

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Saad Dahleb Blida 1
Institut d'Aéronautique et Études Spéciales
Département de la Navigation Aérienne



Mémoire de fin d'Études

En Vue d'Obtention du Diplôme de MASTER en Aéronautique

Option: Opérations Aériennes

THEME:

Application de la méthode de prévision
d'ensemble pour la Prévision du brouillard

Réalisé par:

ADEL MAYOUF

Promoteur: **Pr. Tahar REZOUG**

Co-Promoteur: **Mr. Khalid DEIBOUNE**

Encadrant: **Dr. Mohamed MOKHTARI**

2024/2025

ملخص

تعتمد توقعات الضباب على عدة معادلات تُستخدم متغيراتها لحساب قيمة الرؤية، والتي تُحدد بدورها وجود أو غياب ظاهرة الضباب. يهدف هذا العمل إلى استخدام التوقعات الجماعية (Ensemble Forecasting) لتحسين جودة التنبؤ بالضباب. وبالتالي، فإن توليد هذه التوقعات الجماعية سيعتمد على استخدام نماذج متعددة لحساب عدة قيم للرؤية في نفس نقطة الشبكة (النقطة الجغرافية الحسابية) من جهة، وأخذ عدة قيم للرؤية في المنطقة بأكملها حسب دقة توزيع الشبكة من جهة أخرى.

الكلمات الرئيسية: التنبؤ، الضباب، أروم ، الرؤية، التنبؤ الجماعي.

SUMMARY

Fog forecasting is based on several equations whose variables are used to calculate the visibility value, which in turn determines the presence or absence of fog. This work aims to use ensemble forecasting to improve the quality of fog prediction. The generation of ensembles will therefore be based on using multiple models to calculate several visibility values at the same grid point (geographic calculation point) on one hand, and considering several visibility values across the area based on the grid resolution on the other.

Key Words: Forecast, Fog, AROME, Visibility, Ensemble Forecasting.

RESUME

La prévision de brouillard se repose sur plusieurs équations dont les variables sont utilisées pour calculer la valeur de la visibilité qui déterminera à la suite la présence ou non du phénomène de brouillard. Le présent travail consiste à utiliser une prévision d'ensemble pour améliorer la qualité de la prévision du brouillard, d'où la génération des ensembles sera basée sur l'utilisation d'une multitude de modèles pour calculer plusieurs valeurs de la visibilité dans le même maillon de la grille (point géographique de calcul) d'un côté et de considérer plusieurs valeurs de la visibilité de la zone selon les points de maillage de l'autre côté.

Mots Clés: Prévision, Brouillard, AROME, Visibilité, Prévision d'Ensemble.

REMERCIEMENTS

Mes plus gros remerciements appartiennent à **ALLAH** pour m'avoir donné la santé, la vision et la détermination pour accomplir ce travail.

Merci deuxièmement à toute ma famille pour votre soutien, je le fais pour vous.

Je tiens à étendre mon appréciation à **Mr Rezoug T**, directeur du laboratoire des sciences aéronautiques et également mon promoteur, pour ses propositions, sa patience et sa direction.

Je passe mes sincères remerciements aussi à **Mr Deiboune K.** pour la proposition de ce thème et pour sa coopération et confiance pendant la réalisation de cette étude.

J'aimerais remercier **Mr Mokhtari M.** mon encadrant au niveau de l'ONM pour tous ses conseils, et pour sa disponibilité et son aide précieux tout le long de cette période.

J'étends mes remerciements à **Mr Chikhi W.** au niveau de l'ONM également pour sa réception chaleureuse, et ses remarques et contributions pour la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également **Mme Haouati L.** à Air Algérie pour tous ses efforts et pour son support immense au début de cette épreuve, ce fut une belle rencontre.

Merci à mes camarades **Islam** et **Houcine** d'être une source de motivation majeure pour enchaîner et faire de mon mieux pour avancer sur cette tâche.

Merci à mes amis pour votre encouragement et présence.

Merci à moi d'avoir donné tout mon possible sans lâcher.

TABLE DES MATIERES

RESUME	01
REMERCIEMENTS	02
TABLE DES MATIERES	03
LISTE DES FIGURES	07
LISTE DES TABLEAUX	09
LISTE DES ABBREVIATIONS	10
INTRODUCTION GENERALE	12
<u>Chapitre I: Caractéristiques et Typologie du Brouillard.....</u>	14
Introduction	15
I.1 Définitions	15
I.1.1 Brouillard	15
I.1.2 Brume	15
I.2 Formation du Brouillard	16
I.3 Types de Brouillard	16
I.3.1 Brouillard de Rayonnement	16
I.3.2 Brouillard d'Advection	18
I.3.3 Brouillard d'Évaporation	20
I.3.4 Brouillard d'Inversion	22
I.3.5 Brouillard de Pente	22
I.3.6 Brouillard Frontal	23
I.3.7 Brouillard Givrant	25
I.3.8 Brouillard de Vallée	25
I.3.9 Brouillard de Mélange	26
I.4 L'influence du Brouillard en Aéronautique	27
I.4.1 Opérations Pré-vol	27
I.4.2 Décollage et Atterrissage	28
I.4.3 Navigation en Vol	28
I.4.4 Opérations post-vol et au sol	28
Conclusion	29

<u>Chapitre II: La Prévision Numérique du Temps</u>	30
Introduction	31
II.1 Définition de la PNT	31
II.2 L'Office National de la Météorologie	31
II.3 Principe de la PNT	32
II.4 Historique de la PNT	32
II.5 Étapes de la PNT	33
II.5.1 Collecte des Données d'Observation	33
II.5.2 Assimilation des données	33
II.5.3 La Prévision Numérique	33
II.5.4 La Prévision Expertisés	34
II.6 Précision et limitations	34
II.7 Modèles de prévision	35
II.7.1 Les Modèles Globaux	35
II.7.1.1 ECMWF Integrated Forecasting System (IFS)	35
II.7.1.2 Global Forecast System (GFS)	36
II.7.1.3 Le Modèle ARPEGE	36
II.7.2 Les Modèles Régionaux	37
II.7.2.1 Le Modèle AROME	37
II.7.2.3 Le Modèle ALADIN	39
II.7.2.3 Le Modèle ALADIN-SABLE	41
II.8 La Prévision d'Ensemble	43
II.9 Paramètres de visibilité	45
II.9.1 La Visibilité LWC	45
II.9.2 La Visibilité LWC et Nd	45
II.9.3 La Visibilité AROME	46
Conclusion	46

<u>Chapitre III: Méthodologie de Traitement et Exploitation des Données</u>	47
Introduction	48
III.1 Le Langage de Programmation R	48
III.1.1 Définition	48
III.1.2 Historique	49
III.1.3 Domaines d'Utilisation	49
III.1.4 Les Avantages du Langage R	50
III.1.5 L'interface R Studio	51
III.2 Les METARs	52
III.2.1 Définition	52
III.2.2 Lecture d'un METAR	52
III.2.3 METAR auto	53
III.2.4 SPECI	53
III.2.5 OGIMET	53
III.3 Scripts R Utilisés	55
III.3.1 Script de Calcul de Visibilité en Fonction de LWC	55
III.3.2 Script de Calcul de Visibilité en Fonction de (LWC, Nd)	56
III.3.3 Script d'Extraction de Visibilité AROME	57
III.3.4 Script d'Extraction des Points de l'Ensemble	58
III.3.5 Script d'Obtention de la Visibilité Minimale	59
III.3.6 Script d'Obtention de la Visibilité Moyenne	59
III.3.7 Script d'Obtention de la Visibilité Moyenne avec Coefficients	60
III.3.8 Script de Génération de Tableaux de Contingence	61
Conclusion	62
 <u>Chapitre IV: Validation des Résultats</u>	 63
Introduction	64
IV.1 Définition de l'Ensemble	64
IV.2 Les Méthodes de Rassemblement	65
IV.2.1 Rassemblement par Minimum	65
IV.2.2 Rassemblement par Moyenne	65

IV.2.3 Rassemblement par Moyenne Pondérée	65
IV.3 Analyse d'un Échantillon de Données	66
IV.4 L'Analyse Globale des Données	68
IV.4.1 Tableaux de Contingence	68
IV.4.1.1 Définition	68
IV.4.1.2 Critères de Classement	68
IV.4.1.3 Les Indices d'Évaluation	69
IV.4.1.4 La Méthode du Minimum	70
IV.4.1.5 La Méthode de la Moyenne	71
IV.4.1.6 La Méthode de la Moyenne Pondérée	72
Conclusion	73
CONCLUSION GENERALE	75
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	77

LISTES DE FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1: Brume	16
Figure I.2: Processus de Rayonnement Nocturne	17
Figure I.3: Brouillard De Rayonnement	18
Figure I.4: Processus de Formation du Brouillard d'Advection	19
Figure I.5: Le Brouillard d'Advection	20
Figure I.6: Le Processus de Formation du Brouillard d'Évaporation	21
Figure I.7: Brouillard d'Évaporation	21
Figure I.8: Le Processus de Formation du Brouillard d'Inversion	22
Figure I.9: Brouillard de Pente	23
Figure I.10: Le Processus de Formation du Brouillard Frontal	24
Figure I.11: Le Brouillard Frontal	24
Figure I.12: Le Brouillard Givrant	25
Figure I.13: Brouillard de Vallée	26
Figure I.14: Processus de Formation du Brouillard de Mélange	27

CHAPITRE II

Figure II.1: Les Étapes d'une Prévision	34
Figure II.2: Illustration des Interactions Entre les Composants de l'IFS	35
Figure II.3: Le Modèle Planétaire APERGE	37
Figure II.4: Le Domaine AROME en Algérie	39
Figure II.5: Le Domaine ALADIN en Algérie	41
Figure II.6: Le Domaine ALADIN-SABLE en Algérie	42
Figure II.7: Illustration schématique d'une prévision d'ensemble	44

CHAPITRE III

Figure III.1: Interface Initiale de R Studio	51
Figure III.2: Messages METAR de l'Aérodrome de Houari Boumediene DAAG d'une partie de la journée du 01/02/2022	54

Figure III.3: Code de Calcul de Visibilité en LWC	55
Figure III.4: Tableau Excel de visibilité LWC	55
Figure III.5: Code de Calcul de Visibilité en LWC et Nd.....	56
Figure III.6: Tableau Excel de visibilité (LWC, Nd)	57
Figure III.7: Code d'extraction de Visibilité AROME	57
Figure III.8: Tableau Excel de visibilité AROME	58
Figure III.9: Code d'Extraction de l'Ensemble (Exemple LWC)	58
Figure III.10: Code de Sélection de la Visibilité Minimale	59
Figure III.11: Code de Calcul de la Visibilité Moyenne	59
Figure III.12: Code de Calcul de la Visibilité Moyenne Pondérée	60
Figure III.13: Code pour Obtention de Tableaux de Contingence (Exemple de Moyenne)	61

CHAPITRE IV

Figure IV.1: Les 49 Points de l'Ensemble	64
Figure IV.2: Graphe Comparatif entre les Observations et les Trois Méthodes de Rassemblement	66

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE III

Tableau III.1: Coefficients des Paramètres de Visibilité	60
---	----

CHAPITRE IV

Tableau IV.1: Coordonnées Géographiques des Points de l'Ensemble	65
Tableau IV.2: Tableaux des visibilitées observées et calculées par minimum moyenne et moyenne pondérée pour le 25/02/2022	66
Tableau IV.3: Forme Générale d'un Tableau de Contingence	68
Tableau IV.4: Tableau de Contingence de la Méthode du Minimum	70
Tableau IV.5: Tableau d'indexes pour la Méthode du Minimum	70
Tableau IV.6: Tableau de Contingence de la Méthode de la Moyenne	71
Tableau IV.7: Tableau d'indexes pour la Méthode de la Moyenne	71
Tableau IV.8: Tableau de Contingence de la Méthode de la Moyenne Pondérée...72	
Tableau IV.9: Tableau d'indexes pour la Méthode de la Moyenne Pondérée	72

LISTE DES ABREVIATIONS

OACI: Organisation de l'Aviation Civile Internationale.

PNT: Prévision Numérique du Temps.

ONM: Office National de la Météorologie.

OMM: Organisation Météorologique Mondiale.

RCC: Regional Climate Center.

ONU: Organisation des Nations Unies.

CRT: Centre Régional de Télécommunications.

AROME: Application de la Recherche à l'Opérationnel   Méso- chelle.

ARPEGE: Action de Recherche Petite  chelle Grande  chelle.

ALADIN: Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International.

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

GFS: Global Forecast System.

IFS: Integrated Forecasting System.

NCEP: National Centers for Environmental Prediction.

LWC: Liquid Water Content (Contenu liquide en eau).

Nd: Number of droplets (Nombre de gouttelettes).

METAR: Meteorological Aerodrome Report.

SPECI: Special Meteorological Report.

OGIMET: Observations Globales Int gr es METAR et TAF.

RVR: Runway Visual Range (Portée visuelle de la piste).

ILS: Instrument Landing System.

ATC: Air Traffic Control.

POD: Probability of Detection (Probabilité de Détection).

FAR: False Alarm Rate (Taux de Fausses Alertes).

PC: Pourcentage Correct.

DAAG: A roport d'Alger Houari Boumediène (code OACI).

TAF: Terminal Aerodrome Forecast.

CRAN: Comprehensive R Archive Network.

GPL: General Public License.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans l'aéronautique, la prévision du brouillard est essentielle, surtout pour les aéroports où une visibilité réduite peut gravement perturber les opérations au sol et en vol. Cette étude suggère une approche centrée sur la prévision collective, visant à améliorer la précision des prédictions de brouillard en fusionnant différentes sources d'information et plusieurs points d'application afin d'évaluer la visibilité.

L'objectif principal de ce mémoire est de développer une méthode de prévision d'ensemble appliquée au brouillard, en combinant les visibilités calculées à partir de différentes variables (La teneur d'eau liquide « LWC » et la concentration de gouttelettes « Nd »), ainsi que les sorties directes du modèle numérique AROME, afin de les comparer aux observations réelles issues des données METAR de l'aéroport DAAG. L'évaluation est ensuite effectuée à l'aide de tableaux de contingence, permettant d'analyser la précision des prévisions selon des seuils opérationnels.

Le premier chapitre parmi un total de quatre, propose une analyse approfondie du phénomène du Brouillard, en donnant ses définitions, processus de formation et en le distinguant de la brume. Il énumère également ses types, les propriétés uniques de chacun, ainsi que les défis qu'ils posent pour la prévision. Il analyse ensuite, les effets du brouillard dans l'aviation.

Le deuxième chapitre est consacré à la prévision numérique du temps y compris sa définition et celle de l'Office National de la Météorologie ainsi que leurs histoires. Il explore les étapes opérationnelles de cette première. Il discute aussi son exactitude, ses limitations et ses modèles différents. Le chapitre continue sur les formules de calcul de la visibilité basées sur la teneur en eau liquide (LWC), la concentration de gouttelettes (Nd), et les formules utilisées dans le modèle AROME, et définit la prévision d'ensemble.

Le 3^{ème} chapitre explore l'aspect informatique du traitement des données en présentant le langage R, sa définition, son historique, son interface et ses principaux champs d'application. Le chapitre traite aussi la lecture des METARs, les METARs automatiques, les rapports SPECI et la plateforme OGIMET. La dernière partie montre les différents scripts en langage R utilisés pour la calcul et extraction de différentes visibilité, isolation de points d'ensemble, obtention de visibilité minimale, moyenne et pondérée, ainsi que la création de tableaux de contingence.

Le chapitre IV présente les résultats obtenus et leur analyse. Les visibilité calculées par différentes méthodes sont comparées aux observations réelles de DAAG sur l'ensemble du mois de février 2022. L'évaluation s'appuie sur des seuils définis de visibilité (VERY BAD, BAD, GOOD), et les tableaux de contingence permettent de quantifier les écarts entre prévisions et observations, en mettant en évidence les performances relatives de chaque approche.

Chapitre I

**CARACTERISTIQUES ET TYPOLOGIE DU
BROUILLARD**

Introduction:

Ce chapitre propose une analyse approfondie du Brouillard, en commençant par ses définitions de base, en le distinguant de la brume, puis en décrivant son processus de formation. Il aborde ensuite en détail ses différents types, y compris l'advection, l'évaporation, l'inversion, la pente, le frontal, le givrant, la vallée et le mélange, tout en analysant leurs propriétés uniques et les défis qu'ils posent en termes de prévision. Le chapitre se termine par une analyse des effets du brouillard dans l'aviation sur les opérations pré-vol, les phases de décollage et d'atterrissage, la navigation en vol et les opérations post-vol au sol.

I.1 Définitions:

I.1.1 Brouillard:

Le brouillard est la suspension dans l'atmosphère de très petites gouttelettes d'eau réduisant la visibilité au sol à moins d'un kilomètre. Le brouillard est en fait un nuage dont la base touche le sol [1]. On parle de brouillard lorsqu'il est présent au niveau du sol et que la visibilité est inférieure à 1 km. La couche de brouillard peut avoir une épaisseur de quelques mètres à quelques centaines de mètres. Lorsque la visibilité est comprise entre 1 et 5 km, on parle alors de brume [2].

I.1.2 Brume:

La brume est un phénomène météorologique qui se caractérise par la présence de fines gouttelettes d'eau en suspension dans l'air, qui donnent à l'atmosphère une apparence opaque et floue. La brume se forme lorsque l'humidité de l'air est élevée et que la température de l'air est proche de celle de la rosée. Elle peut être causée par la proximité de l'eau, comme sur les côtes ou les lacs, ou par des conditions météorologiques particulières, comme lorsqu'il y a un fort gradient de température entre le sol et l'air. La brume peut être assez épaisse pour rendre la visibilité difficile, surtout lorsqu'elle est accompagnée de brouillard [3].



Figure I.1: Brume [3].

I.2 Formation Du Brouillard:

Le brouillard peut se former et se dissiper en raison de la variation de la température de l'air et/ou de la quantité de vapeur d'eau, c'est-à-dire l'humidité absolue de l'air. En ce qui concerne la variation de la température, sur le plan physique, plus l'air est frais, moins il peut contenir de vapeur d'eau. Lorsqu'un "paquet" d'air se refroidit, il devient saturé en vapeur d'eau et cette dernière condense pour former des gouttelettes et donc du brouillard. L'humidité relative est alors de 100%. Inversement, si l'humidité relative est déjà de 100% et qu'il y a du brouillard et que la température de l'air augmente, cet air peut soudain contenir plus de vapeur d'eau et les gouttelettes commencent à s'évaporer, ce qui entraîne la dissipation du brouillard [2].

