



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA-1-

Institut D'aéronautique Et Des Etudes Spatiales

Département : Navigation Aérienne

Spécialité : Opérations aériennes



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En aéronautique

Thème :

**AMELIORATION DE LA PREVISION DU BROUILLARD SUR LES
AERODROMES SITUES AU NORD DE L'ALGERIE : VALIDATION**

Réalisé par

DJELLATO Fairouz

LAIOURATE Marwa

Dirigé par

Dr. MORAD MOKHTARI : Encadreur.

Pr. TAHAR REZOUG : promoteur.

Blida, novembre 2020

RESUME

Le brouillard constitue l'un des phénomènes météorologiques les plus importants et les plus complexes à prévoir. En effet, quand la visibilité baisse, toute circulation (routière, maritime ou aérienne) peut devenir dangereuse, ainsi son impact sur l'exploitation et l'accessibilité des aéroports, pour cela des précautions sont à prendre. Seulement ces précautions sont parfois très coûteuses (retards d'avions, changement d'aéroport d'atterrissage... etc.)

De ce fait, la prévision du brouillard, de l'heure de sa formation et de sa dissipation s'avère d'une grande importance humaine et économique.

L'étude sur la tendance du modèle AROME à prévoir ce phénomène a été réalisée dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude en coopération entre l'ONM et IAB (Zekhmi, 2015). Les résultats obtenus ont été validés sur les trois aérodromes suivants : Alger, Oran et Constantine. Depuis 2015, cette méthode a été adoptée à l'ONM pour la chaîne de production opérationnelle.

Dans ce mémoire et afin d'améliorer l'étude effectuée par Melle Zekhmi dans le cadre de son PFE, ces résultats seront généralisés sur tous les aérodromes situés au nord de l'Algérie pendant trois périodes hivernales successifs.

ABSTRACT

The fog is a hazardous meteorological phenomenon because of the visibility decrease due to water droplets present in the atmosphere. Despite scientific and numerical improvements allowing the use of very detailed numerical weather prediction models, fog forecasting is still a challenge to address.

One of the most important and complex weather phenomena to predict is FOG. Indeed, when visibility decreases, all traffic (road, sea or air) can become dangerous, and its impact on the operation and accessibility of airports, for this precautions must be taken. However, these precautions are sometimes very costly (aircraft delays, change of landing airport, etc.).

Therefore, predicting fog, when it will form and when it will dissipate, is of great human and economic importance.

In this brief and in order to improve the study carried out by Miss Zekhmi as part of her PFE, these results will be generalized to all the aerodromes located in the north of Algeria during three successive winter periods.

ملخص

يعد الضباب من أهم الظواهر الجوية المعقدة التي يمكن التنبؤ بها. في الواقع، عندما تنخفض الرؤية، يمكن أن تصبح جميع حركة المرور (البرية أو البحرية أو الجوية) خطيرة، ويجب اتخاذ الاحتياطات اللازمة. ومع ذلك، فإن هذه الاحتياطات تكون في بعض الأحيان مكلفة للغاية (تأخير الطائرات، تغيير مطار الهبوط، إلخ). لذلك، فإن التنبؤ بالضباب، ومتى يتشكل ومتى يتبدد، له أهمية بشرية واقتصادية كبيرة.

تم إجراء دراسة ميل نموذج (اروم) للتنبؤ بهذه الظاهرة كجزء من أطروحة نهائية بالتعاون بين معهد الطيران والدراسات الفضائية والديوان الوطني للأرصاد الجوية (زخمي 2015)، تم التحقق من صحة النتائج في المطارات الثلاثة التالية: الجزائر العاصمة ووهران وقسنطينة. منذ عام 2015، تم اعتماد هذه الطريقة في الديوان الوطني للأرصاد الجوية لسلسلة الإنتاج التشغيلية.

هذه في هذا الموجز ومن أجل تحسين الدراسة التي أجرتها الأنسة زخمي كجزء من مذكرة التخرج الخاص بها، سيتم تعميم النتائج على جميع المطارات الواقعة في شمال الجزائر خلال فترات الشتاء الثلاث المتتالية

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout d'abord Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la foi, la force et la patience d'accomplir ce modeste travail, ainsi que la volonté et le courage, pour atteindre cette étape importante de notre vie.

