

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université SAAD DAHLEB -BLIDA 1-

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales
Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de
MASTER

Option : Opérations Aériennes



Thème

**PREVISIONS METEOROLOGIQUES DES
AERODROMES DU NORD AVEC AROME :
« CONTRÔLE ET VALIDATION DES
PREVISIONS » ET L'ELABORATION DES TAF
AUTOMATIQUES**

Organisme d'accueil

الديوان الوطني للأرصاد الجوية

Office National de la Météorologie

Réalisé Par :

Mlle. HAMES Cylia

Promoteur : Mr T.REZOUIG

Mlle. KHELOUL Naima

Encadreurs : Mr M.MOKHTARI

Mme BOUCHEFFA Amel

Promotion : 2015/2016

Dédicaces

HAMAS Cylia

Je dédie ce mémoire à mes chers parents, ma mère Ouzna et mon père Belkacem pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A mes grands parents Djouhra et Belaid pour leur douceur et gentillesse. A mes grandes sœurs Lydia et Ouzna ainsi qu'à mes frères Djilali et Boualem pour leur tendresse, leur complicité et leur présence malgré la distance qui nous sépare.

A ma tante Kaissa et mes copines Dihya et Nawal pour toute l'affection qu'ils m'ont donné et pour leurs précieux encouragements.

A mes petites sœurs Diana et Ferial, ma plus grande source de bonheur, j'espère que la vie leur réserve le miel.

A toute ma famille ainsi qu'à mes amis en particulier Monsieur Salim.

Dédicaces

KHELOUL Naima

A mes très chers parents

Abdel Kader et BOUZIANI Mahjouba, dont leurs mérites, leurs sacrifices, leurs soutiens, leurs qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour, je vous souhaite qu'Allah leur préserve bonne santé et longue vie

A mes frères et ma sœur

Mohamed, Nassradine, Maroine et Bakhta Pour leurs soutiens moraux et l'encouragement que m'avez accordés, je vous souhaite tout le bonheur et un brillant avenir.

A mes amies

Un grand merci à mes chères amies, cylvia, asma, zineb, hala pour leurs aimables compagnies, leurs aides.

A tous ceux qui ont su m'apporter aide et soutien aux moments propices, je dédie ce travail reconnaissant et remerciant chaleureusement.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à tous mes camarades à l'Institut pour leurs encouragements et pour l'ambiance agréable tout au long de ce stage pour sa présence dans les moments difficiles et grâce à qui j'ai passé d'excellents moments inoubliables.

Remerciements

Dieu merci, grâce à lui le tout puissant nous avons réalisé ce travail et le mener à terme. Nous tenons à remercier notre Directeur de stage Monsieur «Brahim IHADDADEN » de nous avoir accueillies dans son équipe et d'avoir accepté de diriger ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à notre encadrant Monsieur MOUKHTARI Mourad professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie site à Bab Ezzouar, aussi Ingénieur chercheur au Service de la PNT à L'Office Nationale de Météorologie au niveau d'Alger, sa rigueur scientifique, sa disponibilité et ses qualités humaines nous ont profondément touchée. Son soutien, sa clairvoyance et ses compétences nous ont été d'une aide inestimable. Aussi pour avoir accepté de diriger ce travail.

Nous tenons à remercier également notre Promoteur Monsieur REZZOUG Tahar, Professeur-chercheur à l'Institut Aéronautique de Blida également Chef d'équipe de la recherche au niveau de cette institut avec un thème intitulé « Météorologie et turbulence », pour l'honneur qu'il nous 'a fait en acceptant de diriger ce travail. Sa disponibilité, sa gentillesse et ses précieuses directives tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous remercions également mon encadrant Madame BOUCHEFA Amel, Ingénieur Chercheur au service de la PNT à l'ONM, pour le privilège qu'elle nous a fait en acceptant de diriger ce travail. Sa gentillesse, sa modestie, sa riche expérience et l'accueil cordial qu'elle nous a toujours réservé nous ont inspiré une grande admiration à son égard. Sans oublier ses précieuses directives tout au long de la réalisation de ce travail nous ont beaucoup impressionnées.

Qu'ils puissent trouver dans ce travail le témoignage de notre sincère gratitude et de notre profond respect.

Nous souhaitons remercier Monsieur Djalal Ingénieur en informatique pour toute l'aide qu'il m'a apportée.

Nous tenons à remercier sincèrement les membres du jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Prévisions météorologiques pour les aérodromes avec le modèle AROME

« Validation »

Résumé

Les prévisions météorologiques d'aérodromes présentent un intérêt particulier pour les compagnies aériennes pour assurer l'efficacité des opérations et satisfaire la sécurité sur l'aérodrome et aux abords de celui-ci.

Plusieurs paramètres météorologiques peuvent introduire les aéronefs dans une phase de vulnérabilité très risquée si le pilote n'a pas su réagir, on note essentiellement: les rafales de vent, la visibilité sèche et humide, les cellules orageuses ainsi que d'autre ..., donc, pour assurer la sécurité des utilisateurs, tout en réduisant les retards et les risques d'accidents aériens, il est nécessaire de prendre rapidement des décisions sur la base de prévisions météorologiques de la meilleure qualité.

Aujourd'hui, grâce au développement des modèles numériques de prévision du temps comme AROME à haute résolutions temporelle et spatiale rendent la prévision de ces phénomènes accessible.

Abstract

Weather aerodrome forecasts are of particular interest for companies Airlines to ensure effective operations and meet safety on the airfield and edge thereof.

Several meteorological parameters can introduce the aircraft in very risky vulnerability phase if the pilot did not react, essentially we notice: gusts wind, dry and wet visibility, storm cells as well as other...

So to ensure users safety, while reducing delays and the risk of air accidents, it is necessary to make quick decisions based on forecasts weather premium.

Today, thanks to developments of digital models of time prediction like AROME with high temporal and spatial resolution makes the forecast of these phenomena available.

ملخص

إن لتوقعات طقس المطارات أهمية خاصة في شركات الطيران لضمان العمليات الفعالة وتلبية السلامة في المطار وحواله.

يمكن تلخيص من معلمات الأرصاد الجوية إدخال طائرة في مرحلة الضعف المعرضة للخطر إذا كان الطيار لم يعرف كيفية التفاعل مع الوضع، و من بين هذه المعلمات تسجل هبوب الرياح، والرؤية الجافة و الرطوبة، و العواصف فضلا عن غيرها...

و ذلك لضمان سلامة المستخدم، مع الحد من التأخير وخطر الحوادث الجوية، انه من الضروري اتخاذ قرارات سريعة بناء على توقعات الطقس ذات جودة عالية.

اليوم، مع تطوير النماذج الرقمية لتنبؤ الطقس مثل AROME ذات الدقة العالية سواءا من الناحية الزمانية او المكانية يجعل التنبؤ بهذه الظواهر ممكنة.

Table des matières

Dédicaces.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Table des matières.....	V
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	XII
Listes des abréviations et acronymes.....	XIII
<i>Introduction générale</i>	I
<i>CHAPITRE 1 : Les éléments de base nécessaires pour le contrôle du produit AROME</i>	
I.1 Les messages d'observation et de prévision	3
I.1.1 Introduction.....	3
I.2 Le message METAR	3
I.2.1 Définition.....	3
I.2.2 Contenu du METAR.....	4
I.2.3 La forme symbolique.....	4
I.3 Le message TAF	4
I.3.1 Définition.....	4
I.3.2 Contenu des TAF.....	5
I.3.3 Forme symbolique d'un TAF.....	5
I.4 Utilité des messages TAF et METAR	5
I.5 La température minimale et maximale	6
I.5.1 Définitions.....	6
I.5.2 Origines et caractéristiques.....	6
I.5.3 Influence de la température minimale et maximale sur les aéronefs.....	8
I.6 La température de point de rosée (Td)	9
I.6.1 Définition.....	9

1.6.2	Calcul de la Td.....	9
1.6.3	Diagramme de Mollier.....	9
1.7	L'humidité.....	10
1.7.1	Définition.....	10
1.7.2	Types.....	10
1.7.3	Influence de l'humidité sur les aéronefs.....	11
1.8	Le vent.....	11
1.8.1	Caractéristiques.....	11
1.8.2	Instruments de mesure.....	11
1.8.3	Effet du vent.....	12
1.8.4	Les rafales de vent.....	12
1.8.5	L'influence des rafales sur les aéronefs.....	13
1.9	Précipitations.....	13
1.9.1	Formes de précipitations.....	13
1.9.2	La pluie.....	13
1.9.3	L'influence de la pluie sur les aéronefs.....	14
1.10	La neige.....	14
1.10.1	L'influence de la neige sur les aéronefs.....	14
1.11	La visibilité horizontale.....	15
1.11.1	Types de visibilité existante.....	15
1.11.2	Les phénomènes troublants la visibilité.....	15
1.11.3	Influence de la réduction de la visibilité sur l'A/C.....	16
1.12	La pression atmosphérique	16
1.12.1	Effet de la pression sur un aéronef.....	16
1.13	La nébulosité	16
1.14	Le nuage	17
1.14.1	Evaluation de la nébulosité.....	18
1.14.2	Base des nuages.....	19
1.14.3	Effet de la nébulosité.....	19

CHAPITRE II : Prévision numérique du temps.

II.1	Définition de la PNT	21
II.2	Généralité sur la PNT	21
II.2.1	Principe de la prévision numérique du temps.....	22
II.4	Formules mathématiques de base utilisées pour la prévision numérique du temps.....	22
II.5	Les étapes de la PNT	24
II.5.1	Observation (La collecte des données).....	24
II.5.2	Initialisation/ assimilation.....	25
II.5.3	Modélisation numérique.....	25
II.6	Utilité de la PNT	25
II.7	L'échelle météorologique	26
II.8	Les modèles opérationnels de la PNT disponibles à l'ONM	27
II.8.1	Le modèle AROME.....	27
II.8.2	Le modèle ALADIN.....	28
II.8.3	Le modèle ALADIN SABLE.....	29
II.8.4	Le modèle ARPEGE.....	30
II.8.5	Le couplage entre modèles.....	32

CHAPITRE III : Outils et méthodologie

III.1	Introduction	34
III.2	Procédure suivie pour l'évaluation des prévisions AROME	34
III.2.1	Choix des sites d'études.....	34
III.2.1.1	L'Aérodrome d'Alger (DAAG).....	34
III.2.1.2	L'Aérodrome de Constantine (DABC).....	35
III.2.1.3	L'Aérodrome d'ORAN (DAOO).....	36
III.2.1.4	L'Aérodrome de HASSI MESSAOUD (DAUH).....	37
III.2.2	Décodage des messages météorologiques METAR et TAF.....	38
III.2.3	Système d'exploitation, langage de programmation et logiciel utilisés pour l'exploitation du modèle Arome.....	40

III.2.3.1 Programme de base.....	40
III.2.3.2 Le logiciel du traçage des cartes HBN « GRADS »	42
<i>CHAPITRE IV : Evaluation et validation du produit AROME.</i>	
IV.1 Introduction	43
IV.2 Les marges de tolérances des prévisions TAF	43
IV.3 Contrôle mensuel du produit AROME	44
IV.4 Résultats et discussions	44
IV.4.1 Direction du vent.....	44
IV.4.2 Vitesse du vent.....	46
IV.4.3 Température de l'air.....	48
IV.4.4 Température de point de rosée.....	49
IV.4.5 La pression.....	50
IV.5 Calcul du taux de réussite du modèle AROME.....	51
IV.6 Prévision de la hauteur des nuages avec AROME.....	54
IV.6.1 Hauteur de la base des nuages (HBN).....	54
IV.6.2 Validation des cartes de la HBN.....	54
<i>Conclusion générale.....</i>	60
<i>Perspectives.....</i>	61
Liste des références bibliographiques	62

Liste des figures

CHAPITRE I : Les éléments de base nécessaires pour le contrôle du produit AROME

<i>Figure I.1</i> : Exemple d'un message METAR.....	4
<i>Figure I.2</i> : Exemple d'un message TAF.....	5
<i>Figure I.3</i> : Image illustrant l'origine de la chaleur d'où la température.....	7
<i>Figure I.4</i> : Le diagramme de Mollier.....	10
<i>Figure I.5</i> : Manche à air.....	12
<i>Figure I.6</i> : Figure illustrant les différents types de nuages suivant l'altitude.....	18

CHAPITRE II : Prévision numérique du temps

<i>Figure II.1</i> : Schémas montrant les étapes de la PNT.....	25
<i>Figure II.2</i> : A gauche, on a la représentation de l'échelle de temps caractéristique en fonction de l'échelle de distance horizontale caractéristique ; à la droite on trouve la représentation des différentes échelles météorologiques en fonction de l'échelle temporelle et spatiale.....	26
<i>Figure II.3</i> : domaine AROME/ Nord d'Algérie.....	28
<i>Figure II.4</i> : domaine ALADIN/ ALGERIE.....	29
<i>Figure II.5</i> : Domaine ALADIN-sable/Algérie.....	30
<i>Figure II.6</i> : Domaine ARPEGE/ Algérie (cercle en jaune).....	30
<i>Figure II.7</i> : Les orographies respectives, sur le domaine alpin, des modèles ARPEGE (à gauche), ALADIN (au milieu) et AROME (à droite).....	32
<i>Figure II.8</i> : les sources d'informations nécessaires à la prévision d'AROME.....	33

Liste des figures

CHAPITRE III : Outils et méthodologie

<i>Figure III.1</i> : Aéroport d'Alger.....	35
<i>Figure III.2</i> : Aéroport de Constantine.....	36
<i>Figure III.3</i> : Aéroport d'Oran.....	37
<i>Figure.III.4</i> : Aéroport de Hassi Messaoud.....	38
<i>Figure III.5</i> : Organigramme montrant la procédure de l'extraction des données AROME.....	41

CHAPITRE IV : Evaluation et validation du produit AROME

<i>Figure IV.1</i> : Les directions du vent moyennes observées (en blue), établies manuellement (en vert) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en degré.....	46
<i>Figure IV.2</i> : Vitesses du vent moyennes observées (en blue), établies manuellement (en vert) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en Noeud.....	48
<i>Figure IV.3</i> : Températures moyennes à 2 mètres observées (en blue) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en degré Celsius.....	49
<i>Figure IV.4</i> : Température moyennes de point de rosée à 2 mètres observées (en blue) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en degré Celsius.....	50
<i>Figure IV.5</i> : Pression au niveau de la mer observées (en blue) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en hPa.....	51
<i>Figure IV.6</i> : Carte HBN prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l'DAAG.....	55
<i>Figure IV.7</i> : Carte HBN prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l'DABC.....	56

Liste des figures

Figure IV.8: Carte HBN prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l'DAAO..... 57

Figure IV.9: Carte HBN prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l'DAUH..... 58

CHAPITRE I : Les éléments de base nécessaire pour le contrôle du produit AROMELE

Tableau I.1 : Tableau illustrant la représentation de la nébulosité en fonction de son unité.....17

Tableau I.2 : Tableau représentant les types de nuages en fonction de leurs hauteurs.....19

CHAPITRE II : Prévision numérique du temps

Tableau II.1 : Tableau montrant les différentes échelles utilisées en météorologie.....26

CHAPITRE III : Outils et méthodologie

Tableau III.1: Paramètres météorologiques obtenus à partir d'un message METAR.....38

Tableau III.2 : Ce tableau représente la suite du *Tableau III.1*.....39

CHAPITRE IV : Evaluation et validation du produit AROME

Tableau IV.1 : Marges de Tolérances des prévisions TAF.....43

Tableau IV.2 : Biais moyens de la direction du vent obtenus pour les TAF et AROME.....45

Tableau IV.3 : Biais moyens de la vitesse du vent obtenus pour les TAF et AROME.....47

Tableau IV.4 : Taux de réussite pour les prévisions AROME et TAF concernant la direction du vent.....52

Tableau IV.5 : Taux de réussite pour les prévisions AROME et TAF concernant la vitesse du vent.....53

Liste des tableaux

<i>Tableau IV.6</i> : HBN observé, prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l' DAAG.....	54
<i>Tableau IV.7</i> : HBN observé, prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l' DABC.....	55
<i>Tableau IV.8</i> : HBN observé, prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l' DAOO.....	57
<i>Tableau IV.9</i> : HBN observé, prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l' DAUH.....	58

Liste des abréviations et acronymes

AROME	Application of Research at Operations to MEscale
ALADIN International	Aire Limite, Adaptation dynamique, Développement
ARPEGE	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
ONM	Office National de la Météorologie
GrADS	Grid Analysis and Display System
HBN	Hauteur de la Base des Nuages

Introduction générale

Le trafic aérien mondial ne cesse de croître : il est passé de quelques millions de passagers en 1950 à 3.3 milliards en 2014, la barre du milliard de passagers ayant été franchie en 1987. Cette augmentation effrénée du trafic doit être accompagnée d'une assistance météorologique de qualité afin d'assurer la sécurité des passagers et atténuer les perturbations que subissent les opérations en cas de phénomènes météorologiques à fort impact, notamment les vents forts, brouillard, vent de sable, tempêtes de neige, le givrage... etc.

L'assistance météorologique à la navigation aérienne internationale a pour objet de contribuer à la sécurité, à la régularité et à l'efficacité de la navigation aérienne internationale. Ce but sera atteint en fournissant aux différents services et acteurs impliqués dans le circuit aéronautique (exploitants, membres d'équipage et de conduite, organisme des services de la circulation aérienne, service de sauvetage... etc.) les renseignements météorologiques qui sont nécessaires à l'accomplissement de leurs fonctions respectives.

Aujourd'hui, les progrès de la météorologie, qui sont surtout d'ordre technique grâce aux ordinateurs, permettant d'intégrer des modèles de prévision à haute résolution et de repousser plus loin les limites des prévisions. En Algérie, grâce à l'acquisition de l'ONM d'un supercalculateur, l'exploitation de ce type de modèle, à l'instar du modèle AROME, est devenue opérationnelle depuis 2014. L'exploitation du modèle AROME a permis de développer des nouveaux produits spécifiques aux secteurs économiques en particulier le secteur du transport. À titre d'exemple, une application permettant de mettre en œuvre un produit de prévision des cisaillements de vent de tout type sur un secteur prédéterminé qui recouvre l'aéroport d'Alger ainsi que deux trajectoires d'approches a été développée en coopération entre l'ONM et l'Institut d'Aéronautique de Blida (IAB) (mémoire de fin d'étude, Boucheffa, 2015). Cette application a donné des résultats très encourageants sur l'aéroport d'Alger.

Ce présent travail s'inscrit dans ce contexte, et il est la suite de l'étude précitée. Son objectif principal est de valider et généraliser l'application développée pour l'aérodrome d'Alger à d'autres aérodromes et de l'automatiser. Pour se faire, nous allons, en premier lieu, généraliser l'application aux autres aérodromes. Ensuite, nous allons effectuer un contrôle journalier des paramètres prévus par rapport aux observations durant la période du 14 février au 14 mars 2016. Dans ce mémoire, en se limitant à l'analyse de quelques sites choisis selon

Introduction générale

le critère de la densité du trafic aérien à savoir : Alger, Constantine, Oran et Hassi-Messaoud. Aussi une deuxième phase de contrôle est réalisée par rapport aux bulletins TAFs élaborés manuellement par les prévisionnistes sur la base du modèle Arpège. Cette étape permet de recenser le pourcentage de réussite des bulletins effectués automatiquement.