I.3 Types De Brouillard:

I.3.1 Brouillard De Rayonnement:

I.3.1.1 Les Propriétés du Brouillard de Rayonnement:

Le brouillard de rayonnement se forme généralement après le coucher du soleil, lorsque le sol a cédé sa chaleur à l'atmosphère environnante par rayonnement. Ce processus se produit le plus souvent en automne et en hiver, lorsque les longues nuits entraînent un refroidissement important des basses couches de l'atmosphère. En se refroidissant, l'humidité relative de l'air augmente et,

lorsqu'elle atteint 100 %, une couche de brouillard très basse et peu dense commence à se former près de la surface de la terre, même à quelques dizaines de centimètres, qui s'élève progressivement et, lorsqu'elle dépasse le seuil de deux mètres, on commence à parler de véritable brouillard. L'arrivée du soleil réchauffe alors la surface de cet air qui, par brassage, tend à se dissoudre de plus en plus. Le brouillard de rayonnement a tendance à suivre le cycle diurne [2].

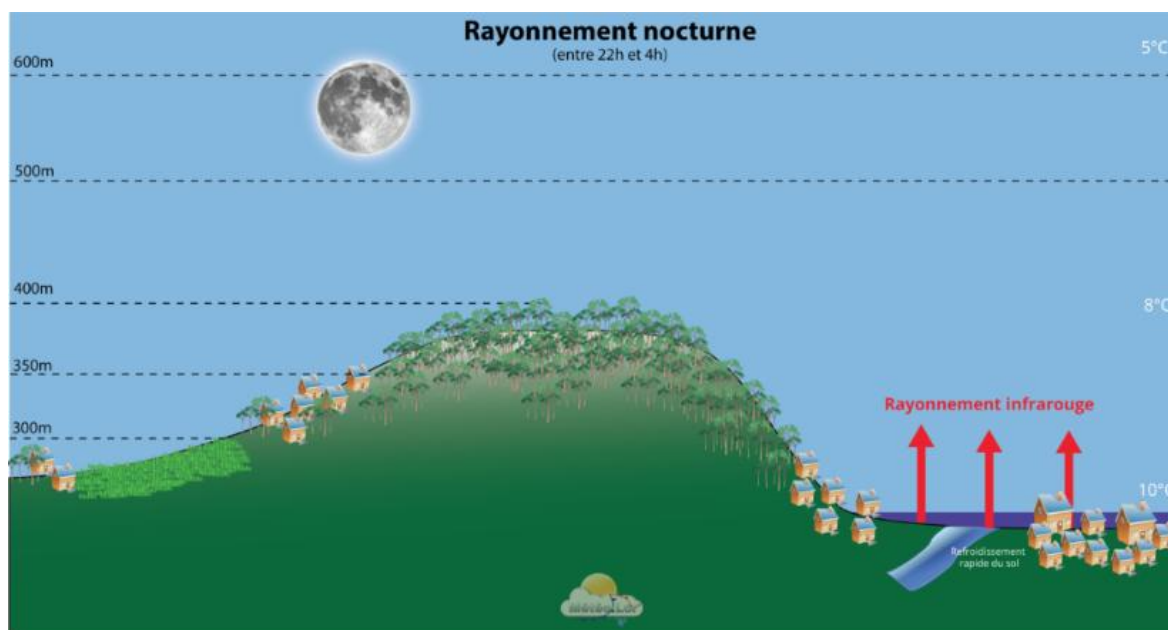


Figure I.2: Processus de Rayonnement Nocturne [6].

I.3.1.2 Les Défis de Prévision Du Brouillard de Rayonnement:

Le brouillard de rayonnement constitue un défi majeur pour les prévisions, et ce, pour plusieurs raisons [5].

- **L'humidité:** Il n'est pas garanti que du brouillard se développe lorsque le taux d'humidité est de 100 % [5].
- **Le Vent:** Lorsque les prévisions de vent de surface sont erronées, ne serait-ce que de quelques nœuds, la formation de brouillard peut s'en trouver totalement affectée. Si les vents sont trop forts, il y aura trop de mélange dans l'étage inférieur, et l'air saturé sera trop étalé pour se transformer en brouillard à la surface. En revanche, un vent calme ou inexistant ne mélangera pas suffisamment l'air et laissera une très fine couche saturée à la surface, favorisant la formation de rosée ou de givre

(ce qui pourrait, à son tour, retarder la formation du brouillard jusqu'au lever du soleil) [5].

- **La Nébulosité:** En cas de présence inattendue de cirrus, les températures de l'air ne peuvent pas se refroidir suffisamment pour qu'il y ait saturation. Inversement, lorsque des cirrus sont attendus et ne sont pas présents, ou qu'ils sont beaucoup plus minces que prévu, il peut alors y avoir saturation de la surface [5].



Figure I.3: Brouillard De Rayonnement [4].

I.3.2 Brouillard d'Advection:

I.3.2.1 Les Propriétés du Brouillard d'Advection:

Un brouillard d'advection se forme lorsqu'une masse d'air chaud et humide se déplace sur une surface relativement froide. La base de cette masse d'air se refroidit au contact de la surface froide et ce refroidissement se propage sur une certaine épaisseur. Le refroidissement entraîne la condensation de la vapeur d'eau [1].

Ce brouillard est rarement très dense (visibilité rarement inférieure à 100 m), mais son épaisseur verticale est importante et il peut se former à tout moment de la journée. La plupart des brouillards rencontrés en haute mer sont des brouillards d'advection résultant d'une masse d'air chaud évoluant sur une mer froide [1].

Le brouillard d'advection a tendance à dériver vers la côte et peut s'amincir à mesure que le sol se réchauffe. Si la terre est chaude en raison d'un réchauffement diurne limité, l'air se mélange et devient turbulent. Cette turbulence, combinée au transfert de chaleur par convection entre l'air et la surface, dissipe le brouillard ou le fait s'élever et se transformer en stratus [7].

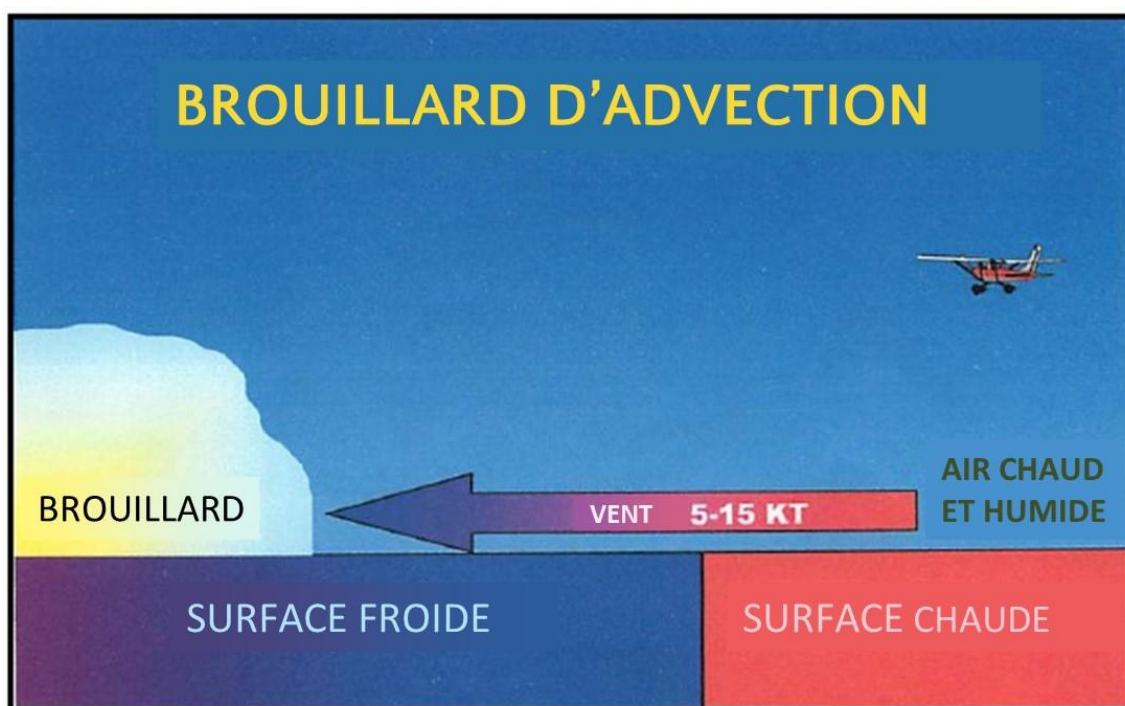


Figure I.4: Processus de Formation du Brouillard d'Advection [7].

I.3.2.2 Les Défis de Prévision du Brouillard d'Advection:

- Détermination de la dissipation d'un brouillard d'advection qui a persisté pendant des jours ou des semaines. De petites variations d'humidité et le gradient horizontal de température peuvent influencer le moment où le brouillard se transforme en stratus [7]
- La présence d'une pluie modérée peut augmenter la visibilité dans un brouillard préexistant, car les grosses gouttelettes de pluie recueillent une partie des gouttelettes de brouillard lorsqu'elles tombent au sol. Cependant, les fortes pluies ont tendance à réduire la visibilité dans le brouillard en raison de la pluie elle-même [7].
- La bruine, en revanche, a tendance à réduire la visibilité dans le brouillard en raison de la taille beaucoup plus petite des gouttelettes de la bruine [7].

- La neige peut avoir pour effet d'améliorer ou de réduire la visibilité dans le brouillard, en fonction de l'importance des chutes de neige [7]



Figure I.5: Le Brouillard d'Advection [4].

I.3.3 Brouillard d'Évaporation:

I.3.3.1 Les Propriétés du Brouillard d'Évaporation:

Le brouillard d'évaporation (ou brouillard d'advection froide) se forme lors du passage d'une masse d'air froid et stable au-dessus d'une étendue d'eau beaucoup plus chaude. L'évaporation de l'eau chaude sature l'air froid qui la surplombe; la vapeur d'eau s'y condense et produit de la «fumée de mer», ou, dans les régions polaires, de la «fumée de mer arctique» [8].

C'est un peu le contraire du brouillard d'advection car il nécessite une surface chaude et une masse d'air très froide (il faut qu'il y ait une différence de températures suffisantes entre le sol et l'air) [17].

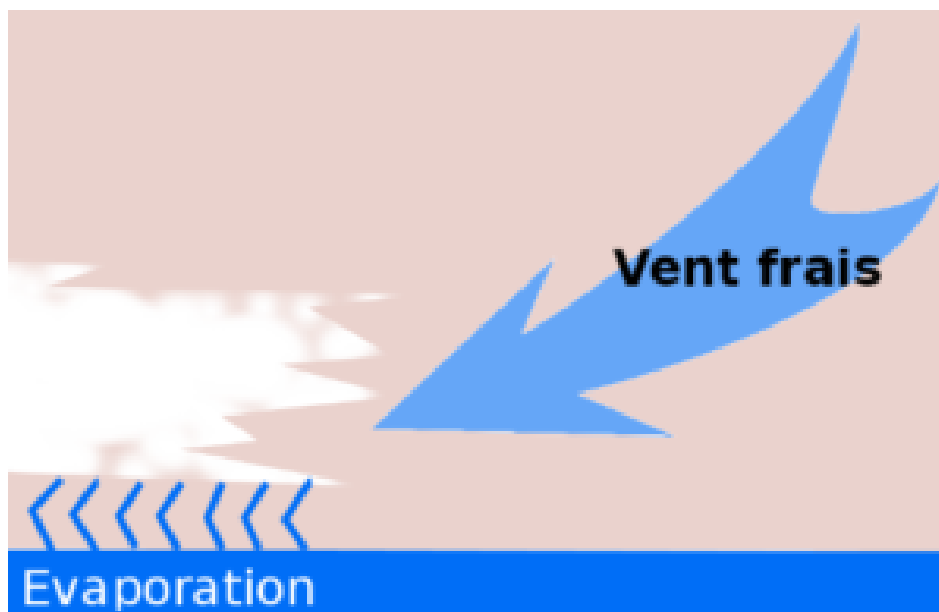


Figure I.6: Le Processus de Formation du Brouillard d'Évaporation [16].

Il est très souvent associé à la brise de terre établie la nuit qui amène de l'air froid au contact d'un air maritime chaud et humide dont la vapeur d'eau finit par condenser par refroidissement [1].

Concernant sa dissipation, son comportement indique une forte sensibilité à l'augmentation de la température et diminution de l'humidité au-dessus des surfaces d'eau [9].



Figure I.7: Brouillard d'Évaporation [4].

I.3.4 Brouillard d'Inversion:

I.3.4.1 Les Propriétés du Brouillard d'Inversion:

Sous un anticyclone, l'air est comprimé vers le sol. On parle de « hautes pressions ». Cette compression crée un échauffement de la masse d'air en altitude, entre la couche d'air initial près du sol et celle qui est comprimée par le haut. Cette zone de compression chauffée s'appelle une « inversion thermique ». En effet, en temps normal, plus on prend de l'altitude, plus la température baisse. Arrivé au niveau de l'inversion, la température remonte brutalement de 2 à 10 °C supplémentaires. Même principe que le précédent brouillard, c'est au contact de ces deux masses d'air différentes que le brouillard se forme. Sauf que celui-ci est généralement plus haut en altitude et bien plus épais. Il se forme généralement entre 350 mètres et 700 mètres d'altitude et mesure entre 100 et 300 mètres d'épaisseur [6].

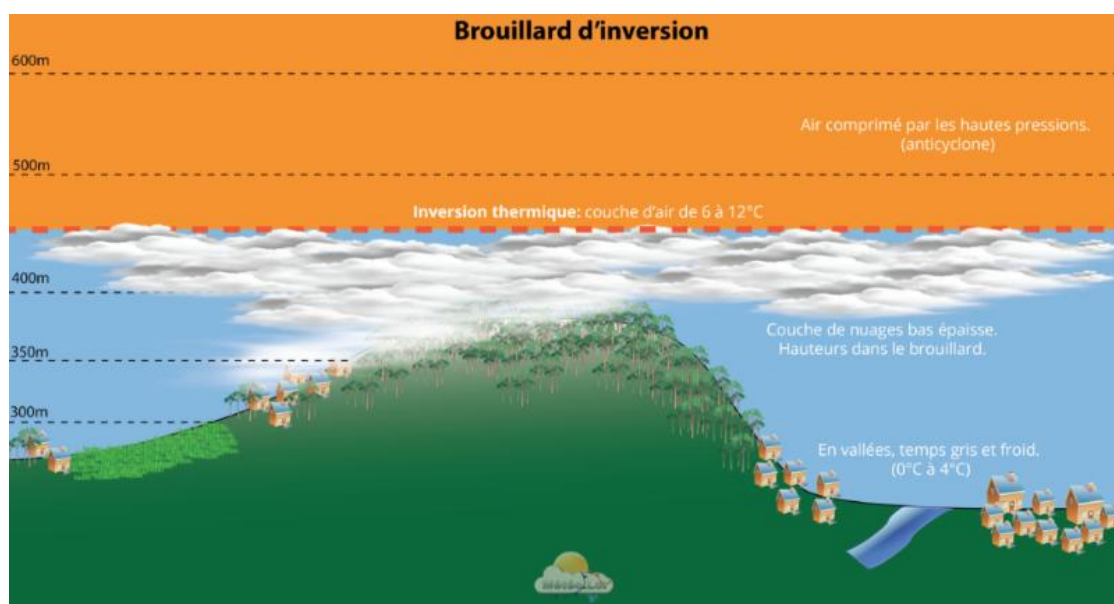


Figure I.8: Le Processus de Formation du Brouillard d'Inversion [6].

I.3.5 Brouillard de Pente:

I.3.5.1 Les Propriétés du Brouillard de Pente:

Un autre type de brouillard est le brouillard orographique. Appelé également brouillard de pente, il se forme lorsque les masses d'air sont forcées de s'élever le long d'un obstacle (par exemple une colline ou une montagne) [10].

Dans les régions présentant un relief marqué, il est possible d'observer un brouillard se formant le long des pentes et laissant la vallée dégagée. Cela se produit lorsqu'un vent faible pousse de l'air chaud et humide à s'élever le long d'une pente. En s'élevant l'air se détend et donc se refroidit pour atteindre son point de condensation. Un brouillard se forme alors, qui reste accroché au relief [16].

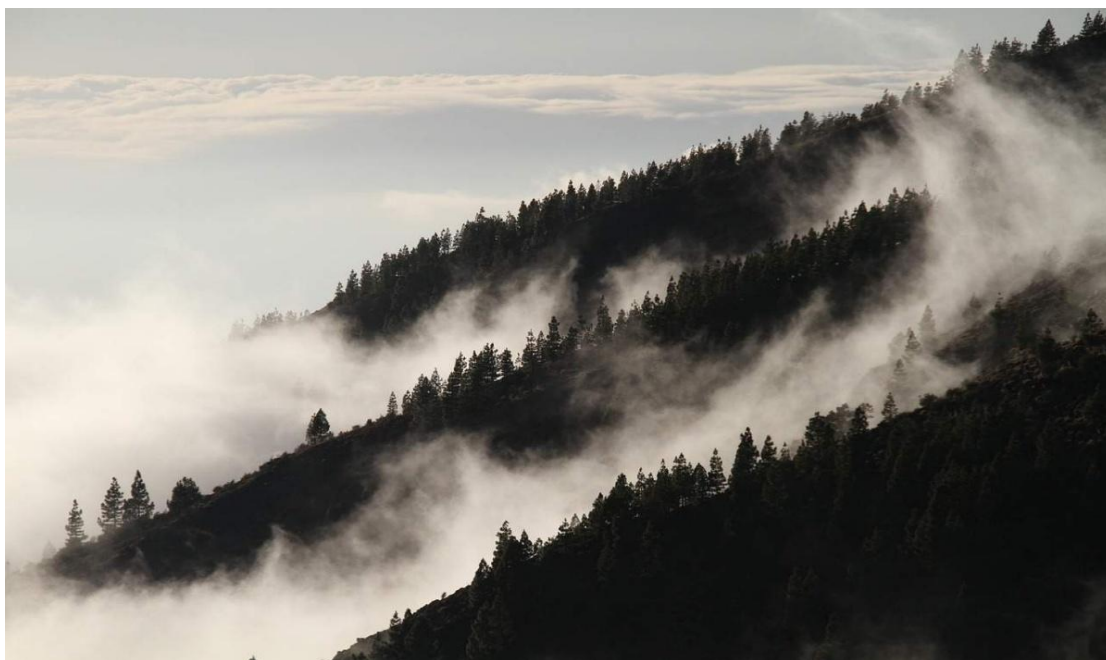


Figure I.9: Brouillard de Pente [10].