Nous exprimons toutes nos reconnaissances et gratitude à tout le personnel de l'office national de la météorologie, pour leur accueil chaleureux, leur soutien, et leur gentillesse.

Nous remercions sincèrement Monsieur Mohamed MKHTARI. En tant qu'encadreur de mémoire, Il s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce projet, aussi pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer, nous disons merci.

Nous remercions Monsieur Tahar REZOUG promoteur de ce travail il nous a soutenu et guidé dans notre travail et, nous a aidé à trouver des solutions pour avancer.

Tous nos vifs remerciements aux membres du jury de nous avoir honoré en acceptant de juger notre travail.

Nous tenons plus particulièrement à remercier :

Nos parents pour leur soutien dans nos plus durs moments.

L'ensemble de la famille pour leur accompagnement et leur aide singulière.

Nous voulons également remercier l'ensemble du corps enseignant de l'institut d'aéronautique et des études spatiales de BLIDA, pour leurs efforts, leurs conseils durant notre cursus universitaire, plus particulièrement à messieurs DEIBOUNE et OUNNAR pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche.

TABLE DES MATIERES

RESUME	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIERES	III
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES	VI
INTRODUCTION GENERALE	VII
CHAPITRE I : GENERALITES METEOROLOGIQUES	9
I. L'ATMOSPHERE	9
I.1. COMPOSITION ET PROPRIETES	9
I.2 LA STRUCTURE VERTICALE DE L'ATMOSPHERE	10
I.3 LA VISIBILITE	12
I.3.1 la visibilité météorologique.....	13
I.3.2 la visibilité aéronautique.....	13
I.3.3 Conditions météorologiques réduisant la visibilité.....	13
I.4 LA MESURE DE LA VISIBILITE	14
I.5 CENTRE MONDIAL DE PREVISIONS DE ZONE (CMPZ)	16
I.6 LE MESSAGE D'OBSERVATION METAR	17
CHAPITRE II : LE PHENOMENE DU BROUILLARD	18
II LE BROUILLARD	18
II.1.DEFINITIONS	18
II.2 PARAMETRES QUI FAVORISENT LA FORMATION DES BROUILLARDS	19
II.3 PARAMETRES QUI DEFAVORISENT LA FORMATION DES BROUILLARDS	20
II.4 PROCESSUS DE FORMATION	20
II.5 DEVELOPPEMENT DES BROUILLARDS	21
II.5.1. Brouillard de rayonnement (radiatif).....	21
II.5.2. Brouillard d'advection.....	22
II.5.3. Brouillard d'ascendance ou orographique.....	22

II.5.4. Brouillard d'évaporation (fumée de mer).....	23
II.5.5. Brouillard mixte (mélange).....	24
II.6. CYCLE DE VIE.....	25
II.6.1. Phase de formation.....	25
II.6.2. Phase mature.....	25
II.6.3 Phase de dissipation.....	26
II.7. DISSIPATION DES BROUILLARDS.....	27
II.8. OUTILS DE DETECTION.....	28
• Observations météorologiques classiques.....	28
• Stations d'observation automatiques.....	28
• Observations à bord de navires.....	29
• Imagerie satellitaire.....	29
• Les sorties des modèles numériques.....	30
Chapitre III : IMPACT DE BROUILLARD SUR L'AVIATION.....	31
III.1 MINIMAS OPERATIONNELS ET ACCESSIBILITE DES AERODROMES.....	31
III.1.1 Aéroport Accessible.....	31
III.1.2 Les Minima Opérationnels.....	31
III.1.3 Les Minima Opérationnels D'aéroport.....	31
III.1.4 Détermination Des Minima.....	32
III.2. CONTRAINTES METEOROLOGIQUES SUR L'AVIATION.....	33
III.2.1 Généralités.....	33
III.2.2 Brouillard.....	33
III.2.2.1 Impact du brouillard sur la visibilité.....	33
III.2.2.2 Impact du Brouillard sur le Trafic Aérien.....	34
III.2.2.3 Effet Néfaste Du Brouillard Sur La Sécurité Des Vols.....	35
III.2.3 Impact Des Conditions Météorologiques Sur Les Exploitants (Etude De Cas Tassili Airlines Exercice 2019).....	36
III.3 SOLUTIONS.....	39
III.3.1 Procédures de faible visibilité (LVP).....	39
III.3.2 Solutions face aux brouillards.....	41