Ce mémoire est organisé comme suit : le premier chapitre sera consacré à la présentation des éléments de base nécessaires pour le contrôle du produit AROME. Nous exposerons, dans le deuxième chapitre, les éléments de base de la prévision numérique du temps et les différentes étapes nécessaires pour effectuer une prévision à l'aide des modèles de prévision. Ensuite, on définira dans le troisième chapitre les outils et la méthode suivis pour réaliser ce travail. Le quatrième chapitre consistera en la validation et la généralisation des bulletins de prévision pour les aéroports prévus par AROME d'une façon automatique. Nous présenterons, les résultats par rapport aux observations et par rapport aux TAFs. Nous terminerons par une conclusion.

CHAPITRE I

***LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES
POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME***

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

CHAPITRE I

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

Nous présenterons dans ce chapitre les paramètres météorologiques nécessaires pour effectuer : un décollage, un atterrissage ou bien une approche sécurisée. L'absence de ces paramètres peut introduire l'aéronef dans une phase de vulnérabilité très risquée.

1.1 Les messages d'observation et de prévision

1.1.1 Introduction

La météorologie est un facteur très important et indispensable pour le secteur aéronautique. Pour le pilote comme pour les services au sol, la connaissance de la météorologie est une donnée essentielle dans la préparation des vols et dans les décisions qui seront prises en cas d'évolution de la situation pendant le vol. Ces services peuvent connaître la météo sous forme des messages simples et clairs comme les METAR et TAF.

Dans ce chapitre on va essayer de présenter la signification de ces messages avec leurs contenus et leurs utilités.

1.2 Le message METAR

1.2.1 Définition

Les observations météorologiques exécutées quotidiennement dans les aéroports fournissent, en code METAR, concis et explicite, des informations essentielles pour l'aviation. Des messages indiquant des variations significatives du temps entre les observations régulières sont également diffusés; ce sont des messages météorologiques spéciaux en code SPECI.

Il est possible aussi d'ajouter aux messages METAR une prévision de tendance sur deux heures, «TREND», pour signaler aux aéroports considérés toute variation significative du temps au cours des deux heures qui suivent l'heure du message.

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

Un message METAR est rédigé à toutes les heures rondes, et dans certains cas où on a des aérodomes à grand trafic il est rédigé toutes les demi-heures [1].

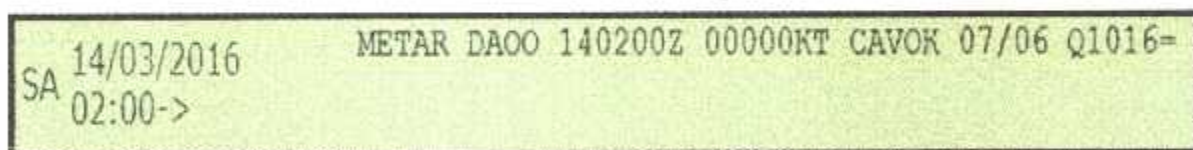
1.2.2 Contenu du METAR

Un message METAR peut comprendre les paramètres météorologiques suivants :

- Date/heure
- Aérodomne concerné
- Vent en surface
- Visibilité horizontale
- Météores nuages
- Température de l'air
- Température de point de rosée
- La pression QNH
- Eventuellement :
 - Cisaillement de vent
 - Météores significatifs récents
 - Etat des pistes [2]

1.2.3 Forme symbolique

La forme symbolique d'un METAR est représentée sur la figure ci-dessous :



SA 14/03/2016 METAR DAOO 140200Z 00000KT CAVOK 07/06 Q1016=
02:00->

Figure 1.1 : exemple d'un message METAR

Un message d'observation METAR doit contenir toutes les informations qui sont utiles pour l'exécution efficace des vols [1].

1.3 Le message TAF

1.3.1 Définition

C'est une prévision d'aérodomne ou TAF (en anglais Terminal Aerodrome Forecast ou bien Terminal Airport Forecast) est une prévision météorologique valide pour 6 à 30 heures pour

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

un aéroport et qui utilise un encodage similaire au format METAR. De plus, On distingue les TAF courts d'une validité de 9h00 et les TAF Longs (uniquement en métropole) d'une validité de 18h00.

La période couverte par ces prévisions dépend des heures d'utilisation de l'Aéroport, de son importance et de la longueur des vols qui s'y rendent, le tout servant à la planification pour les transporteurs aériens.

Tous les aéroports n'ont pas de TAF. C'est le cas général des petits A/D ou des A/D à usage local ou récréatif [3].

1.3.2 Contenu du TAF

Le message TAF contient :

- Vent en surface
- Visibilité dominante
- Phénomènes météorologiques
- Nuages ou visibilité verticale
- Changements significatifs prévus. [4]

1.3.3 Forme symbolique d'un TAF

```
FT 11/03/2016
17:00->
TAF DAOO 111700Z 1118/1218 36010KT 9999 SCT016
BECMG 1118/1120 06010KT 9999 SCT026
BECMG 1120/1122 VRB03KT
BECMG 1208/1210 30006KT-
```

Figure 1.2 : exemple d'un message TAF

Un message de prévision TAF doit contenir toutes les informations qui sont utiles pour l'exécution efficace des vols [2].

1.4 Utilité des messages METAR et TAF

Les messages METAR et TAF sont utilisés par les météorologistes, les pilotes, le personnel des services de contrôle de la circulation aérienne et les agents techniques d'exploitation, à des fins de surveillance, de planification de vol et de sécurité.

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

Aussi pour prendre conscience de l'évolution des conditions météo sur les aérodromes pour la période de réalisation des projets par exemple des projets de navigation, infrastructure...etc.

Ensuite, ils servent à estimer le report dans le temps du départ ou anticiper le retour en fonction des évolutions annoncées [5].

1.5 La température minimale et maximale

1.5.1 Définitions

Définition de la température minimale (abréviation TN) : C'est la température la plus basse observée au cours d'une période, plus exactement entre 18 heures U.T.C. la veille et 18 heures le jour même. Elle se produit le plus souvent vers le lever du jour ou dans l'heure qui suit.

Définition de La température maximale (abréviation TX) : C'est la température la plus élevée observée au cours d'une période, plus exactement entre 6 heures U.T.C. et le lendemain 6 heures. Elle se produit le plus souvent en cours d'après-midi.

Remarques : Les qualificatifs de minimum et de maximum ayant ainsi une signification bien précise en météorologie, il est préférable de les éviter pour désigner les températures respectivement la plus basse et la plus élevée relevées sur une carte [7].

1.5.2 Origines et caractéristiques

Origine : La température de l'atmosphère résulte d'un bilan énergétique complexe dans lequel interviennent le soleil, l'effet de serre et la chaleur propre de la Terre [8].

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

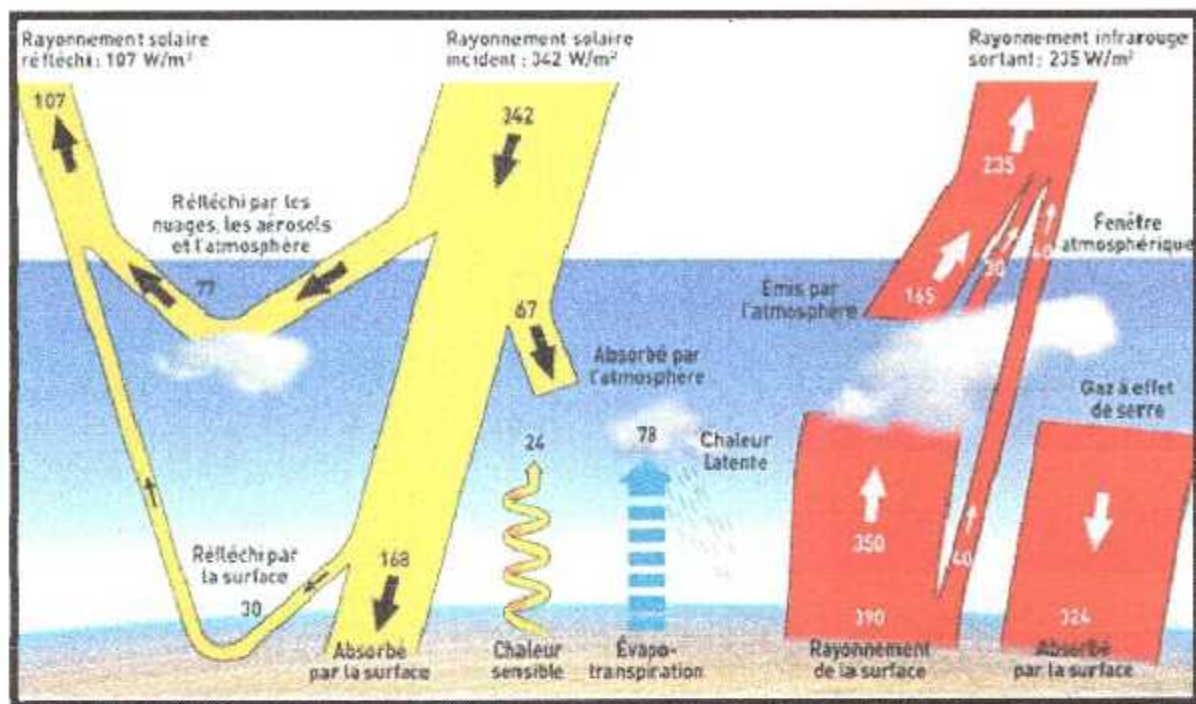


Figure I.3: Image illustrant l'origine de la chaleur d'où la température [3].

Pour la partie solaire, l'énergie lumineuse reçue par la Terre correspond à une puissance incidente $1,4 kW/m^2$ à la limite de l'atmosphère dont 65% (environ $1kW/m^2$) arrive jusqu'au sol alors que le reste est absorbé par l'atmosphère.

Interprétation de la figure : L'atmosphère est très transparente pour la lumière du Soleil : malgré la présence des nuages, près de 60 % de l'énergie lumineuse arrivant vers la Terre atteint la surface du globe, qui en réfléchit une faible partie. Globalement, la moitié de l'énergie solaire arrivant vers la Terre est absorbée par les continents et les océans qu'elle réchauffe. Une partie de cette chaleur est restituée, essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge. Certains gaz présents en faible quantité dans l'atmosphère (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, méthane) absorbent le rayonnement infrarouge : seulement 10 % du rayonnement émis par la surface s'échappe directement vers l'espace.

Caractéristiques : La température est très variable, au cours du temps et suivant les lieux. Les valeurs extrêmes enregistrées sont $58\text{ }^\circ\text{C}$ en Libye et $-88,3\text{ }^\circ\text{C}$ à Vostok dans l'Antarctique [9].

Variation diurne de la température : La différence entre le minimum et le maximum d'une journée est appelée amplitude diurne. Celle-ci varie en fonction du type de temps, de la saison, de la région, de l'altitude (l'amplitude croit lorsque la latitude diminue), et du relief environnant. La température minimale est généralement plus élevée lorsque le temps est couvert, et la maximale au contraire plus élevée par temps clair. Les nuages ont en effet

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

tendance à atténuer à la fois le refroidissement nocturne et le réchauffement diurne. L'amplitude est de ce fait normalement plus forte en été qu'en hiver (c.à.d. elle est réduite par la présence des masses nuageuses) L'amplitude est par ailleurs plus importante dans les vallées que dans les stations de haute altitude, et dans les régions continentales que maritimes. Même la proximité immédiate d'un lac est suffisante pour l'amoindrir [10].

La constante solaire : La constante solaire exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1 m² située à une distance de 1 ua (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère. La valeur de cette constante est de $1\,360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$... souvent résumé en $1,4 \text{ kW/m}^2$ [11].

1.5.3 Influence de la température minimale et maximale sur les aéronefs

Effet de la température maximale sur les A/C : Plus significative en été et peut engendrer une diminution de la masse volumique de l'air. Ce qui entraîne une dégradation des performances de l'avion, et parmi ces effets les plus néfastes [12], on cite :

- Diminution de la portance
- Augmentation de la vitesse propre de décrochage ;
- Augmentation de la distance de décollage et d'atterrissage ;
- Diminution de la puissance des moteurs ;
- Le taux de montée de l'avion est faible par rapport à une situation normale.

Effet de la température minimale sur les A/C : Plus significative en hiver et dangereuse pour un aéronef que se soit au sol ou en vol car ces basses températures engendrent le phénomène du givrage qui peut avoir des conséquences très sérieuses sur la cellule d'un avion [13], entre autres :

- diminution de la portance et une augmentation de la vitesse de décrochage : Cet effet est provoqué par une rupture de l'écoulement laminaire autour des ailes. Il est nécessaire de savoir que la vitesse de décrochage d'un avion givré est inconnue ;
- augmentation du poids et de la traînée, et donc augmentation de la consommation de carburant ;
- blocage partiel ou total des tubes de Pitot et des prises statiques, produisant des indications erronées des instruments.

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

1.6 La température de point de rosée T_d (Dew Point)

1.6.1 Définition

C'est la température à laquelle il faut refroidir une particule d'air pour qu'elle soit juste saturée à pression constante, plus la différence entre T et T_d est grande plus l'air est sec [14].

1.6.2 Calcul de la T_d

Le point de rosé n'est pas mesuré mais calculé à partir de la température et de l'humidité. Voici la formule de calcul de TD (Dew Point) nommée la formule d'Heinrich Gustav Magnus-Tetens:

$$T_r = \frac{b \times \alpha(T, RH)}{\alpha - \alpha(T, RH)} \quad [1]$$

Avec :

$$\alpha(T, RH) = \frac{\alpha \times T}{b + T} + \ln RH \quad [1]$$

$$\alpha = 17,27 \quad \text{et} \quad b = 237,7 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

T : température mesurée : $0^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$

RH : humidité relative : $0.01 (1\%) < RH < 1.00 (100\%)$

T_r : Température de point de rosée : $0^{\circ}\text{C} < T_r < 50^{\circ}\text{C}$

Remarque : Cette formule est appliqués seulement si les températures varient entre -20°C et 50°C

1.6.3 Diagramme de Mollier

Il permet de déterminer le point de rosée lorsque l'on connaît l'humidité relative et la température de l'air.

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

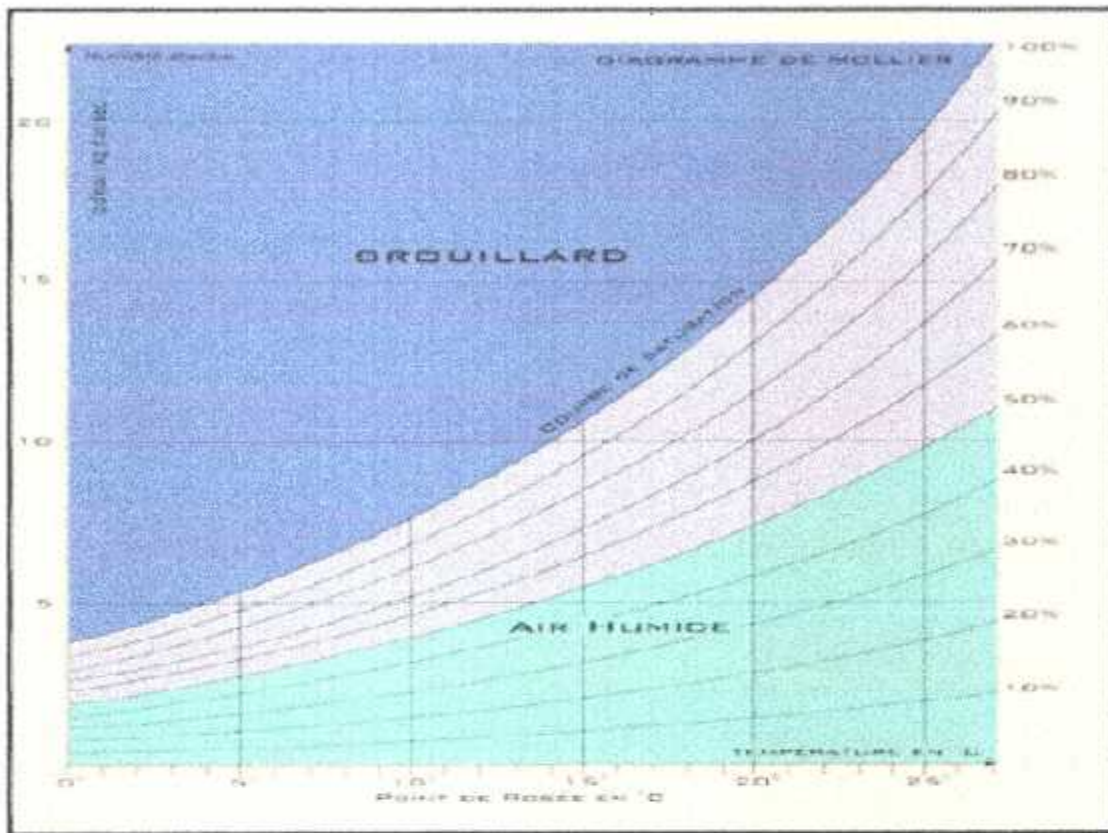


Figure I.4 : le diagramme de Mollier. [4]

I.7 L'humidité

I.7.1 Définition

C'est la quantité de la vapeur d'eau que peut contenir l'air [15].

I.7.2 Types

En météorologie, on quantifie l'humidité de l'air de deux manières : l'humidité absolue et l'humidité relative.

L'humidité absolue : L'humidité absolue est la masse de vapeur d'eau que contient l'air. Plus exactement c'est le nombre de grammes de vapeur d'eau contenus dans un kilogramme d'air humide (de 5 à 15 en moyenne) [16].

L'humidité relative : L'humidité relative représente le pourcentage de la vapeur d'eau que contient l'air, à une température donnée, par rapport à la quantité maximale qu'il peut contenir. Elle dépend de 2 paramètres : la température et la pression de l'air.

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

Lorsque ce type d'humidité atteint 100 %, on dit qu'il y a saturation ou que l'air est saturé en vapeur d'eau [17].

Dans le cas de la saturation on aura comme résultat une formation des nuages ou du brouillard selon les conditions.

L'humidité relative permet donc aux météorologues de prévoir la formation de nuages et même le type de nuages et les risques de précipitation [18].

1.7.3 Influence de l'humidité sur les aéronefs

Lorsque la saturation est atteinte, le risque de diminution de la visibilité et de formation des nuages s'accroît [19].

1.8 Le vent

Le vent est un déplacement d'air dû à des différences de pression entre les points de la surface de la terre, l'air se déplace des zones de haute pression vers des zones de basse pression où la trajectoire des particules d'air est parallèle aux isobares. Cette force entraîne l'air des hautes vers les basses pressions. Plus les différences de pression sont importantes et plus cette force est importante.

1.8.1 Caractéristiques

Le vent est exprimé par sa vitesse et sa direction.

La direction : Elle est donnée par rapport au Nord vrai (Nv), exprimée par un angle qui varie entre 0° et 360°.

La force : C'est la vitesse du vent qui correspond à la vitesse de déplacement de la masse d'air, elle est exprimée généralement en nœuds (KT) ou m/s [20].

1.8.2 Instruments de mesure

La direction du vent en surface est mesurée à l'aide d'une girouette, sa vitesse est déterminée à l'aide d'un anémomètre

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME



Figure 1.5 : Manche à air [5].

On peut obtenir une estimation de la direction du vent en surface, et très grossièrement de sa vitesse en observant le manche à air sur les pistes aéroportuaires, les fumées de cheminées, de feux domestiques... etc.

1.8.3 Effet du vent

La connaissance du vent au sol est nécessaire aux pilotes ainsi qu'au tant pour les manœuvres d'atterrissage ou de décollage, par contre la connaissance du vent en altitude est indispensable pour l'établissement des plans de vol et la détermination des réserves de carburant s'est en outre une donnée primordiale pour la navigation aérienne [21].

Le calcul de la force et de la direction du vent est très important lors de la planification d'un vol. La direction du vent déterminera quelle piste utiliser (les décollages et les atterrissages s'effectuent toujours face au vent) alors que la force affectera le temps que prendra le voyage, un vent arrière rendra l'appareil plus rapide alors qu'un vent de face le ralentira.