Le brouillard de pente est une sorte de brouillard de montagne. Observé du dessous, il a l'apparence d'un stratus. À l'intérieur, la visibilité est celle d'un brouillard. S'il se situe au-dessus du brouillard de pente, l'observateur aura l'impression de voir la surface d'un nuage [11].

Si l'ascension est brusque, des stratus se formeront à la place du brouillard [12].

I.3.6 Brouillard Frontal:

I.3.6.1 Les Propriétés du Brouillard Frontal:

Si la pluie tombe de la couche d'air supérieure, plus chaude, dans l'air plus froid situé en dessous et que la température des gouttes est plus élevée que celle de

l'air froid, les gouttes s'évaporent. L'humidité de l'air peut alors augmenter et finalement atteindre le niveau de condensation [10].

Le brouillard frontal, se forme à l'avant des fronts chauds ou d'une occlusion, suivant cette condensation [12].

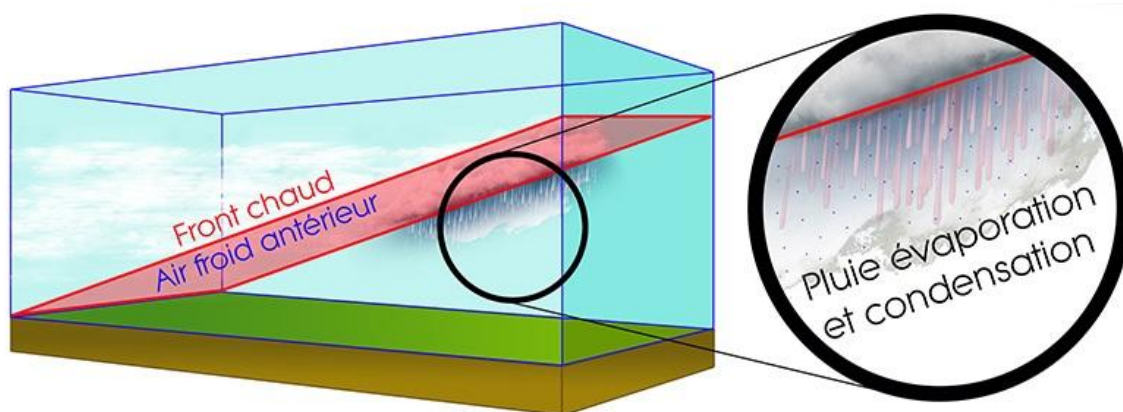


Figure I.10: Le Processus de Formation du Brouillard Frontal [4].

Ce brouillard est généralement de courte durée et suit le mouvement du front [10].

Son association aux nuages frontaux et aux précipitations le rend particulièrement gênant pour l'aviation [12].



Figure I.11: Le Brouillard Frontal [12].

I.3.7 Brouillard Givrant:

I.3.7.1 Les Propriétés du Brouillard Givrant:

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le brouillard givrant n'est pas constitué de minuscules cristaux de glace. C'est un brouillard composé de gouttelettes d'eau surfondue (à l'état liquide par température négative, elles gèlent au moindre contact) [1].

Le brouillard givrant apparaît à des températures inférieures à 0 °C lorsque des gouttelettes de brouillard surfondu gèlent au contact avec le sol ou avec d'autres objets et forment un dépôt de givre. Dans le cadre des activités d'observation et de prévision météorologiques pour l'aéronautique, tout brouillard composé principalement de gouttelettes d'eau à des températures inférieures à 0° C est signalé comme brouillard givrant, qu'il dépose du givre ou non [13].

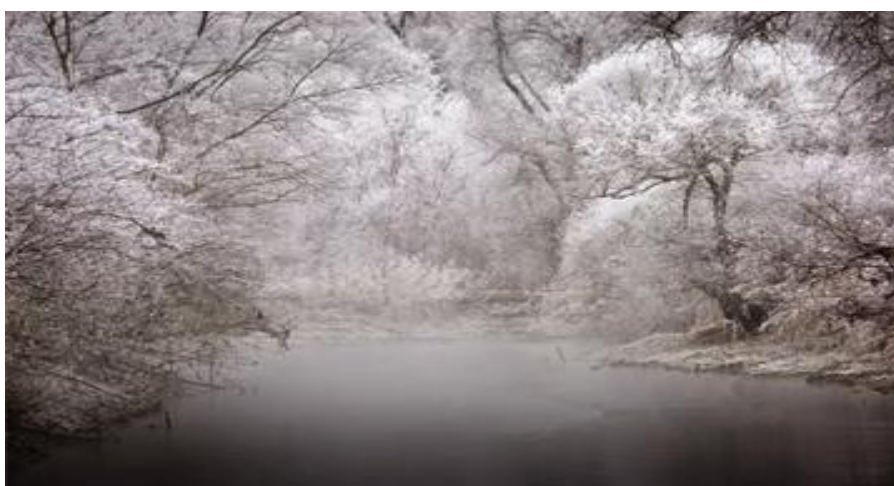


Figure I.12: Le Brouillard Givrant [12].

I.3.8 Brouillard de Vallée:

I.3.8.1 Les Propriétés du Brouillard de Vallée:

Le brouillard de vallée se forme dans les vallées montagneuses, généralement en hiver. Le brouillard de vallée se développe lorsque les montagnes empêchent l'air dense de s'échapper. Le brouillard est emprisonné dans la cuvette de la vallée [14].

Comme l'air froid est plus lourd que l'air chaud, l'air froid refroidi par rayonnement descend sur les flancs des collines dans les vallées, et il est donc facile que du brouillard se forme dans de tels endroits, surtout s'ils sont humides. Par

conséquent, ce type de brouillard se produit fréquemment en automne et en hiver et atteint sa densité maximale tôt le matin lorsque le soleil se lève au-dessus de l'horizon [19].

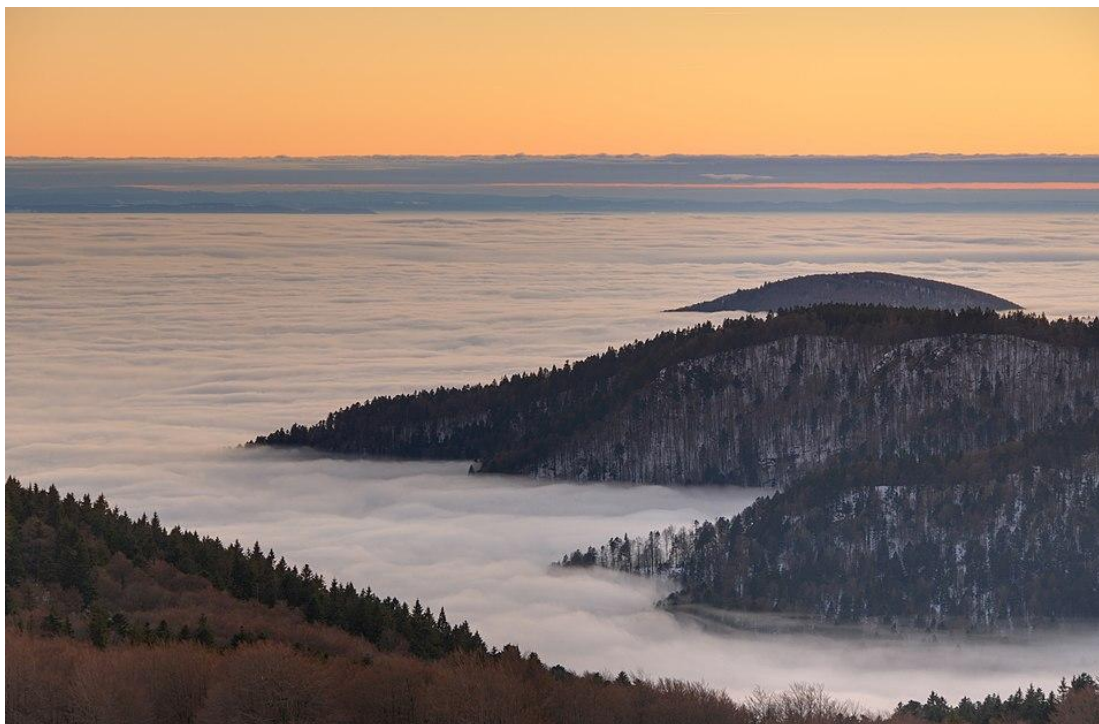


Figure I.13: Brouillard de Vallée [18].

I.3.9 Brouillard de Mélange:

I.3.9.1 Les Propriétés du Brouillard de Mélange:

Le brouillard de mélange se produit par le refroidissement d'une masse d'air chaud par mélange avec une masse d'air plus froid. Ce processus est assez limité car plusieurs conditions sont indispensables : un brassage important des deux masses d'air, un fort écart de température entre les masses d'air et une forte humidité. Ce type est plutôt rare et peu dense [12].

Le brouillard de mélange prend naissance à l'interface de deux masses d'air d'origines et de températures différentes. En effet, la rencontre de deux masses d'air humide, mais non sursaturé, et de températures différentes, peut produire une zone de mélange dans laquelle la vapeur se trouve naturellement sursaturée. Un nombre important de molécules d'eau sous forme de vapeur peut alors

s'agglomérer sur les noyaux de condensation présents. Le brouillard qui se forme est généralement léger et de courte durée [20].

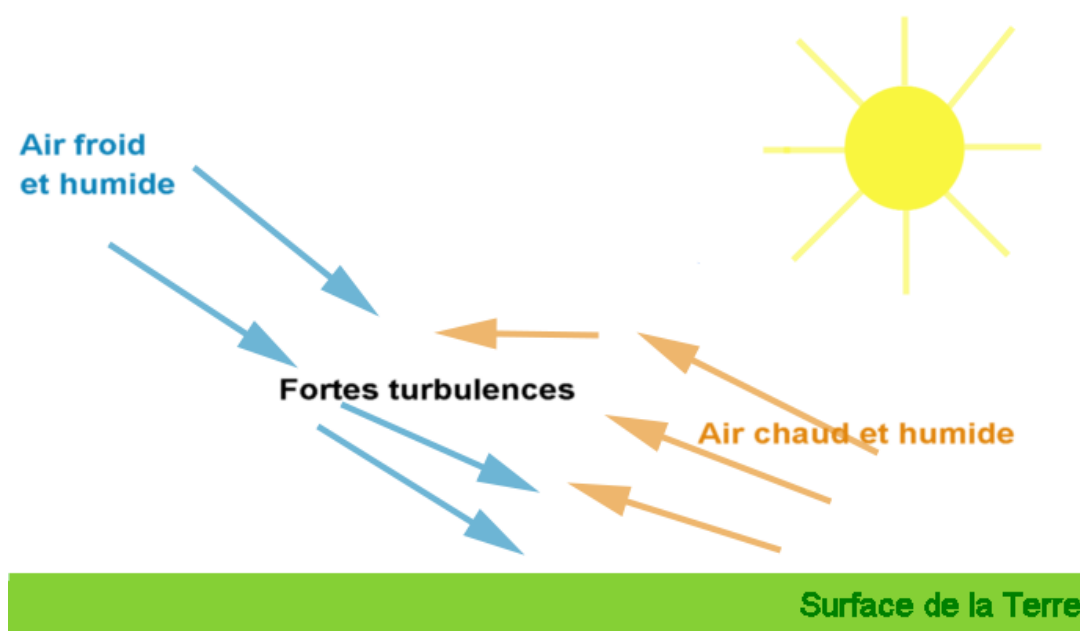


Figure I.14: Processus de Formation du Brouillard de Mélange [17].

I.4 L'influence du Brouillard en Aéronautique:

Le brouillard affecte significativement la sécurité de vol, l'efficacité, et la prise de décision opérationnelle. Son impact varie à travers nombreuses phases de vol, incluant le pré-vol, durant et post-vol [21]:

I.4.1 Opérations pré-vol:

- **Accessibilité de l'aéroport:** Le brouillard dense réduit considérablement la visibilité au sol, compliquant les mouvements comme le roulage, l'alignement sur la piste et l'accès aux terminaux [21].
- **Planification des vols:** Le brouillard persistant perturbe la programmation des vols, provoquant des retards, des modifications d'horaires ou des annulations [21].
- **Vérifications de sécurité:** Le personnel au sol rencontre des difficultés pour effectuer des inspections pré-vol complètes, notamment celles liées à

la cellule de l'appareil ou à la détection de givrage, en raison de la faible visibilité [21].

I.4.2 Décollage et atterrissage:

- **Portée visuelle sur la piste (RVR):** Le brouillard réduit la portée visuelle sur la piste, rendant les phases de décollage et d'atterrissage particulièrement critiques [21].
- **Dépendance aux instruments:** Les pilotes doivent s'appuyer fortement sur les systèmes d'atterrissage aux instruments (ILS) [21].
- **Remises de gaz (go-arounds):** Les conditions de faible visibilité augmentent le risque de remise de gaz, ce qui entraîne une consommation de carburant supplémentaire et des délais opérationnels [21].

I.4.3 Navigation en vol:

- **Réduction de la conscience situationnelle:** Bien que le brouillard n'affecte pas directement les avions en altitude, il peut obscurcir les repères visuels nécessaires à la navigation à basse altitude, notamment en approche [21].
- **Séparation du trafic aérien:** Le contrôle aérien (ATC) doit souvent élargir les séparations entre avions pour maintenir la sécurité, ce qui ralentit le rythme des arrivées et des départs [21].
- **Détournements d'urgence:** Lorsque les conditions de brouillard sont trop sévères, les avions peuvent être contraints de se dérouter vers d'autres aéroports, provoquant des perturbations pour les compagnies et les passagers [21].

I.4.4 Opérations post-vol et au sol:

- **Roulage à l'aveugle (Taxiing):** La faible visibilité au sol due au brouillard augmente considérablement les risques de collision entre avions, ou avec des véhicules d'assistance, notamment sur les voies de circulation complexes [21].

- **Sécurité des passagers:** Le débarquement dans des conditions brumeuses pose des défis logistiques, en particulier pour les gros porteurs. La coordination entre les passerelles, les bus, et le personnel au sol devient plus difficile et doit respecter des protocoles de sécurité renforcés [21].

La visibilité représente donc la principale problématique du brouillard. Dans les brouillards les plus épais, la visibilité peut descendre en dessous de cinquante mètres. En plus de réduire la visibilité, les brouillards peuvent entraîner de faibles précipitations sous forme de bruine, voire de neige, et des phénomènes de dépôts liquides ou givrants par températures négatives [22].

Conclusion:

Pour conclure, le Brouillard est un des phénomènes les plus éminents dans le domaine de l'aviation. À travers ce chapitre dont le but était de comprendre ce phénomène, ce qu'il représente dans ses différentes formes est connu ainsi que comment il peut affecter le déroulement de nos opérations.

Chapitre II

LA PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

Introduction:

Ce chapitre est consacré à la prévision numérique du temps, en commençant par sa définition et la fonction principale de l'Office National de la Météorologie. Il explique l'idée générale derrière la PNT, retrace son histoire et décrit ses différentes étapes, y compris la collecte et l'assimilation des données, le calcul des modèles et l'expertise humaine. Ensuite, l'exactitude et les limitations des modèles sont discutées. Puis, des modèles régionaux (AROME, ALADIN, ALADIN-SABLE) et des modèles globaux (ECMWF-IFS, GFS, ARPEGE) sont présentés, ainsi que leurs variations en Algérie. Avant de conclure avec les formules de calcul de la visibilité basées sur la teneur en eau liquide (LWC), la concentration de gouttelettes (Nd), et les formules utilisées dans le modèle AROME, le chapitre aborde également la prévision d'ensemble et son application sur le brouillard.

II.1 Définition de la Prévision Numérique du Temps:

La prévision numérique du temps (PNT) est une méthode utilisée par les météorologues pour prévoir le temps en résolvant des équations mathématiques qui décrivent le comportement de l'atmosphère. Ces équations, connues sous le nom d'équations fondamentales du mouvement, de la conservation de la masse et des principes thermodynamiques, sont basées sur des lois physiques régissant le comportement de l'atmosphère [23].

En Algérie, l'organisme principale responsable est l'Office National de la Météorologie (ONM) qui est la source des données traitées dans ce travail et également le collaborateur principal pour ce dernier.

II.2 L'Office National de la Météorologie:

L'ONM assure la représentation permanente de l'Algérie auprès de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Il contribue en effet en sa qualité de Centre Régional de Télécommunications (CRT) pour la collecte et la transmission des données météorologiques à l'échelle de l'Afrique. Comme, Il est membre à part entière auprès du Centre Régional du Climat (RCC de l'OMM) [37].

Le rôle principal de l'ONM est de promouvoir la veille météorologique à travers l'observation, la surveillance des conditions météorologiques et climatiques et la

fourniture des prévisions météorologiques et les avis météorologiques aux autorités, partenaires ainsi que d'autres institutions nationales [37].

II.3 Principe de la Prévision Numérique du Temps:

Le principe de la prévision numérique du temps est de simuler sur un ordinateur l'évolution de l'atmosphère de manière réaliste, plus vite qu'elle ne se déroule dans la réalité [24].

Cette simulation repose sur les lois physiques qui gouvernent l'évolution atmosphérique. Les principales sont celles de la mécanique des fluides. Elles sont complétées par celles d'autres processus présents dans l'atmosphère : des changements d'état (l'eau se condense ou s'évapore), beaucoup de turbulence et de nombreuses interactions avec la surface et même l'espace [24].

II.4 Historique:

En 1904, le scientifique norvégien Wilhelm Bjerknes proposa un modèle mathématique destiné à prévoir l'évolution des océans et de l'atmosphère. Il posa ainsi les bases à la fois de la météorologie (prévisions à court terme) et de la climatologie (prévisions à long terme) [25].