CHAPITRE IV : LA PREVISION DU BROUILLARD PAR LE MODELE AROME	42
IV.1 Définition de la PNT.....	42
IV.2 La grille du modèle numérique.....	44
IV.3 LES ETAPES D'UNE PREVISION.....	44
IV.3.1 Recueillir les observations et assimiler les données.....	45
IV.3.2 Simuler le comportement de l'atmosphère en trois dimensions.....	45
IV.3.3 L'analyse des simulations par les prévisionnistes.....	46
IV.4 LA QUALITE DES PREVISIONS.....	47
IV.5 PREVISION DU BROUILLARD A L'AIDE DES MODELES DE PMN.....	47
IV.6 LES PRINCIPAUX MODELES UTILISES A L'ONM	49
IV.7 CONTEXTE ET OBJECTIFS DU TRAVAIL.....	52
IV.8 LA PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	53
IV.9 LES DONNEES DE L'ETUDE.....	54
IV.9.1. les données des visibilités observées.....	54
IV.9.2 Les relations empiriques utilisées pour l'étude.....	54
IV.10 METHODOLOGIE.....	55
IV.11 TRAITEMENT DES OBSERVATIONS.....	55
IV.11.1 Présentation de l'échantillon.....	55
IV.11.2 Analyse des observations METAR.....	56
IV.12 ANALYSE STATISTIQUE GLOBALE DES DONNEES.....	59
IV.12.1 Analyse de la table de contingence	62
IV.12.2 Résultats.....	63
CONCLUSION.....	64
CONCLUSION GENERALE	65
LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	66

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Structure verticale idéalisée de la température.....	11
Figure I.2 : Structure verticale de l'atmosphère.....	12
Figure I.3 : Le Transmissiomètre.....	15
Figure I.4 : Le Diffusomètre.....	15
Figure I.5 : Un Céломètre (à gauche) et Télémètre laser (à droite).....	16

CHAPITRE II

Figure II.1 : Nappe de brouillard à Lisbonne (Portugal) sous le pont du 25 Avril.....	19
Figure II.2 : Le bilan énergétique à la surface de la Terre.....	20
Figure II.3 : Brouillard de rayonnement (radiatif).....	22
Figure II.4 : Brouillard d'advection.....	23
Figure II.5 : Brouillard d'ascendance ou orographique.....	23
Figure II.6 : Brouillard d'évaporation (fumée de mer).....	24
Figure II.7 : Brouillard mixte (mélange).....	24
Figure II.8 : Formation du brouillard.....	26
Figure II.9 : Phase mature du brouillard.....	27
Figure II.10 : Dissipation du brouillard.....	28
Figure II.11 : Dissipation du brouillard sur la Maine de Bouchemaine.....	28

CHAPITRE III

Figure III.1 : Catastrophes aériennes.....	33
Figure III.2 : Réductions de visibilité par le brouillard à l'aéroport de London.....	34
Figure III.3 : Evolutions des retards en fonction de mois causé par la météo.....	37
Figure III.4 : Etat des vols retardés par causes 2019.....	37

Figure III.5 : Evolutions des annulations en fonction de mois causé par la météo.....	38
Figure III.6: Etat des vols annulés par causes 2019.....	38
Figure III.7 : Etat des vols irréguliers par causes 2019.....	39
Figure III.8 : Procédures de faible visibilité.....	40

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Vue de la Terre découpée en une multitude de petites zones notons ici la grille horizontale et la grille verticale.....	44
Figure IV.2 : les étapes d'une prévision météorologique.....	45
Figure IV.3 : Domaine Aladin.....	50
Figure IV.4 : Domaine Aladin_dust.....	51
Figure IV.5 : Domaine AROME.....	52
Figure IV.6 : Stations météo professionnelles à l'intérieur du domaine AROME.....	53
Figure IV.7 : Carte statique des aéroports d'Algérie.....	57
Figure IV.8 : Représente le Graphique des Aéroports touchés par le brouillard en fonction de la période la plus fréquente.....	58
Figure IV.9 : Carte des stations touchées par le brouillard en trois hivers successifs.....	59
Figure IV.10 : Graphe illustre les cas de brouillard totaux par station.....	59
Figure IV.11 : Diagramme en mosaïque de la table de contingence.....	62