Les vents forts peuvent dévier les aéronefs de leur trajectoire. Ainsi, il n'est pas rare de voir un avion se dirigeant vers une direction x alors que le nez de l'appareil pointe dans une direction différente de quelques degrés. C'est ce qu'on appelle voler en crabé [22].

1.8.4 Les rafales de vent

Dans le cadre de notre étude, on désigne par rafale de vent le pic de vent enregistré sur une période bien déterminé.

Origine : Ces pic peuvent être à l'origine de :

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

- L'influence exercée par la nature et le relief du sol, sur le mouvement de l'air dans les couches inférieures de l'atmosphère.
- L'insolation du sol qui provoque le réchauffement par la base d'une masse d'air et donne naissance à des mouvements de convection.
- Le frottement résultant du mouvement relatif de deux couches d'air adjacentes au voisinage d'une surface de discontinuité [23].

En météorologie aéronautique, on parle de rafales quand la vitesse maximale du vent dépasse d'au moins 10 nœuds sa vitesse moyenne (calculée sur 2 minutes) [24].

1.8.5 L'influence des rafales sur les aéronefs

Les rafales imposent à l'avion des variations brutales de portance qui entraînent des modifications d'assiette accompagnées de montées ou de descentes [25].

1.9 Précipitations

Le terme précipitation désigne des cristaux de glace ou des gouttelettes d'eau qui, ayant été soumis à des processus de condensation et d'agrégation à l'intérieur des nuages, sont devenus trop lourds pour demeurer en suspension dans l'atmosphère et tombent au sol ou s'évaporent en virga (toute forme de précipitation n'atteignant pas le sol) avant de l'atteindre [26].

1.9.1 Formes de précipitation

Les précipitations peuvent être liquides ou solides :

1.9.2 La pluie

Origine : Eau produite par la condensation des nuages, qui tombe de l'atmosphère en gouttes sur la terre provenant des nuages plus épais et de plus grande étendue altostratus et nimbostratus, la taille d'une goutte d'eau dépend de la façon dont elle est formée et des différentes forces physiques qui vont s'appliquer sur elle, si la taille de celles-ci ne dépassent pas 1 mm ; on parlera alors de bruine.

La bruine est abrégée DZ dans la liste des abréviations METAR. Le nuage où elle se forme est un stratus bas.

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

La pluie verglaçante est de la pluie qui reste liquide malgré une température inférieure à 0 °C, les gouttelettes sont alors en état de surfusion et lorsqu'elles rencontrent un objet, elles gèlent instantanément causant du verglas. Le code METAR pour rapporter de la pluie verglaçante est FZRA [27].

1.9.3 L'influence de la pluie sur les aéronefs

a) Réduction de la visibilité :

- Lorsqu'on a une pluie faible on aura une visibilité de 7 à 8 km
- Lorsqu'on a une pluie modérée on aura une visibilité de 5 à 6 km
- Lorsqu'on a une pluie forte on aura une visibilité inférieure à 5 km
- Forte averse quelques centaines de mètres.

b) changement d'état de la piste (piste mouillée ou verglacée) : grande influence sur la distance des décollages et atterrissages.

c) cisaillement de vents verticaux : dans leur chute les gouttes d'eau entraînent les molécules d'air créant un courant vertical dirigé vers le bas, celui-ci sera intense et pourra entraîner des cisaillements des vents verticaux qui sont des générateurs de turbulence et présentent un danger pour l'aéronautique.

d) risque d'absorption par les réacteurs de grande quantité d'eau lors des traversées d'une zone de précipitation intense, il peut résulter l'extinction des moteurs [28].

1.10 Neige

La neige est une forme de précipitation de type solide, constituée de glace cristallisée et agglomérée en flocons pouvant être ramifiés d'une infinité de façons. Puisque les flocons sont composés de petites particules, ils peuvent avoir aussi bien une structure ouverte et donc légère qu'un aspect plus compact voisin de celui de la grêle, même si celle-ci n'a rien à voir dans sa formation [29].

1.10.1 L'influence de la neige sur les aéronefs

La neige tombée sur un aéronef au sol constitue une couche qui trouble notablement l'écoulement aérodynamique et alourdit l'avion.

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

Après le décollage et lorsque l'on monte au-dessus du niveau de l'isotherme 0°C, le dépôt de neige mouillée se prend en un bloc de glace qui bloque complètement les commandes.

En vol, par chute de neige les flocons ne se collent généralement pas sur la cellule. Donc ne forment pas de dépôt ayant l'aspect de givrage. Par contre cette chute diminue notablement la visibilité, qui est toujours inférieur à 5km et peut tomber à 100 ou 200m [30].

1.11 La visibilité horizontale

C'est la plus grande distance à laquelle on peut voir, à l'horizontale, dans une direction donnée, mesurée par référence à des objets ou des sources lumineuses dont la distance est connue [31].

1.11.1 Types de visibilité existante

Dans notre cas on évalue la visibilité horizontale qui est élaboré par AROME, en plus de ce type de visibilité on a d'autres types importants mais indisponible pour notre étude, ils sont les suivants :

a. Visibilité dominante : la visibilité au niveau du sol qui est commune à la moitié ou plus de l'horizon.

b. Visibilité verticale : la plus grande distance à laquelle on peut voir en regardant vers le haut dans une couche dont la base est à la surface, comme le brouillard ou une chute de neige.

c. Visibilité oblique : visibilité obtenue en regardant vers l'avant et vers le bas depuis le poste de pilotage d'un avion.

d. Visibilité en vol : intervalle de visibilité moyen, à un moment quelconque, depuis le poste de pilotage d'un avion en vol [32].

1.11.2 Les phénomènes troublants la visibilité

La visibilité peut être réduite sous l'influence de l'un de ces phénomènes suivants :

a) *La brume* : Représente la suspension dans l'atmosphère de microscopiques gouttelettes d'eau, réduisant la visibilité horizontale à des valeurs comprises entre 1 et 5km [33].

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

b) *Le brouillard* : Désigne la suspension dans l'atmosphère de petites gouttelettes d'eau réduisant la visibilité horizontale à moins de 1km [34].

c) *La brume sèche* : Fines particules de poussière et de pollution en suspension dans l'atmosphère suffisamment nombreuses pour donner à l'œil un aspect opalescent et une visibilité inférieure à 5km. Elle se distingue du brouillard par sa teinte bleuâtre ou jaunâtre [35].

1.11.3 Influence de la réduction de la visibilité sur l'A/C

Perte de repères de cheminement pour les vols IFR et VFR [36].

1.12 La Pression atmosphérique

C'est le poids de la colonne d'air du point de mesure jusqu'à une altitude infinie, résulte des chocs des molécules d'air entre elles et avec les objets dans l'atmosphère, un paramètre fondamental en météo pour prévoir le temps qu'il fera.

La pression atmosphérique se mesure surtout à l'aide d'un baromètre, d'un hypsomètre ou d'un altimètre, dans le système international d'unités, la pression se donne en Pascal (pa).

Dans l'aéronautique ce paramètre est pris en compte dans l'utilisation des instruments de bord tels que : altimètre, anémomètre et variomètre [37].

1.12.1 Effet de la pression sur un aéronef

Le calage altimétrique est souvent désigné par la pression atmosphérique pour le choix du niveau de vol (FL) et le maintien d'une pressurisation cabine adaptée.

Donc pour une pression donnée erronée on a un faux niveau de vol, ce cas est plus critique pour la phase d'atterrissage, alors ici la tour de control doit fournir au pilote commandant de bord une pression exacte dans le cas échéant c'est la catastrophe [38].

1.13 La nébulosité

Fraction de ciel couverte par des nuages, quels qu'ils soient, à un moment donné et sur une station déterminée, exprimée en octas (divisé en 8) [39].

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

Tableau I.1 : Tableau illustrant la représentation de la nébulosité en fonction de son unité [1] :

Termes utilisés	Partie du ciel non visible du fait de la présence de nuages (en octas)
Ciel serein	0
Légèrement nuageux	1 à 2
Partiellement nuageux	3 à 5
Très nuageux	6 à 7
Couvert	8

1.14 Le nuage

Un nuage est un hydrométéore, formé d'un ensemble de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace en suspension dans l'air. L'aspect du nuage dépend de la lumière qu'il reçoit et des particules qui le constituent. La couleur et l'éclat des nuages sont dus à la diffusion des rayons lumineux provenant du soleil et de la lune aussi bien que du ciel et du sol [40].

Types de nuage : On peut faire la classification des nuages selon la forme, l'aspect et l'altitude de ces nuages. La partie de l'atmosphère dans laquelle on observe habituellement les nuages (la troposphère) a été divisée verticalement en trois étages appelés respectivement : étage supérieur, étage moyen et étage inférieur, chaque étage est défini comme l'ensemble des niveaux auxquels certains genres de nuages apparaissent presque exclusivement. Les étages se chevauchent quelque peu et leurs limites varient avec la latitude où on a 10 genres des nuages [41].

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

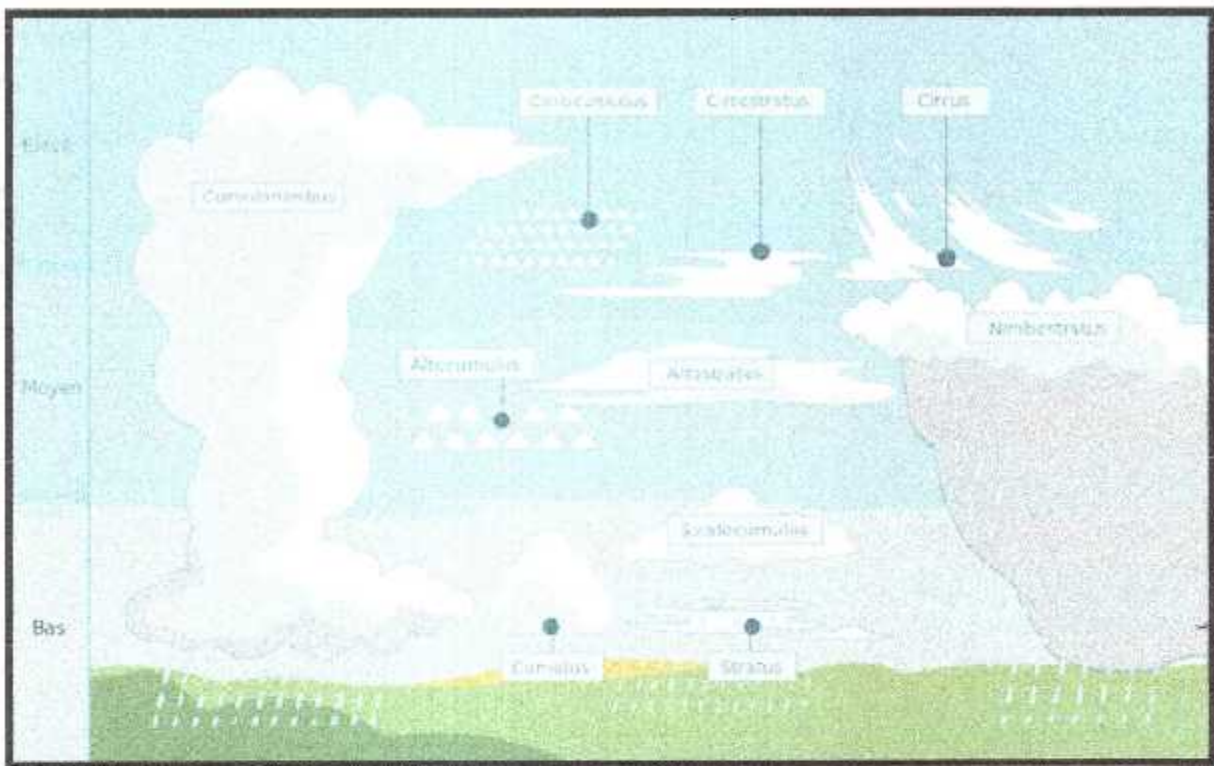


Figure 1.6 : Figure illustrant les différents types de nuages suivant l'altitude [6].

1.14.1 Evaluation de la nébulosité

Elle est exprimée par l'évaluation et hauteur de base des nuages.

a) Evaluation des nuages

L'estimation de la nébulosité est visuelle [42]

- Ciel clair 0 octas SKC (skyclear)
- FEW 1 à 2 octas quelques nuages
- SCT 3 à 4 octas nuages espacés- épars (SCaTtered)
- BKN 5 à 7 octas nuages fragmentés (BroKeN)
- OVC 8 octas ciel couvert (OVerCast)
- VV/// ciel invisible

b) Hauteur

L'estimation de la hauteur est visuelle avec repères de reliefs, aussi elle peut être mesurée à l'aide des ballons ou télémètres [43].

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

1.14.2 Base des nuages

La base des nuages diffère selon leurs types car il existe dix genres, classés en fonction de leur altitude selon les catégories suivantes:

- A l'étage supérieur (de 5 à 12 km d'altitude), on retrouve le cirrus, le cirrocumulus et le cirrostratus, composés de cristaux de glace
- A l'étage moyen (de 2 à 7 km d'altitude), l'altocumulus et l'altostratus
- A l'étage inférieur (du sol à 2000 m d'altitude), le stratus et le stratocumulus
- Le nimbostratus, le cumulus et le cumulonimbus sont des nuages à développement vertical important et occupent donc plusieurs "étages" [44].

On peut estimer la hauteur de base du nuage en utilisant la formule suivante :

$$H \text{ (ft)} = 400 * (T - TD)$$

T : température de l'air

TD : température de point de rosée

Tableau 1.2 : Tableau représentant les types de nuages en fonction de leurs hauteurs [2].

Type de nuage	Hauteur min (ft)	Hauteur max (ft)
Cirrus	20000	40000
Cirrocumulus	20000	40000
Cirrostratus	20000	40000
Alto cumulus	8000	15000
Altostratus	7000	20000
Nimbostratus	4000	25000
Stratocumulus	1000	7000
Stratus	1000	1500
Cumulus	1500	6000
Cumulonimbus	1000	10000

1.14.3 Effet de la nébulosité

Lorsqu'on parle de la nébulosité, on sous-entend nuages. Les nuages influent grandement sur la visibilité horizontale et verticale pour un avion en vol, de plus des différents

LES ELEMENTS DE BASE NECESSAIRES POUR LE CONTROLE DU PRODUIT AROME

caractéristiques physiques de chaque nuages qui contribuent a la dégradation des performances de vol tel que le givrage et les dépôt de glace sur la cellule [45].

CHAPITRE II

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

CHAPITRE II

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

II.1 Définition de la PNT

La prévision numérique du temps est une application de la météorologie et de l'informatique, c'est la simulation sur un ordinateur de l'évolution de l'atmosphère réelle en reposant sur des équations mathématiques offrant une approximation plus proche en utilisant un modèle numérique de prévision du temps [53].

II.2 Généralités sur la PNT

La prévision numérique du temps repose sur l'application des lois fondamentales de la physique (mécanique des fluides) pour prévoir les états futurs de l'atmosphère.

Pour obtenir une bonne prévision, il faut aussi tenir compte de phénomènes qui sont plus petits que la résolution du modèle (phénomènes sous maille). La représentation de l'influence moyenne à grande échelle des phénomènes de la petite échelle est appelée paramétrisation.

Le paramétrage des phénomènes physiques ne compense pas complètement les limitations imposées par un espacement trop grand de la maille des modèles. Le choix et l'ajustement des schémas de paramétrisation a un impact important sur la qualité des prévisions

La stratégie de base en modélisation numérique consiste à :

- 1- Formuler des hypothèses sur la nature du milieu atmosphérique et son évolution
- 2- Ces hypothèses sont traduites en équations mathématiques avec différentes interactions en jeu dans l'évolution de l'atmosphère ;
- 3- On aura un système d'équations différentielles non linéaires (on ne connaît pas la solution analytique de ce système), les équations mathématiques ainsi posées sont trop complexes pour être résolues avec exactitude en utilisant des approximations numériques fournissent des systèmes d'équations algébriques que l'informatique permet de résoudre.
- 4- On cherche une solution approchée ;

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

5- On utilise un algorithme en connaissant l'état initial sur les points de grille. [54]

II. 3 Principe de la prévision numérique du temps

La préparation d'une prévision consiste en premier lieu à établir une banque de données, à cet effet les observations en surfaces et en altitude des stations météorologiques du monde entier sont emmagasinées dans les ordinateurs, y sont ajoutés les renseignements issus de satellites et de navires ou bouées en mer, la prévision quotidienne de base est réalisée à partir des observations effectuées à 0 heure UTC

Lorsque la banque de données est établie, l'ordinateur doit, pour travailler de façon cohérente, créer une grille régulière de données, à partir des observations réelles, irrégulièrement réparties.

Il utilise pour cela plusieurs méthodes, l'espacement des point de grille se resserre peu à peu au fur et à mesure des progrès du calcul, ce qui favorise la qualité du produit fourni.

C'est alors seulement que commence la prévision elle-même qui n'est pas du tout basée sur des statistiques ou de la climatologie, mais elle est élaborée à partir de formules de la mécanique des fluides telles que celles dérivant de la loi fondamentale de la dynamique, de la loi fondamentale de la thermodynamique ainsi que de la loi fondamentale des gaz parfait [55].

II.4 Formules mathématiques de base utilisées pour la prévision numérique du temps

a) *La loi fondamentale de la dynamique* [2]

$$[1] \quad F = ma$$

F : la force

m : la masse (Kg)

a : l'accélération (m/s)

b) *La loi fondamentale de la thermodynamique qui est pour la conservation de l'énergie* [2]

$$Q = U_2 - U_1 + W$$

Q : la quantité de la chaleur reçue par le système.

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

$U_2 - U_1$: correspond à l'accroissement de l'énergie U du système entre l'état initial 1 et l'état final 2.

W : est le travail fourni au milieu extérieur

c) *La loi fondamentale de la relation des gaz parfait* [2]

$$PV = nRT$$

P : la pression

V : le volume (m³)

n : la quantité de matière (nombre de moles)

R : constante des gaz parfaits vaut 8,3144621 J.mol⁻¹.K⁻¹

T : température.

d) *L'équation du mouvement* [2]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - f v + \frac{\partial \varphi}{\partial x} + R_d T_v + \frac{\partial \ln P_s}{\partial x} = F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + \frac{\partial \varphi}{\partial y} + R_d T_v + \frac{\partial \ln P_s}{\partial y} = F_y$$

e) *L'équation de l'hydrostatique* [2]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} + \frac{R_d T_v}{\sigma} = 0$$

f) *L'équation de thermodynamique* [2]

$$\frac{dT_v}{dt} - \frac{R_d T_v}{c_p} \left[\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{d \ln P_s}{dt} \right] = F_T$$

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

g) *L'équation de continuité* [2]

$$\frac{d \ln P_s}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 ; \frac{dq}{dt} = F_q$$

Avec : Avec : $\sigma = p / p_s$

p = pression

Phi = hauteur géopotentielle

R = constante des gaz

T = température

x = coordonnée dans la direction ouest-est.

y = coordonnée dans la direction sud-nord.

F = forçages.

t = temps

Rho = densité de l'air.

q = humidité spécifique.

V = vecteur vent horizontal.

u = composante ouest-est du vent.

v = composante sud-nord du vent.

II.5 Les étapes de la PNT

Pour faire la prévision numérique du temps il faut passer par 3 étapes essentielles [56] :

II.5.1 Observation (la collecte des données)

Prendre des échantillons de l'état actuel de l'atmosphère (température, nuages, humidité, visibilité, ...) à partir de plusieurs sources.