Ce modèle a cependant longtemps attendu son heure de gloire. En cause : sa complexité mathématique et le challenge que représente le calcul effectif de ses solutions. Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, le développement de l'informatique permit enfin de calculer les premières prévisions météorologiques convaincantes. Les théorèmes se feront cependant encore attendre, car c'est seulement entre 1992 et 2007 que fut montré que ce modèle a bien une et une seule solution. Un résultat rassurant pour un modèle prédictif dont on ne sait que calculer des solutions approchées, faute de formule explicite pour la solution exacte. C'est l'histoire de ce modèle mathématique, de son origine physique, de son utilisation numérique et de sa justification mathématique en tant que modèle prédictif que nous allons raconter [25].

II.5 Les Étapes d'une Prévision Numérique du Temps:

II.5.1 Collecte des Données d'observations:

La première étape consiste à rassembler toutes les observations que l'on sait utiliser, relative à une fenêtre temporelle récente. Pour cela, la météorologie développe et entretient toute une infrastructure internationale, c'est l'un des rôles principaux de l'Organisation Météorologique Mondiale, agence de l'ONU basée à Genève [24].

II.5.2 Assimilation des Données:

La deuxième étape consiste à combiner différentes sources d'informations pour construire l'état initial de la prévision. Les sources d'informations en jeu sont, en plus des observations, une première ébauche de ce futur état initial, le tout complété par des statistiques qui caractérisent les erreurs présentes dans ces différentes données. Cette première ébauche est en général une prévision très récente, parfois refaite après avoir attendu des observations arrivées très tard et avoir refait aussi, avec d'avantage de données, une assimilation de la période précédente. L'enchaînement de ces re-assimilations tardives constitue le cycle d'assimilation [24].

II.5.3 La Prévision Numérique:

Le modèle numérique prend ensuite ces informations sur l'état actuel de l'atmosphère et les fait passer par des équations physiques qui prédisent l'évolution des conditions météorologiques. Lorsque le modèle informatique a fini de calculer les équations, il produit des données sur le futur état de l'atmosphère pendant les prochaines heures, jours et même semaines. Il le fait non seulement pour les conditions au sol, comme la température, l'humidité et la vitesse du vent, mais aussi pour les conditions à différentes hauteurs au-dessus du sol [26].

II.5.4 La Prévision Expertisée:

Une expertise humaine est indispensable pour analyser ces résultats complexes et les traduire en informations concrètes. Les prévisionnistes de Météo-France étudient les résultats de plusieurs modèles numériques, en plus d'ARPEGE et d'AROME, et les ajustent, pour aboutir à la prévision météo... Déclinée en cartes et bulletins [27].

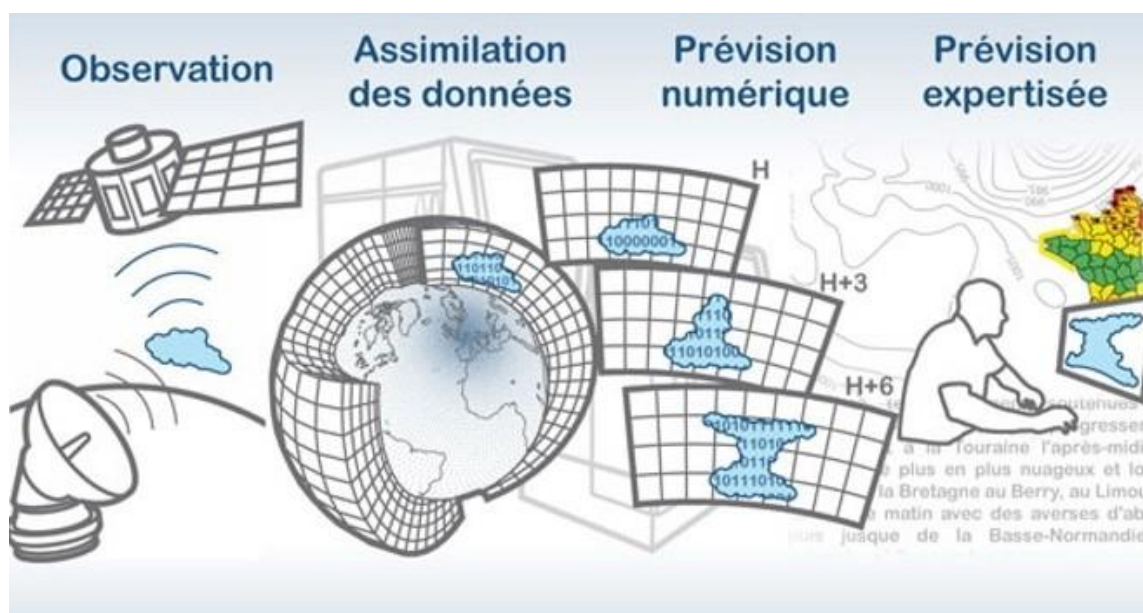


Figure II.1: Les Étapes d'une Prévision [26].

II.6 La Précision du Modèle Numérique:

Les modèles numériques ne produisent pas de prévisions parfaites, principalement pour deux raisons. La première raison est liée à la qualité des données. Si les données que nous alimentons dans les modèles météorologiques sont fausses, alors les prévisions seront fausses [26].

Le terrain est la deuxième raison pour laquelle les modèles sont parfois inexacts, et ceci est dû à la modélisation de terrains à altitudes variable (montagnes, vallées...) qui est affectée par la capacité informatique disponible [26].

II.7 Les Modèles de la Prévision Numérique du Temps:

II.7.1 Les Modèles Globaux:

II.7.1.1 ECMWF Integrated Forecasting System (IFS):

Le ECMWF Integrated Forecasting System (ECMWF-IFS) couvre le domaine global et consiste en plusieurs composants [28]:

- Un modèle de circulation générale atmosphérique.
- Un modèle de vagues océaniques.
- Un modèle de surface terrestre.
- Un modèle de circulation générale océanique.
- Des modèles de perturbation pour : Assimilation de données/Génération d'ensembles.

De différentes configurations de ses composants sont exécutées opérationnellement pour produire des prévisions à [28] :

1. Échelle moyen (jusqu'à 15 jours).
2. Échelle étendue (jusqu'à 46 jours).
3. Échelle saisonnière (jusqu'à 7 mois).

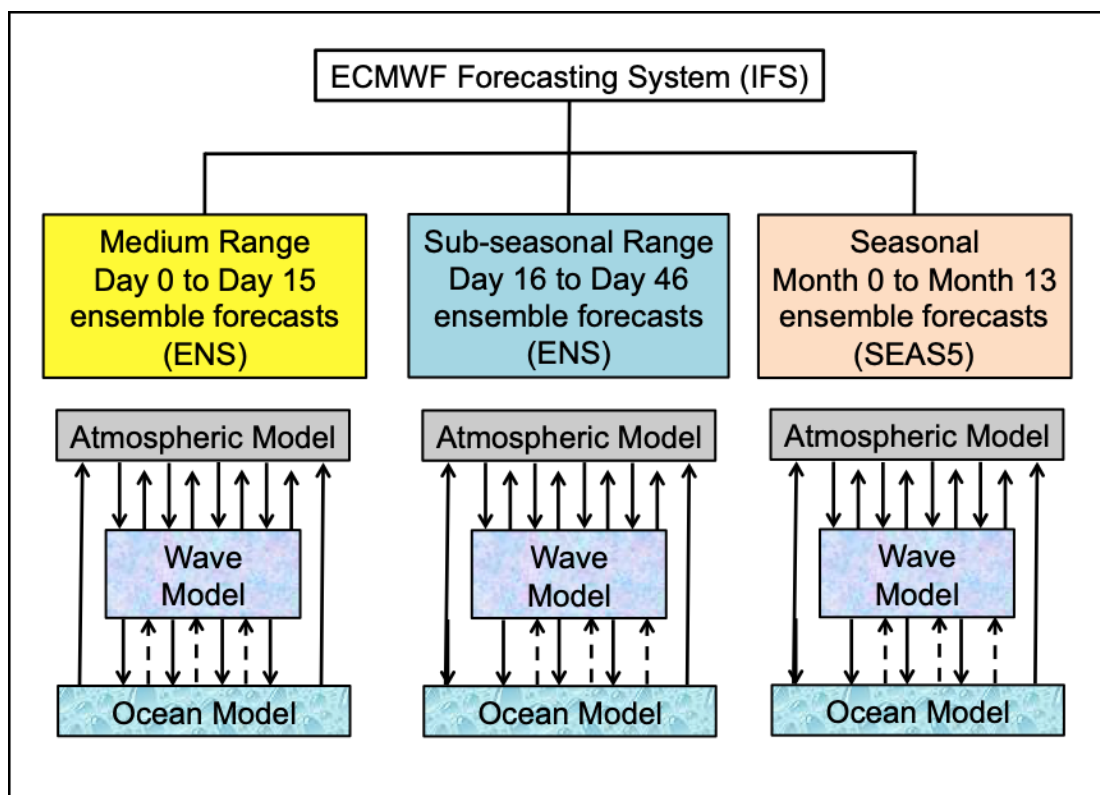


Figure II.2: Illustration des Interactions Entre les Composants de l'IFS [29].

II.7.1.2 Global Forecast System (GFS):

Le Global Forecast System (GFS) est un modèle de prévision météorologique développé par le National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Il génère des données pour de nombreuses variables atmosphériques et terrestres, on parle de températures, vents, précipitation, humidité du sol, et concentration d'ozone atmosphérique [30].

Ce système contient quatre modèles différents (modèle atmosphérique, modèle océanique, modèle terrestre, modèle de glace de mer) qui travaillent ensemble pour précisément représenter les conditions météorologiques [30].

Tout le globe est couvert par le GFS à une résolution horizontale de base de 28 kilomètres entre les points de grille, exploitée par les prévisionnistes pour obtenir des prévisions jusqu'à 16 jours à l'avance. La résolution horizontale diminue jusqu'à 70 kilomètres entre les points de grille pour les prévisions d'une à deux semaines [32].

II.7.1.3 Le Modèle ARPEGE:

Le modèle de prévision numérique planétaire Arpège (Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle) 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. Avec une nouvelle version tous les 12 mois, ce code est en constante évolution avec une durée de vie largement supérieure à celle de tous ses prédécesseurs, puisqu'il est utilisé opérationnellement depuis plus de 30 [31]. ARPEGE anticipe les phénomènes de grande échelle sur l'ensemble du globe grâce à des mailles variant d'une précision fine de 5 km sur l'Europe à une précision plus lâche de 24 km aux antipodes. Ce modèle de prévision numérique planétaire est essentiel pour la prévision opérationnelle du temps à Météo-France. Il fournit des prévisions jusqu'à 4 jours à l'avance [27].



Figure II.3: Le Modèle Planétaire APERGE [27].

II.7.2 Les Modèles Régionaux:

II.7.2.1 Le Modèle AROME:

Le modèle AROME est le modèle de prévision numérique du temps à maille fine exploité en opérationnel à Météo-France et utilisé également en Algérie. Il est opérationnel depuis décembre 2008. Il a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux. La maille de calcul du modèle, nettement plus fine que celle de ses prédécesseurs, est de 1,3 kilomètres (contre 5 km pour ARPEGE). Dès sa première version, AROME a démontré son apport par rapport aux prévisions de son modèle coupleur (modèle qui lui fournit les

informations météorologiques sur les bords de son domaine) qui à l'époque était ALADIN (une version d'ARPEGE sur un domaine limité à l'Europe). Et à partir de sa deuxième version, l'augmentation de résolution horizontale d'ARPEGE sur l'Europe a permis de coupler directement AROME à ARPEGE. Et plus récemment, une version d'AROME dédiée à la prévision immédiate (quelques heures d'échéance) est opérationnelle. De plus, une prévision d'ensemble AROME (permettant d'estimer l'incertitude d'une prévision, ou de fournir une probabilité de dépassement de seuils à risque) est venue compléter la version dite déterministe d'AROME [33].

Le Modèle AROME en Algérie/ONM:

Le modèle AROME (Application of Research to Operations at Mesoscale), est le modèle qui est utilisé par l'ONM pour la modélisation à échelle fine. Il est opérationnel depuis Mars 2014 [36].

AROME a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux tels que les fortes pluies, les orages violents, le brouillard... [36]

- **Résolution Horizontale:** 3 km.
- **Nombre de Points:** 400*400.
- **Résolution Verticale:** 60 niveaux.
- **Échéances maximales:** T+48h.
- **Nombre d'Opérations (par jour):** 2 sorties (00UTC, 12UTC).

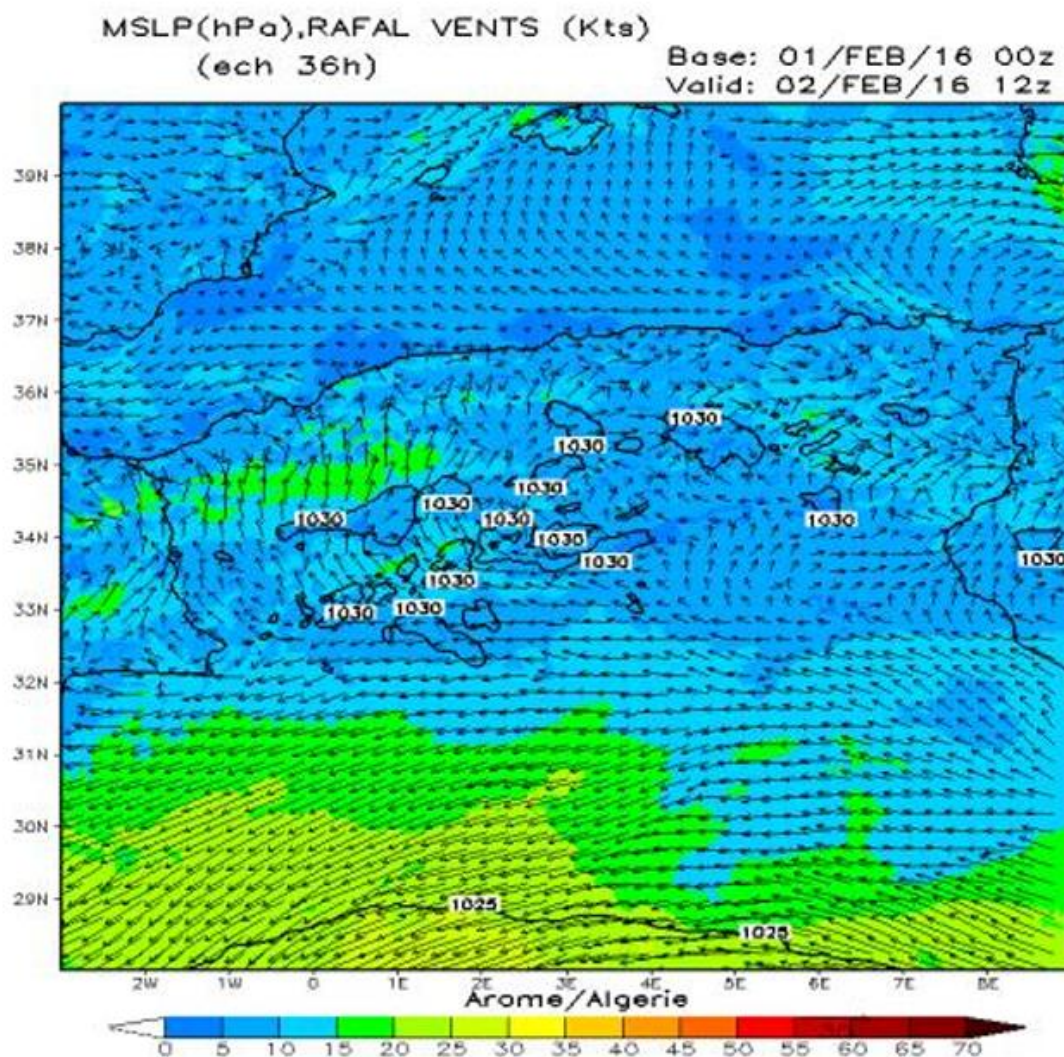


Figure II.4: Le Domaine AROME en Algérie [38].

II.7.2.2 Le Modèle ALADIN:

Le modèle numérique ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) est un modèle bi-spectral à aire limitée. L'intérêt principal des modèles régionaux de climat est de limiter le coût de calcul des simulations par rapport à des modèles de climat globaux de même résolution. Ils permettent donc d'explorer la représentation du climat et du changement climatique à plus fine échelle, il est également utilisé en Algérie [34].

Le modèle Aladin a été conçu sur la notion de compatibilité avec le système «père» Arpège. C'est un modèle spectral qui utilise la physique et la dynamique du modèle global Arpège. Il est couplé (données initiales et aux bords) à ce dernier toutes les trois heures [35].

ALADIN est utilisé comme modèle régional pour la prévision à moyenne et courte échéance, avec une résolution typique de 6 à 16 km selon les configurations et les régions. En Algérie, par exemple, des versions d'ALADIN couvrent le Grand Domaine Algérie avec une résolution de 6 km, produisant des prévisions jusqu'à 72 heures.

Le Modèle ALADIN en Algérie/ONM:

La version opérationnelle ALADIN-Algérie couvre toute l'Algérie, elle est utilisée en opérationnel à l'ONM depuis novembre 2006. Depuis Janvier 2014 ce modèle tourne sur la machine IBM de l'ONM [36].

- **Résolution Horizontale:** 8 km.
- **Nombre de Points:** 350*350.
- **Résolution Verticale:** 70 niveaux.
- **Échéances maximales:** T+72h.
- **Nombre d'Opérations (par jour):** 2 sorties (00UTC, 12UTC).