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1: Composition volumétrique de l'air sec.....	10
Tableau I.2: Exemple d'un message METAR.....	17

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 : Paramétrisation utilisé pour calculer la visibilité.....	54
Tableau IV.2 : Analyse des METAR.....	56
Tableau IV.3 : Résultat d'analyse.....	57
Tableau IV.4 : Tableau de contingence de Finley (1884).....	60

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International
AOM	Aerodrome Operating Minima
ARPEGE	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
AROME	Application of Research to Operations at Mesoscale
ATC	Air Traffic Controller
AWIPS	Advanced Weather Interactive Processing System
CAVOK	Ceiling and Visibility OK
CFIT	Controlled Flight Into Terrain
CMPZ	Centre Mondial de Prévisions de Zone
DA/DH	Altitude/hauteur de décision
ETP	Equal Time Points
FAR	Fausse Alarme
FCST	Forecast
GNSS	Global Navigation Satellite System
HR	Humidité Relative
IAB	Institut d'Aéronautique et Aérospatiale de Blida
IBM	International Business Machines Corporation
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Instrument Landing System
IRGHO	Retarder le départ d'un vol
IRGAV	Changer le type d'avion
IRGIT	Changer l'itinéraire d'un vol
KT	Knots
LVP	Low Visibility Procedure
LWC	Liquid Water Content
MDA/MDH	Altitude/hauteur Minimale de Descente
MÉSO-NH	Non-Hydrostatic Mesoscale Atmospheric Model
METAR	Meteorological Airport Report
N _D	La Concentration Numérique des Goulettes
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration

OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OBS	Observations
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONM	Office National de la Météorologie
PC	Précision, Proportion Correcte
PM	La Prévision Météorologique
PMN	Modèles De Prévision Météorologique Numérique
PNT	Prévision Numérique du Temps
RVR	Runway Visual Range
SKC	Sky Clear
SMN	Service Météorologique National
SMOG	Smoke-Fog
SPECI	Special Weather Report
SURFEX	Surface Externalisée
TAF	Terminal Aerodrome forecast
TS	Threat Score
UTC	Temps universel coordonné
VFR	Visual Flight Rules

INTRODUCTION GENERALE

L'effet du brouillard sur l'expérience humaine est reconnu depuis les débuts de l'humanité, mais son impact s'est considérablement accru dans les dernières décennies. En fait, les pertes humaines et financières attribuables au brouillard et à la réduction de la visibilité sont devenues comparables à celles dues à d'autres phénomènes météorologiques, comme les tornades et même les ouragans.

Pour l'aéronautique, la réduction de visibilité qu'il entraîne empêche tout vol à vue. Il est impossible pour un pilote d'assurer la sécurité dans le brouillard. Le sol n'est pas toujours visible et les obstacles de grandes dimensions verticales ne sont aperçus que trop tard pour être évités. **C'est pourquoi, les aéroports sont demandeurs de prévisions précises et fiables.**

La prévision des brouillards nécessite la représentation précise des paramètres dans la couche limite de surface tels que les profils verticaux de vent, de température et d'humidité (Fitzjarrald and Lala, 1989).

Bien que les avancées scientifiques et informatiques permettent d'utiliser des modèles de prévisions numériques du temps de plus en plus détaillés, la prévision du brouillard reste encore un challenge dû à la multitude et la complexité des processus mis en jeu lors du cycle de vie du brouillard (dynamique, microphysique, turbulent et radiatif).

Ce travail est composé de quatre chapitres, dont les deux premiers sont construits autour des généralités sur l'atmosphère terrestre et certaines propriétés, le brouillard et ses types ainsi son cycle de vie.

Le troisième chapitre traite les minima opérationnels et l'accessibilité des aérodromes ainsi l'impact de brouillard sur l'aviation avec quelques solutions face à ce phénomène. Et Le dernier chapitre comporte la prévision numérique du temps et ses étapes, en indiquant quelques modèles utilisés en prévisions. Et enfin nous allons valider l'étude sur tous nos aérodromes.