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

II.5.2 Initialisation/assimilation

Une fois les données sont collectées, on fait la vérification de la qualité de ces données pour éliminer les erreurs puis elles sont traitées pour faire l'analyse et pour les intégrer sur la grille du modèle.

II.5.3 Modélisation numérique

La modélisation numérique doit prendre en compte les lois de conservation de l'atmosphère relatives à la quantité de mouvement, à la masse, au contenu en eau et à l'énergie.

On fait la projection des paramètres prévus en temps réel sur la grille du modèle, le modèle utilisé est basé sur les lois de la mécanique de fluide, les coordonnées hybrides (mixte entre hauteur et sigma) et la résolution numérique fait par la discrétisation de l'espace (pt de grille et du temps).

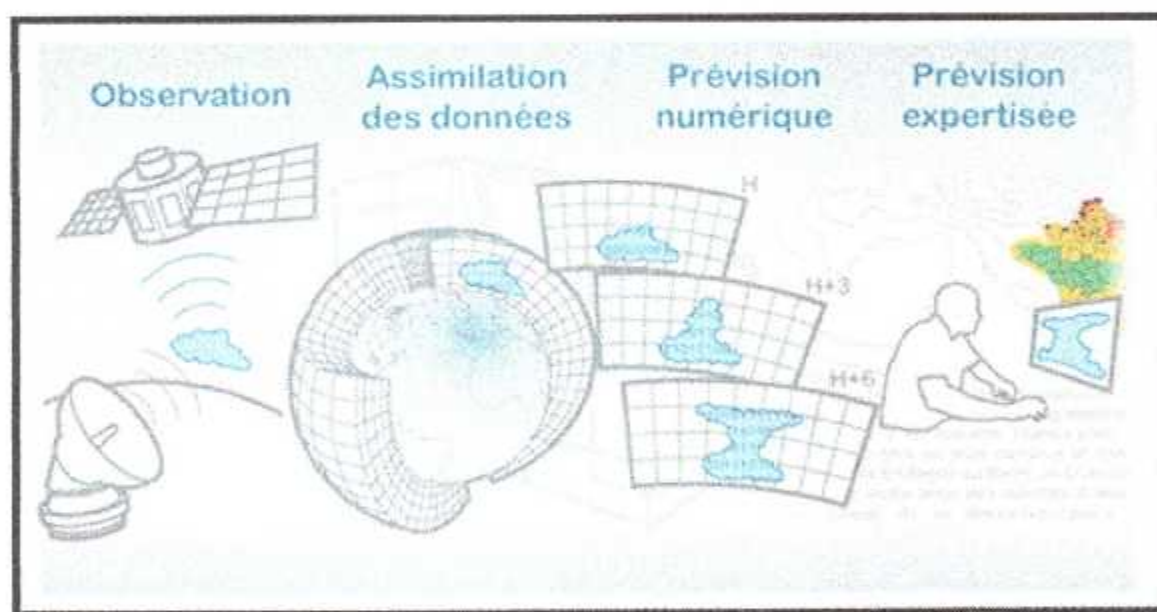


Figure II.1 : schémas montrant les étapes de la PNT [7]

II.6 Utilité de la PNT

La PNT peut servir, en recherche, à faire des études de cas en « vase clos », pour étudier une facette ou un comportement particulier de l'atmosphère ou tester des améliorations au modèle en fonction des cas théoriques ou pratiques dont on connaît d'avance les résultats. Le modèle de PNT devient ainsi un laboratoire virtuel pour l'étude de l'atmosphère et l'amélioration des prévisions. PNT permet d'améliorer la précision des prévisions [57].

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

II.7 L'Echelle météorologique

Le nouveau produit AROME travaille avec l'échelle synoptique.

Tableau II.1 : Tableau montrant les différentes échelles utilisées en météorologie [3].

Echelle	Dimension	Durée	Phénomènes
PLANETAIRE	10000 Km	Semaine-mois	Circulation de Hadley, régimes de temps
SYNOPTIQUE	1000Km et plus	Jour-semaine	Dépression, anticyclones, cyclones tropicaux
MESOECHELLE	10Km à 100Km	Heure-jour	Vents régionaux, lignes de grain
AEROLOGIQUE	100m à 10Km	Minute-heure	Convection, orages isolés, tornades
MICRO-ECHELLE	1m	Seconde-minute	Tourbillons de poussière

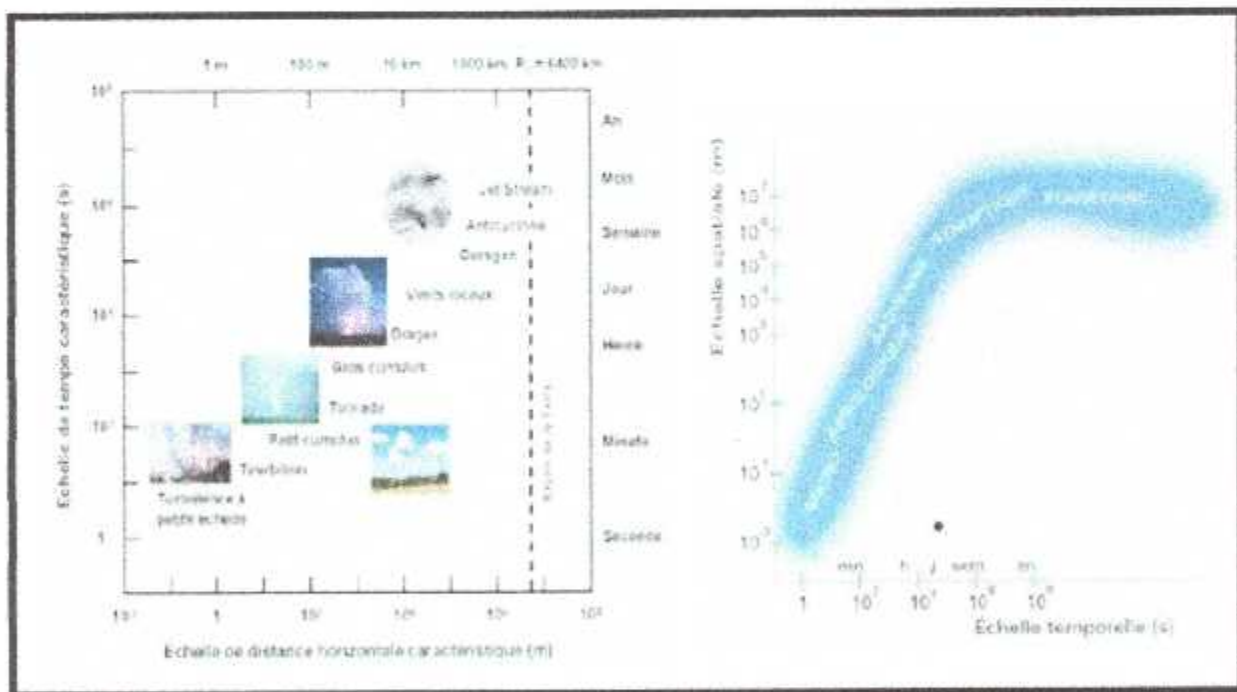


Figure II.2 : A gauche, on a la représentation de l'échelle de temps caractéristique en fonction de l'échelle de distance horizontale caractéristique ; à la droite on trouve la représentation des différentes échelles météorologiques en fonction de l'échelle temporelle et spatiale [8].

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

II.8 Les modèles opérationnels de la PNT disponibles à l'ONM

Le système de prévision numérique de l'ONM repose sur l'exploitation d'une chaîne de modèles complémentaires. Le modèle ALADIN et le modèle à maille fine AROME qui sont tous les deux alimentés par les simulations issues du modèle global ARPEGE de METEO FRANCE.

II.8.1 Le modèle AROME

Le modèle AROME (Application of Research to OperationatMEscale) est le modèle de prévision numérique du temps à maille fine exploité en opérationnel par l'ONM depuis Mai 2014 pour la modélisation à l'échelle fine avec une résolution horizontale de 3km et une résolution verticale de 41 niveaux, il est couplé à ALADIN toutes les heures avec 48 échéances [58].

Il a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux tels que les fortes pluies méditerranéennes, les orages violents, le brouillard ...etc.

Physique et dynamique du modèle AROME : Les paramétrisations physiques du modèle sont en majeure partie héritées du modèle de recherche Més0-NH, alors que la partie dynamique est une adaptation pour la fine échelle du noyau dynamique du modèle ALADIN.

AROME a bénéficié de développements réalisés par des laboratoires universitaires et par le consortium ALADIN regroupant 16 services météorologiques européens (Algérie, Autriche, Belgique, Bulgarie, Croatie, République Tchèque, France, Hongrie, Maroc, Pologne, Portugal, Roumanie, Slovaquie, Slovénie, Tunisie, Turquie).

AROME utilise la dynamique non hydrostatique (NH) de l'ALADIN, il fournit deux prévisions par jours, il est alimenté par le modèle de grande échelle ALADIN et qui est lui aussi alimenté par le modèle global ARPEGE [59].

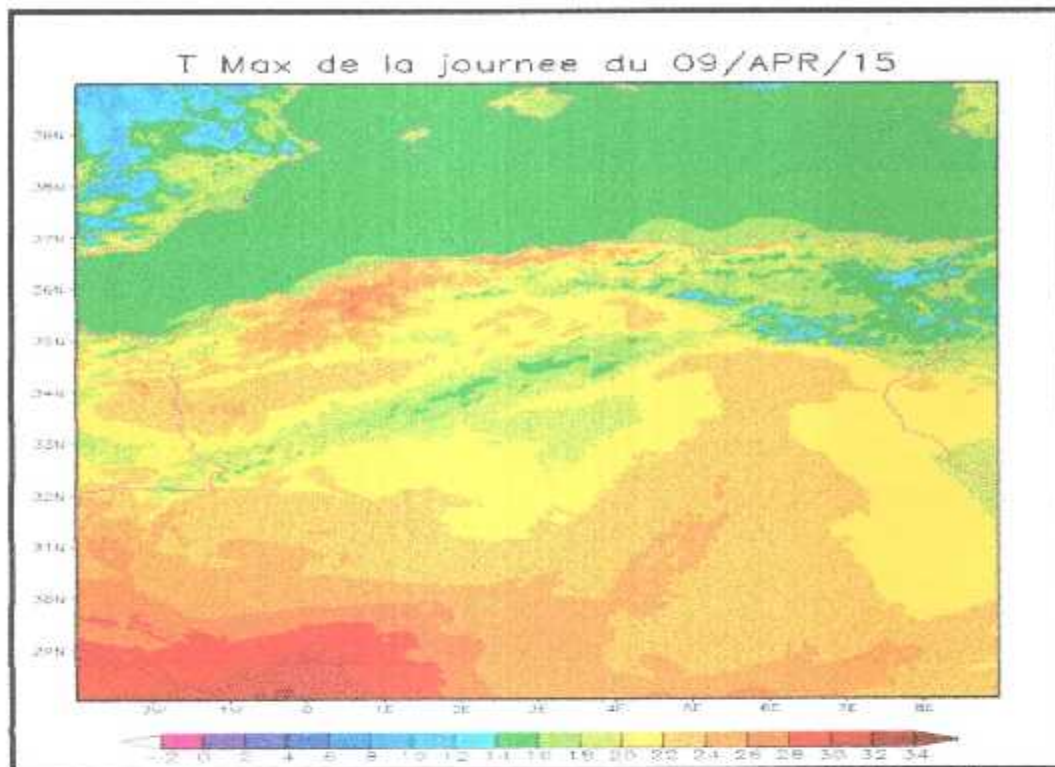


Figure II.3 : Domaine AROME/ Nord d'Algérie [9].

Pourquoi un nouveau produit AROME : Le modèle AROME a une résolution kilométrique. L'intention d'AROME est bien de compléter Arpège et ALADIN, et non de les remplacer.

L'apport le plus attendu d'Arôme est la capacité à bien prévoir les précipitations méditerranéennes intenses de type cévenol, il fournit des structures précipitantes d'intensité plus proche de la réalité [60].

II.8.2 Le modèle ALADIN

ALADIN : Air Limitée Adaptation dynamique Développement International est basé sur les équations primitives hydrostatiques utilisant une décomposition horizontale spectrale en série bi-Fourier et une coordonnée hybride (η) sur la verticale [14] et [61].

Ce modèle dispose d'une résolution horizontale de 8 km avec 70 niveaux centré sur l'Algérie. Couplé avec ARPEGE toutes les 3 heures. Il permet de prévoir le temps sur un domaine limité jusqu'à trois jours d'échéance (72 heures) [62].

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

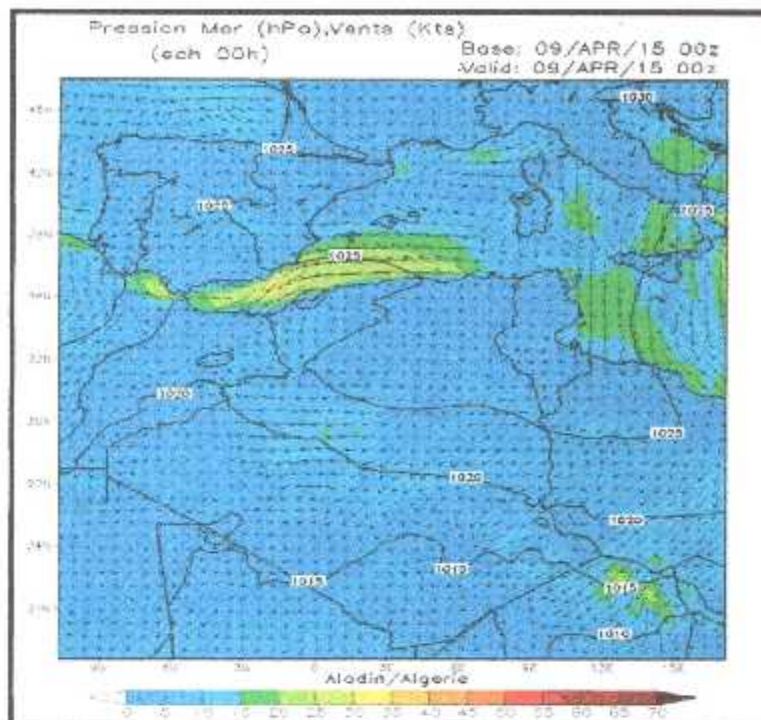


Figure 11.4 : Domaine ALADIN/Algérie [10].

11.8.3 le modèle ALADIN SABLE

ALADIN-SABLE est une version d'ALADIN qui permet la prévision du cycle atmosphérique des poussières désertiques. ALADIN-SABLE est un couplage entre le modèle atmosphérique ALADIN et le schéma de surface SURFEX (SURFace EXternalisée). Ce modèle a une maille fixe de 14 Km centrée sur l'Algérie, avec 70 niveaux de 17m jusqu'à 67 Km, il est couplé à ARPEGE toutes les 3 heures avec 48 d'échéance.

Cette version est le fruit de coopération entre l'Office National de Météorologie et Météo France. Depuis l'acquisition de l'ONM d'un supercalculateur, cette version est devenue opérationnelle à l'ONM.

ALADIN_DUST permet la prévision des concentrations de poussière désertique, les visibilité horizontales, les flux d'émission de poussière et les épaisseurs optiques. Ces paramètres sont essentiels pour les prévisions d'aérodrome (TAF Terminal Aerodrome forecast) notamment sur les régions Sahariennes [63].

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

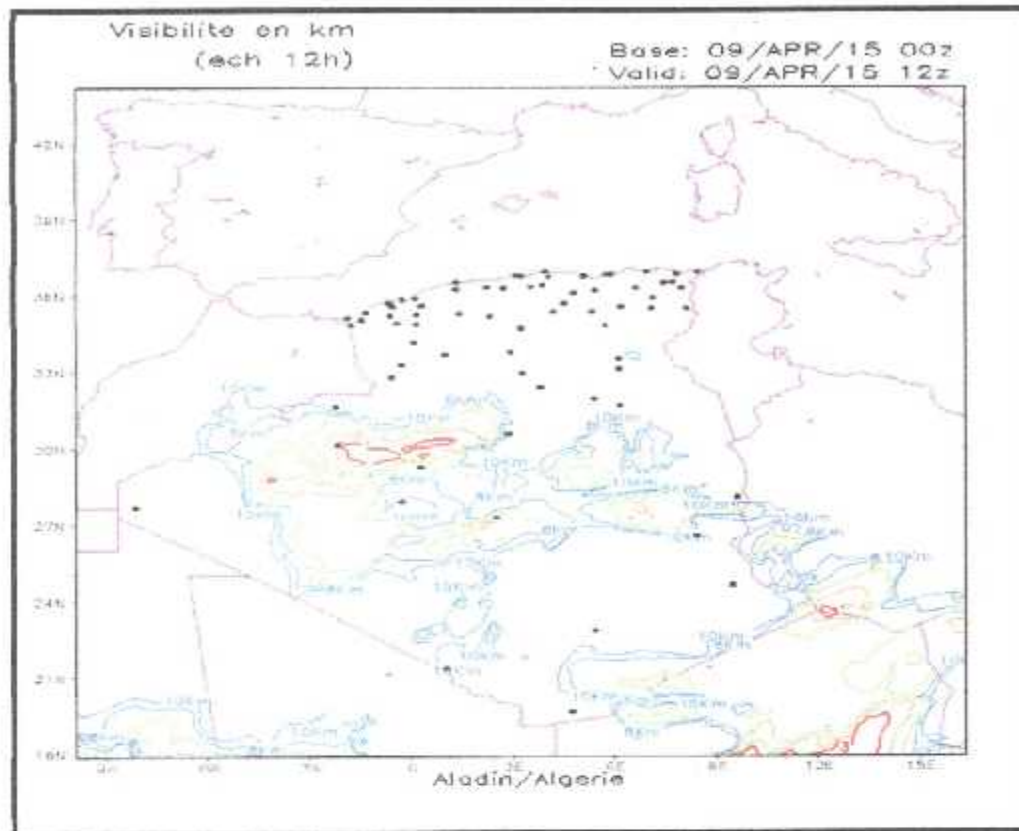


Figure II.5 : Domaine ALADIN-sable/Algérie [11].

II.8.4 Le modèle: ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle)

Le modèle de prévision numérique globale de temps, Arpège, est un élément essentiel pour la prévision opérationnelle du temps à Météo-France. Ce logiciel intègre la majorité des applications nécessaires à la prévision numérique opérationnelle permettant ainsi d'assurer une stricte cohérence des calculs effectués dans l'analyse, le modèle et les post-traitements.

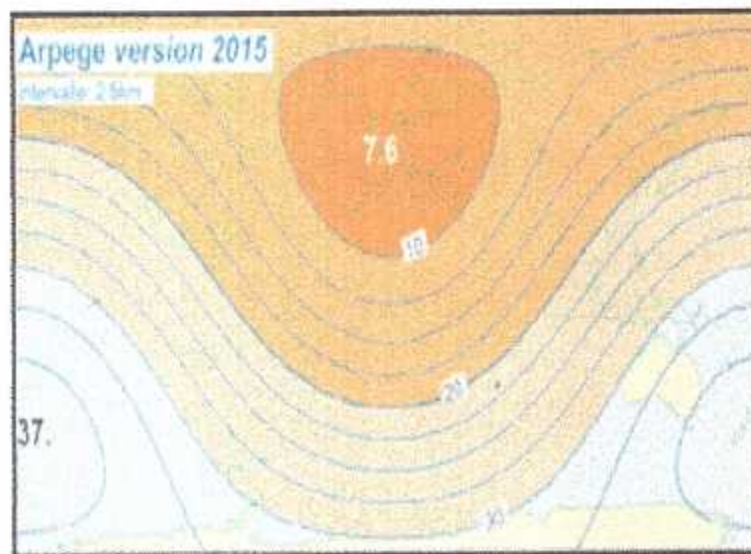


Figure II.6 : Domaine ARPEGE/ Algérie (cercle en jaune) [12].