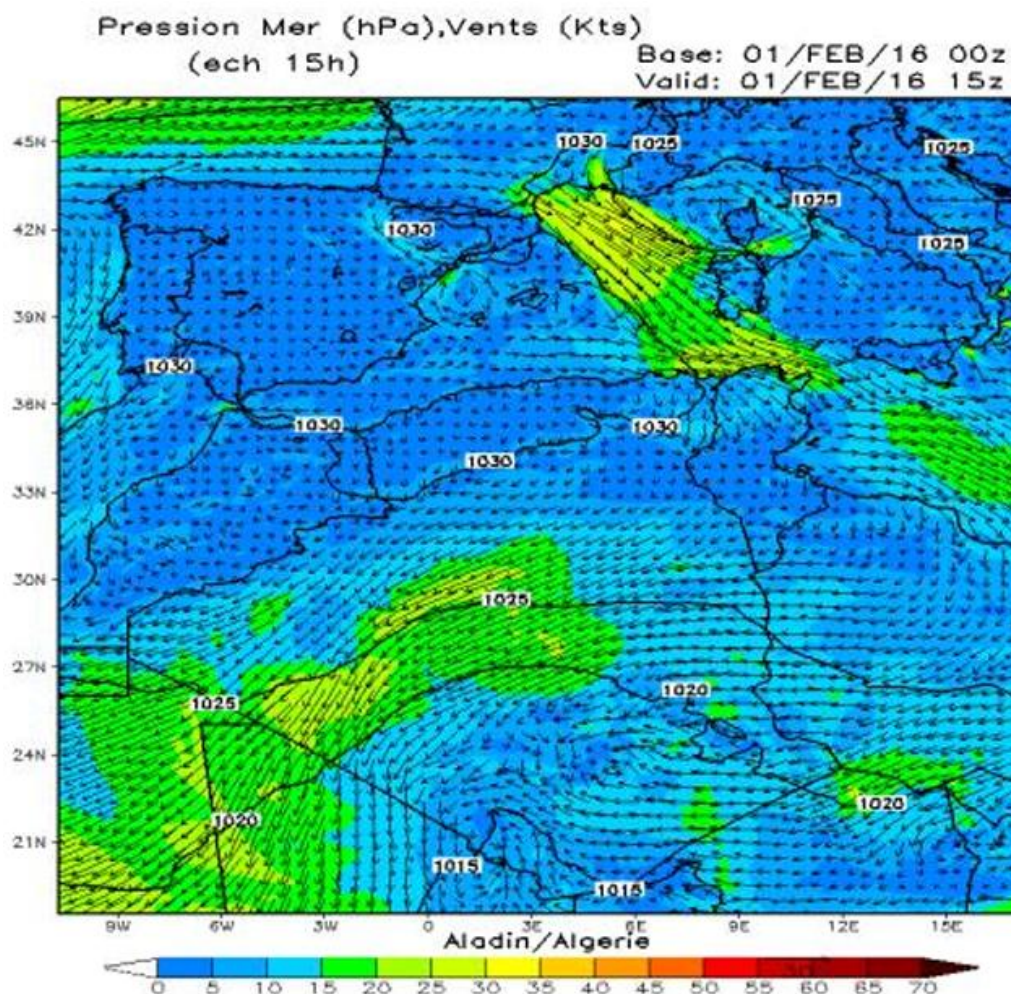


Figure II.5: Le Domaine ALADIN en Algérie [38].

II.7.2.3 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) [36].

ALADIN-SABLE 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 [36].

Le Modèle ALADIN-SABLE en Algérie/ONM:

Cette version est le fruit de coopération entre l'Office National de Météorologie et Météo France. Depuis l'acquisition par l'ONM d'un supercalculateur, cette version est devenue opérationnelle à l'ONM. La version ALADIN-SABLE couvre toute l'Algérie [36].

- **Résolution Horizontale:** 14 km.
- **Nombre de Points:** 250*250.
- **Résolution Verticale:** 70 niveaux.
- **Échéances maximales:** T+48h.
- **Nombre d'Opérations (par jour):** 2 sorties (00UTC, 12UTC).

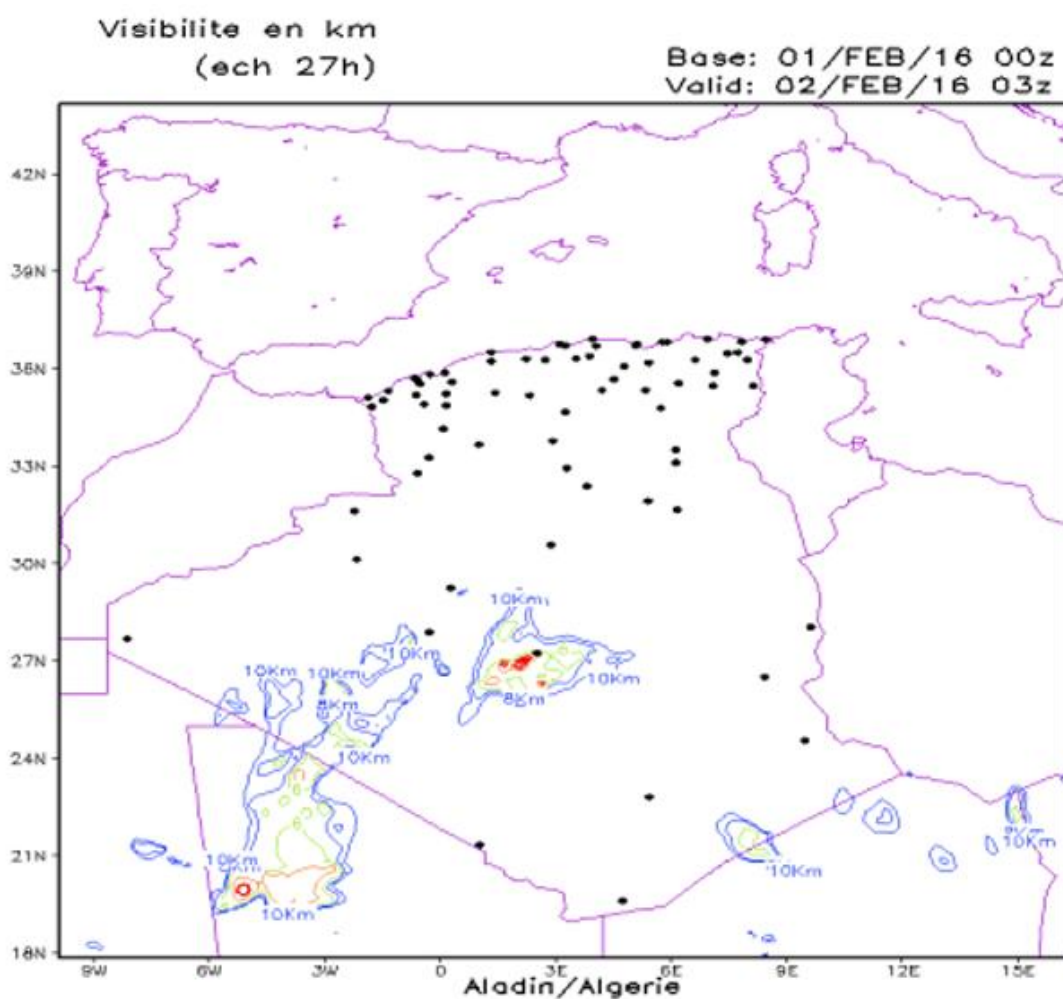


Figure II.6: Le Domaine ALADIN-SABLE en Algérie [38].

II.8 La Prévision d'Ensemble:

La prévision d'ensemble est l'outil qui permet de faire des prévisions météorologiques probabilistes. C'est à la fois une alternative et un complément devenu indispensable à la prévision déterministe du temps. Elle consiste à simuler les erreurs commises lors du calcul d'une prévision numérique du temps pour aboutir à l'évolution la plus probable. Ces erreurs inévitables peuvent provenir d'inexactitudes dans les valeurs retenues pour caractériser l'état initial de l'atmosphère, ou bien d'approximations effectuées dans les équations, ou encore des incertitudes acceptées dans la modélisation des conditions aux interfaces sol/air ou mer/air [39].

La prévision d'ensemble est ainsi généralement évaluée en termes de la moyenne des prévisions individuelles concernant une variable de prévision et le degré d'accord entre les différentes prévisions au sein du système d'ensembles. La propagation des membres de l'ensemble est diagnostiquée grâce à des outils tels que les diagrammes spaghetti qui montrent la trajectoire de chaque membre sur les cartes à des temps spécifiques dans le futur.

Le terme « ensemble » signifie que le système ne donne pas une seule prévision, mais un certain nombre de scénarios différents, qui donnent une idée de l'incertitude de la prévision. L'incertitude concerne non seulement les précipitations, mais aussi d'autres paramètres, et elle augmente au fur et à mesure que l'on avance dans le temps [41].

L'avantage critique de la prévision d'ensemble est qu'elle fournit des probabilités des phénomènes susceptibles de se produire au fur et à mesure de l'évolution de l'atmosphère. Si les membres de l'ensemble sont similaires à un endroit, à un moment donné, la prévision a plus de chances d'être fiable que si les membres sont très dispersés. Ainsi, l'approche par ensemble ne fournit pas seulement une prévision, mais aussi une indication de la compétence de cette prévision [42].

II.8.1 Application de la Prévision d'ensemble sur le Brouillard:

Un ensemble échantillonne l'incertitude de la prévision, en supposant que le modèle de prévision est parfait.

Si les conditions initiales étaient connues avec précision et que le modèle était parfait, une prévision exacte pourrait, en théorie, être produite.

Cependant, comme il est impossible de connaître exactement les conditions de départ, on utilise notre meilleure estimation pour générer une prévision, qui peut parfois être inexacte (représentée en rouge dans le schéma ci-dessous).

En échantillonnant l'incertitude des conditions initiales et en faisant tourner plusieurs membres d'ensemble avec le même modèle (représentés en bleu dans le schéma), on obtient une estimation de l'incertitude de la prévision et une indication des événements météorologiques possibles.

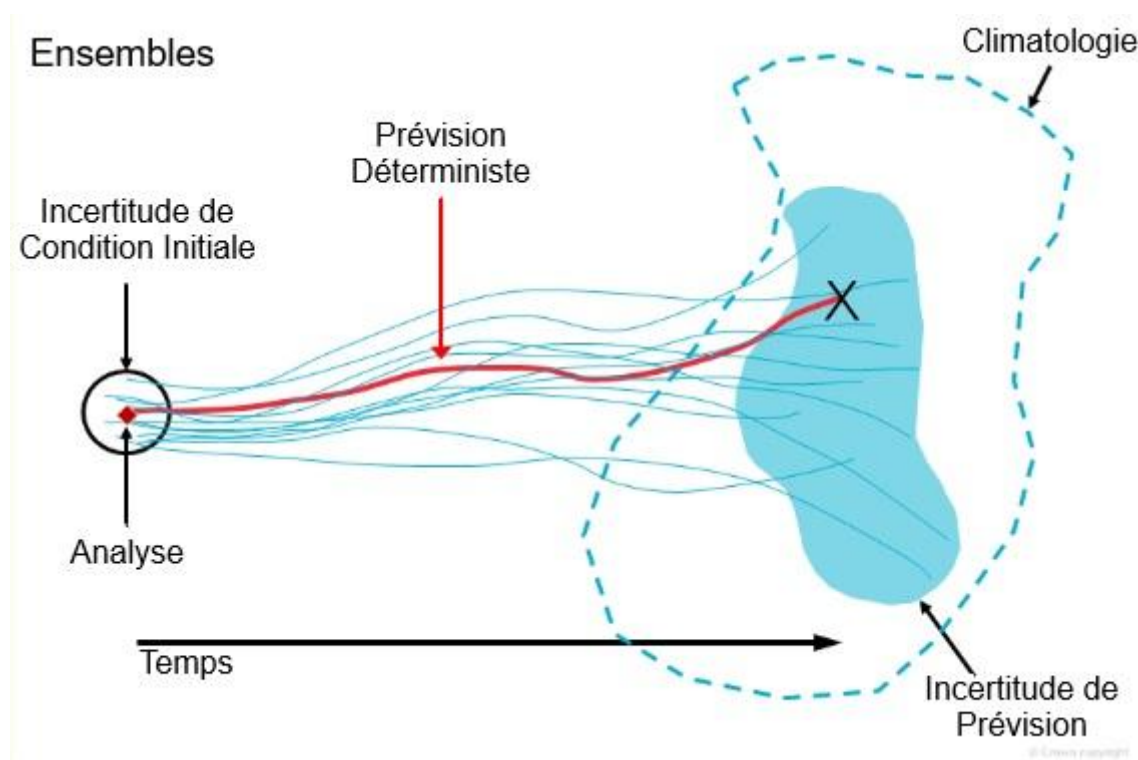


Figure II.7: Illustration schématique d'une prévision d'ensemble [40].

La génération des ensembles pour le brouillard est basée sur deux approches:

1. L'utilisation de multitudes de modèles pour calculer plusieurs valeurs de la visibilité dans le même point géographique de calcul :
 - AROME.
 - Teneur en eau liquide (LWC).
 - Concentration de Nombre de Gouttelettes (Nd et LWC).
2. L'utilisation de plusieurs valeurs de visibilité dans une zone selon les points de maillage en fonction de la résolution du modèle utilisé.

II.9 Paramètres de visibilité:

La relation entre la visibilité et le brouillard était auparavant simplifiée à une question de teneur en eau liquide (LWC). Des recherches plus récentes ont intégré un nouveau paramétrage pour prédire la visibilité dans le brouillard pour les modèles de prévision météorologique numérique. Le nouveau paramétrage a montré une relation non linéaire entre la visibilité (Vis) et la teneur en eau liquide (LWC) et la concentration en nombre de gouttelettes (Nd) [43].

II.9.1 La Visibilité en Fonction de la Teneur en Eau Liquide (LWC):

Cette formule utilise LWC/CLW (Cloud Liquid Water Content) pour calculer la visibilité:

$$V(LWC) = \frac{-\ln(0.02)}{144.7 \cdot LWC^{0.88}} \quad [43]$$

- **LWC:** Teneur d'eau liquide (donnée en g/m³).
- **0.02** correspond à **2% de transmission lumineuse**.
- **144.7** et **0.88** sont des **constantes** déterminées empiriquement pour adapter la formule à des situations réelles de brouillard.

II.9.2 La Visibilité en Fonction de Nd et LWC:

Dans ce cas, on utilise le nombre de gouttelettes d'eau par unité de volume d'air (Nd) en plus de la teneur d'eau liquide (LWC). Nd est obtenue à partir de la température selon la formule:

$$Nd = -0.071 \cdot T^2 + 2.213 \cdot T + 141.56 \quad [43]$$

- **Nd:** La concentration de gouttelettes (donnée en cm⁻³).
- **T:** La température en °C.

Après avoir obtenue le nombre de gouttelettes Nd, il suffit de l'appliquer sur la formule suivante pour obtenir la visibilité:

$$V(LWC, Nd) = \frac{1}{CLW \cdot Nd^{0.65}} \quad [43]$$

II.9.3 La Visibilité selon AROME:

Le calcul de la visibilité repose sur la formule de Koschmieder qui relie la visibilité horizontale aux coefficients d'extinction des différents hydrométéores (eau liquide, glace, neige, pluie et grésil) [43].

$$PVISICLD = \frac{-\ln(0,05)}{0,013 + \beta_{cld} + \beta_{ice}} \quad [43]$$

PVISICLD: Visibilité due aux nuages (eau liquide et glace) en mètres.

β_{cld} : Coefficient d'extinction dû à l'eau liquide des nuages.

β_{ice} : Coefficient d'extinction dû à la glace des nuages.

$$PVISIHVD = \frac{-\ln(0,05)}{0,013 + \beta_{rain} + \beta_{snow} + \beta_{graupel}} \quad [43]$$

PVISIHVD: Visibilité due aux hydrométéores en mètres.

β_{rain} : Coefficient d'extinction dû à la pluie.

β_{snow} : Coefficient d'extinction dû à la neige.

$\beta_{graupel}$: Coefficient d'extinction dû au grésil.

Conclusion:

En conclusion, depuis cette présentation de son principe, ses modèles et ses méthodes, le calibre de la prévision numérique du temps est mieux compris, et également sa part dans le bon déroulement des opérations aériennes à travers l'observation de divers phénomènes, et le brouillard n'en est pas une exception.

Chapitre III

**METHODOLOGIE DE TRAITEMENT ET
EXPLOITATION DES DONNEES**

Introduction:

Ce chapitre explore l'aspect informatique du traitement des données météorologiques. Il commence par une présentation du langage de programmation R, traitant de sa définition, son parcours historique, ses principaux champs d'application comme l'éducation, la science des données, les statistiques et la finance, et de ses atouts particuliers. La présentation inclut également l'interface RStudio, qui est utilisée pour le développement de scripts. La suite est dédiée aux METARs, incluant une explication du format, les composants nécessaires pour leur lecture et interprétation, ainsi que des détails concernant les METARs automatiques, les rapports SPECI et l'usage de la plateforme OGIMET. Pour conclure, les scripts R mis en œuvre dans cette recherche sont décrits. Cela inclut ceux qui permettent de calculer la visibilité à partir de LWC ou de LWC et Nd, d'extraire les données AROME, de choisir les 49 points géographiques, d'obtenir les visibilités minimale, moyenne et pondérée, ainsi que la création de tableaux de contingence pour faire une comparaison entre prévisions et observations.

III.1 Le Langage de Programmation R:

III.1.1 Définition:

Le langage de programmation R est un outil open source essentiel pour les statisticiens et les Data Analystes qui souhaitent explorer, analyser et visualiser de grandes quantités de données. Tout comme Python, R est un langage orienté objet. Cela signifie qu'il permet aux utilisateurs de créer des objets, tels que des matrices ou des tableaux. Ceux-ci peuvent ensuite être utilisés pour stocker et manipuler des données [45].

Il s'agit d'un environnement intégré de manipulation de données, de calcul et de préparation de graphiques. Toutefois, ce n'est pas seulement un « autre » environnement statistique, mais aussi un langage de programmation complet et autonome [44].

III.1.2 Historique:

Le langage R est dérivé du langage S et ajoute une portée lexicale. Il s'inspire d'un autre langage de programmation, Scheme. À l'origine fut le S, un langage pour « programmer avec des données » développé chez Bell Laboratories à partir du milieu des années 1970 par une équipe de chercheurs menée par John M. Chambers [44].

Dès la fin des années 1980 et pendant près de vingt ans, le S a principalement été popularisé par une mise en œuvre commerciale nommée S-PLUS. En 2008, Lucent Technologies a vendu le langage S à Insightful Corporation, ce qui a effectivement stoppé le développement du langage par ses auteurs originaux. Aujourd'hui, le S est commercialisé de manière relativement confidentielle sous le nom Spotfire S+ par TIBCO Software [44].