Une étude sur la tendance du modèle AROME à prévoir le phénomène de brouillard a été réalisée dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude en coopération entre l'ONM et IAB (Zekhmi, 2015). Depuis 2015, cette méthode a été adoptée à l'ONM pour la chaîne de production opérationnelle.

L'objectif de ce travail est d'améliorer la prévision du brouillard sur les aérodromes situés au nord de l'Algérie. Il s'agit de généraliser l'étude effectuée par Melle Zekhmi dans le cadre de son PFE à d'autres aérodromes. Des simulations sur trois saisons hivernales consécutives

(2017, 2018 et 2019) sont réalisées sur les aéroports du Nord de l'ALGERIE avec le modèle à l'échelle kilométrique AROME. Les résultats sont validés par rapport aux données d'observations.

En raison de la situation sanitaire et les mesures de l'application de la quarantaine, nous n'avons pas pu inclure des nouvelles paramétrisations qui ont été programmés pendant un stage pratique à l'ONM et pour cela une amélioration de cette étude en prenant en compte d'autres phénomènes qui rentrent en jeu dans la formation ou la dissipation du brouillard est recommandée.



GÉNÉRALITÉS MÉTÉOROLOGIQUES

INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons donner quelques définitions météorologiques et notions de base sur les paramètres ayant une relation avec notre sujet à savoir : l'atmosphère terrestre et ses propriétés, sa structure verticale ainsi que l'atmosphère standard. Nous définissons aussi la visibilité et les conditions météorologiques qui la réduisent et les instruments employés pour la mesurer. Enfin nous donnons un aperçu sur le centre mondial de prévision de zone et le message d'observation METAR.

❖ Quelques définitions :

- La température du point de rosée

C'est la température à laquelle les premières gouttelettes d'eau liquide se forment quand on refroidit un volume d'air contenant de l'eau à l'état gazeux. [1]

- L'humidité

Elle correspond à la quantité d'eau sous forme gazeuse présente dans l'air humide. A savoir, l'air humide est constitué d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. [1]

- Météorologie

Discipline ayant pour objet l'étude des phénomènes atmosphériques et de leurs variations, et qui a pour objectif de prévoir à court terme les variations du temps. [2]

I. L'ATMOSPHERE

I.1. COMPOSITION ET PROPRIETES

L'atmosphère est constituée d'une mince pellicule de gaz qui entoure le globe terrestre. Elle ne possède pas de dimension verticale, mais le gaz se raréfie avec l'altitude. Une épaisseur approximative 15 kilomètres contient 99% de la masse totale de l'atmosphère, elle est 200 fois plus petite que le rayon terrestre.

L'air atmosphérique est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau en quantité assez variable, des impuretés et de différentes particules microscopiques.

Tableau I.1 : Composition volumétrique de l'air sec

Composition volumétrique de l'air sec	
Azote	78%
Oxygène	21%
Argon	0.9%
Gaz carbonique	traces
Hélium	traces
Hydrogène	traces
Ozone	traces concentrées entre 10 et 50 km

Dans un volume d'air, la proportion est de quelques grammes de vapeur d'eau pour un kilogramme d'air sec.

Les gaz et les poussières diverses provenant de combustions générées par l'activité industrielle, l'évaporation des embruns, la décomposition des matières azotées, la floraison de certaines plantes, les éruptions volcaniques, constituent des impuretés qui servent, entre autres, de support à la condensation de la vapeur d'eau.

Les paramètres qui caractérisent l'état de l'atmosphère sont : la pression (P), la température et l'humidité exprimée en (%). [3]

I.2. LA STRUCTURE VERTICALE DE L'ATMOSPHERE

Les principales variables thermodynamiques utilisées pour l'étude de l'atmosphère sont la température T, la pression P, et la masse volumique (ou densité). Toutes les trois varient beaucoup plus rapidement sur la verticale que sur l'horizontale, on peut donc définir une structure verticale moyenne en fonction de l'altitude.

Les variations verticales de température sont très différentes : la température décroît et augmente alternativement avec l'altitude, de façon quasi-linéaire (Fig.I.2).

