmosphère, l'analyse, à l'aide d'une combinaison linéaire des deux sources d'information \mathbf{x}^b et \mathbf{y}^o sous la forme :

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{K}(\mathbf{y}^o - \mathcal{H}(\mathbf{x}^b)). \quad (2)$$

La théorie de l'estimation linéaire indique que cette estimation est optimale (elle

minimise la variance d'erreur d'estimation) et appelée *Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE), lorsque \mathbf{K} , appelé l'opérateur de gain, est égal à :

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

où les opérateurs T et $^{-1}$ désignent respectivement la transposée et l'inverse d'une matrice. Le vecteur $\mathbf{y}^o - \mathcal{H}(\mathbf{x}^b)$, noté $\mathbf{d}(t_i)$ est appelé vecteur des résidus observés ou vecteur d'innovation, et $\delta\mathbf{x}^a = \mathbf{K}\mathbf{d}$ est appelé incrément d'analyse.

La matrice de covariance d'erreur d'analyse s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{B} \\ &= \mathbf{B} - \mathbf{K}\mathbf{H}\mathbf{B}. \end{aligned} \quad (3)$$

On montre aussi que \mathbf{x}^a est optimal s'il minimise la fonction coût $J(\mathbf{x})$ qui mesure les écarts entre les différentes sources d'information, pondérés par la précision de chacune de ces sources : les écarts à l'ébauche et aux observations sont représentés respectivement par les termes $J^b(\mathbf{x})$ et $J^o(\mathbf{x})$:

$$\begin{aligned} J(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)^T\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y}^o - \mathcal{H}(\mathbf{x}))^T\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}^o - \mathcal{H}(\mathbf{x})) \\ &= J^b(\mathbf{x}) + J^o(\mathbf{x}). \end{aligned} \quad (4)$$

b) Résolution par l'approche variationnelle

L'approche variationnelle présente l'avantage d'éviter le calcul de la matrice de gain \mathbf{K} et donc l'inversion de la matrice $\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R}$. Elle consiste à déterminer l'incrément d'analyse en minimisant la fonction coût (4) grâce au calcul de son gradient. Elle traite le problème globalement en utilisant les observations passées, présentes mais aussi futures de l'heure de l'analyse (toutes les observations distribuées dans une fenêtre d'assimilation $]t_i - \delta t, t_i + \delta t[$).

En pratique, la fonction coût $J(\mathbf{x})$ est minimisée par un processus itératif qui s'arrête après avoir atteint un critère d'arrêt : un nombre maximal d'itération atteint ou lorsque la norme du gradient de $J(\mathbf{x})$ devient inférieure à un seuil fixé.

L'approche variationnelle permet la prise en compte des données indirectes et asymptotiques³ comme les radiances satellitaires. Elle assure aussi un équilibre entre les variables du modèle dans le sens physique. Aujourd'hui, la plupart des grands centres de prévision opérationnelle utilisent une assimilation variationnelle en version 3D-Var et 4D-Var.

- Formulation 3D-Var

La version 3D-Var considère que toutes les observations et l'ébauche sont contemporaines de l'analyse : la dimension temporelle de la fenêtre d'assimilation est réduite au seul instant t_0 et répond à la minimisation de l'équation (4) comme décrit précédemment (voir axe des ordonnées de la fig. 3).

- Formulation 4D-Var

La version 4D-Var contrairement à la version 3D-Var permet de prendre en compte

3. mesures n'étant pas effectuées à heures fixes (satellites par ex.)

le fait que les observations ne sont pas toutes valides au même instant mais sont temporellement distribuées durant la fenêtre d'assimilation. Le 4D-Var rapproche toute une séquence d'observations de \mathbf{x} (voir figure 3) et la fonction coût $J(\mathbf{x})$ (4) voit son terme $J^o(\mathbf{x})$ prendre alors la forme d'une intégration temporelle du modèle de prévision, non linéaire, entre les instants t_{i-1} et t_i . Pour calculer le gradient de J , le 4D-Var nécessite de connaître les opérateurs adjoints. Il est plus coûteux en temps de calcul que le 3D-Var. Toutefois, l'ajustement aux observations sur l'évolution temporelle garantit un meilleur respect des lois physiques et offre, en général, une qualité des analyses supérieure aux autres méthodes.

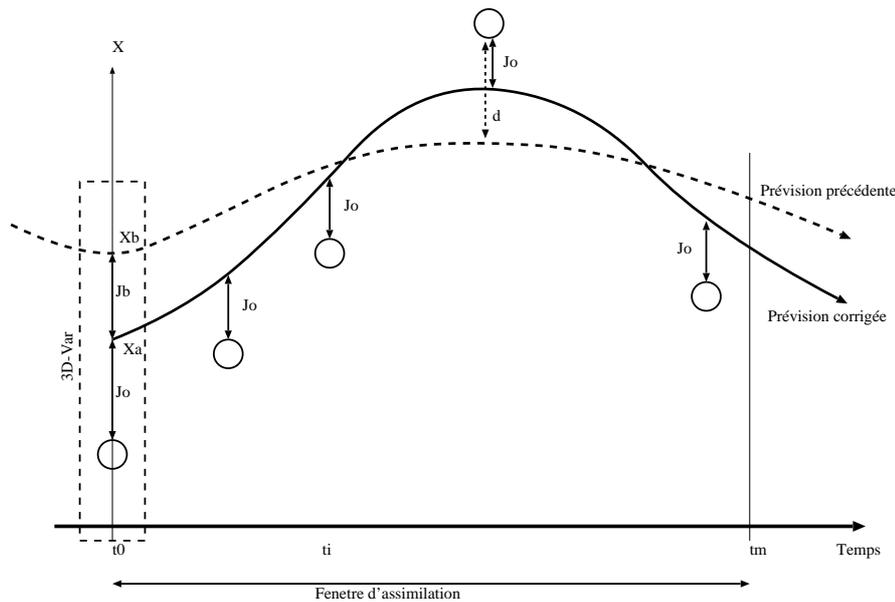


FIGURE 3 – Principes de l'approche variationnelle avec contribution des J^b et J^o sur l'état estimé pour le 3D-Var et le 4D-Var.

2.2.2 Caractéristiques du système de données AROME-France

Le système d'assimilation de données d'AROME-France, dérivé du schéma régional 3D-Var d'ALADIN-France, hérite de la plupart des caractéristiques du logiciel d'IFS-ARPEGE ([8]). En particulier, la formulation, les opérateurs d'observations, la technique de minimisation et les variables sont presque identiques à la version IFS-ARPEGE 3D-Var-4D-Var ; bien que ce dernier ait été conçu à l'origine pour l'analyse à grande échelle, il est bien adapté pour l'analyse de mésoéchelle avec quelques adaptations.

AROME-France ne s'appuie pas sur un schéma d'assimilation 4D-Var car la minimisation et le calcul du gradient de la fonction coût nécessitent l'utilisation du modèle linéaire tangent et de son adjoint, dont le développement et la mise en œuvre sont particulièrement complexes et coûteux dans le contexte AROME. Le manque de dimension temporelle du schéma 3D-Var, dans le système d'assimilation AROME-France, fait qu'à l'intérieur de la fenêtre d'assimilation toutes les observations sont considérées contemporaines de l'analyse et donc de l'ébauche.

Une solution partielle à ce problème consiste, en profitant pleinement de la haute densité et des systèmes à haute fréquence d'observations tels que la surface, GPS, et des mesures de radar, à raccourcir la période du cycle d'assimilation à 3 h (contre 6 h dans ARPEGE). Une analyse est effectuée toutes les 3 h en utilisant les observations les plus proches temporellement de l'heure d'analyse, et suivie d'une prévision 3 h qui servira d'ébauche à l'analyse suivante comme on peut voir une schématisation sur la figure 4.

Le 3D-Var analyse les deux composantes du vent horizontal, de la température, de l'humidité spécifique, et des champs de pression de surface à la résolution de 2,5 km. Les autres champs prognostics du modèle (par ex., l'énergie cinétique turbulente (TKE), le départ de pression, la divergence verticale, et les cinq variétés microphysiques) sont simplement copiés de l'ébauche précédente. En d'autres mots, ils s'ajustent eux-mêmes sur les champs analysés pendant les étapes de prévision du cycle d'assimilation.



FIGURE 4 – Schéma logique de la chaîne de prévision opérationnelle d'AROME-France

Observations assimilées

Les observations assimilées disponibles sur zones et temporellement sont de plusieurs types. Depuis la fin des années 70 avec la mise en réseau des mesures satellitaires, le nombre total d'observations croît de façon exponentielle.

Pour AROME-France, le jeu d'observations assimilées est le même que celui d'ALADIN-France avec en complément les vitesses radiales mesurées par les radars doppler du réseau français ARAMIS, observations potentiellement informatives à mésoéchelle. On trouve parmi ces observations :

- les mesures de station au sol (traditionnellement dénommées SYNOP) : observations de surface des stations synoptiques, du réseau RADOME⁴ de Météo-France, les mesures à bord de bateaux, les observations de contenu intégré en vapeur d'eau dérivé des délais zénithaux de signal GPS mesurés au sol et les observations de bouées marines ;
- les mesures faites par les avions des lignes commerciales ;
- les mesures régulières faites par ballon sonde (radiosondages dénommés message TEMP) : actuellement, ces observations sont sous-utilisées dans le système puisqu'on les considère comme profils verticaux à un instant donné sans tenir compte du déplacement horizontal du ballon et du temps de l'ascension.
- les mesures faites à partir des radars du réseau ARAMIS de Météo-France (uniquement assimilées dans le système d'assimilation AROME-France).
- les mesures faites à partir des satellites géostationnaires, que ce soient des vents dérivés des déplacements des nuages (Satob) ou les températures de brillance des sondeurs embarqués.
- les mesures réalisées à partir des satellites défilants, sondeurs passifs (température de brillance) ou diffusiomètres (vent sur les surfaces maritimes).
- les mesures de vent par sondage PILOT et profileurs de vent.