Au milieu des années 1990, Ross Ihaka et Robert Gentleman proposent un langage pour l'analyse de données et les graphiques qu'ils nomment R (Ihaka et Gentleman, 1996). À la suggestion de Martin Maechler de l'ETH de Zurich, les auteurs décident d'intégrer leur nouveau langage au projet GNU 1, faisant de R un logiciel libre [44].

Ainsi disponible gratuitement et ouvert aux contributions de tous, R gagne rapidement en popularité là même où S-PLUS avait acquis ses lettres de noblesse, soit dans les milieux académiques. De simple dérivé « not unlike S », R devient un concurrent sérieux à S-PLUS, puis le surpasse lorsque les efforts de développement se rangent massivement derrière le projet libre. D'ailleurs John Chambers place aujourd'hui ses efforts de réflexion et de développement dans le projet R [44].

III.1.3 Domaines d'Utilisation:

III.1.3.1 Académie:

R est le langage de programmation dominant dans de nombreuses institutions universitaires. Son utilisation ne se limite pas non plus aux statistiques ; de nombreux types de recherche nécessitent des données quantitatives, notamment corrélationnelles, expérimentales et descriptives, et ce dans tous les domaines [46].

III.1.3.2 Sciences des Données:

R facilite le traitement des données provenant de diverses sources, de l'importation à l'analyse. De plus, le système R lui-même et la bibliothèque CRAN offrent de nombreuses fonctions et outils de visualisation des données, ce qui permet aux professionnels de présenter facilement leurs recherches et leurs résultats dans un format percutant et facile à lire [46].

III.1.3.3 Statistiques:

Une large gamme de logiciels soutient le travail dans ce domaine, tandis que le langage R lui-même peut être utilisé pour développer des outils logiciels qui incluent des fonctions statistiques [3]. Le langage R est utilisé de manière régulière par les statisticiens. Ci-après ses différentes utilisations [47]:

- Organisation et traitement de données volumineuses très rapidement.
- Création de graphiques afin de visualiser et d'analyser les données.
- Création d'une programmation procédurale.

III.1.3.4 Finances:

Grâce à sa flexibilité et à son aptitude à effectuer toute tâche d'analyse de données, il n'est pas surprenant que R soit de plus en plus utilisé dans le secteur financier. Des entreprises telles que ANZ et Bank of America utilisent ce langage pour l'analyse et la modélisation du risque de crédit, l'établissement de rapports financiers, la gestion de portefeuilles d'investissement et de nombreuses autres tâches [46].

III.1.4 Les Avantages du Langage R:

Même s'il est difficile à maîtriser, sous la licence GPL, le langage de programmation R est totalement gratuit. De plus, son code source peut être modifié par la communauté. Et son plus grand avantage est sa disponibilité sur les différents systèmes d'exploitation. Avec ces différents avantages, le langage R est doté d'une communauté très active [47].

La force de R réside dans la disponibilité de fonctions supplémentaires sous forme de "packages" proposés par des développeurs indépendants du monde

entier. Plus de 20.000 de ces packs fonctionnels peuvent être téléchargés via le "Comprehensive R Archive Network" (CRAN) peuvent être obtenus. Pour chaque problème statistique, aussi rare soit-il, il existe souvent une solution prête à l'emploi qui peut être adaptée à tout moment grâce à la licence open source [48].

III.1.5 L'Interface du Logiciel (R Studio):

R est un langage de programmation qui se spécialise dans le traitement statistique et l'analyse des données. Lorsque R Studio est lancé, une interface de commande s'affiche. L'utilisateur interagit avec le logiciel à travers cette interface en tapant des commandes immédiatement après le symbole ">".

Les informations sont affichées automatiquement dès le début, y compris la version de R utilisée, des informations sur les conditions de licence, et des suggestions pour des commandes utiles comme `help()` pour accéder à l'aide, `q()` pour quitter, ou `demo()` pour voir des démonstrations.

```
R version 4.5.0 (2025-04-11 ucrt) -- "How About a Twenty-Six"
Copyright (c) 2025 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-w64-mingw32/x64

R is free software and comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY.
You are welcome to redistribute it under certain conditions.
Type 'license()' or 'licence()' for distribution details.

Natural language support but running in an English locale

R is a collaborative project with many contributors.
Type 'contributors()' for more information and
'citation()' on how to cite R or R packages in publications.

Type 'demo()' for some demos, 'help()' for on-line help, or
'help.start()' for an HTML browser interface to help.
Type 'q()' to quit R.

> |
```

Figure III.1: Interface Initiale de R Studio.

Par défaut, la console R manque d'une interface graphique avancée. Il est principalement utilisé pour écrire et exécuter des scripts, effectuer des calculs, créer des graphiques et manipuler des données.

III.2 Les METARS:

III.2.1 Définition:

METAR est le nom de code utilisé pour le chiffrage d'observations météorologiques régulières d'aérodromes. Le nom METAR figure en tête de chaque message d'observation individuel et le message est diffusé toutes les heures rondes ou toutes les demi-heures rondes [49].

Un METAR (METeorological Airport Report) est un rapport d'observation (et non de prévision) météorologique pour l'aviation. Ce code international a été développé par les membres de l'OACI et est approuvé par l'Organisation météorologique mondiale. Les données de base sont communes à tous les pays mais certaines sections du code sont sujettes à des variantes locales [50].

III.2.2 Savoir Lire un METAR:

Ceci est un exemple d'un METAR concernant l'aéroport de Houari Boumediene, la journée du 25/02/2022 à 5:00:

**METAR DAAG 250500Z 21004KT 0300 R23/P2000N R27/0650D FG SCT010
09/09 Q1021=**

Il suffit de décoder ce message pour en déduire les informations suivantes:

- **DAAG:** Code OACI de l'aéroport Houari Boumediene à Alger (Algérie).
- **250500Z:** Observation faite le 25 février 2022 à 05h00 UTC.
- **21004KT:** Vent provenant du 210° (sud-ouest) soufflant à 4 nœuds.
- **0300:** Visibilité horizontale de 300 mètres — très mauvaise visibilité.
- **R23/P2000N:** Portée visuelle sur la piste 23: plus de 2000 mètres, tendance stable (N = No change).
- **R27/0650D :** Portée visuelle sur la piste 27: 650 mètres, en détérioration (D = Downward).
- **FG:** Présence de brouillard.
- **SCT010:** Quelques nuages épars à 1000 pieds (environ 300 mètres) au-dessus du sol.

- **09/09:** Température de 9°C, point de rosée également de 9°C (humidité relative à 100 %).
- **Q1021:** Pression atmosphérique au niveau de la mer : 1021 hPa.
- **=:** Fin du message.

III.2.3 METAR Auto:

Lorsqu'un METAR est élaboré de manière entièrement automatique, la mention AUTO est ajoutée. Ce message contient une observation météorologique d'aérodrome réalisée uniquement par des moyens automatiques et surveillée à distance par le centre météorologique de rattachement de l'aérodrome [49].

III.2.4 SPECI:

Lorsqu'il y a des changements importants dans les conditions météorologiques, les stations météorologiques peuvent émettre un SPECI (rapport météorologique spécial). Contrairement aux METAR (rapports météorologiques d'aviation réguliers), qui sont publiés à des intervalles spécifiques, un SPECI est diffusé lorsqu'un changement soudain et imprévu du temps survient et qu'il est important d'en être informé immédiatement [51].

Un SPECI couvre des éléments tels que la vitesse et la direction du vent, la visibilité, la couverture nuageuse, la température et la pression. Si l'un de ces éléments change de manière significative entre deux rapports METAR réguliers, un SPECI informera dès que possible. Cela permet d'ajuster rapidement votre plan de vol [51].

III.2.5 OGIMET:

OGIMET est une plateforme en ligne spécialisée dans la collecte, l'archivage et la visualisation de données météorologiques issues de stations du monde entier. C'est d'où Tout les messages METAR faisant partie de notre période d'étude (Février 2022) ont été obtenus sous forme de rapports successives tout le long du mois.

L'interface est représentée sous forme de table textuel, avec chaque ligne correspondant à une observation horaire ou bien semi-horaire.

Dans le cas de la **figure III.2**, OGIMET nous a généré une liste de rapports METAR/SPECI spécifiques à l'aérodrome de Houari Boumediene (DAAG) à Alger, Dar El Beida pour la journée du 01/02/2022.

Ces derniers contiennent des informations sur ces phénomènes météorologiques:

- La direction et vitesse du vent.
- La visibilité.
- La nébulosité.
- La température.
- Le point de rosée.
- La pression atmosphérique.

METAR/SPECI from DAAG, Algiers / Dar el Beida (Algeria).	
SA 01/02/2022 00:00->	METAR DAAG 010000Z 20005KT 9999 SCT020 10/07 Q1021=
SA 01/02/2022 00:30->	METAR DAAG 010030Z 20007KT 9999 FEW016 10/07 Q1021=
SA 01/02/2022 01:00->	METAR DAAG 010100Z 21007KT 9999 FEW016 09/07 Q1021=
SA 01/02/2022 01:30->	METAR DAAG 010130Z 21007KT 9999 FEW016 09/08 Q1021=
SA 01/02/2022 02:00->	METAR DAAG 010200Z 23006KT 9999 FEW017 10/08 Q1021=
SA 01/02/2022 02:30->	METAR DAAG 010230Z 24004KT 210V270 9999 FEW017 11/09 Q1021=
SA 01/02/2022 03:00->	METAR DAAG 010300Z 25005KT 9999 FEW023 11/09 Q1021=
SA 01/02/2022 03:30->	METAR DAAG 010330Z 23006KT 9999 SCT023 11/09 Q1021=
SA 01/02/2022 04:00->	METAR DAAG 010400Z 23005KT 210V290 9999 SCT023 SCT036 11/09 Q1021=
SA 01/02/2022 04:30->	METAR DAAG 010430Z 27005KT 220V330 9999 SCT023 SCT036 11/09 Q1021=
SA 01/02/2022 05:00->	METAR DAAG 010500Z 33009KT 9999 SCT023 SCT036 13/11 Q1022=
SA 01/02/2022 05:30->	METAR DAAG 010530Z 33009KT 9999 SCT023 SCT036 13/09 Q1022=
SA 01/02/2022 06:00->	METAR DAAG 010600Z 34009KT 9999 -RA SCT023 BKN040 14/08 Q1022=
SA 01/02/2022 06:30->	METAR DAAG 010630Z 36007KT 9999 SCT023 FEW026CB BKN040 13/08 Q1022=
SA 01/02/2022 07:00->	METAR DAAG 010700Z 36006KT 9999 FEW023 FEW026CB BKN040 13/08 Q1022=
SA 01/02/2022 07:30->	METAR DAAG 010730Z 36004KT 9999 FEW023 FEW026CB BKN040 13/09 Q1023=
SA 01/02/2022 08:00->	METAR DAAG 010800Z 02005KT 9999 FEW023 FEW026CB BKN040 13/09 Q1023=
SA 01/02/2022 08:30->	METAR DAAG 010830Z 04008KT 9999 FEW023 FEW026CB BKN040 13/09 Q1024=
SA 01/02/2022 09:00->	METAR DAAG 010900Z 04010KT 9999 FEW023 FEW026CB BKN040 13/09 Q1024=
SA 01/02/2022 09:30->	METAR DAAG 010930Z 05009KT 9999 FEW023 FEW026CB BKN040 14/09 Q1024=
SA 01/02/2022 10:00->	METAR DAAG 011000Z 05012KT 9999 FEW023 FEW026CB BKN040 14/09 Q1025=
SA 01/02/2022 10:30->	METAR DAAG 011030Z 05014KT 9999 FEW023 FEW026CB SCT040 14/08 Q1025=
SA 01/02/2022 11:00->	METAR DAAG 011100Z 05014KT 9999 FEW023 FEW026CB SCT040 14/08 Q1025=
SA 01/02/2022 11:30->	METAR DAAG 011130Z 04013KT 9999 FEW023 FEW026CB SCT040 14/08 Q1025=
SA 01/02/2022 12:00->	METAR DAAG 011200Z 04012KT 9999 FEW023 FEW026CB SCT040 13/08 Q1025=
SA 01/02/2022 12:30->	METAR DAAG 011230Z 05010KT 9999 FEW023 FEW026CB SCT040 15/09 Q1025=
SA 01/02/2022 13:00->	METAR DAAG 011300Z 05011KT 9999 FEW023 FEW026CB SCT040 14/08 Q1024=
SA 01/02/2022 13:30->	METAR DAAG 011330Z 05013KT 9999 FEW023 FEW026CB SCT040 14/08 Q1024=
SA 01/02/2022 14:00->	METAR DAAG 011400Z 05010KT 9999 FEW023 SCT040 14/08 Q1024=
SA 01/02/2022 14:30->	METAR DAAG 011430Z 04010KT 9999 FEW023 SCT040 14/07 Q1024=
SA 01/02/2022 15:00->	METAR DAAG 011500Z 04009KT 9999 FEW023 SCT040 14/08 Q1025=
SA 01/02/2022 15:30->	METAR DAAG 011530Z 05010KT 9999 FEW023 SCT040 14/08 Q1025=
SA 01/02/2022 16:00->	METAR DAAG 011600Z 05009KT 9999 FEW023 SCT040 14/08 Q1025=

Figure III.2: Messages METAR de l'Aérodrome de Houari Boumediene DAAG d'une partie de la journée du 01/02/2022.

III.3 Scripts R Utilisés:

III.3.1 Script de Calcul de Visibilité en Fonction de LWC:

```
> library(openxlsx)

for (i in 0:23) {
  filename_in <- sprintf("clw_%02d", i)
  filename_out <- sprintf("C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/R files/V%d.xlsx", i)

  my_data <- read.table(filename_in, header = FALSE, col.names = c("g", "l", "clw"))

  v <- ifelse(my_data$clw == 0, NA, -log(0.02) / (144.7 * (my_data$clw)^0.88))

  my_data1 <- cbind(my_data, v)

  my_data1 <- my_data1[, c("l", "g", "clw", "v")]

  write.xlsx(my_data1, file = filename_out, rowNames = FALSE)|
}
```

Figure III.3: Code de Calcul de Visibilité en LWC.

Objectif: Calcul de visibilité d'une journée complète par heure en fonction de la teneur d'eau liquide.

Étapes:

- Lire les données de la teneur d'eau liquide (clw_00, clw_01... clw_23).
- Appliquer la formule de visibilité LWC.
- Réorganiser en mettant la latitude avant la longitude.
- Exporter les résultats dans un fichier xlsx.

Résultat: Un fichier Excel contenant toutes les mêmes données en ajoutant une colonne visibilité LWC.

	A	B	C	D
1	l	g	clw	v
2	36.68	3.2	2.414E-06	2372.06157
3	36.68	3.205	2.414E-06	2372.06157
4	36.68	3.21	2.563E-06	2250.26744
5	36.68	3.215	2.5034E-06	2297.34914
6	36.68	3.22	2.3842E-06	2398.13477
7	36.68	3.225	2.414E-06	2372.06157
8	36.68	3.23	2.265E-06	2508.86222

Figure III.4: Tableau Excel de visibilité LWC.

III.3.2 Script de Calcul de Visibilité en Fonction de (LWC, Nd):

```
> library(openxlsx)

for (i in 0:23) {
  clw_file <- sprintf("clw_%02d", i)
  t2m_file <- sprintf("t2m_%02d", i)

  output_file <- sprintf("C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/PFE/R files/V%d.xlsx", i)

  my_data <- read.table(clw_file, header = FALSE, col.names = c("g", "l", "clw"))
  my_data1 <- read.table(t2m_file, header = FALSE, col.names = c("g", "l", "t"))

  t <- my_data1$t - 273.15

  ND <- (-0.071) * t^2 + 2.213 * t + 141.56

  v <- ifelse(my_data$clw <= 0 | is.na(my_data$clw) | is.na(ND), NA, 1 / (my_data$clw * ND^0.65))

  my_data1 <- cbind(my_data1, ND)
  my_data2 <- cbind(my_data1, v)

  my_data2 <- my_data2[, c("l", "g", "t", "ND", "v")]
  |
  write.xlsx(my_data2, file = output_file, rowNames = FALSE)
}
```

Figure III.5: Code de Calcul de Visibilité en Nd.

Objectif: Calcul de visibilité d'une journée complète par heure en fonction de la teneur d'eau liquide et la concentration de gouttelettes.

Étapes:

- Lire les données de la teneur d'eau liquide (clw_00, clw_01... clw_23).
- Lire les données de température (t2m_00, t2m_01... t2m_23).
- Convertir la température de °K en °C.
- Calculer la concentration de gouttelettes Nd.
- Appliquer la formule de visibilité (LWC, Nd).
- Réorganiser en mettant la latitude avant la longitude.
- Exporter les résultats dans un fichier.xlsx.

Résultat: Un fichier Excel contenant toutes les mêmes données en ajoutant une colonne visibilité (LWC, Nd).

	A	B	C	D	E
1	l	g	t	ND	v
2	36.68	3.2	282.64624	156.172501	15538.9585
3	36.68	3.205	282.729736	156.244191	15534.3237
4	36.68	3.21	282.734619	156.248353	14630.9121
5	36.68	3.215	282.755127	156.265795	14978.1803
6	36.68	3.22	282.850342	156.345996	15721.845
7	36.68	3.225	282.925049	156.408021	15523.7453
8	36.68	3.23	282.97876	156.452125	16542.0126

Figure III.6: Tableau Excel de visibilité (LWC, Nd).

III.3.3 Script d'Extraction de Visibilité AROME:

```
> library(openxlsx)

for (i in 0:23) {
  filename_in <- sprintf("vis_%02d", i)
  filename_out <- sprintf("C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/PFE/R files/V%d.xlsx", i)

  my_data <- read.table(filename_in, header = FALSE, col.names = c("g", "l", "v"))

  my_data <- my_data[, c("l", "g", "v")]

  write.xlsx(my_data, file = filename_out, rowNames = FALSE)
}
```

Figure III.7: Code d'extraction de Visibilité AROME.

Objectif: Extraction de données de visibilité AROME par heure, pour une journée complète.

Étapes:

- Lire les données de visibilité AROME (vis_00, vis_01... vis_23).
- Réorganiser en mettant la latitude avant la longitude.
- Exporter les résultats dans un fichier xlsx.