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

Il est utilisé pour prévoir les évolutions des phénomènes de grande échelle (dépressions, anticyclones) et pour la prévision jusqu'à 5 jours d'échéance. Dans le monde, les grands services météorologiques nationaux comme Météo-France comparent en permanence les qualités des prévisions issues de leurs modèles globaux de prévision numérique du temps. Le système Arpège figure toujours aux tout premiers rangs mondiaux.

Quatre prévisions par jour sont réalisées à 0h, 6h, 12h et 18h TU. Les prévisions Arpège servent de conditions limites latérales aux modèles de prévision aire-limitée à plus fine résolution Aladin. Les prévisions sont interpolées sur 5 grilles horizontales régulières en latitude/longitude, dont une grille de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ sur un domaine Europe-Atlantique et une grille $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ sur le globe, et sur des niveaux verticaux variés (pression, hauteur, iso PV, etc.) [64].

Nous nous intéresserons dans notre étude aux deux modèles de prévision AROME et ARPEGE car les TAF envoyés depuis le centre de prévision météorologiques de Dar el Beida sont des prévisions issues du modèle global ARPEGE tandis que les nouveaux TAF élaborés automatiquement sont établis à partir du modèle AROME.

Pour évaluer la qualité de chaque prévision, des contrôles continus du comportement du modèle par rapport aux cas observés ou par rapport à d'autres modèles doivent être établis quotidiennement afin de le maintenir à jour.

Le contrôle des prévisions est un problème délicat, puisque parfois interprétable ; il faut donc bien choisir les paramètres à contrôler et bien analyser les observations [65].

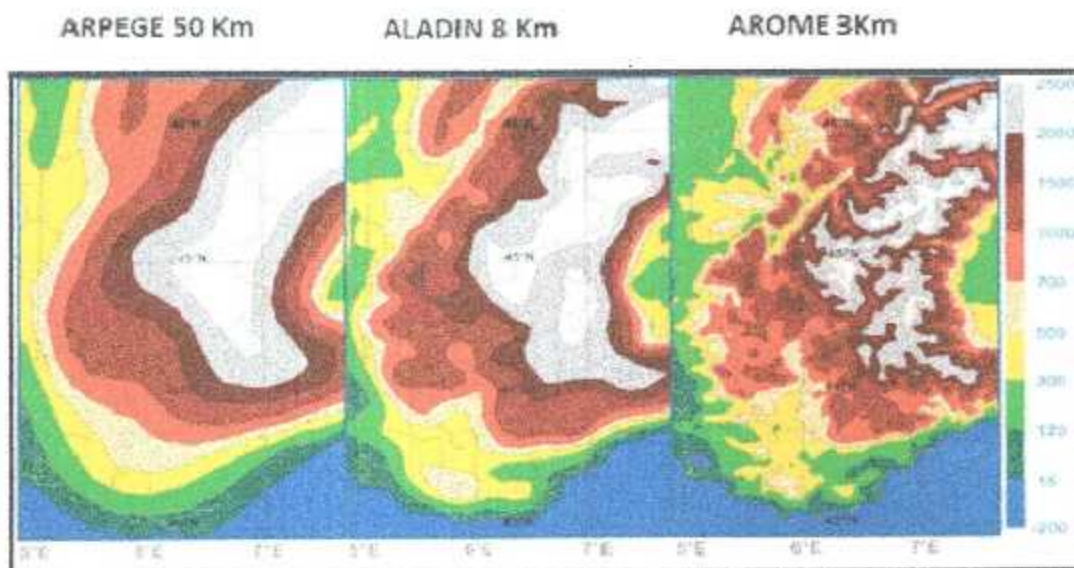


Figure II.7 : Les orographies respectives, sur le domaine alpin, des modèles ARPEGE (à gauche), ALADIN (au milieu) et AROME (à droite) [13].

II.8.5 Le couplage entre modèles

Comme l'atmosphère locale, un modèle régional répond à un ensemble de facteurs, qui doivent tous être soigneusement modélisés afin de produire de bonnes prévisions [66].

Le schéma contre résume les principales sources d'informations nécessaires à la prévision d'Arome :

- le forçage latéral par la prévision numérique d'un modèle d'atmosphère à plus grande échelle (Arpège, Aladin ou IFS) ;
- le forçage en dessous par les conditions de surface, sur les continents et les océans, dont les paramètres évolutifs (neige, banquise, végétation, humidité du sol...) doivent être convenablement initialisés ;
- l'état initial de l'atmosphère du modèle Arome, à produire grâce à une assimilation de données, elle-même couplée à une assimilation à grande échelle.

PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

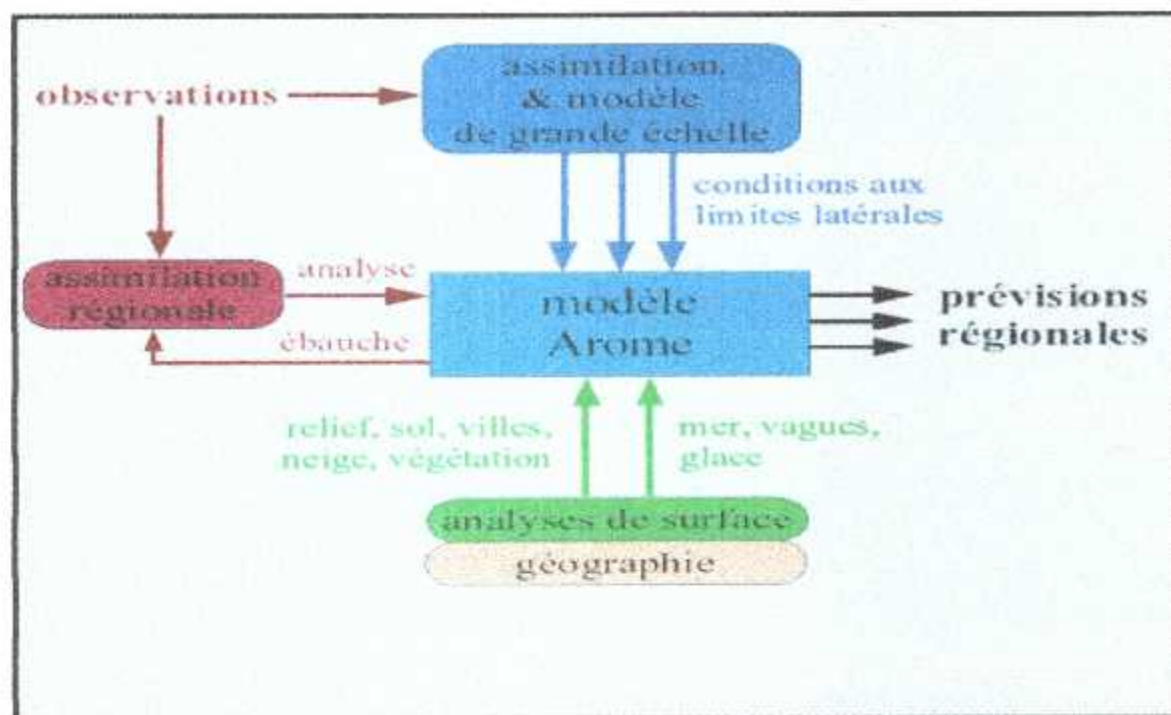


Figure II.8 : Les sources d'informations nécessaires à la prévision d'AROME [14].

En option, le modèle peut être interactivement couplé à l'évolution de modèles d'océan superficiel, de poussières, chimie et/ou aérosols, en plus de ses paramétrisations physiques internes (rayonnement, turbulence, flux de surface, microphysique nuageuse, convection sous maille).

CHAPITRE III

OUTILS ET METHODOLOGIE

Chapitre : III

Outils et méthodologie

III.1 Introduction

Dans notre étude « prévisions météorologiques pour les aérodrômes avec le modèle AROME » on va traiter plusieurs paramètres météorologiques à savoir la vitesse et la direction du vent, la température de l'air, la température de point de rosée, la pression atmosphérique, et la hauteur de la base des nuages. A noter que ces éléments sont indispensables pour le pilote pendant les phases critiques du vol (Décollage et atterrissage).

Dans ce chapitre, nous présenterons notre méthodologie pour l'élaboration et la validation des prévisions AROME destinées pour les aérodrômes.

III.2 Procédure suivie pour l'évaluation des prévisions AROME

III.2.1 Choix des sites d'études

Cette partie comportera un bref aperçu des aérodrômes positionnés dans le domaine AROME auxquels notre analyse se focalisera, et qui ont été sélectionnée selon le critère de la densité du trafic aérien.

III.2.1.1 L'Aérodrome d'Alger (DAAG)

Alger est bâtie sur les contreforts des collines du Sahel algérois [47], bénéficie d'un climat méditerranéen d'où le climat de l'Aéroport HOUARI BOUMEDIENNE. Elle est connue par ses longs étés chauds et secs. Les hivers sont doux et humides, la neige est rare mais pas impossible. Les pluies sont abondantes et peuvent être diluviennes. Il fait généralement chaud surtout de la mi-juillet à la mi-août.

En raison de sa situation géographique, Alger est fortement soumise aux risques d'inondation à cause du ruissellement des eaux de pluie des hauteurs de la ville jusqu'aux quartiers situés en contrebas [48].

Les phénomènes météorologiques les plus fréquents observés sur les pistes d'Alger sont : les rafales de vent, brouillard.



Figure III.1 : Aéroport d'Alger

III.2.1.2 L'Aérodrome de Constantine (DABC)

L'Aéroport de Constantine Mohamed Boudiaf est situé à 9km au sud de la ville [49] qui s'étale sur un terrain caractérisé par une topographie très accidentée, marquée par une juxtaposition de plateaux, de collines, de dépressions et de ruptures brutales de pentes donnant ainsi un site hétérogène.

Elle s'étend sur un plateau rocheux à 649 mètres d'altitude, coupé des régions qui l'entourent par des gorges profondes où coule l'oued Rhummel qui l'isole, à l'est et au nord, des montagnes : Ouahch et Sidi Meid, dominant de 300 mètres, à l'ouest, le bassin d'El-Hamma.

Le climat de la wilaya de Constantine est méditerranéen d'où le climat de l'aéroport de Mohamed Boudiaf, La moyenne pluviométrique varie de 500 mm à 700 mm par an. Cet aéroport est atteint par les rafales de vent suite à son horographie [50].

Les phénomènes météorologiques les plus fréquents observés sur les pistes de Constantine sont : les rafales de vent d'où le cisaillement de vent, brouillard.



Figure III.2 : Aéroport de Constantine

III.2.1.3 L'Aérodrome d'ORAN (DAOO)

L'aéroport international d'Oran - Ahmed Ben Bella est anciennement connu sous le nom d'Aéroport d'Oran - Es Sénia, est un aéroport algérien, situé sur la commune de Es Sénia à 12 km au sud d'Oran. C'est le second plus important aéroport algérien après l'aéroport d'Alger - Houari Boumediene.

Oran bénéficie d'un climat méditerranéen classique marqué par une sécheresse estivale, des hivers doux, un ciel lumineux et dégagé. Pendant les mois d'été, les précipitations deviennent rares voire inexistantes, et le ciel est lumineux et dégagé.

L'anticyclone subtropical recouvre la région oranaise pendant près de quatre mois. En revanche la région est bien arrosée pendant l'hiver. Les faibles précipitations (420 mm de pluie) et leur fréquence (72,9 jours par an) sont aussi caractéristiques de ce climat.

Les phénomènes météorologiques les plus fréquents observés sur les pistes d'Oran sont : les rafales de vent, brouillard [51].



Figure III.3 : Aéroport d'Oran

III.2.1.4 L'Aérodrome de HASSI MESSAOUD (DAUH)

L'aéroport d'Hassi Messaoud est un aéroport algérien situé à 16 km à l'est de la ville, l'aérodrome de Hassi Messaoud obéit à un climat désertique chaud ensoleillé et aride où les précipitations annuelles sont inférieures à une limite déterminée, très rares et irrégulières, la plupart des régions reçoivent en moyenne moins de 130mm de pluie par an, il existe des nuits glaciales.

Il existe des phénomènes météorologiques à cause de sable Comme les tempêtes de poussière et de sable, brouillard, brume, des vents brûlants, comme le sirocco, ou plus frais, comme le harmattan.

La température est plus élevée pendant le jour avec humidité faible et plus faible pendant la nuit avec forte humidité.

Les phénomènes météorologiques les plus fréquents observés sur les pistes de Hassi Messaoud sont : les tempêtes de sable [52].



Figure III.4 : Aéroport de Hassi Messaoud

III.2.2 Décodage des messages météorologiques METAR et TAF

Les messages METAR, pour la période 13-02-2016 au 14-03-2016 sont obtenus à partir d'une interface graphique OGIMET accessible par internet. Ensuite on a décodé ces messages, puis on a organisé les informations décodées dans un tableau en utilisant le tableur EXCEL. A savoir que ces informations présentent l'évolution des paramètres météorologiques en fonction du temps (ici on a considéré une échéance d'une heure).

Par exemple pour l'aérodrome d'Alger voici comment on a procédé au décodage des METAR pour la 1^{ère} journée de notre période d'étude qui correspond au 14/02/2016 :

Tableau III.1: Paramètres météorologiques obtenus à partir d'un message METAR

Outils et méthodologie

Heures du 14/02/2016	Direction moyenne du vent (°)	Vitesse du vent (K)	Vitesse des rafales (K)	Direction min du vent (°)	Direction max du vent (°)	Visibilité (km)
0	230	15	25	200	260	10
1	230	16	24	200	260	10
2	230	17	25	200	260	10
3	232	10	25	200	260	10
4	240	15	21	200	270	10
5	242	20	32			10
6	232	15	28	200	240	10
7	222	15	28	150	190	10
8	242	15	28	200	270	10
9	242	13		240	270	10
10	240	14		210	270	10
11	240	19	29	210	270	10
12	250	18	33	190	260	10
13	250	12		210	270	9
14	240	16	30	240	270	10
15	250	12		210	280	10
16	270	17				10
17	250	10				10
18	165	5		130	230	10
19	240	30	45			4
20	200	12		170	240	10
21	240	19	31	210	270	3
22	230	9		180	250	10
23	220	13	23	130	260	10

Tableau III.2 : Ce tableau représente la suite du **tableau III.1**.

Nébulosité à la base couche (Octa)	Hauteur de la base des nuages de la 1ère couche (ft)	Température de l'air (°)	Température de pt de rosée (°)	Pression au niveau de la mer (hpa)
1 à 2	2600	19	10	1010
1 à 2	2600	19	10	1008
1 à 2	2600	19	10	1008
1 à 2	2600	18	10	1007
1 à 2	2600	18	10	1007
1 à 2	2500	18	10	1006
1 à 2	2600	18	9	1006
1 à 2	2600	18	11	1005
1 à 2	2600	18	11	1005
1 à 2	2600	18	11	1005
1 à 2	2600	19	11	1005
1 à 2	2600	20	11	1005
1 à 2	2600	19	12	1004
1 à 2	2000	15	13	1004
1 à 2	2000	16	10	1002
1 à 2	2000	19	12	1002
1 à 2	2000	16	11	1002
3 à 4	2500	15	11	1001
1 à 2	2000	13	12	1000
1 à 2	2000	10	9	1001
1 à 2	2000	13	9	1001
1 à 1	2000	10	8	1002
1 à 2	2600	10	7	1002
1 à 2	2600	10	6	1002

La même procédure est suivie pour l'extraction des données METAR pour les autres aérodromes.

Dans la partie suivante on va décrire comment on a établi les prévisions d'AROME, c.à.d. les éléments de base utilisés pour le fonctionnement du modèle.

III.2.3 Système d'exploitation, langage de programmation et logiciel utilisés pour l'exploitation du modèle AROME

III.2.3.1 Programme de base

Le programme de base sur lequel on a travaillé est un code écrit en langage fortran. Il est développé par Mme Boucheffa.

Dans cette partie on se focalisera sur la démarche d'extraction des données AROME, du début du téléchargement de fichiers coupleurs depuis Météo France jusqu'à l'élaboration des TAF automatique et le calcul des biais. Alors, pour se faire :

En premier lieu, AROME (Modèle dont le programme de base est écrit en langage FORTRAN) après avoir fait la lecture des fichiers aérodrome (LON-LAT-PREVISION), il va ensuite déterminer les prévisions sur chaque station en position GPS en fonction de la distance entre ces stations et le point de grille AROME. Donc, on va avoir de nouvelles coordonnées pour chaque station GPS puisque le modèle va lui affecter les coordonnées du point de grille le plus proche.

Deuxièmement, le modèle va attribuer pour chaque A/D les prévisions météorologiques calculées à partir des équations de modélisations atmosphériques.

Finalement, après l'achèvement du processus d'extraction des données le modèle/ le supercalculateur va élaborer les TAF automatiques.

III.2.3.2 Le logiciel du traçage des cartes HBN « GRADS »

Tout d'abord, GRADS est un logiciel qui permet de visualiser des données météorologiques et océanographiques.

Dans notre étude on l'a utilisé pour tracer la hauteur de la base des nuages, par conséquent comparer et contrôler la HBN prévue par de notre modèle AROME à celle des METAR et TAF.

Pour le traçage de la HBN on introduit dans le logiciel GRADS l'équation appropriée et qui est donnée par la relation ci-dessous :

$$HBN = 400 \times (T - T_d)$$

Avec : HBN (ft)

T est la température au sol ($^{\circ}\text{C}$)

T_d est le point de rosée au sol ($^{\circ}\text{C}$)

Remarque :

- Cette loi est valable uniquement pour les nuages de type Cumulus.
- La Hauteur minimale d'un Cumulus commence à partir de 1500 ft.

CHAPITRE IV

***EVALUATION ET VALIDATION DU
PRODUIT AROME***

Evaluation et validation du produit AROME

Chapitre : IV

Evaluation et validation du produit AROME

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons évaluer la fiabilité des prévisions d'AROME pour les aérodromes situés dans la zone de couverture du modèle par rapport aux données d'observation METAR. A terme, notre étude finira par l'élaboration d'un bulletin de prévision d'aérodrome automatique depuis les prévisions AROME destiné pour les prévisionnistes. Aussi, nous allons essayer de tracer les cartes de nébulosité prévues par AROME afin de repérer les hauteurs de la base des nuages, qui est une donnée indispensable dans le message TAF.

IV.2 Les marges de tolérance des prévisions TAF

Pour évaluer la qualité de notre produit contrôlé on est amené à le délimiter par une plage de précision c.à.d. lui mettre des bornes min et max à ne pas dépasser.

Donc, ces prévisions doivent être évaluées selon le tableau suivant extrait de l'annexe 03 relative à la convention de Chicago « Assistance Météorologique à la Navigation Aérienne Internationale » :

Tableau IV.1 : Marges de Tolérances des prévisions TAF.

Éléments à prévoir	Marge de tolérances acceptable
Direction du vent	$\pm 60^\circ$
Vitesse du vent	± 5 m/s (10 kt)
Visibilité	Jusqu'à 800 m : ± 200 m Entre 800 m et 10 km : ± 30 %
Précipitations	Présence ou absence
Nébulosité	Une catégorie au-dessous de 450 m (1 500 ft). Présence ou absence de nuages BKN ou OVC entre 450 m (1 500 ft) et 3 000 m (10 000 ft).
Hauteur des nuages	Jusqu'à 300 m (1 000 ft) : ± 30 m (100 ft). Entre 300 m (1 000 ft) et 3 000 m (10 000 ft) : ± 30 %.
Température de l'air	± 1 °C
Pression atmosphérique au MSL	± 1 hpa

Evaluation et validation du produit AROME

On reprendra ces tolérances dans les 02 parties : « Contrôle du modèle AROME » et « Comparaison entre les produits AROME et TAF ».