a) SYNOP, RADOME, SHIP, Radiosondage

b) Avions

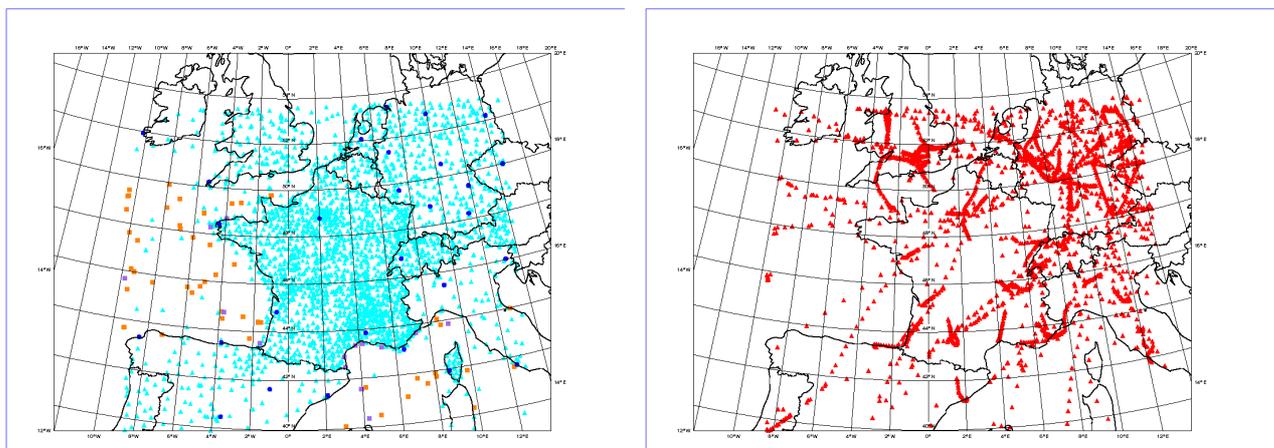


FIGURE 5 – Pointage des observations assimilées à 12 UTC le 8 juin 2011 dans le système d'assimilation AROME-France : observations des réseaux de mesure SYNOP, RADOME, par bateaux et par radiosondage (graphe de gauche) , observations par avion (graphe de droite)

Les observations de radar améliorent la structure spatiale et la représentation quantitative des prévisions de précipitation en raison de meilleures analyses de convergence de bas niveau liées aux systèmes convectifs. Le nombre d'observations utilisées dans chaque analyse est tout à fait irrégulier au cours de la journée parce que, par exemple, des radiosondages sont effectués seulement à 0000 et à 12h00 UTC dans le domaine d'AROME, et les orbites satellites polaires (ATOVS et mesures de

4. Réseau d'acquisition de données et d'observations météorologiques étendu

diffusiomètres) intersectent, seulement plusieurs fois par jour, le domaine relativement petit du modèle. D'autre part, beaucoup de systèmes observants importants sont abondants tout au long de la journée à une haute fréquence, telle que SYNOPs, avions, vents de radar, et rayonnements de SEVIRI.

2.2.3 Diagnostics de l'impact des observations sur les analyses

Le modèle AROME-France dispose d'un schéma 3D variationnel visant la minimisation de la variance d'erreur d'estimation. L'objectif est de quantifier l'apport des différents types d'observations et d'en mesurer l'impact sur la construction de l'analyse.

Ceci est pratiqué traditionnellement par la méthode des Observing System Experiments qui consiste à évaluer les performances des prévisions ou analyses d'expériences pour lesquelles des observations sont ajoutées ou supprimées par rapport à une expérience de référence. On peut aussi utiliser des systèmes de diagnostics a posteriori du système d'assimilation de données comme la réduction de variance.

La réduction de variance de l'erreur d'estimation développée et intégrée dans le modèle ARPEGE et adaptée pour le modèle AROME-France, permet d'évaluer l'impact donné au jeu d'un type d'observations sur l'analyse par le schéma d'assimilation. L'estimation de la réduction de variance, selon la méthode proposée par [4], est menée par une méthode de tirage aléatoire (méthode de Monte-Carlo) pour chaque jeu d'observations en fonction des paramètres analysés (ici la température et le vent) sur la zone géographique ciblée (ici le domaine du tir de missile).

Il s'agit d'introduire des observations perturbées de façon aléatoire dans un intervalle de largeur donné par l'erreur d'observation (σ_O). La réduction de cette variance s'écrit sous la forme :

$$\begin{aligned} r &= Tr(\mathbf{B}) - Tr(\mathbf{A}) \\ &= Tr(\mathbf{KHB}) \end{aligned}$$

où K est la matrice de gain, H l'opérateur d'observation et Tr représente la trace d'une matrice.

La réduction de variance a la dimension d'une variance et n'a donc de sens physique que pour un champ donné. Elle permet de quantifier la capacité des observations à rapprocher l'ébauche de l'analyse pour ce champ donné. La réduction par les observations des erreurs d'estimation des paramètres du modèle est répercutée par la matrice B et indirectement par l'opérateur d'observation H sur l'ensemble des paramètres du modèle.

3 Méthodologie

Cette partie décrit la méthodologie retenue pour traiter le sujet du stage.

Il s'agit d'évaluer l'apport des analyses et prévisions du système AROME-France opérationnel dans le cadre de l'exploitation des tirs de missile des centres d'essai DGA. En effet, comme vu dans la section 2.2.2, ce système utilise une grande quantité d'observations lors du processus d'assimilation de données dont certaines sont proches des sites de Biscarrosse (radar et radiosondages de Bordeaux) et de l'île du Levant (radar et radiosondages de Nîmes, radar de Collobrières dans le Var). On peut donc imaginer que l'estimation de l'atmosphère sur la trajectoire prévue du missile peut être concurrentielle avec l'approche actuellement utilisée.

La deuxième partie consiste à évaluer l'amélioration apportée par l'assimilation d'observations supplémentaires :

- en effectuant des réanalyses qui permettent de tirer profit des observations qui n'ont pu être assimilées en temps réels par le système opérationnel,
- en assimilant les observations de radiosondage supplémentaires de Biscarrosse et du Levant réalisées par la DGA.

Cette évaluation est basée sur des diagnostics élaborés de l'assimilation de données comme la réduction de la variance d'erreur d'estimation et des études d'impact sur les analyses et les prévisions par comparaison à des observations (données de l'avion suiveur comme données indépendantes dans le cas spécifique du tir de Biscarrosse). Enfin, l'objectif de faire tourner le Modèle Dynamique de Référence de la munition avec les données de prévisions n'a pas été traité pendant cette période de stage de trois mois. Il est visé de renseigner la trajectoire du missile avec plusieurs données d'entrée. Actuellement, la simulation est réalisée avec l'extraction de valeurs du profil du radiosondage. Il s'agira d'utiliser les prévisions du modèle AROME-France puis celles ayant assimilé les radiosondages de Biscarrosse et du Levant.

3.1 Déroulement des tirs aux centres d'essai et observations météorologiques DGA

Un aperçu du déroulement chronologique des essais (tir de missile et observations météorologiques) est présenté dans la table 1. L'abréviation RS correspond à l'opération de radiosondage et est employée à plusieurs reprises dans la suite du document.

TABLE 1 – Déroulement chronologique des essais

Site	Date		Tir missile	Avion	RS1	RS2	RS3
Biscarrosse	28 mai 2010	début	12h23	11h54	10h29	11h03	12h24
		fin	13h10	13h10	11h33	11h22	12h41
Le Levant	8 juin 2011	début	12h00	10h45	10h10	12h27	
		fin	13h02	12h23	10h29	12h48	

Pour faciliter la compréhension, le phasage chronologique des essais dans le processus d'assimilation est schématisé dans la section 3.2.

Afin de pouvoir dérouler la démarche comparative des différentes configurations de simulations du modèle, une phase préliminaire a consisté à manipuler les fichiers fournis par les centres d'essai de la DGA pour vérifier leur cohérence et les mettre en forme pour leur assimilation par le modèle AROME-France. Ces fichiers portent sur les radiosondages et les mesures d'avion suiveur.

Dans la terminologie du système d'assimilation, les fichiers comportant les observations de radiosondages et des avions sont dénommés respectivement messages TEMP et AIREP dont le formalisme est à respecter strictement.

La figure 6 fait un zoom sur un domaine élargi comprenant le site du Levant. On y retrouve certaines des observations assimilées par le modèle.

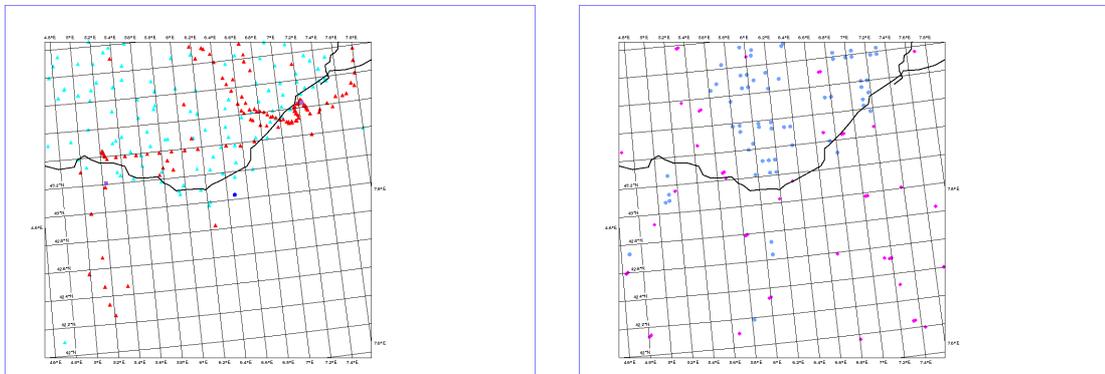


FIGURE 6 – Pointage des observations assimilées à 12 UTC le 8 juin 2011 dans le système d'assimilation AROME-France pour la zone de l'île du Levant : observations des réseaux de mesure de surface (cyan), avion (rouge), vent SATOB (orange), bouée (violet), radiosondage (bleu marine), sondeur (olive) et radar (bleu ciel).

3.1.1 Radiosondages « DGA »

Les conditions atmosphériques et éventuellement océanographiques sont relevées au début de l'essai pour évaluer la situation météorologique. Cette situation permet de définir un créneau météorologique correspondant à une fenêtre temporelle au cours de laquelle les conditions météorologiques assurent la faisabilité de l'essai. Un radiosondage est réalisé avant et un autre juste après le tir de la munition et permet de confirmer a posteriori cette faisabilité d'essai pour le domaine météorologique.