Résultat: Un fichier Excel contenant toutes les mêmes données réorganisées.

	A	B	C
1	l	g	v
2	36.68	3.2	2446.14285
3	36.68	3.205	2446.14285
4	36.68	3.21	2288.14285
5	36.68	3.215	2330.64285
6	36.68	3.22	2486.64285
7	36.68	3.225	2435.64285
8	36.68	3.23	2632.14285

Figure III.8: Tableau Excel de visibilité AROME.

III.3.4 Script d'Extraction des Points de l'Ensemble:

```
> library(openxlsx)

grille_49 <- read.csv("C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/PFE/R files/grille_49_points.csv")

fichier_entree <- "C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/PFE/R files/0205/LWC/v12.xlsx"
fichier_sortie <- "C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/PFE/R files/0205/LWC/v12_filtered.xlsx"

data <- read.xlsx(fichier_entree)

filtered <- merge(data, grille_49, by = c("l", "g"))

write.xlsx(filtered, fichier_sortie, rowNames = FALSE)
```

Figure III.9: Code d'Extraction de l'Ensemble (Exemple LWC).

Objectif: Extraction de données de visibilité des points spécifiques à l'ensemble étudié depuis tous les points donnés.

Étapes:

- Lire le fichier Excel qui présente les coordonnées des points de la grille.
- Lire le fichier de visibilité à filtrer.
- Combiner les deux fichiers en gardant que les points désirés.
- Exporter les résultats dans un fichier.xlsx.

Résultat: Un fichier Excel filtré contenant les données de visibilité que pour les points sélectionnés.

III.3.5 Script d'Obtention de la Visibilité Minimale:

```
> library(openxlsx)

dir <- "C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/PFE/R files/0201"
result <- data.frame(Heure = 0:23, vis_min = NA)

for (i in 0:23) {
  f <- sprintf("%s/v%d_combined.xlsx", dir, i)
  if (file.exists(f)) {
    d <- read.xlsx(f)
    v <- c(d$vis_arome, d$vis_lwc, d$vis_nd)
    result$vis_min[i + 1] <- min(v, na.rm = TRUE)
  }
}

write.xlsx(result, file = file.path(dir, "Minvis_0201.xlsx"), rowNames = FALSE)
```

Figure III.10: Code de Sélection de la Visibilité Minimale.

Objectif: Trouver la valeur minimale de la visibilité à travers tous les modèles utilisés [LWC, (LWC, Nd), AROME] pour tous les points de la grille, cela pour chaque heure de la journée.

Étapes:

- Lire tous les fichiers de visibilité combinés pour une journée (V0... V23).
- Déterminer la valeur minimale pour chaque heure.
- Exporter les résultats dans un fichier.xlsx.

Résultat: Un fichier Excel contenant la visibilité minimale pour chaque heure de la journée étudiée.

III.3.6 Script d'Obtention de la Visibilité Moyenne:

```
> library(openxlsx)

dir <- "C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/PFE/R files/0201"
res <- data.frame(Heure = 0:23, vis_moy = NA)

for (i in 0:23) {
  f <- sprintf("%s/v%d_combined.xlsx", dir, i)
  if (file.exists(f)) {
    d <- read.xlsx(f)
    v <- c(d$vis_arome, d$vis_lwc, d$vis_nd)
    res$vis_moy[i + 1] <- mean(v, na.rm = TRUE)
  }
}

write.xlsx(res, file = file.path(dir, "Moyvis_0201.xlsx"), rowNames = FALSE)
```

Figure III.11: Code de Calcul de la Visibilité Moyenne.

Objectif: Calculer la visibilité moyenne à travers tous les modèles utilisés [LWC, (LWC, Nd), AROME] pour tous les points de la grille, cela pour chaque heure de la journée.

Étapes:

- Lire tous les fichiers de visibilité combinés pour une journée (V0... V23).
- Calculer la valeur moyenne de visibilité pour chaque heure.
- Exporter les résultats dans un fichier.xlsx.

Résultat: Un fichier Excel contenant la visibilité moyenne pour chaque heure de la journée étudiée.

III.3.7 Script d'Obtention de la Visibilité Moyenne avec Coefficients:

Dans ce cas, des coefficients sont données aux différents paramètres de visibilité tel que:

Tableau III.1: Coefficients des Paramètres de Visibilité.

Modèle	LWC	(LWC, Nd)	AROME
Coefficient	1	1	2

Cela est attribué à la fiabilité des résultats donnés par le modèle AROME.

```
> library(openxlsx)

dir <- "C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/PFE/R files/0201"
res <- data.frame(Heure = 0:23, Vis_moy_pondérée = NA)

for (i in 0:23) {
  f <- sprintf("%s/v%d_combined.xlsx", dir, i)
  if (file.exists(f)) {
    d <- read.xlsx(f)
    v <- (2 * d$vis_arome + d$vis_lwc + d$vis_nd) / 4
    res$Vis_moy_pondérée[i + 1] <- mean(v, na.rm = TRUE)
  }
}

write.xlsx(res, file = file.path(dir, "MoyPondVis_0201.xlsx"), rowNames = FALSE)
```

Figure III.12: Code de Calcul de la Visibilité Moyenne Pondérée.

Objectif: Calculer la visibilité moyenne pondérée à travers tous les modèles utilisés [LWC, (LWC, Nd), AROME] pour tous les points de la grille, cela pour chaque heure de la journée.

Étapes:

- Lire tous les fichiers de visibilité combinés pour une journée (V0... V23).
- Calculer la valeur moyenne pondérée de visibilité pour chaque heure.
- Exporter les résultats dans un fichier.xlsx.

Résultat: Un fichier Excel contenant la visibilité moyenne avec prise en compte des coefficients choisies pour chaque heure de la journée étudiée.

III.3.8 Script de Génération de Tableaux de Contingence:

```
> library(openxlsx)

folder <- "C:/Users/adelm/OneDrive/Documents/PFE/R files/Conteignence/Moyenne"
obs <- pred <- c()

for (day in sprintf("02%02d", 1:28)) {
  f <- file.path(folder, sprintf("Fusion_Moy_%.xlsx", day))
  if (!file.exists(f)) next

  d <- read.xlsx(f)
  if (!("obs_Classe" %in% names(d)) || !("Moy_Classe" %in% names(d))) next

  valid <- !is.na(d$obs_Classe) & !is.na(d$Moy_Classe)
  obs <- c(obs, d$obs_Classe[valid])
  pred <- c(pred, d$Moy_Classe[valid])
}

catg <- c("VERY BAD", "BAD", "GOOD")
tab <- table(factor(obs, levels = catg), factor(pred, levels = catg))
df <- as.data.frame.matrix(tab)
df$SUM <- rowSums(df)
df <- rbind(df, SUM = colSums(df))
df <- cbind(Category = rownames(df), df)
rownames(df) <- NULL

write.xlsx(df, file.path(folder, "Tableau_Contingence_Fusion_Moy.xlsx"), rowNames = FALSE)
```

Figure III.13: Code pour Obtention de Tableaux de Contingence (Exemple de Moyenne).

Objectif: Générer un tableau comparatif qui compile tous les résultats observés et les résultats prédis et présente les croisements obtenus.

Étapes:

- Lire tous les fichiers de visibilité finales pour la période entière.
- Comparer chaque valeur de prévision avec celle à côté d'observation.
- Faire compte de toutes les combinaisons.
- Exporter les résultats dans un fichier xlsx.

Résultat: Un tableau de contingence contenant les nombres de fois que chaque combinaison est arrivée avec sommes. (Plus sur les tableaux de contingences dans le 4^{ème} chapitre).

Conclusion:

Ce chapitre a tenté de présenter le langage de programmation R et ses différents aspects, les sources de données utilisées comme les METARS et la base de données OGIMET, et les scripts R qui ont donné vie à ce travail.

Chapitre IV

VALIDATION DES RESULTATS

Introduction:

Ce dernier chapitre présente l'analyse des résultats de la prévision d'ensemble faite. Il débute par la définition de la maille de l'ensemble étudié, puis décrit les trois méthodes de rassemblement utilisées: minimum, moyenne, et moyenne pondérée. Une analyse exemplaire est effectuée sur un échantillon de données, avant de passer à une analyse globale sur la totalité du mois avec des tableaux de contingences définis et des indices d'évaluation de qualité de prévision.

IV.1 Définition de l'Ensemble:

Cette étude a été faite avec le choix de l'aérodrome de Houari Boumediene comme zone d'étude au niveau de Dar el Beida (DAAG). Une maille de 49 points a été définie en se basant sur et en prenant en compte le point de référence pour créer l'ensemble sur lequel le travail a été appliqué:

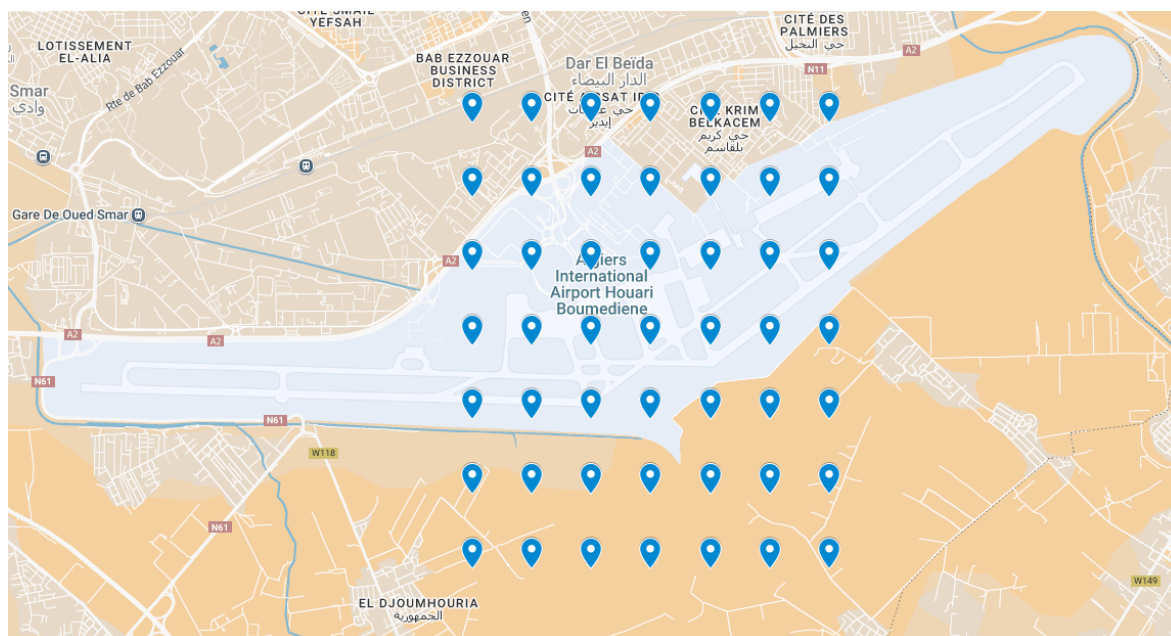


Figure IV.1: Les 49 Points de l'Ensemble.

Ces points ont été choisis en prenant le point de référence de l'aérodrome comme point centrifuge de base ($36^{\circ}41'40''$ Nord ; $03^{\circ}13'01''$ Est). Ce point et les 48 ont été exprimés en décimal et arrondis sous la forme (36.69 N ; 3.2 E) pour accommoder aux données utilisées. Ci-dessous est un tableau contenant toutes les coordonnées géographiques de l'ensemble:

Tableau IV.1: Coordonnées Géographiques des Points de l'Ensemble.

Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
36.68	3.2	36.685	3.2	36.69	3.2	36.695	3.2
36.68	3.205	36.685	3.205	36.69	3.205	36.695	3.205
36.68	3.21	36.685	3.21	36.69	3.21	36.695	3.21
36.68	3.215	36.685	3.215	36.69	3.215	36.695	3.215
36.68	3.22	36.685	3.22	36.69	3.22	36.695	3.22
36.68	3.225	36.685	3.225	36.69	3.225	36.695	3.225
36.68	3.23	36.685	3.23	36.69	3.23	36.695	3.23
36.7	3.2	36.705	3.2	36.71	3.2		
36.7	3.205	36.705	3.205	36.71	3.205		
36.7	3.21	36.705	3.21	36.71	3.21		
36.7	3.215	36.705	3.215	36.71	3.215		
36.7	3.22	36.705	3.22	36.71	3.22		
36.7	3.225	36.705	3.225	36.71	3.225		
36.7	3.23	36.705	3.23	36.71	3.23		

IV.2 Les Méthodes de Rassemblement:

IV.2.1 Rassemblement par Minimum:

Dans ce cas, la valeur de visibilité calculée minimale est prise d'une échéance dans une journée parmi tous les modèles (LWC, LWC-Nd, AROME) à travers les 49 points. Cela assure la sélection des visibilités les plus basses, du coup, les plus proches des valeurs qui définissent le brouillard.

IV.2.2 Rassemblement par Moyenne:

Dans ce deuxième cas, une approche différente a été choisie pour rassembler les résultats. Cette fois, la moyenne des valeurs de visibilités de tout l'ensemble est calculée pour chaque heure à travers les trois modèles. Le résultat sera de valeurs médianes avec tous ces derniers en égalité.

IV.2.3 Rassemblement par Moyenne Pondérée:

Le troisième cas a pour but de donner plus de poids aux données AROME. Dans ce cas, la méthode est encore celle d'une moyenne mais cette fois il existe aussi des coefficients pour chaque modèle en donnant AROME celle la plus élevée (AROME: 2; LWC-Nd: 1; LWC:1) (**Tableau III.1**).

IV.3 Analyse d'un Échantillon de Données:

Voici un exemple d'une journée qui compare les trois méthodes avec présence de brouillard:

Tableau IV.2: Tableaux des visibilités observées et calculées par minimum, moyenne et moyenne pondérée pour le 25/02/2022.

Heure	Visibilité Minimum	Visibilité Moyenne	Visibilité Moyenne Pondérée	Visibilité Observée
0	235.421703	563.618591	502.856631	8000
1	31.184203	143.721176	142.373506	500
2	19.132892	53.6757439	57.1721683	300
3	20.5084425	57.1658265	60.7067275	300
4	27.4899931	80.3577856	83.6421907	800
5	44.494127	195.75664	189.425602	300
6	196.72541	822.903564	718.051298	300
7	1003.97795	7434.01907	6297.06746	300
8	3111.84419	15009.692	13053.9012	4000

Le tableau montre les valeurs de visibilités calculées par la méthode du minimum, la méthode de la moyenne et la méthode de la moyenne pondérée pour la totalité de l'ensemble étudié, appliqué sur la journée du 25/02/2022 de minuit à 8 heures, une période confirmée d'avoir une présence de brouillard remarquable. Ci-dessous sont les mêmes résultats représentés sous forme graphique:

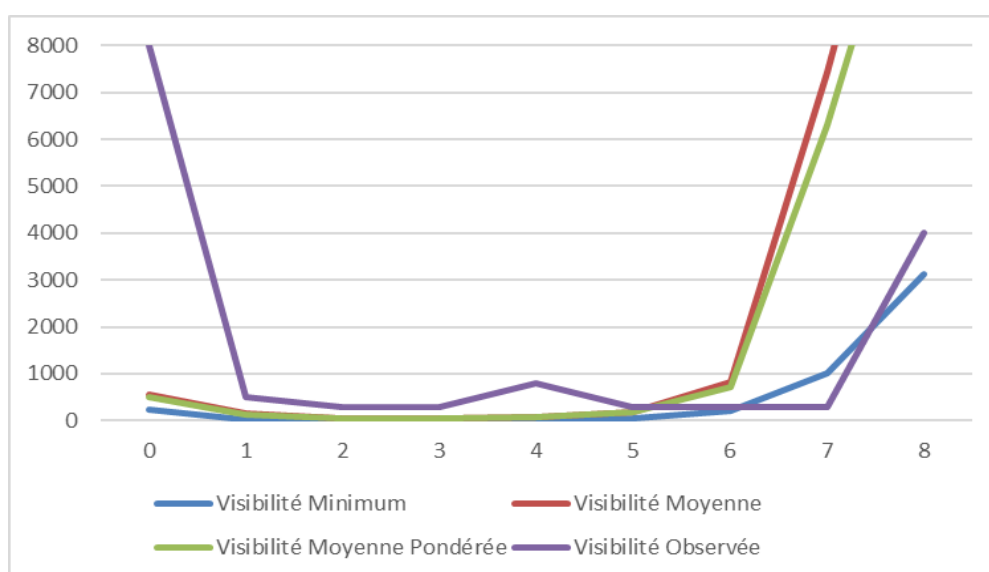


Figure IV.2: Graphe Comparatif entre les Observations et les Trois Méthodes de Rassemblement.

Observations:

Il est remarquable ce jour-là, que la visibilité minimum commence d'environ la moitié (200m) des visibilité moyenne et pondérée (>500m) et elle descend jusqu'à 31m à 1h où les moyennes sont les deux à environ 140m, tant que la visibilité observée est de 8000m, une valeur beaucoup plus élevée qui ne montre aucun signe de brouillard.

Depuis ce point, la visibilité minimum reste relativement constante jusqu'à 5h avec la valeur la plus basse étant 19m à 2h. Simultanément, les valeurs de la visibilité moyenne et la visibilité pondérée continuent à diminuer en restant très proches jusqu'à 2h où ils atteignent un minimum de 53m et 57m respectivement et augmentent légèrement jusqu'à 4h où ils remontent et arrivent à 195m et 189m à 5h. La visibilité observée est de 500m à 1h et descend à 300m jusqu'à 4h ou elle saute à 800m avant de rechuter encore une fois à 300m jusqu'à 7h.

A partir de 5h, la visibilité minimum s'élève jusqu'à atteindre 1003m, la visibilité moyenne remonte jusqu'à 7434m et la pondérée prend une valeur de 6297m à 7h pour les trois. Tandis que l'observation elle-même reste à 300m jusqu'à 7h.

A 8h, une élévation générale est constatée avec la dissipation du brouillard. L'observation donne 4000m en lecture et 3111m pour la visibilité minimum. Ce qui est notable est que les visibilités moyenne et pondérée à cette heure prennent des valeurs extrêmement hautes de 15009m et 13053m respectivement.