IV.3 Contrôle mensuel du produit AROME

Pour effectuer ce contrôle on a choisi une période d'un mois (Contrôle mensuel) débutant du 14/02/2016 jusqu'au 14/03/2016. Les produits AROME sont comparés à la fois par rapport au TAF élaboré manuellement par les prévisionnistes péronautique et par rapport au METAR. Il est à noter que nous avons utilisé pour ce contrôle les valeurs des moyennes journalières pour chaque paramètre, par exemple : les températures moyennes, les vitesses moyennes ... etc.

IV.4 Résultats et discussions

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats du contrôle concernant les paramètres suivants : la direction du vent, la vitesse du vent, la température de l'air, la température du point de rosé et la pression. La comparaison par rapport au TAF généré manuellement concerne uniquement la vitesse et la direction du vent.

III.4.1 Direction du vent

La figure 4.1 représente les directions du vent moyennes observées, établies manuellement et prévues par AROME exprimées en degré enregistrées sur les quatre sites d'étude pour la période 13 Février au 14 Mars 2016. L'analyse de la figure 4.1 montre que les courbes des directions du vents observées et prévues par AROME représentent des allures similaires notamment pour les aérodromes d'Alger, Constantine et Oran. Des différences remarquables sont enregistrées pour l'aérodrome de Hassi Messaoud au début de la période du contrôle (13-18 Févrie) et vers la fin du mois de Février jusqu'au 4 Mars. Pour ces deux périodes, la vitesse du vent enregistrée est faible, et la direction du vent pourrait être variable. Et pour ce genre de situation il est très difficile au modèle de les similer. Par contre, le modèle simule bien les directions du vent liées aux système organisés (passage d'une perturbation).

Les biais moyens enregistrés pour les directions du vent pour les quatre aérodromes sont donnés par les tableau 4.2.

Evaluation et validation du produit AROME

Tableau IV.2 : Biais moyens de la direction du vent obtenus pour les TAF et AROME

A/D	Biais (°) TAF/AROME		
	Min	Max	Moyen
DAAG	2.5/0.5	137.5/106.63	39.38/19.24
DABC	0./0.17	212.5/52.17	39.33/18.17
DAOO	0.42/0.17	214.17/165.75	40.03/19.15
DAUH	0.42/1.04	197.91/174.8	60.98/52.66

Le tableau montre que les biais moyens des directions du vent obtenus avec les prévisions AROME sont inférieurs aux biais des TAF élaborés manuellement. Il est à noter que les TAF sont généralement élaborés sur la base du modèle global ARPEGE qui a une résolution faible par rapport au modèle AROME. En conséquence, AROME représente mieux la topographie de la région, donc il a plus d'avantage pour mieux prévoir la direction du vent. En premier lieu, pour l'Aéroport DAAG, le biais min d'AROME (4,75°) est enregistré dans la journée du 26/02/2016 et c'est la même chose pour les TAF (2,5°). En revanche, le biais max d'AROME (156,5°) est enregistré le dans la journée du 12/03/2016 tandis que celui des TAF (137,5°) est enregistré le 08/03/2016.

Pour l'Aéroport DABC, le biais min d'AROME (0,25°) est enregistré dans la journée du 26/02/2016 et c'est la même chose pour les TAF (0°). En revanche, le biais max d'AROME (118°) est enregistré le dans la journée du 23/02/2016 tandis que celui des TAF (212,5°) est enregistré le 20/02/2016.

Pour l'Aéroport DAOO, le biais min d'AROME (0,17°) est enregistré dans la journée du 09/03/2016, et celui des TAF (0,42°), il est enregistré le 14/02/2016. En revanche, le biais max d'AROME (165,75°) est enregistré le dans la journée du 13/03/2016 et c'est la même chose pour celui des TAF (214,17°).

Enfin, pour l'Aéroport DAUH, le biais min d'AROME (0,42°) est enregistré dans la journée du 05/03/2016 ; tandis que le max d'AROME (197,91°) est enregistré le 04/03/2016.

Evaluation et validation du produit AROME

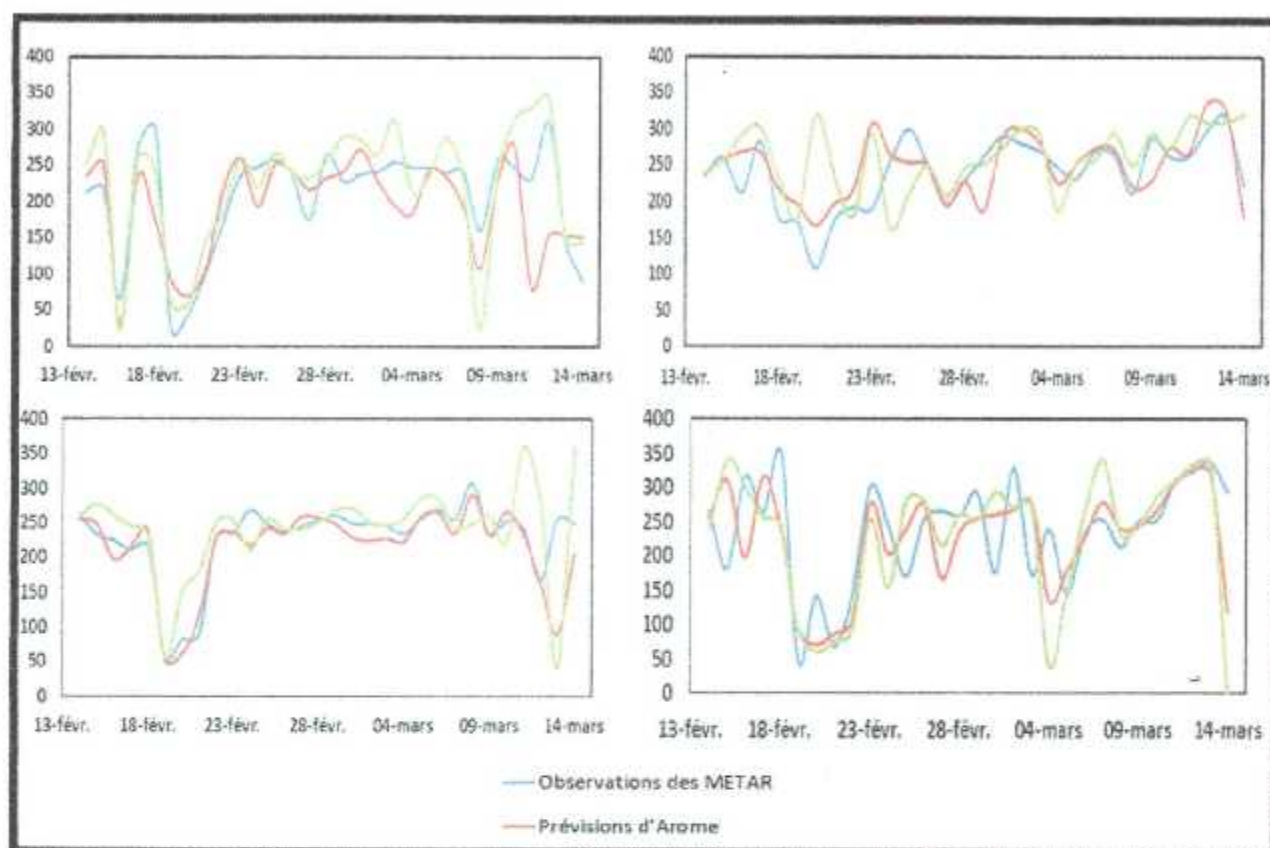


Figure IV.1 : Les directions du vent moyennes observées (en bleu), établies manuellement (en vert) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en degré.

IV.4.2 Vitesse du vent

La vitesse du vent est un paramètre très sensible à l'état de la surface. En effet, la présence des obstacles joue le rôle d'amortisseur pour les mouvements de l'air et modifie largement la vitesse et la direction du vent. La représentation de ces obstacles dans les modèles numériques de prévision du temps constitue un défi pour les scientifiques et elle est liée directement à la résolution de ces modèles.

La figure 4.2 montre les vitesses du vent moyennes observées, établies manuellement et prévues par AROME enregistrées pour les quatre aéroports. L'analyse de cette figure permet d'avancer que les vitesses du vent données dans les TAF sont souvent surestimées et au-dessus de celles prévues par AROME.

Pour faciliter l'intégration, nous avons calculé les biais moyens des vitesses du vent qui sont donnés par le Tableau 4.3.

Evaluation et validation du produit AROME

Tableau IV.3 : Biais moyens de la vitesse du vent obtenus pour les TAF et AROME

A/D	Biais (Kts) TAF/AROME		
	Min	Max	Moyen
DAAG	1.5/0.04	10.25/7.0	5.83/1.2
DABC	0.0/0.17	7.5/4.96	3.18/1.47
DAOO	0.08/0.04	5.86/3.21	2.13/1.01
DAUH	0.09/0.04	11.75/4.74	3.039/1.89

Alors comme résultats des graphes, on a le biais min d'AROME (0. kts) est enregistré dans les journées : 16/02/2016, 25/02/2016 et le 08/03/2016. Et celui des TAF (1.5 kts) est enregistré le 16/02/2016. En revanche, le biais max d'AROME (5.75 kts) est enregistré le dans la journée du 15/02/2016 tandis que celui des TAF (10.25 kts) est enregistré le 07/03/2016.

Ensuite, pour DABC, le biais min d'AROME (0.25 kts) est enregistré dans les journées : 20/02/2016, 25/02/2016 et 10/03/2016. Celui des TAF (0.kts) est enregistré le 13/03/2016. En revanche, le biais max d'AROME (5.25 kts) est enregistré le dans la journée du 15/02/2016 tandis que celui des TAF (7.5kts) est enregistré le 03/03/2016.

Pour DAOO, le biais min d'AROME (0.04kts) est enregistré dans la journée du 06/03/2016, et celui des TAF (0.08kts), il est enregistré le 08/03/2016. En revanche, le biais max d'AROME (3.21kts) est enregistré le dans la journée du 14/02/2016 et pour celui des TAF (5.96kts) est enregistré dans la journée du 03/03/2016.

Enfin, pour DAUH, le biais min d'AROME (0.04kts) est enregistré dans la journée du //2016 et celui des TAF (0.09kts) est enregistré le 05/03/2016; tandis que le max d'AROME (4.75kts) est enregistré le //2016 et le max des TAF (11.75kts) est enregistré dans la journée 22/02/2016.

Evaluation et validation du produit AROME

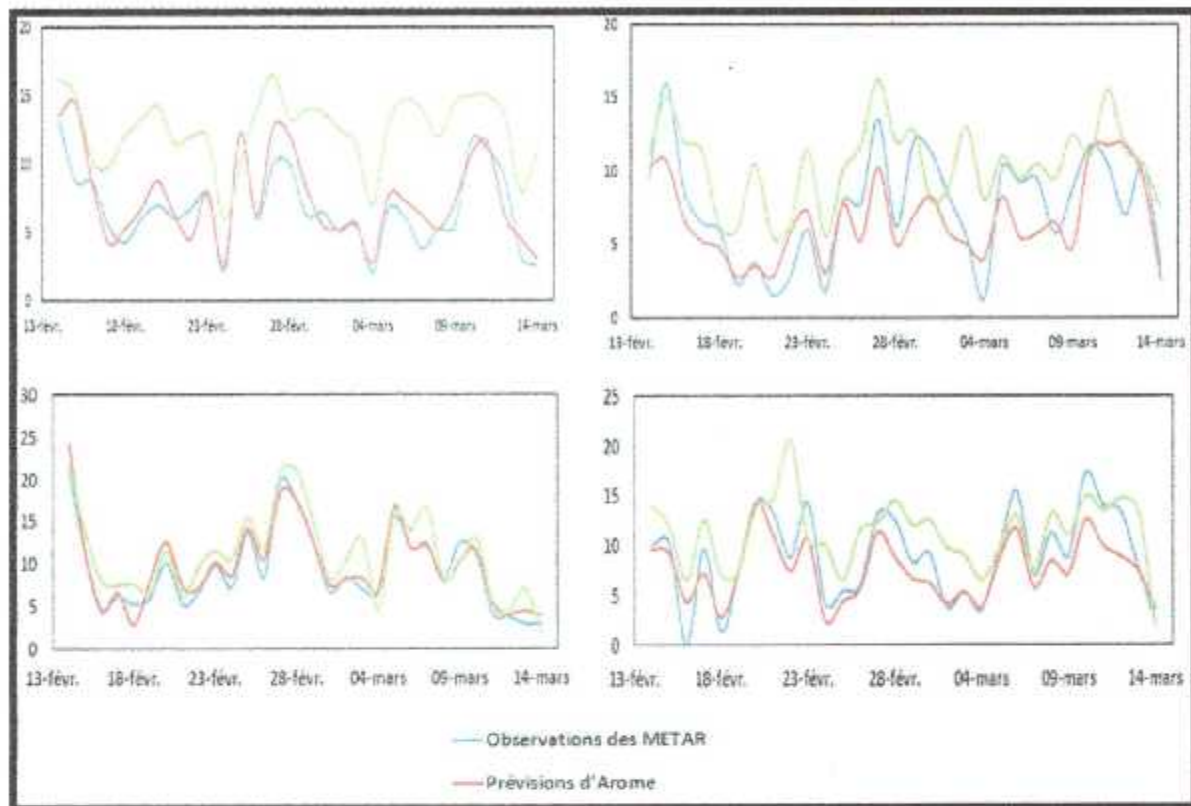


Figure IV.2 : Vitesses du vent moyennes observées (en blue), établies manuellement (en vert) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en Nocud.

IV.4.3 Température de l'air

La figure 4.3 montre les températures moyennes à 2 mètres observées et prévues par AROME exprimées en degré Celsius. L'analyse de la figure montre que les prévisions AROME sont beaucoup meilleures pour les deux sites DAAG et DAOO. Par contre, sur les deux autres sites on a enregistré des biais consistant qui atteignent 5°C.

Evaluation et validation du produit AROME

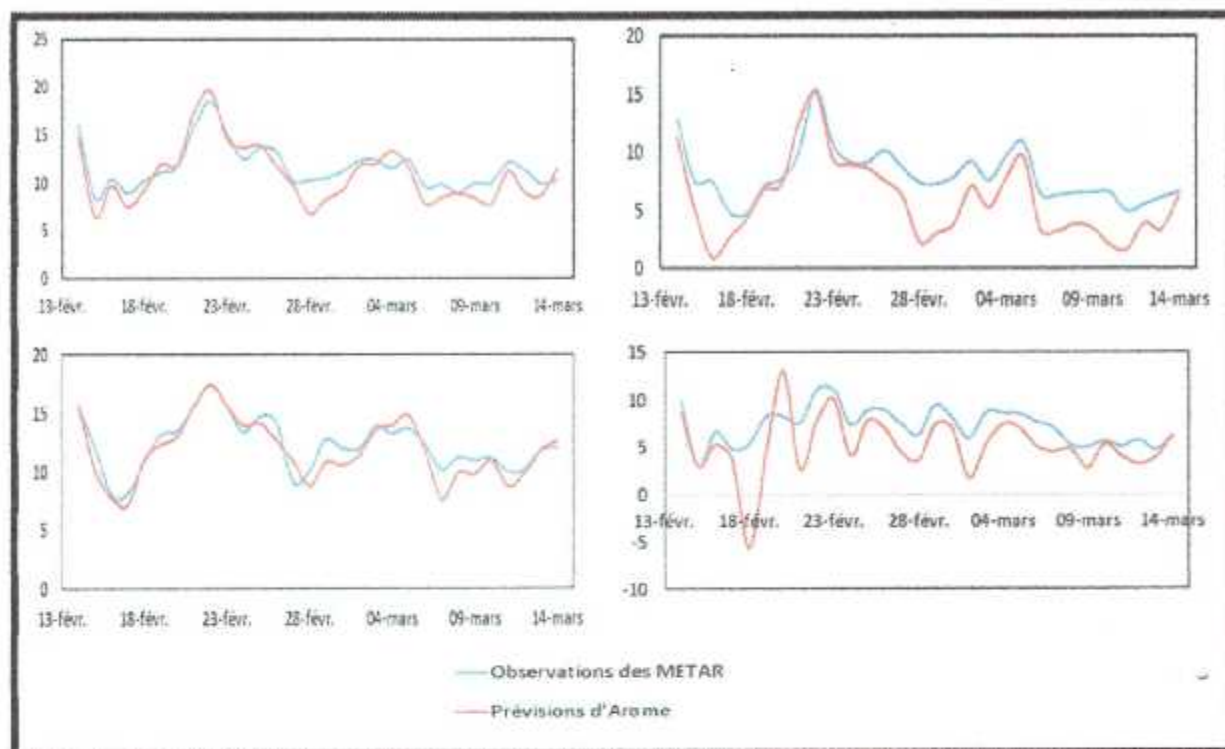


Figure IV.3 : Températures moyennes à 2 mètres observées (en bleu) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en degré Celsius.

IV.4.4 Température de point de rosée

Les températures de point de rosée sont calculées par une relation empirique. L'évolution de cette température est donnée par la figure 4.4. L'analyse de la figure permet de constater des différences remarquables entre les températures calculées et celles observées. Pour les sites du nord (DAAG, DAOO et DABC), on remarque que les températures prévues par AROME sont souvent sous-estimées par rapport à l'observation.

Evaluation et validation du produit AROME

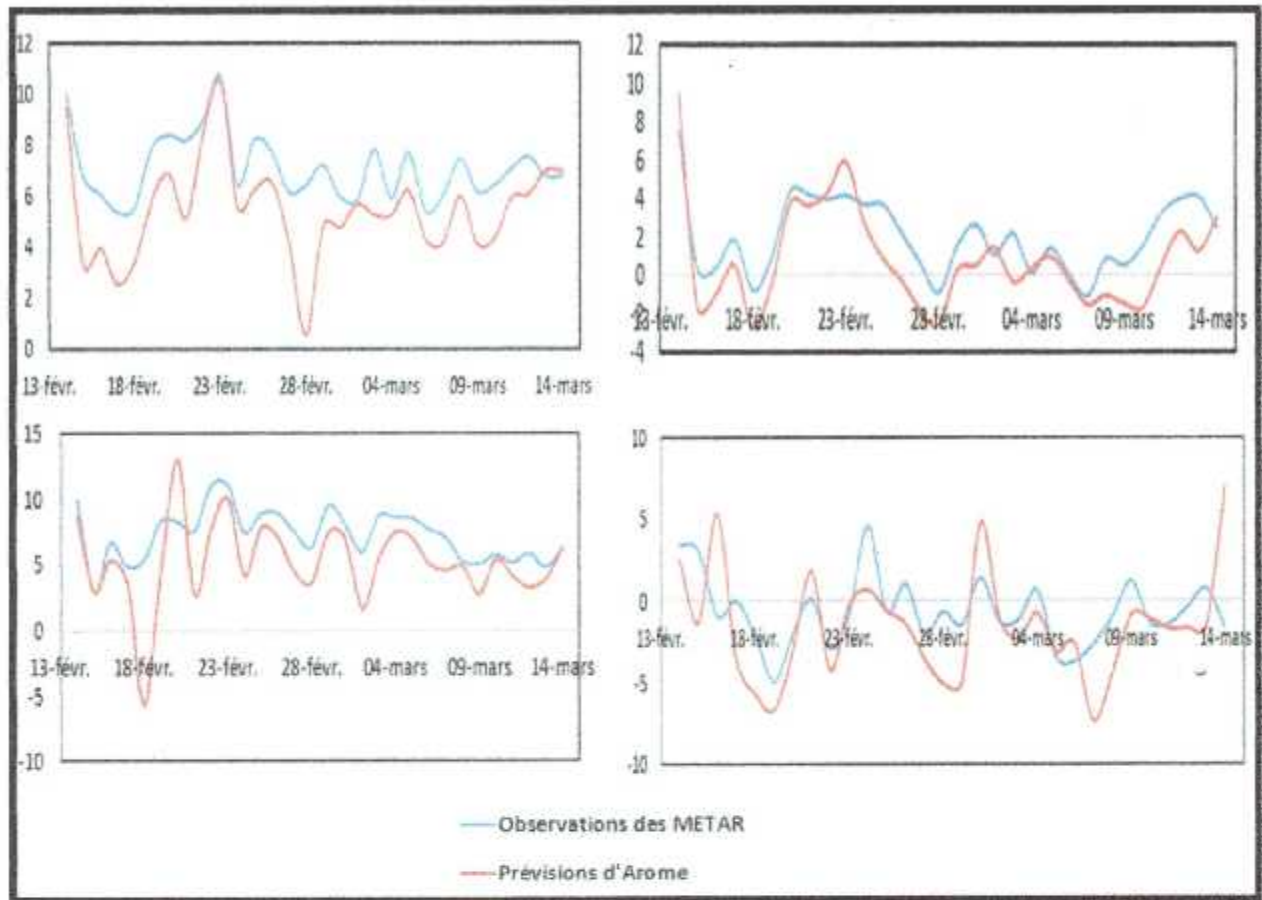


Figure IV.4 : Température moyennes de point de rosée à 2 mètres observées (en blue) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en degré Celsius.