Dans le créneau météorologique de 10h20 à 13h30 UTC pour le site de Biscarrosse, la table 1 montre la réalisation de trois radiosondages pour encadrer le tir dont deux avant et un après le tir (voir fig. 7). Pour le Levant, deux radiosondages bornent le tir dans le créneau météorologique de 06h00 à 13h25 UTC. Le traitement des fichiers bruts a nécessité plusieurs opérations avant d'arriver à la mise en forme finale du message TEMP. Une sélection verticale des observations de radiosondage est faite afin de ne retenir pour chaque niveau du modèle AROME-France que les observations les plus proches. De plus, ne sont extraites du fichier de radiosondage que les variables assimilées par le modèle en y ajoutant après calcul celle requiert

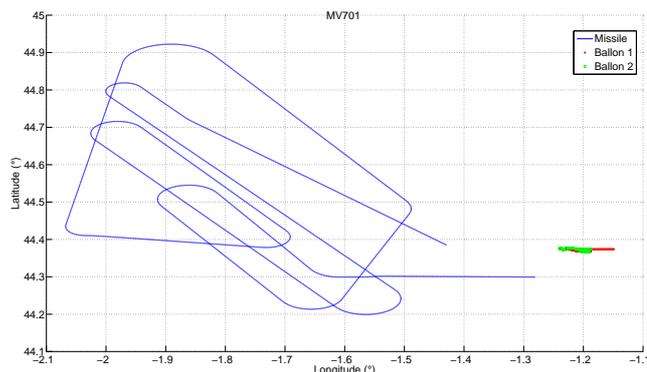


FIGURE 7 – Pour Biscarrosse, trajectoire du missile et radiosondages DGA (Ballons 1 et 2) pour la journée du 28 mai 2010.

par le système d’assimilation. C’est le cas de l’humidité spécifique, noté q , absente du fichier d’observation transmis par la DGA, et qui est calculée en utilisant les observations de pression (p), température (T) et humidité relative (hu) à partir de la formule de Tetens (où e représente la pression de vapeur saturante) :

$$q \approx \frac{0,622.100.e}{p - 0,378.hu.e} \text{ avec } e = 6,07.10^{\left(\frac{7,5.T}{T+237,3}\right)}$$

Le message TEMP se présente sous la forme d’un fichier en format texte composé d’un entête comportant des informations sur le site de radiosondage (date, heure, altitude,...) puis de blocs de données par variable observée (température, humidité relative, humidité spécifique, direction et force du vent) constitué des paramètres pour chaque niveau (altitude, valeur, code qualité).

3.1.2 Mesures avion « DGA »

Du point de vue DGA, les mesures avion sont prévues pour englober la durée du tir du missile et effectuer au plus près le suivi de la trajectoire du missile. Cet objectif a pu être assuré pour le tir de Biscarrosse mais n’en couvre qu’une partie pour celui du Levant. De plus, les fichiers transmis par les centres d’essai ne présentent pas le même formalisme et la température n’est pas présente pour Le Levant. Ceci limite son intérêt sur ce site pour cette étude.

En ce qui concerne le stage, ces mesures avion représentent une opportunité de disposer d’observations indépendantes, soit un jeu de données de contrôle, pour évaluer la qualité des différentes simulations AROME-France obtenues. Seules les mesures exécutées à Biscarrosse ont pu être exploitées.

3.2 Simulations AROME-France

Les simulations ont porté sur les deux dates d’exécution des tirs de la munition (28 mai 2010 pour Biscarrosse et 8 juin 2011 pour l’île du Levant).

L’Outil de Lancement Interactif et de Visualisation d’Expériences (OLIVE), permet de configurer le paramétrage des expériences et de définir le modèle à utiliser

parmi plusieurs configurations et versions en modes opérationnel ou de recherche. Cette interface est largement employée au CNRM et au sein de GMAP. Pour notre étude, afin de profiter des dernières évolutions, nous avons utilisé la version du système AROME-France opérationnelle au moment du stage (*al36t1_arome-op2.28*). Cependant, il convient de préciser que, cette version étant opérationnelle depuis février 2012, les simulations ont nécessité quelques adaptations pour pouvoir les exécuter sur les essais (dates antérieures). Hormis ces adaptations de paramétrage, les simulations effectuées pour les sites de Biscarrosse et du Levant ont suivi le même processus d'expérimentation déroulé graduellement selon quatre niveaux de complétude. Ces différentes expériences sont nommées en utilisant le préfixe **XP** (pour eXPériences) et les suffixes **Bisc** pour Biscarrosse et **Levt** pour le Levant. Elles sont décrites ici :

1. **XP_OPER** (pour OPERationnel) : expériences lancées avec la version actuellement opérationnelle d'AROME-France avec les spécificités suivantes pour chacun des deux sites :
 - le cycle d'assimilation débute à 00 UTC et finit à 12 UTC le jour du tir,
 - l'analyse de 00 UTC utilise comme ébauche la prévision AROME-France opérationnelle de l'époque issue des archives de Météo-France,
 - les conditions latérales des prévisions sont fournies par le modèle ARPEGE opérationnel issu des archives de Météo-France et rafraichies toutes les heures,
 - les simulations fournissent des prévisions à échéance 30h pour toutes les analyses par pas de 1h
2. **XP_REA** (pour REAnalyse) : se distingue de **XP_OPER** uniquement par la prise en compte de toutes les observations disponibles. En effet, dans un contexte opérationnel de disposer des prévisions avec un délai le plus court possible, il n'est pas envisageable d'attendre la mise à disposition totale de toutes les observations et les analyses ainsi effectuées n'utilisent pas toutes les observations existantes. Dans une étude a posteriori, comme dans le cadre de « réanalyse », il est possible d'utiliser toutes les observations réalisées même celles qui sont distribuées très tardivement.
3. **XP_C3** (pour Cycle 3h) : expériences identiques à **XP_REA** mais qui assimilent les radiosondages DGA dans un cycle d'assimilation de période 3 heures. La figure 8 permet d'avoir un aperçu du phasage temporel de la répartition des observations et de leur prise en compte dans l'assimilation par le modèle en fonction des heures des analyses.

Un radiosondage est assimilé à l'heure d'analyse correspondante à son heure de lancement dans la fenêtre d'assimilation. Ainsi, toutes les observations du RS sont considérées à coordonnées fixes pour la latitude, la longitude et le temps et variable pour l'altitude.

Pour Le Levant, nous disposons de deux RS : à 10h10 UTC (RS1) et à 12h27 UTC (RS2). RS1 se situe entre les deux analyses de 9h00 et de 12h00. Pour l'analyse de 12h00, RS2 conviendra mieux, à poste de station identique, car les observations se trouveront plus près de 12h00 et sont entièrement comprises dans sa fenêtre d'assimilation. Par contre, RS1 se situe à la limite haute de la fenêtre d'assimilation de l'analyse de 9h00 (soit 10h30) et s'il devait être

assimilé, toutes les observations seraient considérées comme effectuées à 9h00. Pour Biscarrosse, l'exemple est plus flagrant pour RS1 qui a démarré à 10h29 UTC, soit en fin de fenêtre d'assimilation de l'analyse de 9h00 alors qu'il s'achève à 11h33. RS1 est plus long en raison de la transmission du fichier complet par le centre d'essai (acquisitions jusqu'à éclatement du ballon). Comme pour Le Levant, seul le RS le plus proche de l'analyse de 12h00 est assimilé. Il s'agit de RS3.

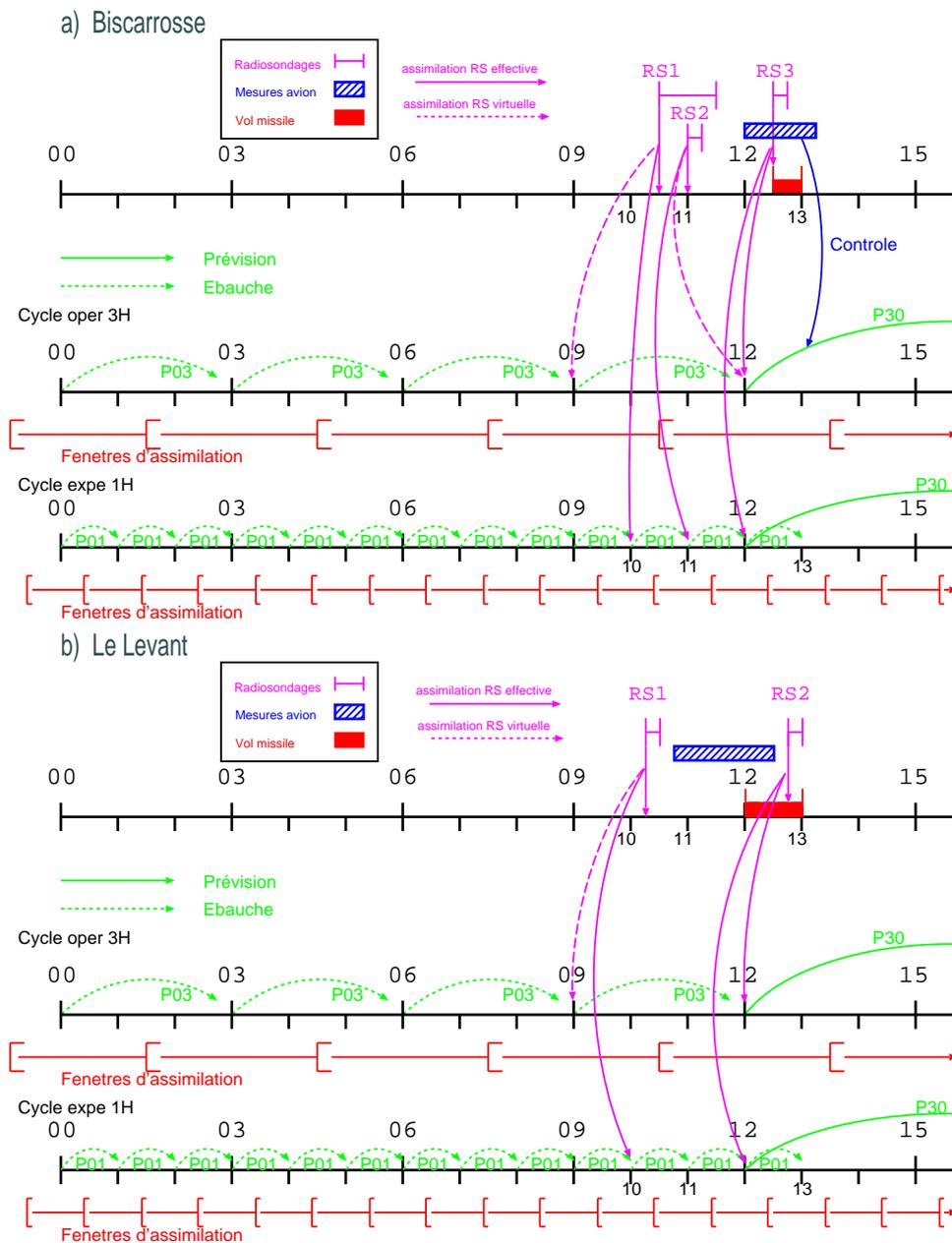


FIGURE 8 – Schéma temporel des observations provenant du centre d'essai de Biscarrosse (a) et de l'île du Levant (b) dans la chaîne d'expérimentation AROME-France mise en oeuvre et de leur prise en compte dans les analyses en fonction du cyclage

4. **XP_C1** (pour Cycle 1h) : expériences identiques à **XP_C3** mais qui exploitent une version expérimentale du modèle AROME-France avec un cycle d'assimilation de période 1h00. Les radiosondages DGA ont pu être assimilés dans des fenêtres plus réduites permettant une meilleure synchronisation temporelle des observations. Ainsi, pour le site de Biscarrosse, RS1 et RS2 ont été assimilés respectivement à 10h00 UTC (au lieu de 9h00 si l'assimilation avait été effective pour XP_C3) et de 11h00, l'horaire d'assimilation pour RS3 restant inchangé. Pour le site du Levant, RS1 est assimilé à 10h00. Les prévisions sont fournies de façon horaire de 00h00 à 12h00 avec des sorties de prévisions spécifiques jusqu'aux échéances 30h pour les analyses de 9h00 et de 12h00. Pour tous les autres analyses, seules des prévisions à échéance 1h ont été réalisées pour fournir l'ébauche à l'analyse suivante.