Conclusions:

- La visibilité moyenne et la visibilité moyenne pondérée évoluent presque de la même façon.
- La visibilité minimum donne des valeurs excessivement basses.
- Dans la présence du brouillard, toutes les méthodes surestiment l'abaissement de visibilité comparé avec celui observé.
- La visibilité moyenne et pondérée montre également une surévaluation lorsque le brouillard se dissipe.
- Toutes les méthodes ont prédit la présence de brouillard avec succès.

IV.4 L'Analyse Globale des Données:

IV.4.1 Tableaux de Contingence:

IV.4.1.1 Définition:

Il s'agit d'un tableau comparatif qui prend en compte les visibilitées observées réelles et les visibilitées calculées obtenues pour chacune des trois méthodes; celle du minimum, celle de la moyenne et celle de la moyenne pondérée. Il est fait pour le but d'évaluer la performance de chaque méthode en comparant chaque valeur de visibilité résultante avec la vraie valeur enregistrée pour la même échéance.

IV.4.1.2 Critères de Classement:

Les résultats obtenus sont répartis en trois classes de visibilité:

- **Very Bad:** Visibilité inférieure à 1000m (Brouillard).
- **Bad:** Visibilité entre 1000m et 5000m (Brume).
- **Good:** Visibilité supérieure à 5000m.

Tableau IV.3: Forme Générale d'un Tableau de Contingence.

		Prévision			
		Very Bad	Bad	Good	Somme
Observation	Very Bad	A	B	C	J
	Bad	D	E	F	K
	Good	G	H	I	L
	Somme	M	N	O	T

IV.4.1.3 Les Indices d'Évaluation:

IV.4.1.3.1 Pourcentage Correcte (PC):

Ce score indique la proportion de prévisions correctes. Il varie de 0 à 1, 1 étant le score parfait. Cependant, ce score peut être trompeur car il est fortement influencé par la catégorie la plus fréquente, généralement aucun événement dans le cas d'événements rares [43].

$$PC = \frac{A+E+I}{T} * 100 \quad [43]$$

IV.4.1.3.2 Probabilité de Détection (Taux de Réussite) (POD):

Le POD indique généralement la proportion d'événements "oui" observés qui ont été correctement prédits. Le score varie de 0 à 1, 1 étant le score parfait. Il est sensible aux réussites (détection des événements réels) mais ignore les fausses alarmes, ce qui le rend pertinent pour les événements rares [43].

$$POD = \frac{A+D+E}{K+J} * 100 \quad [43]$$

IV.4.1.3.3 Le Taux de Fausses Alarmes (FAR):

Ce paramètre indique le pourcentage d'événements "oui" prédits qui ne se sont finalement pas produits. Le score FAR varie de 0 à 1, la valeur parfaite étant 0. Ce score est sensible aux fausses alarmes et ignore les omissions (événements non prédits qui se sont produits). Il est également très sensible à la fréquence climatologique de l'événement (la probabilité naturelle qu'il se produise) [43].

$$FAR = \frac{G+H}{N+M} * 100 \quad [43]$$

IV.4.1.3 La Méthode du Minimum:

Tableau IV.4: Tableau de Contingence de la Méthode du Minimum.

		Prévision			
		Very Bad	Bad	Good	Somme
Observation	Very Bad	8	2	0	10
	Bad	2	1	14	17
	Good	36	20	589	645
	Somme	46	23	603	672

Tableau IV.5: Tableau d'indexes pour la Méthode du Minimum.

PC	POD	FAR
88.89%	40.74%	81.15%

- a) Le pourcentage correcte (PC) pour la méthode du minimum est de 88.98% ce qui montre un bon alignement des prévisions avec les observations.
- b) Cette méthode donne un Taux de réussite (POD) de détection de Brouillard (Very Bad) et de Brume (Bad) au-dessous de la moyenne avec 40.74%.
- c) Le taux de fausses alarmes (FAR) est assez élevé avec 81.15% à travers toute la période.

Conclusion:

La nature des valeurs prise par cette méthode étant basses indirectement donnera une probabilité de détection plus élevée que les autres méthodes et en même temps plus de fausses alarmes.

IV.4.1.4 La Méthode de la Moyenne:

Tableau IV.6: Tableau de Contingence de la Méthode de la Moyenne.

		Prévision			
		Very Bad	Bad	Good	Somme
Observation	Very Bad	7	0	3	10
	Bad	2	0	15	17
	Good	24	7	614	645
	Somme	33	7	632	672

Tableau IV.7: Tableau d'indexes pour la Méthode de la Moyenne.

PC	POD	FAR
92.41%	33.33%	77.5%

- a) Un pourcentage de prévisions correctes (PC) très élevé avec 92.41% qui est encore plus haut que celui de la méthode du minimum.
- b) La probabilité de détection (POD) est plus basse pour cette méthode avec 33.33% tout le long du mois.
- c) Il y a légèrement moins de fausses alarmes (FAR) pour la méthode de la moyenne avec un pourcentage de 77.5%.

Conclusion:

Vu le choix de valeurs plus intermédiaires dans cette méthode, il y a une tendance à détecter le brouillard moins que la méthode précédente. En revanche, il existe un meilleur pourcentage de prévisions correctes et moins de fausses alarmes.

IV.4.1.5 La Méthode de la Moyenne Pondérée :

Tableau IV.8 : Tableau de Contingence de la Méthode de la Moyenne Pondérée.

		Prévision			
		Very Bad	Bad	Good	Somme
Observation	Very Bad	7	0	3	10
	Bad	2	0	15	17
	Good	24	7	614	645
	Somme	33	7	632	672

Tableau IV.9: Tableau d'indexes pour la Méthode de la Moyenne Pondérée.

PC	POD	FAR
92.41%	33.33%	77.5%

- La méthode de la moyenne pondérée a donné exactement le même tableau de contingence et du coup les mêmes indices que la méthode de la moyenne.
- Cela qui veut dire que même avec le poids plus haut donné au modèle AROME, la marge reste trop basse pour changer l'attribution des valeurs de visibilité à travers les trois classes (Very Bad, Bad, Good).

Remarque:

Le même travail a été refait en augmentant le coefficient du modèle AROME de 2 à 4 en gardant les deux autres modèles à 1. Le résultat était encore une fois la même table sans changement.

Conclusion:

Après avoir défini l'ensemble étudié, les méthodes de rassemblement appliquées et à travers l'étude comparative faite dans ce chapitre, il est conclu que:

- En termes de prévision de brouillard et brume purement, la méthode du minimum est supérieure à la méthode de la moyenne.
- En termes de précision et réussite de prévisions, la méthode de la moyenne donne de meilleurs résultats corrects et moins de fausses alarmes.

Vu que le but visé est la prévision du brouillard, le choix logique pour la meilleure méthode à adapter est la méthode du minimum.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail avait pour but d'améliorer la prévision du brouillard à l'aérodrome de Houari Boumediene (DAAG) à travers l'utilisation de la méthode de la prévision d'ensemble, cela fait sur plusieurs coordonnées géographiques et avec plusieurs modèles différents. Cependant, la complexité de ce phénomène météorologique rend de sa prévision un défi peu importe les moyens.

Cette tâche a commencé par une familiarisation détaillée sur tout ce qui concerne le brouillard, sa formation, ses types et son impact sur les différents secteurs aéronautiques. Ceci a été suivi par une étude sur la prévision numérique du temps et ses composantes, plus spécifiquement le modèle AROME et les formules de calcul de visibilité différentes.

Ensuite, la méthodologie de ce travail est constituée de deux formules (LWC / LWC, Nd) et un modèle de prévision (AROME), le tout appliqué à travers un ensemble défini de 49 points. Puis, les résultats sont englobés à l'aide de trois méthodes: La méthode du minimum, la méthode de la moyenne, la méthode de la moyenne pondérée.

L'évaluation des données obtenues a été faite avec un tableau de contingence pour chaque méthode comparant les prévisions avec les observations METAR réelles de la période étudiée du mois de Février 2022. Cela a été suivi par les calculs de trois indicateurs (Pourcentage de prévisions correctes, Probabilité de détection, Taux de fausses alertes).

La méthode de la moyenne pondérée n'a apporté aucune amélioration notable par rapport à la moyenne régulière, les deux ayant des tableaux de contingence identiques.

La méthode moyenne a affiché un excellent score global de prédictions correctes, mais reste perfectible en termes de sensibilité aux situations critiques. La méthode du minimum, quant à elle, a affiché le meilleur taux de détection pour les faibles visibilités, mais elle souffre d'un taux de fausses alertes plus élevé.

La prévision d'ensemble offre une amélioration globale de la qualité de prévisions, mais monte ses limites dans les conditions extrêmes. Cette recherche indique que cette stratégie de prévision peut produire des résultats encourageants, à condition de bien sélectionner la méthode de regroupement et de prendre en compte les contraintes inhérentes aux modèles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Météo-France, "*Le Brouillard*". 21/11/2023
<https://meteofrance.com/comprendre-la-meteo/nuages/le-brouillard>
- [2] MétéoSuisse, "*Brouillard*" <https://www.meteosuisse.admin.ch/meteo/meteo-et-climat-de-a-a-z/brouillard.html>
- [3] MétéoCity,. "Brume" <https://www.meteocity.com/lexique/terme/brume>
- [4] Laurent Van Hille, "*Météorologie : brumes et brouillards*", 03/04/2023
<https://parapente360.com/documents-pedagogique-parapente/meteorologie-brume-brouillard/>
- [5] NavCanada, "*Brouillard de Rayonnement - Référentiel de la Météorologie en Aviation*", 2022 <https://avmet.navcanada.ca/fr/brouillard-de-rayonnement.aspx>
- [6] Météo Lor, "*Les Différents Types de Brouillard*", 08/11/2021
<https://www.meteolor.fr/les-differents-types-de-brouillards/>
- [7] NavCanada, "*Brouillard d'Advection - Référentiel de la Météorologie en Aviation*", 2022 <https://avmet.navcanada.ca/fr/brouillard-dadvection.aspx>
- [8] WMO, "*Brouillard d'évaporation - Atlas international des nuages*", 2017
[https://cloudatlas.wmo.int/fr/evaporation-fog.html#:~:text=Le%20brouillard%20d%27évaporation%20\(ou,d%27eau%20beaucoup%20plus%20chaude.](https://cloudatlas.wmo.int/fr/evaporation-fog.html#:~:text=Le%20brouillard%20d%27évaporation%20(ou,d%27eau%20beaucoup%20plus%20chaude.)
- [9] Gultepe, I. "*Fog research: A review of past achievements and future perspectives - Pure and Applied Geophysics*", 2007.
- [10] Eichmann, M. "*Les Différences Entre Types de Brouillard*", MeteoNews, 14/01/2025 <https://meteonews.fr/fr/News/N14738/Les-différents-types-de-brouillard>
- [11] WMO, "*Brouillard de Pente - Atlas international des nuages*", 2017
<https://cloudatlas.wmo.int/fr/upslope-fog.html>
- [12] Lavionnaire, "*Brume et Brouillard*", 2015
<https://www.lavionnaire.fr/MeteoBrouillard.php>
- [13] WMO, "*Brouillard Givrant - Atlas international des nuages*", 2017
<https://cloudatlas.wmo.int/fr/freezing-fog.html>

- [14] AquaPortail, "Brouillard", 29/06/2009
<https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/5006/brouillard>
- [15] Laffarge Y. "Généralités sur le brouillard - Brouillard et aéronautique"
<https://brouillard.yn.lu/?-Generalite->
- [16] AirTractorConcept, "Brouillards et Brumes", 01/01/2019
<https://airtractorconcept.eu/?p=4308>
- [17] MeteoLaFleche, "Le Brouillard" <https://www.meteolafleche.com/brouillard.html>
- [18] Bresson T. "Vallée Brouillard" Creative Commons - Wikimedia, 31/12/2010
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vallee-brouillard.jpg>
- [19] El Moaaita A. "Qu'est-ce que le brouillard radioactif et pourquoi se forme-t-il dans les plaines et les vallées ?", ArabiaWeather, 12/01/2025
<https://www.arabiaweather.com/fr/content/qu39estce-que-le-brouillard-radioactif-et-pourquoi-se-formetil-dans-les-plaines-et-les-valles->
- [20] Chalon J-P. "Brouillards: Les Différents Types de Brouillards", Universalis, 2019 <https://www.universalis.fr/encyclopedie/brouillards/2-les-differents-types-de-brouillards/>
- [21] Durgut M. "Meteorological Causes of Fog, Its Types, and Its Impact on Aviation: A Comprehensive Analysis", AviationFile, 29/11/2024
<https://www.aviationfile.com/meteorological-causes-of-fog-its-types-and-its-impact-on-aviation-a-comprehensive-analysis/>
- [22] Météo-France, "Les dangers du brouillard", 07/11/2024
<https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/precipitations-un-mois-doctobre-en-deux-temps>
- [23] Meteomatics, "Prévision Numérique du Temps", 11/06/2024,
<https://www.meteomatics.com/fr/modele-meteorologique-europeen/prevision-numerique-du-temps/>
- [24] Centre National de Recherches Météorologiques, "La prévision numérique du temps : les grands principes", 2019 <https://www.umn-cnrm.fr/spip.php?rubrique148&lang=fr>
- [25] Sueur, F. "Une brève histoire de la prévision du temps", TheConversation, 29/02/2024 <https://theconversation.com/une-breve-histoire-de-la-prevision-du-temps-223023>

- [26] Berlo, A. “Comprendre les modèles numériques”, Skiinfo Magazine, 8/10/2024
<https://www.skiinfo.fr/news/comprendre-les-modeles-numeriques/>
- [27] Météo-France, “Les modèles de prévision météo”, 26/11/2024
<https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/magazine/meteo-histoire/il-y-20-ans-la-canicule-2003>
- [28] Aqua.upc.es, “ECMWF Integrated Forecasting System (IFS)”, 2017
<https://aqua.upc.es/anywhere-catalogue-v2/?product=ecmwf-integrated-forecast-system>
- [29] Ecmwf.int, “The ECMWF Integrated Forecasting System - IFS - Forecast User Guide - ECMWF Confluence Wiki - Section 2”, 2024
<https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/Section+2+The+ECMWF+Integrated+Forecasting+System+-+IFS>
- [30] National Centers for Environmental Information (NCEI), “Global Forecast System (GFS)”, 12/08/2020 <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>
- [31] Pottier, P. “ARPEGE - Centre National de Recherches Météorologiques”, Umr-cnrm.fr, Janvier 2022a <https://www.umer-cnrm.fr/spip.php?article121&lang=fr>
- [32] National Centers for Environmental Information (NCEI), “Global Forecast System (GFS) 1.0 Degree” <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00631>
- [33] Potter, P. “AROME - Centre National de Recherches Météorologiques”, Umr-cnrm.fr, Janvier 2022b <https://www.umer-cnrm.fr/spip.php?article120&lang=fr>
- [34] Nabat, P. “NCRM-ALADIN - Centre National de Recherches Météorologiques”, Umr-cnrm.fr, Janvier 2022c <https://www.umer-cnrm.fr/spip.php?article125&lang=fr>
- [35] Hamadache, B., Benamara, M., & Mahdi, K. “Execution de la Chaîne Opérationnelle du Modèle Aladin”, Météo France, 2005 https://www.umer-cnrm.fr/aladin/IMG/pdf/Alg_Aladin.pdf
- [36] Météo Algérie, “Modélisation numérique du temps”, 15/06/2021
<https://www.meteo.dz/articles/Modélisation%20numérique%20du%20temps>
- [37] Météo Algérie, “L’Office National de la Météorologie”
https://www.meteo.dz/assets/files/a_propos_onm.pdf

- [38] Hamadache B. “*Vigilance et Alerte Météorologique à Météo Algérie*”, Météo Algérie, 22/10/2018 https://www.interieur.gov.dz/images/Vigilance-et-Alerte-Mtorologique--Mto-Algrie.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [39] Bouttier F. “*La Prévision d’Ensemble*”, Encyclopedie de l’Environnement, 20/09/2018 <https://www.encyclopedie-environnement.org/air/prevision-densemble/>
- [40] Met Office, “*What is an Ensemble Forecast?*” <https://www.metoffice.gov.uk/research/weather/ensemble-forecasting/what-is-an-ensemble-forecast>
- [41] L’institut Royale Météorologique (IRM), “*Prévision d’Ensemble*”, 2023 <https://www.meteo.be/fr/infos/newsletter/articles-2023/prevision-densemble-sans-faillie-pour-les-citernes-intelligentes>
- [42] Dutton J. “*The Difference Between Deterministic and Ensemble Forecasts*”, World Climate Service, 10/12/2021 <https://www.worldclimateservice.com/2021/10/12/difference-between-deterministic-and-ensemble-forecasts/>
- [43] Karkache N., Lasnami R. “*Etude Comparative des Modèles de Prévision du Brouillard à L’Issue AROME*”, Thèse de Master en Opérations Aériennes, Université de Saad Dahleb - Blida, Juillet 2024.
- [44] Goulet V. “*Introduction à la Programmation en R*”, École d’actuariat, Université Laval https://cran.rproject.org/doc/contrib/Goulet_introduction_programmation_R.pdf
- [45] Robert J. “*Langage R : Tour d’horizon et différences avec Python*”, DataScientest, 23/03/2023 <https://datascientest.com/langage-r-tout-savoir>
- [46] Worsley S. “*Qu’est-ce que R ? - Une introduction à la centrale de calcul statistique*”, DataComp, 04/10/2024 <https://www.datacamp.com/fr/blog/all-about-r>
- [47] DataRockstars, “*R Langage de programmation*”, 06/09/2023 <https://www.datarockstars.ai/r-langage-de-programmation/>
- [48] Stübi R. “*Qu’est-ce que R?*”, S-Peers, 16/06/2024 <https://s-peers.com/fr/wiki/was-ist-r/>
- [49] Lavionnaire, “*Codes Météorologiques*”, 2015 <https://www.lavionnaire.fr/CodesMetar.php>

[50] Sekkiou M. “*Décoder les METARs*”, 01/2011

<https://www.scribd.com/document/642362668/MTO-METAR-pdf>

[51] Pilot Institute, “*What Is a SPECI and When Is It Issued?*”, 05/11/2024

<https://pilotinstitute.com/what-is-a-speci/>