IV.4.5 La pression

La pression au niveau de la mer prévue par AROME est en cohérence avec celle donnée par le METAR.

Evaluation et validation du produit AROME

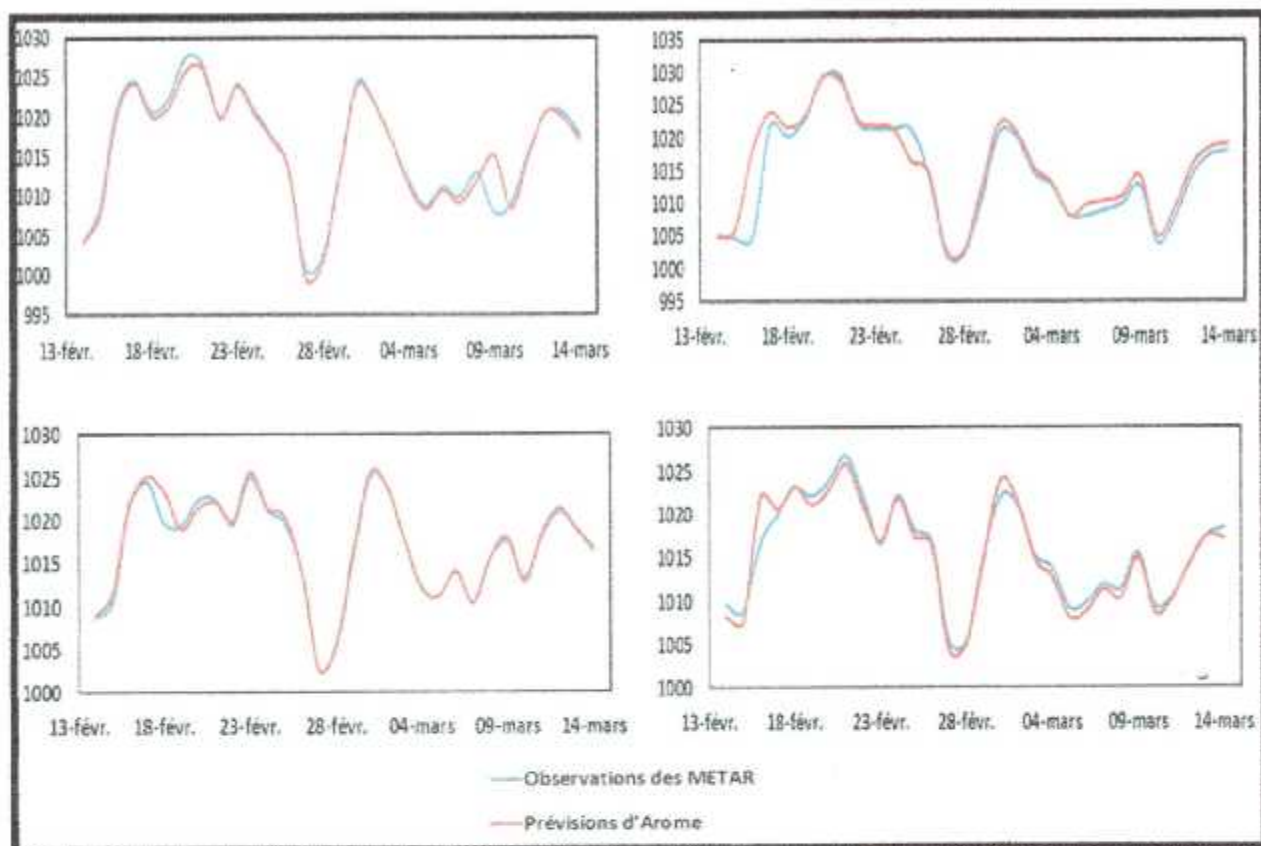


Figure IV.5 : Pression au niveau de la mer observées (en bleu) et prévues par AROME (en rouge) exprimées en hPa.

IV.5 Calcul du taux de réussite du modèle AROME

Dans cette partie, on va calculer le taux de réussite du modèle sur les 30 jours choisis allant du 14/02/2016 jusqu'au 14/03/2016. Ces taux de réussite sont estimés à partir des marges de tolérance données dans le tableau 4.1. Ces taux sont calculés seulement pour les deux paramètres vitesse et direction du vent.

Ayant les valeurs des biais pour les 02 paramètres prévus par AROME, on peut procéder alors à la détermination du taux de réussite du produit.

✓ **Direction du vent :**

Pour la détermination du taux de réussite du modèle pour le paramètre direction du vent, on a choisi deux seuils 30° et 60° , comme on peut ajouter un autre seuil plus strict par exemple 20° , sachant que la marge OACI tolérable pour la direction du vent est 60° .

Les résultats sont donnés dans le tableau 4.4:

Evaluation et validation du produit AROME

Tableau IV.4 : Taux de réussite pour les prévisions AROME et TAF concernant la direction du vent

Aérodrome	Taux de réussite pour un seuil de 30° (%)		Taux de réussite pour un seuil de 60° (%)	
	AROME	TAF	AROME	TAF
DAAG	43	43	80	83
DABC	73	63	93	80
DAOO	90	57	97	80
DAUH	40	45	63	70

Analyse du tableau :

On remarque que pour les trois premiers aérodromes (Alger, Constantine et Oran) dans le tableau l'objectif est atteint, avec un taux de réussite pour la direction du vent \geq à 80% pour un seuil tolérable de 60° (Exigé par l'OACI). Par contre, pour l'Aérodrome de Hassi Messaoud ce taux n'est pas atteint, mais 63% c'est un taux dépassant ma moyenne, donc ce n'est pas un inconvénient. Même chose pour les TAF en les comparants.

En prenant un seuil plus stricte de 30°, on observe que le taux de réussite diminue logiquement jusqu'à 40° et 43° pour les Aérodromes DAAG et DAUII.

✓ *Vitesse du vent :*

On a utilisé les biais AROME et TAF et on a choisit 2 seuils pour le calcul du taux de réussite du modèle pour la vitesse du vent qui sont : 5 kts et 10 kts avec un autre plus stricte « 3 kts », la tolérance exigé par la réglementation OACI est de 10 kts.

Les résultats sont donnés dans le **Tableau IV.5**:

Evaluation et validation du produit AROME

Tableau IV.5 : Taux de réussite pour les prévisions AROME et TAF concernant la vitesse du vent.

Aérodrome	Taux de réussite pour un seuil de 3 Kts (%)		Taux de réussite pour un seuil de 5 Kts (%)		Taux de réussite pour un seuil de 10 Kts (%)	
	AROME	TAF	AROME	TAF	AROME	TAF
DAAG	97	07	97	40	100	97
DABC	77	40	97	77	100	100
DAOO	97	77	100	93	100	97
DAUH	73	59	100	77	100	97

Analyse du tableau :

Pour la vitesse du vent, on a de très bons résultats, car le taux de réussite d'AROME pour le seuil exigé par l'OACI (10Kts) pour ce paramètre est de 100% et cela pour tous les sites choisis. En prenant deux autres seuils 5 et 3 Kts plus strictes on remarque que les taux sont légèrement baissés mais restaient toujours admissibles pour tous les sites notamment pour le seuil 5 kts. Pour le seuil de 3 Kts on a pas atteint les 80% de réussite au niveau des aérodromes Constantine et Hassi Messaoud.

En comparant le taux de réussite (De la vitesse du vent d'AROME) à celui des TAF, on déduit que le taux de réussite des bulletins AROME est plus élevé par rapport au TAF pour la vitesse du vent.

Les objectifs fixés par l'ONM d'atteindre des taux de réussite de 80% pour la vitesse du vent est atteint avec le modèle AROME et cela pour des restrictions plus fortes 5kts. Ce taux est revu à la hausse lorsque ces prévisions AROME seront corrigées ou amendées par les derniers messages METAR avant de les éditer.

Alors, on peut dire que le modèle AROME apporte un grand progrès à la météorologie aéronautique.

IV.6 Prévion de la hauteur des nuages avec AROME

IV.6.1 Hauteur de la base des nuages (HBN)

La hauteur de la base des nuages est un nouveau paramètre élaboré à l'aide du modèle AROME. L'information de la base des nuages est très importante à savoir surtout pour prévoir la situation météo pendant les phases les plus critiques du vol. Ainsi pour le contrôle de ce nouveau paramètre, on a tout d'abord pointé chaque aéroport dans un domaine bien défini qui couvre le champs de vision d'un observateur. A titre d'exemple, nous avons présenté les résultats obtenus pour une journée qui est le 23/02/2016.

IV.6.2 Validation des cartes de la HBN

- Aéroport d'Alger

Tableau IV.6 : HBN observé, prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l'DAAG.

23/02/2016	HBN METAR (ft)	HBN TAF (ft)	HBN AROME (ft)
00	1600	2600	1500
06	1600	2600	1500
12	1600	2600	1500
18	2600	2600	1500

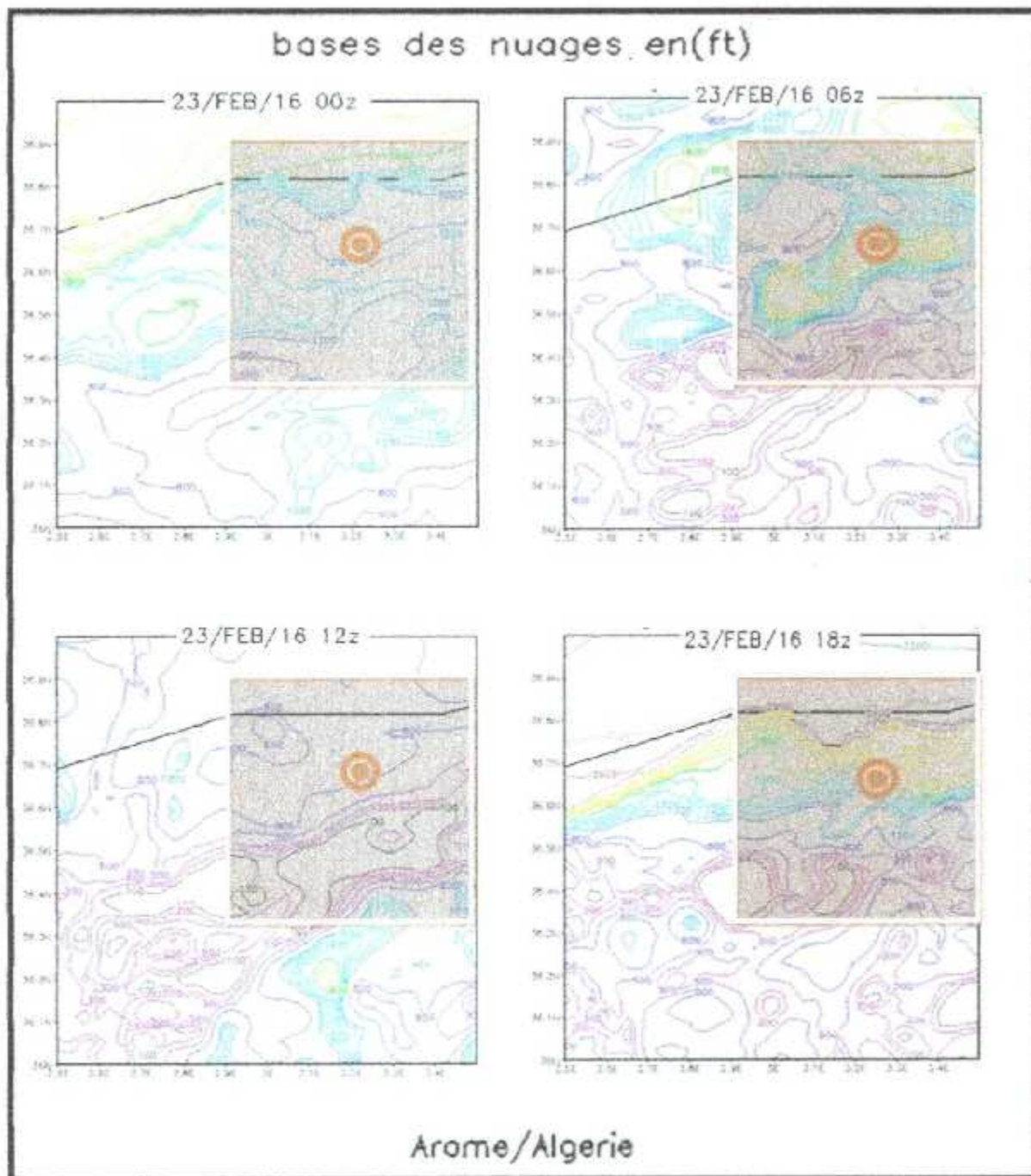


Figure IV.6 : Carte HBN prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l' DAAG

Evaluation et validation du produit AROME

- Aéroport de Constantine

Tableau IV.7 : HBN observé, prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l'DABC.

23/02/2016	HBN METAR (ft)	HBN TAF (ft)	HBN AROME (ft)
00	3000	3000	3000
06	3000	2600	2200
12	2600	2600	2400
18	3000	2600	/

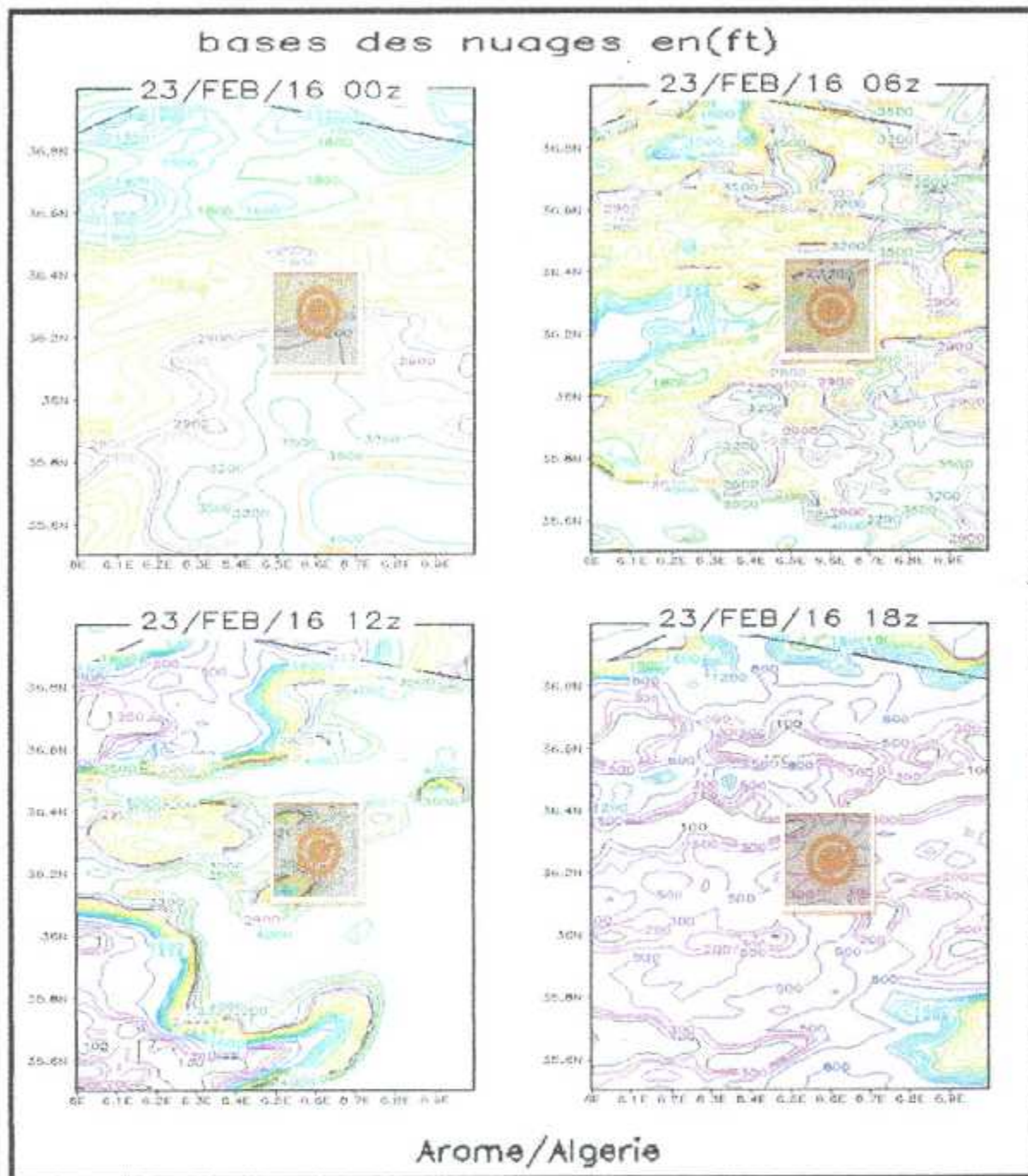


Figure IV.7 : Carte HBN prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l'DABC

- Aéroport d'Oran

Tableau IV.8 : HBN observé, prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l'DAOO.