L'ensemble des simulations réalisées selon le processus défini précédemment est présenté dans la table 2.

Type de sortie	Configuration	Expérience
Prévisions	oper, cycle d'analyse de 3H	XP_OPER.LEVT
		XP_OPER.BISC
	oper, cycle d'analyse de 3H + utilisation toutes obs dispos (= réanalyse)	XP_REA.LEVT
		XP_REA.BISC
	réanalyse + assim 1RS (TEMP à 12H)	XP_C3.LEVT
		XP_C3.BISC
	réanalyse cycle d'analyse de 1H + assim 2RS (10 et 12H) + assim 3RS (10, 11 et 12H)	XP_C1.LEVT
		XP_C1.BISC

TABLE 2 – Synthèse des principales expériences de simulations AROME-France effectuées pour la date du 28 mai 2010 relative au site de Biscarrosse et du 8 juin 2011 pour le site du Levant

3.3 Evaluation des performances de simulations AROME-France

Il s'agit d'abord d'estimer et de comparer la qualité des prévisions et de l'assimilation de données des différentes expériences réalisées. Ceci permet de montrer s'il y a eu un gain en nombre d'observations, d'en déduire si la qualité de l'assimilation est satisfaisante et s'il n'y a pas eu éventuellement de dégradation.

D'autre part, de manière plus originale, il a été fait appel à la réduction de variance (vue à la section 2) qui traduit la part de chaque type d'observation dans la minimisation du processus d'assimilation. Ici, l'impact du système d'observation est étudié pour caractériser les types d'observations les plus informatives sur la zone géographique particulière du site du Levant pour les champs de température et de vent. Cet impact est quantifié sur les analyses entre les expériences XP_REA et XP_C3.

Enfin, les derniers diagnostics concernent l'estimation de l'apport de l'assimilation du radiosondage sur les prévisions en évaluant leur qualité par rapport aux

observations avion indépendantes issues du centre d'essai DGA. Ainsi, les simulations XP_C3 et XP_C1 sont comparées à l'expérience de réanalyse XP_REA, prise comme référence, grâce aux valeurs statistiques de l'erreur quadratique moyenne et du biais des observations - prévisions.

3.3.1 Intérêt des champs 2D par rapport aux RS DGA

Dans un premier temps, ont été effectués des calculs statistiques sur les observations avions DGA pour évaluer l'intérêt de disposer de champs 2D pour la température et le vent (force et direction) par rapport aux valeurs du champ 1D du radiosondage sur le domaine du vol du missile. La distribution des champs de variance et de biais peuvent nous renseigner sur l'intérêt d'utiliser des valeurs sur une plus grande superficie plutôt qu'un profil vertical 1D pour ces journées particulières de tir. Par la suite (voir section 3.3.5), une comparaison est effectuée entre les champs 2D des mesures avion DGA et les simulations du modèle maillé de mésoéchelle AROME-France.

3.3.2 Comparaison des configurations opérationnelle et de réanalyse

Cette partie va permettre de comparer par l'intermédiaire de paramètres statistiques les expériences de configuration opérationnelle (XP_OPER) et de réanalyse (XP_REA). On s'appuie sur la quantification des différences entre observations et ébauche d'une part et observations et analyses d'autre part pour les différents types d'observations. L'objectif réside dans la mise en valeur des observations assimilées en supplément en indiquant leur provenance, leur quantité et leur impact sur les ébauches et les analyses.

En premier lieu, l'expérience XP_OPER sera considérée comme l'expérience de référence à laquelle l'expérience XP_REA sera comparée. On utilise les outils de calculs de diagnostics existants dans l'interface OLIVE pour mener ces comparaisons de valeur de la moyenne quadratique (RMS pour Root Mean Square) et de biais (bias en anglais) sur le domaine entier du modèle, appelé FRANGP⁵ et pour une zone plus restreinte autour des centres d'essai.

Le zoom réalisé sur les sites d'essai permet de faire un bilan particulier sur ces zones permettant de ne pas lisser les résultats sur tout le domaine AROME-France.

A l'issue de cette évaluation, une configuration d'expérience sera choisie pour servir d'expérience de contrôle pour l'évaluation des configurations d'expériences d'assimilation de radiosondages supplémentaires.

3.3.3 Qualité des observations de radiosondages

Avant d'évaluer l'apport des observations de radiosondages DGA sur les prévisions, il est judicieux de s'assurer de la qualité de ces observations. Le contrôle consiste à utiliser les diagnostics de l'interface OLIVE pour comparer les statistiques d'écart entre les observations et l'ébauche pour le radiosondage du centre d'essai sur la zone de tir par rapport aux radiosondages assimilés par le modèle AROME-France sur

5. pour FRANce Grand Patron

tout le domaine (Frangp). Si les valeurs sont du même ordre de grandeur, nous pourrions considérer que les radiosondages du Levant et de Biscarrosse sont satisfaisants.

3.3.4 Impact des RS DGA dans le système d'assimilation

L'objectif est de quantifier l'apport des différents types d'observations et d'en mesurer l'impact sur les analyses grâce à la réduction de variance (voir 2.2.3) et la comparaison des diagnostics entre expériences.

Réduction de variance

Pour déterminer cet apport, nous faisons intervenir d'une manière originale la réduction de variance d'erreur d'estimation qui constitue un diagnostic permettant d'étudier l'apport des observations dans le système d'assimilation pour chaque jeu d'observation, type d'instrument, variable observée, région géographique ou niveau horizontal. Par rapport aux méthodes nécessitant le retrait et l'ajout d'observations dans le système d'assimilation, ce calcul de réduction de variance est moins coûteux en ressources informatiques et donne sous certaines hypothèses l'impact d'un jeu d'observations en présence de l'ensemble des autres observations. Une vision d'ensemble est menée sur chaque type d'observation puis un zoom est effectué sur l'apport du radiosondage supplémentaire DGA.

Comparaison de XP_REA, XP_C3 et XP_C1

Pour mesurer l'impact de l'assimilation de RS DGA sur les analyses, une évaluation est menée en comparant à l'aide de diagnostics sur des statistiques d'erreur les configurations d'expériences de réanalyse XP_REA à celle d'assimilation supplémentaire de RS DGA XP_C3 puis de la même façon XP_C3 à XP_C1.

3.3.5 Impact des RS DGA sur la qualité des prévisions

Comparaison objective : utilisation des mesures avion

Les mesures avion, considérées comme jeu de données indépendantes, sont employées pour évaluer l'impact de l'assimilation du radiosondage sur les prévisions. Ces observations avion sont utilisées avec une résolution spatiale de deux fois la maille du modèle soit un Δ_x de 5 km. En effet, l'outil utilisé pour comparer les observations aux prévisions (interpolation verticale et horizontale) qui est l'opérateur d'observation avion du système d'assimilation impose cette contrainte. Quant à la résolution temporelle, la totalité des valeurs des observations avion ont été conservées avec un échantillonnage de 1 Hz. Ces diagnostics permettent de comparer les expériences entre elles par l'intermédiaire de calculs statistiques d'erreur quadratique moyenne et de biais entre les observations et les prévisions.

Comparaison subjective : champs simulés et observations radar (réflectivité)

Les missiles en phase d'expérimentation dans les centres de la DGA nécessitent d'être tirés dans des conditions météorologiques propices au bon déroulement de l'essai. Les mesures acquises (radiosondage) avant le tir viennent conforter la faisabilité de l'essai. De ce fait, les prévisions AROME-France élaborées pour les 2 journées du 28 mai 2010 (Biscarrosse) et du 8 juin 2011 (Le Levant) ne sont pas censées

montrer des évènements météorologiques particuliers au moins pour les domaines de tir compte tenu de la stabilité atmosphérique recherchée.

Toutefois, il a été possible d'isoler, pour la journée du 8 juin 2011, au sud-est du domaine AROME-France (soit à une centaine de km du site du Levant) de légers phénomènes convectifs. A la suite d'une description succincte de la situation météorologique, les sorties de simulations sont comparées aux observations en considérant les champs de précipitations en instantané issus des réflectivités radar.

3.4 Apport des simulations AROME-France pour la DGA

Les prévisions issues du modèle AROME-France doivent permettre, après mise en adéquation du formalisme des données, d'implémenter des Modèles dynamiques de Référence (MDR) de systèmes d'arme utilisés par les centres d'expertise de la DGA. Dans le cadre de cette étude, il s'agit du modèle dynamique de référence du missile de croisière naval. Les sorties du modèle (prévisions) ont été transformés en fichiers « degribbés » pour la mise à disposition de DGA-MI. L'implémentation du MDR et les résultats attendus ne figurent pas dans ce rapport. Quelques informations sont données ci-après sur le MDR, en respectant l'annexe de sécurité de classification Défense.

3.4.1 Modèle Dynamique de Référence MdCN

Le Modèle Dynamique de Référence en environnement aérodynamique fournit, pour le milieu ambiant de la munition, les caractéristiques statiques (pression, température et masse volumique) et dynamiques (perturbations dues au vent) pour calculer la vitesse et le nombre de Mach aérodynamique. Deux types de modélisation sont possibles avec une « météo » manuelle paramétrant entièrement l'environnement de la munition et une « météo » prévisionnelle ou climatologique provenant du système Calypso⁶. Les profils de vent sont utilisés pour calculer les angles et les coefficients aérodynamiques de la munition.

3.4.2 Données d'entrée pour le MDR

Les fichiers du modèle numérique de prévision météorologique AROME-France sont produits sous trois différents formats qui correspondent aux sorties :

- de prévision sur la grille native (Lambert conforme de 750 x 720 points) et les niveaux verticaux (niveaux pression hybrides) du modèle AROME-France,
- de champs post-traités sur une grille lat-lon régulière (interpolation horizontale) et des niveaux altitude ou pression souhaités (interpolation verticale) au format FA (format ARPEGE),
- ces mêmes champs au format GRIB1 (fichiers GRIB édition 1).