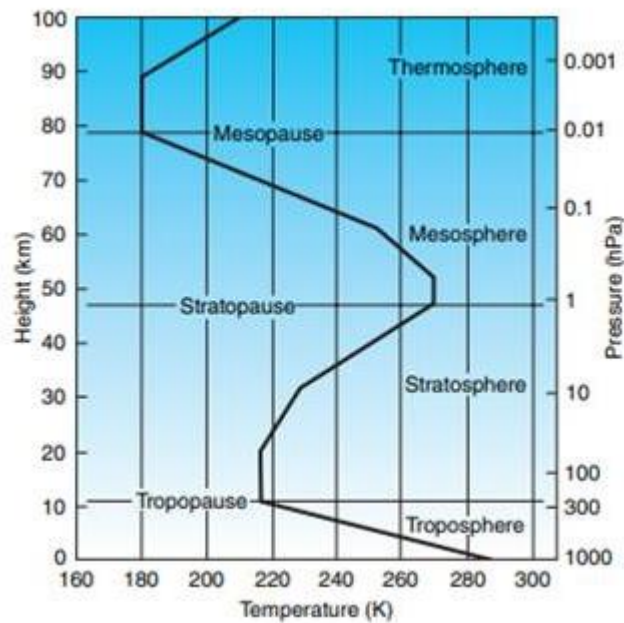


Fig.I.1 : Structure verticale idéalisée de la température.

Cette structure verticale de la température permet de diviser l'atmosphère en un certain nombre de couches aux propriétés différentes, nommées *-sphère*, dont les limites supérieures sont appelées *-pause*. On distingue, à partir de la surface [2] : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère.

Dans ce mémoire on s'intéresse à la troposphère qui est concernée par la majorité des phénomènes météorologiques (formation des nuages, pluie, neige...). C'est la couche la plus basse de l'atmosphère qui s'étend jusqu'à environ 6 -18 km selon la latitude et les saisons, et contient 80% de la masse de l'atmosphère. La température y décroît en moyenne de 6,5°C par kilomètre. C'est une couche relativement bien mélangée sur la verticale, sauf sur certaines couches minces appelées *inversions* où la température décroît peu ou même augmente avec l'altitude.