23/02/2016	HBN METAR (ft)	HBN TAF (ft)	HBN AROME (ft)
0	1600	1600	1500
6	1600	1600	1500

Evaluation et validation du produit AROME

12	1600	2300	3000
18	/	2000	1500

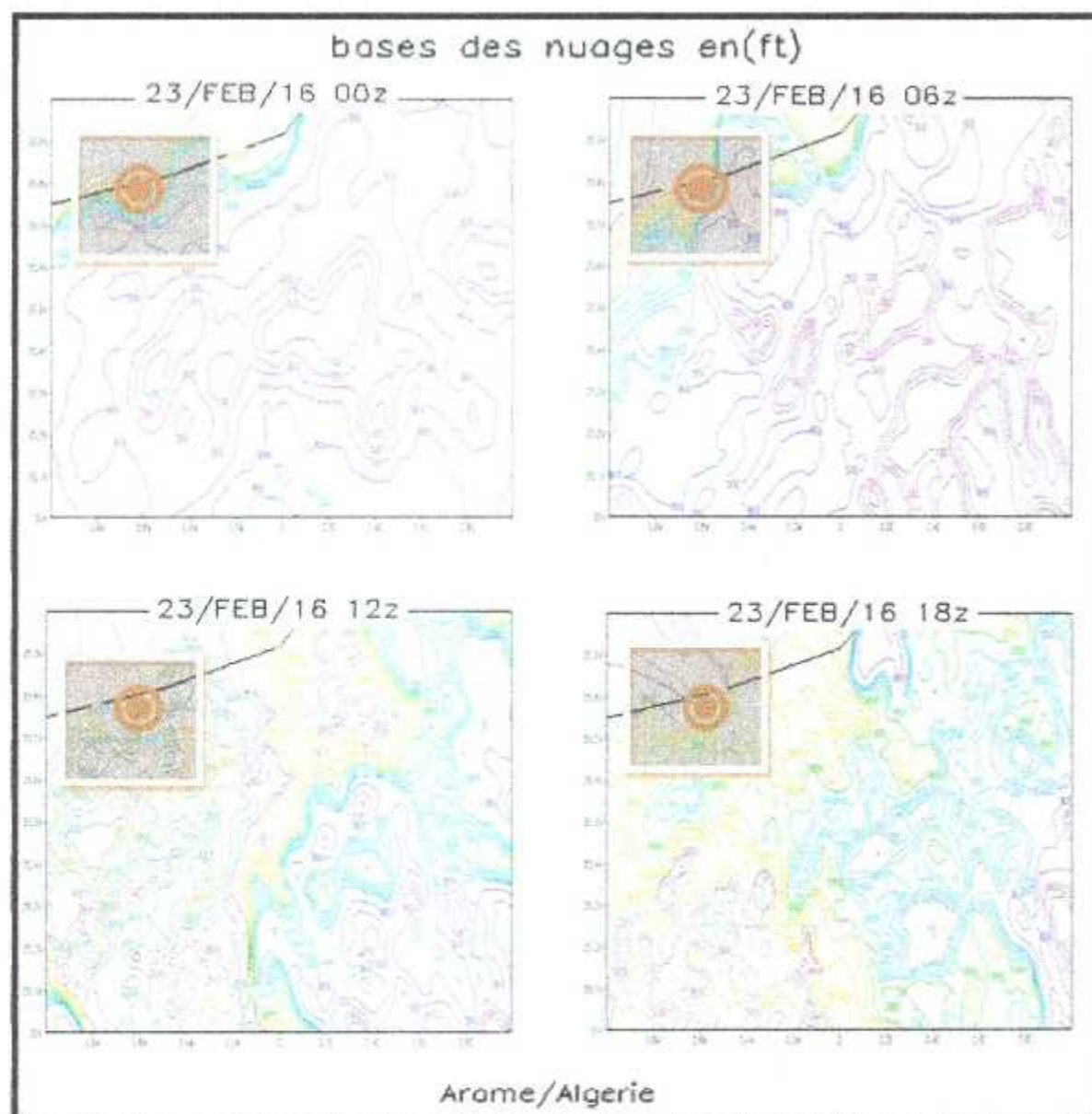


Figure IV.8: Carte HBN prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l' DA00

- *Aérodrome de Hassi Messaoud*

Tableau IV.9 : HBN observé, prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l' DAUH.

23/02/2016	HBN METAR (ft)	HBN TAF (ft)	HBN AROME (ft)
0	4000	4000	/
6	4000	4000	3500

Evaluation et validation du produit AROME

12	4000	/	/
18	/	/	/

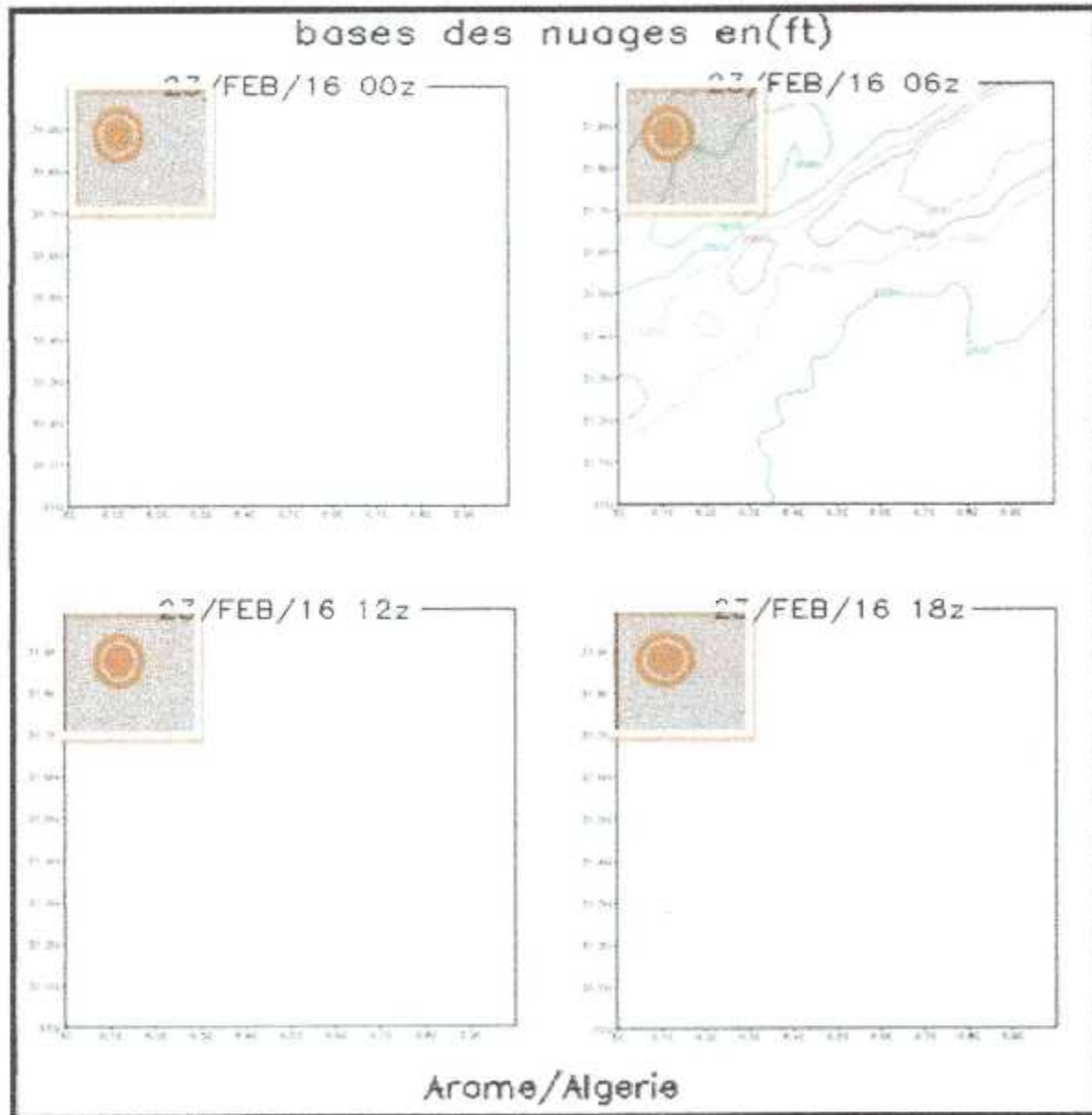


Figure IV.9: Carte HBN prévue par AROME et donnée par le TAF pour le 23/02/2016 pour les échéances 00, 06, 12 et 18 heures pour l'DAUH

Dans les cartes d'AROME on a pris uniquement la base des nuages et la comparer avec la hauteur de base des nuages pour les TAF en prenant les observations METAR comme référence afin de faciliter la comparaison.

D'après les résultats de comparaison obtenus on a remarqué que les valeurs d'AROME sont plus proches aux valeurs METAR.

Evaluation et validation du produit AROME

Concernant l'aérodrome de Hassi Messaoud les nuages sont plus élevés, et le modèle AROME simule mieux l'évolution des hauteurs des nuages.

Conclusion générale

Ce mémoire s'est basé sur l'étude du produit AROME qui est focalisé sur tout le Nord d'Algérie où on a une grande variabilité des paramètres météo.

D'après les résultats des simulations du modèle AROME utilisé au niveau de l'ONM, nous avons arrivé à choisir travailler avec le modèle AROME pour le calcul des différents paramètres météo qui offre vraiment une meilleure résolution spatiale.

Les résultats des simulations numériques des paramètres prévus pendant la période 14 février au 14 mars 2016 montrent une certaine cohérence comparée aux observations.

D'après le contrôle mensuel d'AROME avec METAR effectué où on a utilisé la moyenne journalière pour chaque paramètre, on a trouvé une ressemblance entre les deux AROME et METAR ce qui permet de calculer le biais qui donne des valeurs remarquables (min et max). Ensuite la comparaison entre les prévisions AROME et TAF en mettant les METAR comme étant un seuil de référence afin de déterminer le taux de réussite du produit AROME qui dépasse 80% affirme que le modèle AROME arrive à simuler mieux l'évolution des paramètres.

AROME permet d'élaborer les cartes de prévision de la hauteur des nuages qui est un nouveau paramètre a très grand bénéfice à la météo aéronautique , où l'exploitant peut connaître la hauteur et le type de nuage avec exactitude surtout durant les phases les plus critiques du vols, ceci permet d'augmenter la qualité de la prévision AROME effectuée automatiquement par rapport aux bulletins TAF élaborés manuellement.

Perspectives

Dans ce mémoire on a étudié uniquement quelques paramètres météo qui sont les plus importants, donc, l'intervalle est ouvert pour initier les éléments qui restent, il est très intéressant aussi d'établir ce produit avec plus de précision afin d'estimer mieux les marges d'erreurs.

Elargir le domaine d'étude pour les aérodromes du sud qui se situe dans le domaine ALADIN

1. Références des paragraphes

[1], [2] : **Article intitulé** : « messages d'observations et de prévisions d'aérodromes ». Guide d'utilisation des codes, Version à jour de l'amendement 74 annexe 3 OACI, le 05 Novembre 2008.

[3] : **Source**: Wikipédia. **Titre** : Prévion d'aérodrome. [En ligne]. **Crée en** : 15 janvier 2001. **Dernère mise à jour** : 28 Septembre 2015. **Disponible sur** : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Prévion_d'aérodrome>. **Consulté le** : 21 février 2016.

[4] : **Source**: L'avionaire. **Titre** : Codes météorologiques les TAF. **Disponible sur** : <http://www.lavionnaire.fr/CodesTaf.php>. **Consulté le** 21 février 2016.

[5] : **Source** : Le dossier météo /stage FI /02/09 MBIE [Format en diaporama].

[6], [7], [10] : **Titre** : Prévion à 4 semaines. **Date** de 1999 - 2009 Alertes-météo com-Tous droits réservés. **Révision** : 24 septembre 2008. **Disponible sur** : <http://www.alertes-meteo.com/>. **Consulté le** : 21 février 2016.

[8], [9], [11], [15], [17], [26] : **Auteurs**: Genevière Milan, Gérard Pujol. **Relus par** : Laurent Lespiac, Sofiane Bouafia. **Etablissements**: Académie de Montpellier, Atelier aéronautique du lycée Jean Monnet. **Titre de l'article** : « METEOROLOGIE : Comment prévoir le temps pour la navigation Aérienne ? ». **Révision** : 16 Novembre 2014.

[12], [13], [19], [36] : **Livre**. **Auteur** : René Vaillant. **Titre** : Météo plein ciel. 3^{ème} édition

[14] : **Article** : <HIESSE /CPL (A) – 050 Météorologie – 62, mars 2004>

[16], [18], [23], [25], [40] : **Article intitulé** : « Météorologie du B.I.A au C.A.E ». Tome 5

[20] : **Article** : HIESSE /CPL. (A) – 050 Météorologie – 62, mars 2004>

[21], [27], [28] : **Article de** : météorologie aéronautique par Khaled ZERROUKI, instructeur en météo, septembre 2008.

[24] : **Source** : Wikipédia. **Titre** : Rafale (vent). [En ligne]. **Crée le** 15-01-2001. **Disponible sur** : https://fr.wikipedia.org/wiki/Rafale_%28vent%29. **Consulté le** : 21 Février 2016.

Liste des références

[29] : **Source** : Wikipédia. **Titre** : Neige. [En ligne]. **Crée en** : 15 janvier 2001. **Dernière mise à jour** : 28-09-2015. **Disponible sur** : <<https://fr.wikipedia.org/wiki/Neige>>

[30], [31], [32] :

[33], [34], [35] : **Livre**. **Auteur** : René Vaillant. **Titre** : Météo plein ciel. 3^{ème} édition

[37] : **Article intitulé** : « Initiation à l'aéronautique ». **Auteurs** : T. du PUY de GOYNE, Y. PLAYS, P. LEPOURRY, J. BESSE, Editions CEPADUES.

[38], [45] : **Article intitulé** : « météo du pilote de ligne- ATPL Tome I ». **Etablissement** : Institut d'aéronautique MERMOZ, par Christian Bézanger, version 7, édition 2002.

[39] : **Article intitulé** : Brevet d'Initiation Aéronautique, météorologie.

[41] : **Article intitulé** : Météorologie aéronautique. **Auteur** : par Khaled ZERROUKI, instructeur en météo, septembre 2008.

[42] : **Article intitulé** : « Météo du pilote de ligne- ATPL Tome I ». **Etablissement** : Institut d'aéronautique MERMOZ, par Christian Bézanger, version 7, édition 2002.

[43], [44] :

[46] : **Source**: Wikipédia. **Titre** : Climat de l'Algérie. [En ligne]. **Crée en** : 15 janvier 2001. **Disponible sur** : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_de_l%27Alg%C3%A9rie>. **Consulté le** : 20 février 2016.

[47], [48] : **Source** : Wikipédia. **Titre** : Alger. [En ligne]. **Crée en** 15 janvier 2001: **Disponible sur** : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Alger>. **Consulté le**: 20 février 2016.

[49] : **Source** : Wikipédia. **Titre** : Aéroport de Constantine Mohamed Boudiaf. [En ligne]. **Crée en** : 15 janvier 2001. **Disponible sur** : https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9roport_de_Constantine_-_Mohamed_Boudiaf. **Consulté le** : 20 février 2016.

[50] : **Source** : Wikipédia. **Titre** : Constantine (Algérie). **Crée en** : 15 janvier 2001. **Disponible sur** : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Constantine_%28Alg%C3%A9rie%29>. **Consulté le** : 20 février 2016.

Liste des références

[51] : Document disponible sur le site : <<http://www.dzmeteo.com/meteo-oran.dz/Aérodrome d'Oran>>

[52] : Document disponible sur le site : <<http://fr.weather-forecast.com/locations/Hassi-Messaoud/metars/latest>>

[53], [54] : Source : Wikipédia. Titre : Prévision numérique du temps. Créé le : 15 janvier 2001. Disponible

sur : <file:///C:/Users/AGINFO/Desktop/bibliographie/Pr%C3%A9vision%20num%C3%A9rique%20du%20temps%20%E2%80%94%20Wikip%C3%A9dia.htm>. Consulté le : 20 Février 2016.

[55], [57] : Livre. Auteur : René Vaillant. Titre : Météo plein ciel. 3^{ème} édition.

[56] : Cour intitulé : « prévision numérique du temps ». Auteur : Mr MOKHTARLM Ingénieur et chercheur au niveau de l'ONM.

[58] : Article : Météo-France - Centre national de recherches météorologiques (CNRM) par François Bouttier Enaoût 2007

[59] : Document disponible sur le site : <www.cnrm.meteo.fr/aladin/meetings/surfex.html>

[60] : Document disponible sur le site : www.cnrm.meteo.fr/aladin/Algérie

[61] : Document disponible sur le site : www.cnrm.meteo.fr/ALADIN.

[62] : Information ONM. [Pendant le stage pratique]

[63] : Cour intitulé : « modèles numériques de prévision du temps et les énergies renouvelables ». Présenté par: Mohamed MOKHTARI, Journée d'Etude d'Adrar, 16 avril 2015.

+ Site dont les informations sont disponible sur : <www.meteo.dz/ALADIN-dust/>

[64] : Source : Wikipédia. Titre : ARPEGE-Centre Nationale de Recherches Météorologiques (CNRM). Créé le : 15 janvier 2001. Disponible sur : <<http://www.cnrm-game-meteo.fr/spip.php?article121>>. Consulté le : 22 février 2016.

[65] : Source : Information acquirit pendant le stage pratique au niveau de l'ONM site à Dar el Baida ALGER.

[66] : Informations ONM.

2. Référence des équations

[1] : **Source** : Wikipédia. **Titre** : Point de rosée. **Crée le** : 15 janvier 2001. **Disponible sur** : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Point_de_ros%C3%A9e>. **Consulté le** : 22 février 2016.

[2]: **Article** : Cours Modélisation Numérique de l'Écoulement Atmosphérique et Assimilation d'Observations. **Etablissement** : École Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile-de-France, Année 2011-2012,

(Olivier Talagrand, mars-mai 2012), « Récapitulatif sur les Équations Primitives »

Et disponibles sur les sites :

http://www.cnrm-game-meteo.fr/gmapdoc/meshtml/guide_ARP/lien3.html

https://fr.equation_primitives_atmosphériques

http://sesp.esep.pro/fr/pages_fluide-dynamique/equations-primitives.html

3. Références des figures

[1], [2] : Site espagnol OGIMET pour l'aviation. **Titre** : OGIMET [en ligne]. **Disponible sur** : <<http://www.Ogimet.com>>. **Consulté le** 15-02-2016.

[3] : **Auteurs**:Genevière Milan, Gérard Pujol **Relus par** : Laurent Lespiac, Sofiane Bouafia. **Etablissements**: Académie de Montpellier, Atelier aéronautique du lycée Jean Monnet. **Titre de l'article** : « METEOROLOGIE : Comment prévoir le temps pour la navigation Aérienne ? ».

[4] : **Article intitulé** : météorologie. **Organisme** : JAR-FCL. **Révision** : Mars 2004.

[5] : **Source** : Wikipédia. **Titre** : Manche à air. **Disponible sur** : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Manche_%C3%A0_air>. **Crée le** : 15 janvier 2001. **Consulté le** : 21 février 2016.

Liste des références

- [6] : **Article intitulé** : « météorologie du BIA au CAEA », Tome 5.
- [7] : **Titre** : La prévision du temps. **[En ligne]**. **Disponible sur** : <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/la-prevision-du-temps/les-etapes-de-prevision>.
Consulté le: 21 février 2016.
- [8] : **Auteur** : Gilles Moliné. **Titre** : Eléments de météorologie. **Version initiale** : Septembre 2006. **Révision** : 30 Septembre 2010.
- [9] : **Figure disponible sur le site** : < www.cnrm.meteo.fr/arome/ Algérie>
- [10] : **Figure disponible sur le site** : < <http://www.meteo.dz/aladin.php>>
- [11] : **Figure disponible sur le site** : < www.meteo.dz/ALADIN-dust/Algérie>
- [12] : **Titre** : ARPEGE Centre Nationale de Recherches Météorologiques. **[En ligne]**
Disponible sur : www.cnrm.game-meteo.fr . **Consulté le** : 22 février 2016.
- [13], [14] : **Source** : Wikipédia. **Titre** : ARPEGE-Centre Nationale de Recherches Météorologiques (CNRM). **Crée le** : 15 janvier 2001. **Disponible sur** : <<http://www.cnrm-game-meteo.fr/spip.php?article12>>. **Consulté le** : 22 février 2016.

4. Références des tableaux

- [1] : **Article intitulé** : Brevet d'Initiation Aéronautique, météorologie.
- [2] : **Livre**. **Auteur** : René Vaillant. **Titre** : Météo plein ciel 3^{ème} édition.
- [3] : **Auteur** : Gilles Moliné. **Titre** : Eléments de météorologie. **Version initiale** : Septembre 2006. **Révision** : 30 Septembre 2010.