Pour le MDR, les formats de fichiers ont été testés avec différents outils et il semble que le GRIB1 conviennent le mieux après une opération de « degribbage » pour permettre le passage du format binaire au format ASCII grâce au logiciel NCOMET (développé par Météo-France au profit de la DGA) [7].

6. Calypso : Module environnement Hydrographie Océanographie Météorologie de la Marine intégré dans le Système d'Information et de Commandement

4 Résultats et discussion

4.1 Apport des champs 2D par rapport aux RS DGA

On effectue l'analyse de la différence de distribution des valeurs de température et du module de vent entre les champs 1D (radiosondage DGA) et les champs 2D (mesures de l'avion suiveur) par niveaux de pression, réunis en classe de 50 hPa à partir du sol (~ 1015 hPa) jusqu'à 625 hPa.

Au bilan (voir table 3), si on considère à part les classes 1025-975 et 675-625 hPa compte tenu du nombre relativement plus faible d'observations (< 10), le biais varie de 0,2 à 2,1 K pour la température et entre 0,5 et 1,8 m/s pour le module du vent. Les valeurs RMS tournent quant à elles entre 2,0 et 6,4 K pour la température et entre 2,0 et 4,4 m/s pour le vent.

Pression (hPa)	nombre valeurs 2D	Temp (K)		vent (m/s)	
		Biais	RMS	Biais	RMS
1025-975	7	-2,1	3,6	3,2	3,4
975-925	82	-0,2	2,7	0,5	4,4
925-875	57	-1,1	3,4	-1,5	4,0
875-825	57	-2,1	2,9	-1,8	3,3
825-775	33	-2,1	2,3	-0,9	2,2
775-725	78	-2,1	2,5	-1,7	3,7
725-675	55	-1,6	2,4	0,6	2,0
675-625	5	-1,3	2,0	1,1	3,1

TABLE 3 – Comparaison des valeurs statistiques par classe de pression des champs 1D (RS DGA) et 2D (mesures avion suiveur) pour le tir à Biscarrosse

Ces résultats, comme nous le verrons dans la section 4.5.2, représentent une dispersion des valeurs relativement importante et montrent l'intérêt de travailler avec des champs de dimension supérieure et ce d'autant plus grâce à leur couverture de la zone de tir (ce qui n'est pas le cas du profil RS).

4.2 Comparaison des expériences XP_OPER et XP_REA

Pour les deux sites de Biscarrosse et du Levant, la même démarche a été suivie pour évaluer la qualité des expériences. Tout d'abord, on constate que le fait de prendre un cut-off plus long avec la configuration de réanalyse XP_REA permet une légère augmentation du nombre d'observations, notamment pour les mesures asynoptiques. La part d'augmentation peut être très faible comme pour les mesures avion et de radiosondage (+ 0,3%) de façon équivalente pour Biscarrosse et Le Levant. Pour les mesures satellitaires, l'augmentation est de 100% pour la température de brillance (AMSU-A, AIRS et IASI) pour la journée du tir de Biscarrosse alors qu'il n'y a quasiment pas de modification d'observations supplémentaires pour celle du Levant.

Au bilan, si la non prise en compte d'observations supplémentaires par un cut-off plus court dans la version opérationnelle peut sembler pénalisante, le gain apporté par XP_REA n'est pas flagrant (non montré). Toutefois, par principe d'utiliser une configuration plus complète en observations et sans réelle tendance forte démontrée, les tests suivants sont élaborés en prenant comme référence la configuration de réanalyse XP_REA.

4.3 Contrôle de la qualité des observations RS DGA

Les diagnostics ont porté sur les observations de vent (TEMP-FF), de température (TEMP-T) et d'humidité spécifique (TEMP-q) provenant des radiosondages. On obtient, à la fois pour Biscarrosse et pour le Levant, des statistiques de moyenne quadratique (RMS) et de biais des différences (observation-ébauche), sur l'ensemble du domaine du modèle (Frangp) et sur une zone englobant le domaine de tir, les résultats suivants :

- Le Levant : une égalité en valeurs RMS pour TEMP-FF, TEMP-T et TEMP-q
- Biscarrosse (voir table 4) :
 - une égalité en valeurs RMS pour TEMP-q et TEMP-T et une amélioration pour le biais après assimilation du RS supplémentaire DGA (diminution sur zone de 50% pour TEMP-q et de 6% pour TEMP-T)
 - une amélioration en valeur RMS pour TEMP-FF après assimilation du RS DGA avec une réduction sur zone de l'EQM de 12% et de 84% pour le biais. Ceci montre que la qualité des mesures de vent du RS DGA sont aussi satisfaisantes voire meilleures que cellp6.5cmp6.5cmm3cmes de Bordeaux.

Paramètre	Domaine	AssimRS DGA	RMS	Biais
TEMP-FF	Frangp	non	2,26	-0,09
		oui	2,21	-0,06
	Zone	non	1,96	-0,72
		oui	1,72	-0,11
TEMP-T	Frangp	non	1,3	-0,18
		oui	1,3	-0,17
	Zone	non	1,2	-0,11
		oui	1,1	-0,07
TEMP-q	Frangp	non	$0,11.10^{-2}$	$-0,01.10^{-2}$
		oui	$0,10.10^{-2}$	$-0,01.10^{-2}$
	Zone	non	$0,06.10^{-2}$	$-0,006.10^{-2}$
		oui	$0,06.10^{-2}$	$-0,003.10^{-2}$

TABLE 4 – Pour Biscarrosse, comparaison des valeurs statistiques sur le domaine entier AROME-France (Frangp) et sur la « zone » englobant Biscarrosse avec et sans assimilation du RS DGA

Ainsi, les radiosondages supplémentaires sont de qualité satisfaisante et comparables à celle des radiosondages assimilés opérationnellement dans le système d'assimilation d'AROME-France.

4.4 Impact des RS supplémentaires dans le système d'assimilation

Les résultats en terme de réduction de variance d'erreur d'estimation sont présentés pour le site de l'île du Levant pour les champs de température et de vent pour l'analyse de 12h00 et sur une zone délimitée du domaine AROME-France (en degré lat.Nord/lat.Sud/lon.Est/lon.Ouest : 44,0/42,0/8,0/4,5) englobant la zone de tir.

4.4.1 Réduction de variance

a) Description générale

Les profils de réduction de variance obtenus pour la température et le vent pour l'analyse de 12h sont présentés sur la figure 9. Une convention graphique est utilisée pour essayer de faciliter la lecture et l'interprétation avec différentes couleurs employées pour distinguer les différentes plateformes de mesures (voir section 2.2.2).

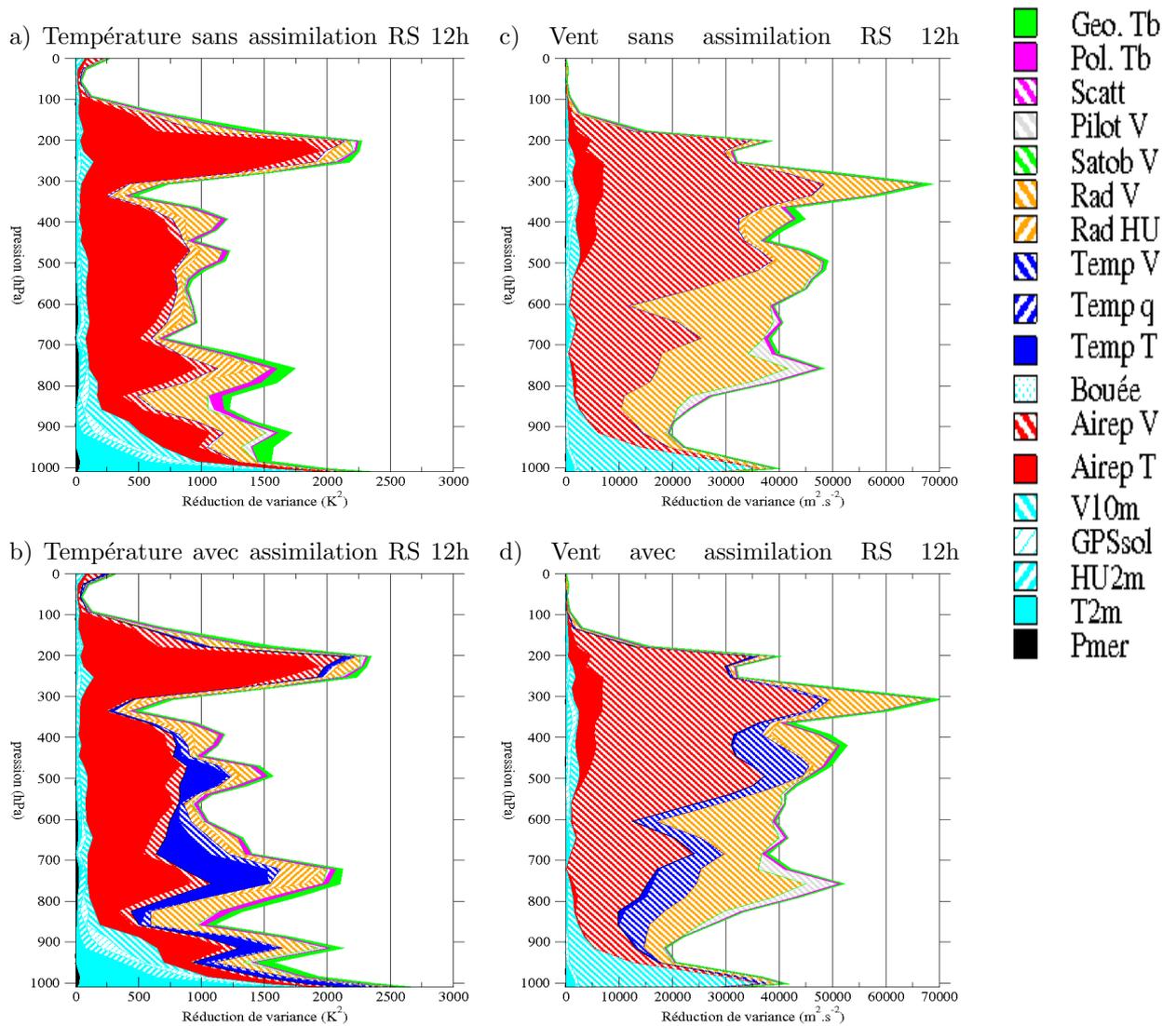


FIGURE 9 – Profils verticaux des contributions de chaque type d'observation à $Tr(\mathbf{KHB})$ (plages de couleur) sur l'analyse du 8 juin 2011 12h00 pour la zone comprenant le site du Levant ; pour les champs de température sans assimilation de radiosondage supplémentaire (a) et avec (b) et pour le champ de vent sans assimilation supplémentaire de RS DGA (c) et avec (d).