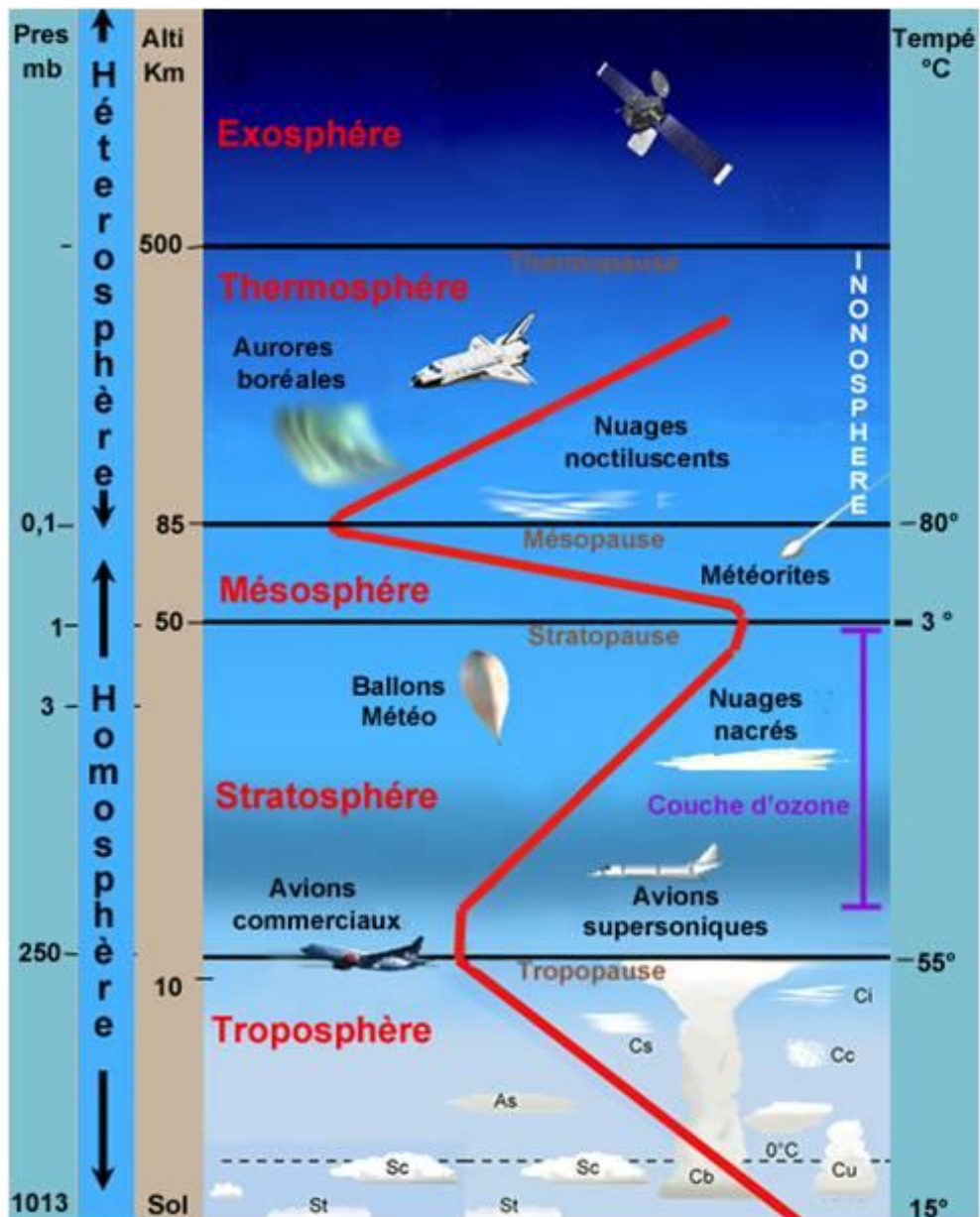


Fig. I.2 : Structure verticale de l'atmosphère.

I.3. LA VISIBILITE

La visibilité est un des éléments les plus importants de l'atterrissage et du décollage. C'est une distance jusqu'à laquelle un observateur situé près du sol ou de la mer peut voir et identifier un objet dans une direction donnée de l'atmosphère, à un instant et en un lieu déterminés, c'est une grandeur que l'on peut mesurer en mètres ou kilomètres, en milles, en pieds, ou encore suivant une échelle, et que l'on appelle la visibilité en ce lieu et à cet instant dans la direction choisie. [4]

I.3.1. La visibilité météorologique

On distingue deux types de visibilité météorologique :

- *La visibilité horizontale* : est la capacité pour un observateur de voir un objet à l'horizon ou entre l'horizon et lui. Outre les paramètres relevant de la courbure terrestre, certaines conditions de la visibilité sont de nature topologique et dépendent de la morphologie terrestre ; d'autres dépendent des circonstances
- *La visibilité oblique et verticale* : est la distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet situé ni au même niveau ni sur la même verticale que lui. *La visibilité verticale* est la distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet sur la même verticale que lui.

La visibilité est fréquemment réduite dans les basses couches de l'atmosphère, en particulier par la présence de météores qui appartiennent dans la grande majorité des cas au groupe des hydrométéores et des lithométéores. [5]

I.3.2. La visibilité aéronautique

L'Organisation météorologique mondiale (OMM) définit la visibilité comme la distance la plus grande à laquelle un objet noir de dimensions appropriées peut être vu et identifié de jour sur le fond du ciel à l'horizon ou, quand il s'agit d'observations de nuit, pourrait être vu et identifié si l'éclaircissement général augmentait jusqu'à atteindre l'intensité normale en lumière du jour.

I.3.3. Conditions météorologiques réduisant la visibilité

Certains phénomènes peuvent réduire la visibilité horizontale, à la surface du globe, dans des proportions telles que le trafic aérien sur les aéroports peut être interrompu. On peut classer ces phénomènes en deux grandes familles, selon leur origine :

Hydrométéore : phénomène autres qu'un nuage, observé dans l'atmosphère ou à la surface du globe et constitué de particules d'eau liquide ou solide.