Les contributions des différents types d'observation à la réduction de variance sont symbolisées spécifiquement dans l'aire comprise entre l'enveloppe totale (correspondant à $Tr(\mathbf{KHB})$) et l'axe des ordonnées. On trouve en ordonnées les niveaux de

pression en hPa et en abscisses la réduction de variance d'erreur qui a la dimension du champ d'intérêt au carré. La figure 9 montre, pour ces champs de température et de vent, que les observations contribuant le plus à la réduction de la variance d'erreur sont les mesures avion, sur l'ensemble du profil vertical, avec une plus forte influence en dehors de la couche de surface pour laquelle ce sont les mesures des stations à 2 m pour la température et à 10 m pour le vent qui sont prédominantes (80 % du total). Ensuite, viennent principalement les mesures de réflectivité radar. Ces éléments se retrouvent dans le constat détaillé des résultats du rapport de thèse de [2].

b) Apport du radiosondage à l'analyse de 12h

Maintenant, regardons plus spécifiquement l'apport du radiosondage supplémentaire assimilé dans le système d'assimilation AROME-France pour les deux paramètres, température et vent, en comparant les expériences XP_REA et XP_C3. En détaillant la réduction de variance de température dans XP_C3, il apparaît que l'assimilation du radiosondage engendre une réduction plus ou moins importante de la variance d'erreur entre la surface et 450 hPa. Les plus forts apports se trouvent par ordre d'importance aux niveaux 900, 500 et entre 650 et 800 hPa. La réduction de variance pour le radiosondage par rapport au total atteint ainsi son maximum au niveau 750 hPa avec une part de 25% soit un peu inférieure à la contribution essentielle de 40% due aux mesures avion. Au delà de 400 hPa, le signal du radiosondage ne se propage pas, les observations s'arrêtant à 460 hPa. On constate toutefois une légère influence autour de la tropopause. Au bilan, le gain est notable sur l'impact de la réduction de variance aux niveaux 700 et 900 hPa où le bénéfice est évalué à environ 25% et même à peu près 30% pour le niveau de 500 hPa.

Pour le champ de vent, si à 600 hPa, la réduction de variance de l'ordre de $4,0 \cdot 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ est d'un niveau identique dans les 2 configurations avec et sans assimilation du radiosondage des expériences XP_REA et XP_C3, la seule différence demeure dans la réduction de l'impact des observations des radars doppler au profit de celles du radiosondage. La priorité est donc accordée aux observations de radiosondages. L'information du radiosondage se propage convenablement entre 300 et 950 hPa avec des portées de 15% à 750 hPa et maximale de 20% à 450 hPa. On notera le changement du profil entre 350 et 500 hPa, où l'influence de l'assimilation du radiosondage est très nette atteignant environ 30%. Au bilan, on constate un léger impact à 750 hPa où la réduction de variance est estimée à 7% et un plus net à ≈ 400 hPa où cette réduction atteint presque 30%.

En résumé, les « enveloppes » de la forme du signal des configurations sans et avec assimilation du radiosondage DGA peuvent paraître d'allures similaires en conservant dans l'ensemble les poids de chaque type d'observations. Au bilan, on remarque que l'assimilation du radiosondage DGA contribue à une nette réduction de la variance d'erreur d'estimation allant jusqu'à 30% pour les champs de température et de vent, apportant une valeur ajoutée au système.

4.4.2 Diagnostics entre les expériences XP_REA, XP_C3 et XP_C1

Maintenant, l'attention est portée sur l'utilisation de diagnostics permettant d'estimer l'assimilation des radiosondages supplémentaires DGA. Pour les deux sites, le radiosondage DGA autour de 12h25, assimilé pour l'analyse de 12h, permet d'introduire des observations de température, humidité et vent sur 36 niveaux de pression du modèle AROME-France qui en comporte 61. Au bilan du diagnostic, ces observations supplémentaires ont toutes été conservées lors de l'étape de contrôle de qualité. Nous procédons en premier à une comparaison de XP_REA et de XP_C3 puis à celle de XP_C3 avec XP_C1.

a) Comparaison de XP_REA et de XP_C3

La figure 10 illustrant l'évolution des valeurs RMS et de biais du module de vent (TEMP-FF) en fonction du niveau de pression nous permet de remarquer une diminution en basse couche jusqu'à 900 hPa des différences (observation-ébauche) et (observation-analyse).

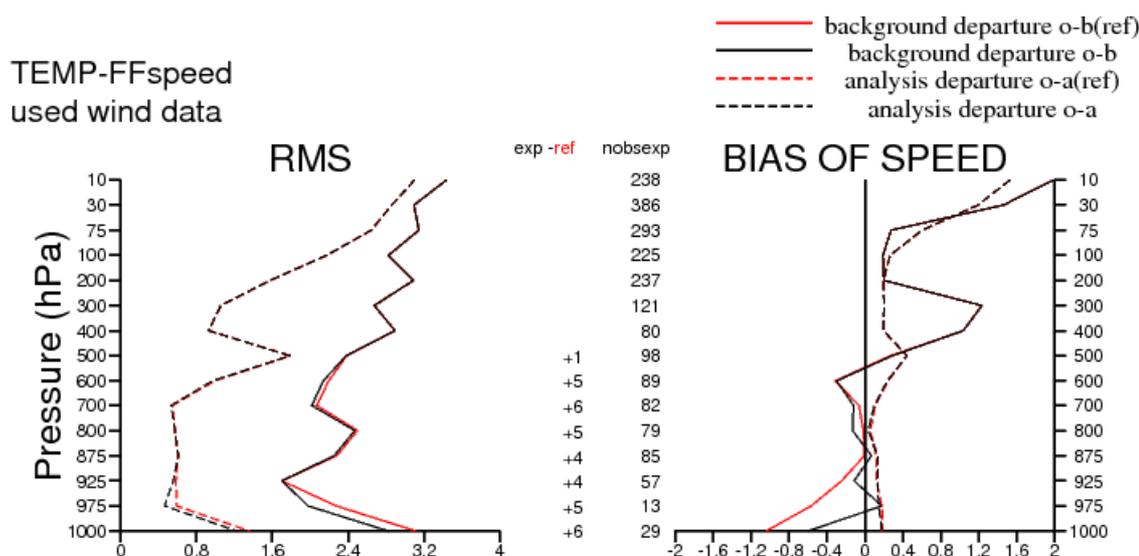


FIGURE 10 – Profils verticaux des valeurs RMS et de biais des écarts (obs-ébauche) et (obs-analyse) pour les observations de radiosondage pour les expériences XP_REA (ref en rouge) et XP_C3 (exp en noir) sur le domaine entier d'AROME-France pour la date du 28 mai 2010 à Biscarrosse.

Il convient de retenir, après quantification des écarts (observation-ébauche) et (observation-analyse) (non montré), que l'assimilation du RS supplémentaire apporte de légères améliorations à tous les niveaux, avec plus d'informations pour les premiers niveaux près du sol, pour les paramètres vent et température pour les deux sites (Biscarrosse et Le Levant). Pour l'humidité, le résultat est contrasté, un peu favorable pour Le Levant (+2%) et défavorable pour Biscarrosse (-27%).

b) Comparaison de XP_C3 et de XP_C1

Enfin, l'expérimentation menée pour l'assimilation de radiosondage supplémentaire

en cycle de période 1h est comparée à celle de période 3h. La réduction de la fenêtre d'assimilation avec un passage de 3h à 1h n'entraîne quasiment pas de modifications du nombre d'observations assimilées excepté pour les observations des satellites défilants qui ne sont plus prises en compte pour l'analyse de 12h. Les diagnostics mettent en évidence un comportement cohérent en similitude du cycle 1h pour tous les types d'observations par rapport au cycle 3h. Un exemple est présenté pour le module du vent sur les graphes (a) et (b) de la figure 11 pour le site de Levant.

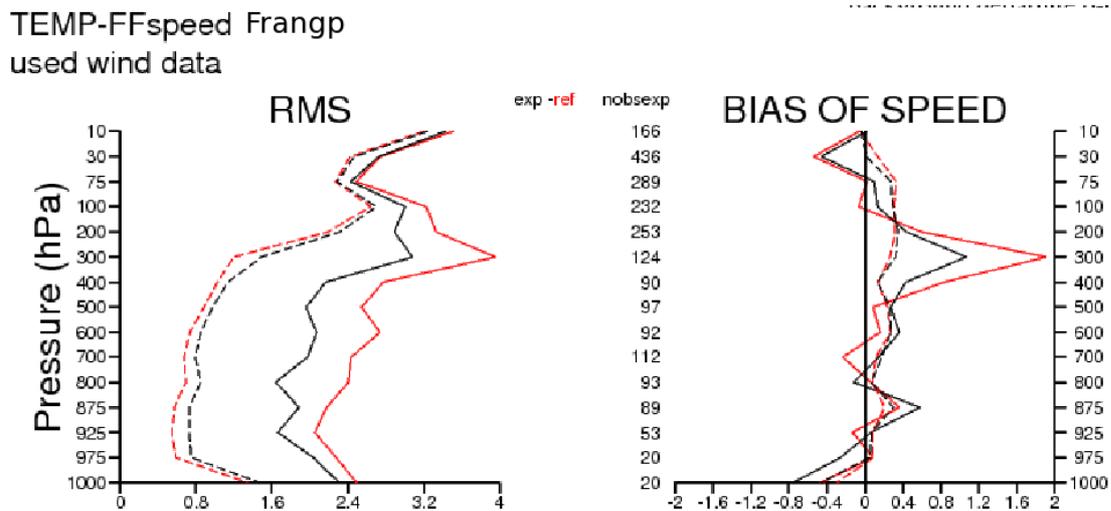


FIGURE 11 – Profils verticaux des valeurs RMS et de biais des écarts (obs-ébauche) et (obs-analyse) pour les observations de radiosondage pour les expériences XP_C3 (ref en rouge) et XP_C1 (exp en noir) sur le domaine entier d'AROME-France pour la date du 8 juin 2011 au Levant.

Les statistiques des écarts (observation-ébauche) et (observation-analyse) sont quantitativement très proches pour les deux situations du 28 mai 2010 (Biscarrosse) et du 8 juin 2011 (Le Levant). Toutefois, il ressort que les valeurs RMS des différences (observation-analyse) de XP_C1 sont plus importantes que celles de XP_C3 (considérée ici comme référence). En considérant à titre d'exemple, pour les deux sites, les mesures de surface (SYNOP), la dégradation liée à XP_C1 est de l'ordre de 30% pour la température et l'humidité à 2 m. Elle s'évalue à environ 20% pour la température des mesures avions (AIREP-T).

Il convient de retenir que l'amélioration du rapprochement de l'ébauche des observations varie entre 5 et 20% sur l'ensemble des diagnostics des deux sites. Parallèlement, l'écart (observation-analyse) croît dans une fourchette de 10 à 40% tout en assurant un comportement satisfaisant de l'assimilation en cycle de période 1h.

La contribution des quatre types d'expérience (XP_OPER, REA, C3 et C1) est étudiée et comparée par rapport au réseau d'observation RADAR sur un cas concret dans la section 4.5.2.

4.5 Impact des radiosondages supplémentaires sur la qualité des prévisions

4.5.1 Comparaison objective

Cette partie porte sur une vérification des prévisions par rapport au jeu de données indépendantes constitué par les observations de l'avion suiveur (défini à la section 3.3.5). La comparaison entre les observations avion et les expériences à estimer (réanalyse XP_REA, XP_C3 et XP_C1) va s'appuyer sur des scores de prévision calculés à échéance 1h. Cette comparaison objective ne porte que sur le site de Biscarrosse (voir section 3.1.2).

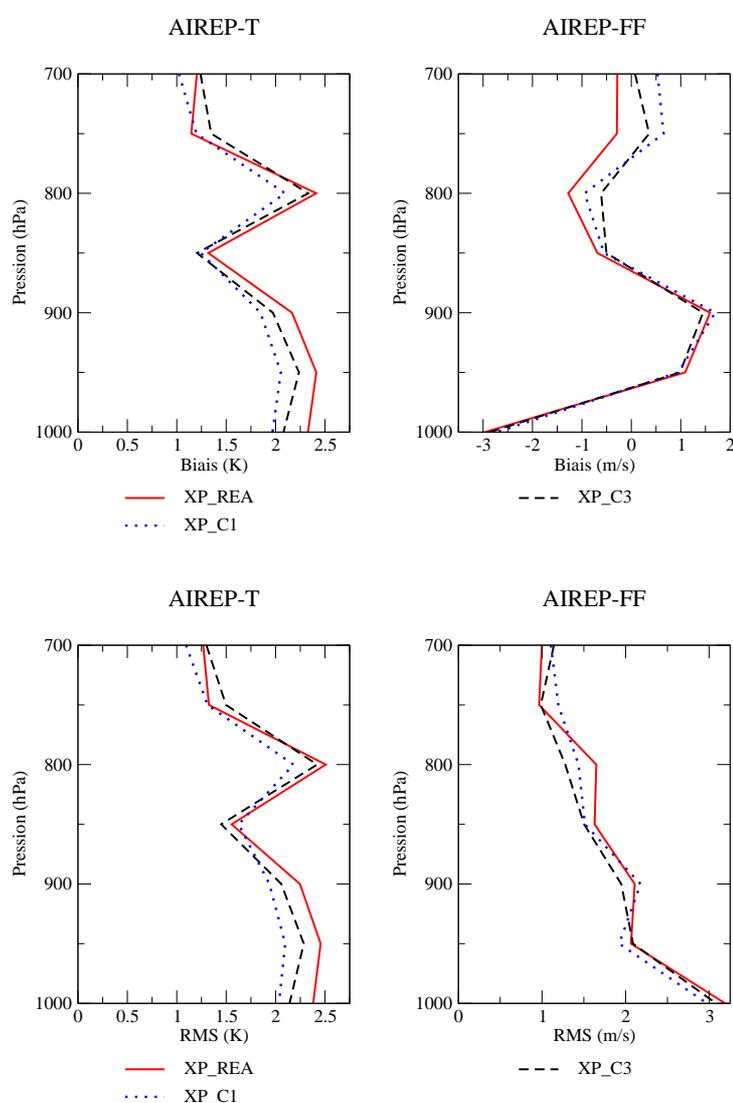


FIGURE 12 – Profils verticaux des scores de prévision (Biais (a) et RMS (b)) pour le champ de température (AIREP-T) et de module du vent (AIREP-FF); issus de la vérification des expériences XP_REA, XP_C3 et XP_C1 par rapport aux observations avion.

A l'examen de la figure 12, on remarque tout d'abord que pour la température, la forme du signal est conservée quelque soit l'expérience, alors que pour le module du vent le constat est moins net. La forme du signal du module de vent est quelque peu différente car elle provient d'une combinaison des deux variables du vent zonal et méridien. Ensuite, on peut constater qu'en comparant successivement l'erreur quadratique moyenne de chaque expérience (XP_REA puis XP_C3 et enfin XP_C1) aux observations avion, l'assimilation du radiosondage DGA supplémentaire apporte pour les paramètres vent et température des améliorations du sol jusqu'à 750 hPa (température : +15% et vent : +25%) et un gain plus mitigé au dessus de ce niveau de 750 hPa. A savoir :

- pour le module du vent : la valeur RMS de XP_C3 est plus importante que celle de XP_REA en croissant de quelques % à partir de 750 hPa et XP_C1 suit la même voie de façon plus conséquente depuis 775 hPa. Quant au biais, il est plus fort pour les deux expériences XP_C3 et XP_C1 à partir d'environ 850 hPa. Le fait de considérer un radiosondage comme un profil vertical de champs 1D pourrait être une réponse à l'augmentation du biais avec l'altitude car il n'est pas tenu compte du changement de position en latitude et longitude du ballon sonde.
- Pour la température : on observe pour une pression plus faible que 775 hPa, la valeur RMS de XP_C3 est dégradée par rapport à celle de XP_REA alors que celle de XP_C1 est plus la faible.

Au bilan, les scores de prévision donnés par le calcul des valeurs RMS et du biais, montrent que les prévisions issues des expériences avec assimilation du radiosondage DGA supplémentaire (XP_C3 et XP_C1) sont de meilleure qualité que l'expérience de réanalyse XP_REA jusqu'à 775 hPa (XP_C3 apporte le gain le plus important pour la température alors que c'est XP_C1 pour le module du vent). Enfin, les valeurs RMS de XP_REA, XP_C1 et XP_C3 sont plus faibles que celle issues du RS DGA ce qui montre l'intérêt d'utiliser ces simulations.

4.5.2 Comparaison subjective

a) Situation météorologique

Un extrait de l'analyse de Météo-France nous rappelle la situation météorologique du 8 juin 2011.

En altitude, un minimum de pression centré sur les îles britanniques entraîne un flux de sud-ouest sur la France. En surface, le thalweg principal et l'air plus chaud s'évacuent vers l'Italie, la Suisse et l'Allemagne. On constate que la présence de tramontane dégage progressivement le ciel de l'après-midi sur le Languedoc-Roussillon. Des averses orageuses des résidus d'air chaud se produisent du Sud des Alpes à la Côte d'Azur. Les orages sont brefs mais ponctuellement violents avec de la grêle principalement sur les Alpes-Maritimes.

Ce sont ces événements convectifs qui sont spécifiquement isolés pour la comparaison des simulations avec les observations.

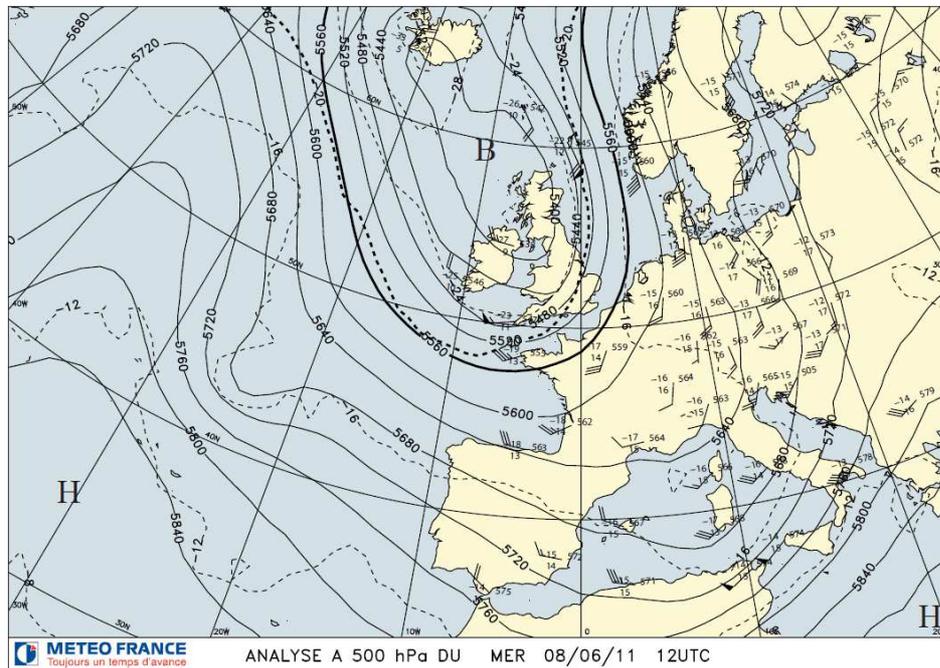


FIGURE 13 – Analyse Météo-France pour le 8 juin 2011 12h00 UTC du géopotentiel à 500 hPa.

b) Réflectivités radar

Les images instantanées de réflectivité radar ont été extraites (base « OkapiMet ») avec un pas de 15 min pour repérer les phénomènes convectifs et les précipitations. Ces images font ressortir entre 13h00 et 18h00 UTC des précipitations au dessus des départements du Var et des Alpes-Maritimes. La table 5 indiquent la localisation des taux maximums de précipitations et précisent pour le site de Toulon la légère évolution de la pression confirmant ainsi la synchronisation des phénomènes précipitant :

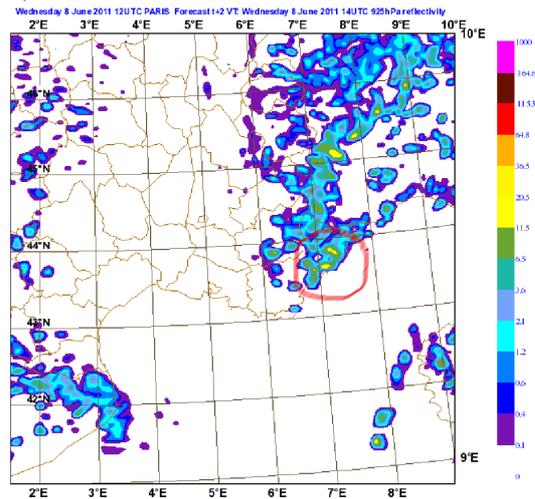
Heure	Pmer (hPa)	baisse de pression	taux max précip.
1300	1007,6	0,0	au nord de Hyères
1400	1007,2	-0,4	entre Cannes et Grasse
1500	1007,0	-0,2	au dessus d'Antibes
1600	1006,6	-0,4	sur une bande Fréjus-Nice
1700	1006,8	+0,2	-
1800	1007,3	+0,5	-

TABLE 5 – Evolution de la pression au niveau de la mer (Pmer) à Toulon le 8 juin 2011.

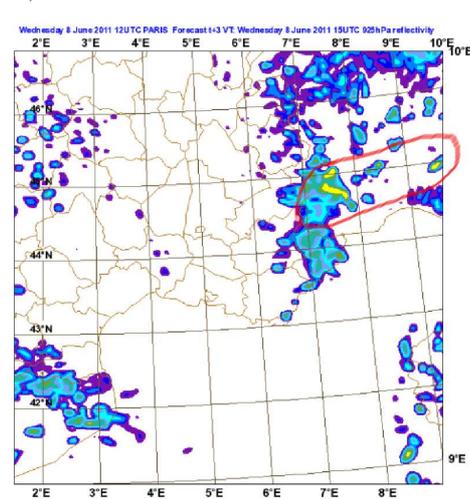
Différentes comparaisons ont été menées sur les 4 types de configurations d'expérience (XP_OPER, XP_REA, XP_C3 et XP_C1) dans le le créneau de 13h00 à 16h00 pour encadrer le phénomène convectif. Il ressort que les échéances +2h de XP_C3 et +4h de XP_C1 sont les plus proches de la représentation des observations radar (figures (a) et (b) de la figure 14). Les images (c) et (d), issues des observations radar montre une similitude entre l'observation et la simulation sur la répartition des taux

maximums. Par contre, sur les images (a) et (b), un décalage au nord est apparent pour la réflectivité simulée de XP_C1, bien que cette expérience soit la plus proche de la forme du signal d'observation. On remarque ici que ce décalage peut provenir d'une prévision d'un flux de sud-ouest plus important que la réalité.

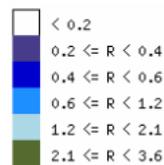
a) Réflectivité simulée à 14h de XP_C3



b) Réflectivité simulée à 16h de XP_C1



c) Réflectivité radar instantanée à 14h00



d) Réflectivité radar instantanée à 16h00

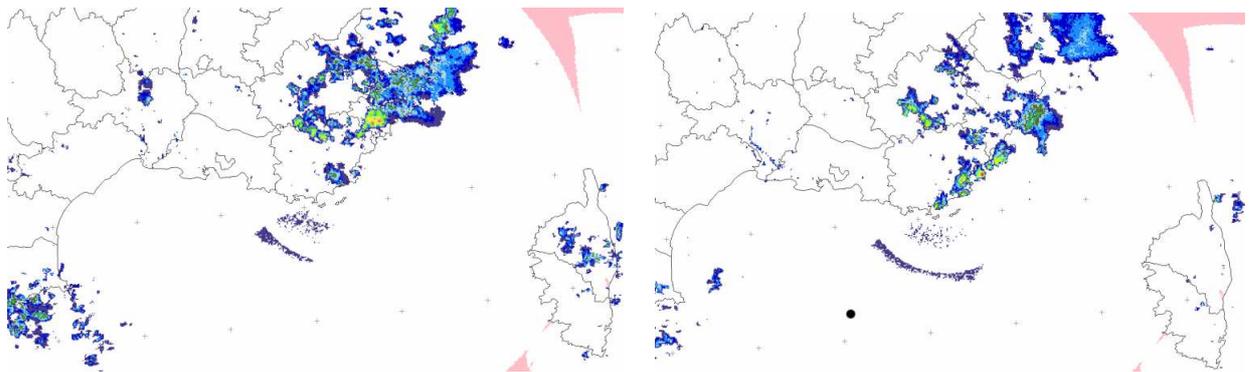
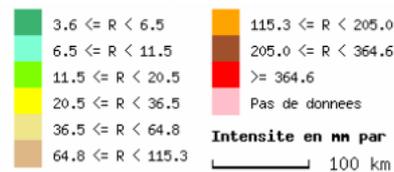


FIGURE 14 – Réflectivités radar simulées (a et b) et observées (c et d) pour une échéance à 14h00 et à 16h00 (attention à la différence d'échelle entre images simulées et d'observations).

5 Conclusion - Perspectives

Dans le cadre des programmes d'armement, les industriels de la Défense et la Direction Générale de l'Armement (DGA) simulent les capacités ou performances des systèmes d'arme à base de missile par l'intermédiaire de modèles dynamique de référence.

Ces modèles nécessitent d'être alimentés par des données atmosphériques proches de la réalité afin de ne pas dégrader les résultats de sortie par manque de représentativité. Les tirs de missile en cours de développement servent entre autres à recalibrer le modèle dynamique pour tendre à l'issue de plusieurs versions vers une configuration mûre validant l'ensemble des chaînes fonctionnelles du système d'arme.

Dans cette phase expérimentale, la DGA exploite les mesures acquises pendant le tir du missile, effectué depuis les centres d'essai des sites de Biscarrosse (Landes) et du Levant (Var). Il est fourni au minimum les données d'observations le jour du tir. Ces données d'observations permettent d'évaluer l'état de l'atmosphère sur la trajectoire et proviennent de radiosondages effectués juste avant et après le tir. Ces observations sont complétées par des mesures d'avion suiveur assurant l'acquisition des paramètres atmosphériques au plus près du missile et éventuellement la validation des observations de radiosondage.

La démarche actuelle consiste à extraire les paramètres souhaités à partir de profils de radiosondages. Le profil de radiosondage ne donnant qu'une information très localisée, il est opportun d'examiner le gain que pourrait apporter un modèle de mésoéchelle non-hydrostatique tel qu'AROME-France, opérationnel à Météo-France depuis fin 2008.

En imaginant que l'estimation de l'atmosphère sur la trajectoire prévue du missile peut être concurrentielle avec l'approche actuellement utilisée, le processus méthodologique a été composé de quatre étapes successives déclinées de façon équivalente pour l'exploitation des tirs de la journée du 28 mai 2010 au centre d'essais de Biscarrosse et du 8 juin 2011 au centre d'essai du Levant.

En premier lieu, il a été montré l'intérêt d'utiliser des champs 2D et par la suite des sorties de modèle maillées par rapport au profil vertical 1D du radiosondage. La différence de distribution des valeurs atmosphériques entre le champ 1D et la grille du modèle, même sur un domaine restreint des conditions de tir, nécessite de ne pas se limiter à la démarche actuelle dans une approche météorologique.

Dans un deuxième temps, nous avons cherché à évaluer le bénéfice représenté par l'emploi des « réanalyses » (XP_REA), exploitant la totalité des observations disponibles, plutôt que les sorties opérationnelles en sortie du modèle AROME-France (XP_OPER). L'apport n'étant pas notable, les deux configurations demeurant équivalentes, celle de réanalyse (XP_REA) a tout de même été choisie, par principe, comme la configuration de référence.

Dans une troisième phase, il convenait d'assimiler le(s) radiosondage(s) effectué(s) lors du tir pour analyser le gain engendré dans le système d'assimilation du modèle en version opérationnelle de cycle 3h (XP_C3). Cette étape a nécessité une manipulation rigoureuse des fichiers de mesures effectuées par les centres d'essai. Elle a ainsi permis de s'assurer de la faisabilité de l'assimilation dans le système AROME-France et également grâce aux outils diagnostics de l'interface OLIVE, largement utilisée au

sein du CNRM, de montrer la qualité de ces mesures. La démarche de cette phase a fait également l'objet d'une déclinaison en version recherche de cycle 1h (XP_C1) montrant un comportement globalement homogène avec la version opérationnelle (XP_C3). De plus, l'outil original constitué par la réduction de variance d'erreur d'estimation (thème développé dans le rapport de thèse de Pierre Brousseau [2]) aura montré que l'assimilation du radiosondage supplémentaire « DGA » aura diminué cette variance de l'ordre de 30% pour les champs de température et de vent.

Il restait dans une quatrième phase à évaluer grâce aux mesures avion, considérées comme jeu de données indépendantes, l'impact de l'assimilation du radiosondage sur les prévisions en utilisant de nouveau les diagnostics issus d'OLIVE. Les scores de prévision ont montré que les prévisions issues des expériences avec assimilation du radiosondage DGA supplémentaire (XP_C3 et XP_C1) sont de meilleure qualité que l'expérience de réanalyse XP_REA jusqu'à 775 hPa (XP_C3 apportant le gain le plus important pour la température et XP_C1 pour le module du vent).

Il nous reste maintenant à poursuivre cette déclinaison méthodologique pour implémenter les modèles dynamiques de référence exploités largement à la DGA.

En fonction des résultats, il conviendra peut-être de s'orienter ou de sortir du cadre de la version opérationnelle du modèle AROME-France pour tester des paramètres différents. Il pourra s'agir de vouloir disposer de simulations pour des pas de temps voire un maillage plus réduits afin de s'adapter aux contraintes et besoins de données atmosphériques sur trajectoire de vol de missile tactique.

Cette période de stage de trois mois au sein du CNRM, dans une partie de l'équipe de GMAP, aura été une réelle opportunité et une expérience très enrichissante à plusieurs titres. Tout d'abord, elle est venue clôturer un cursus universitaire également riche bien qu'éprouvant. Ensuite, elle a concrétisé, par la mise en pratique et une approche méthodologique rigoureuse, un enseignement sur ce domaine vaste et complexe constitué par la modélisation et l'assimilation. Par ailleurs, elle m'a offert un aperçu de la structure et du fonctionnement des équipes de chercheurs, dans le cadre de fortes contraintes opérationnelles, autour du modèle de PNT performant AROME-France.

Enfin, j'espère que mon passage au CNRM permettra d'assurer un relai entre les besoins émis par la Défense sur les programmes d'armement et les différents interlocuteurs du CNRM à Météo-France.

Références

- [1] F. Bouttier. Arome, avenir de la prévision régionale. *La Météorologie*, 2007.
- [2] P. Brousseau. *Propagation de l'information observée dans le système d'assimilation et le modèle atmosphérique AROME*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse III, Juillet 2012.
- [3] J. Coiffier. *Les bases de la prévision numérique du temps*. Cours et manuels n°18. Météo-France, Ecole Nationale de Météorologie, 2009.
- [4] G. Desroziers, P. Brousseau, B. Chapnik, and al. Use of randomization to diagnose the impact of observations on analyses and forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131(611), 2005.
- [5] P. Lynch and G. De Moor. Les origines de la prévision numérique du temps et de la modélisation. *La Météorologie*, 2008.
- [6] S. Malardel. *Fondamentaux de Météorologie*. 2e édition. Editions Cépaduès, 2009.
- [7] Météo-France. *Installation and instruction handbook for NCOMET tool*, 2012. Référence : NCOMET_V5_UserGuide.
- [8] Y. Seity, P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, and V. Masson. The arome-france convective-scale operational model. *Mon. Wea. Rev.*, no. 139 :976–991, 2010.
- [9] J. Cox traduit par M. Rochas. Urbain le verrier : des nuages sur la crimée. *La Météorologie*, 2004.