Lithométéore : phénomène, observé dans l'atmosphère ou à la surface du globe et consistant en un ensemble de particules dont la plupart sont solides et non aqueuses. Les particules sont en suspension dans l'atmosphère ou soulevées du sol par le vent. [6]

La visibilité est importante pour toutes les formes de circulation : routes, navigation et aviation. C'est pour cela que les véhicules et certains éléments du sol (pistes d'atterrissage, virages, etc.) sont balisés par des lampes ou des surfaces réfléchissantes, tels des catadioptres. Les éléments qui peuvent réduire la visibilité sont : l'eau liquide en suspension dans l'air (sous forme brume, brouillard ou nuage), les fumées (en particulier lors des feux de forêt), les tempêtes de sable dans les déserts, les aérosols en suspension qui forment la brume sèche et la poudrière (chasse-neige élevée). [5]

I.4. LA MESURE DE LA VISIBILITE

Pour mesurer la visibilité horizontale, les techniciens en météorologie utilisent des repères visuels qui se trouvent à une distance connue du point d'observation (un château d'eau, un bâtiment,... etc.). La nuit, des lunettes d'obscurité sont utilisées pour adapter la vision de l'observateur à la faible luminosité extérieure avant de sortir de la station.

Il existe également des appareils automatisés de mesure de la visibilité :

- Le transmissiomètre est un instrument de mesure de la visibilité enregistrant l'atténuation d'un faisceau de lumière traversant un fluide sur une certaine distance. Le faisceau concentré, en général émis par un laser, traverse le milieu et est capté en fin de trajet par un récepteur dont l'angle de vision est restreint à la direction de la source du faisceau. [7]

Cet instrument est illustré dans la figure ci-après :



Fig. I.3 : Le transmissiomètre.

- Le diffusomètre optique est un appareil qui consiste en un émetteur lumineux (lampe) et d'un récepteur. Les deux sont placés à un angle ajustable mais généralement autour de 35° de l'horizontale, pointant vers une direction commune. Le coefficient d'extinction de l'onde émise est mesuré à partir de la diffusion latérale sur des particules dans l'air, telles la brume, qui se trouve entre l'émetteur et le récepteur. Le principal défaut de la mesure par cet instrument est qu'elle est faite dans un petit volume d'atmosphère, pas toujours représentatif de la visibilité générale [8], le diffusomètre est montré dans la figure ci-dessous :



Fig. I.4 : Le diffusomètre.

- Le céломètre est un laser qui émet à la verticale et dont le récepteur perçoit les retours de lumière venant des obstructions. En général, on l'utilise pour connaître la hauteur de la base des nuages mais des obstructions partielles comme la brume vont retourner un signal diffus qui peut être interprété comme la visibilité verticale, Plus récemment, les céломètres laser ont été développés. Il s'agit d'un télémètre laser qui émet une impulsion lumineuse verticalement et la hauteur du plafond est calculée par la mesure du temps entre l'émission et le retour du signal ayant été réfléchi par la base du nuage. [9]



Fig. I.5 : Céломètre (à gauche) et Télémètre laser (à droite).

I.5. CENTRE MONDIAL DE PREVISIONS DE ZONE (CMPZ)

Centre météorologique désigné pour préparer et établir les prévisions du temps significatif et les prévisions en altitude sous forme numérique à l'échelle mondiale et les communiquer directement aux États par des moyens appropriés dans le cadre du service fixe aéronautique. Le système mondial de prévisions de zone aura pour objectif de fournir aux administrations météorologiques et aux autres usagers des prévisions météorologiques aéronautiques en route mondiales sous forme numérique. Cet objectif sera réalisé grâce à un système mondial complet, intégré et dans la mesure du possible uniforme, de manière efficace du point de vue des coûts, en tirant pleinement parti de l'évolution technologique. [10]

I.6. LE METAR

C'est un message d'observation, il est donc très fiable. Il se compose de paramètres estimés (visibilité, nébulosité...) ou mesurés (pression). Les METAR sont rédigés systématiquement toutes les heures ou demi-heures.

D'autres messages peuvent être rédigés occasionnellement en cas d'aggravation ou d'amélioration des conditions météorologiques. Ce sont les messages SPECI.

Exemple :

Tableau I.2 : exemple d'un message METAR

LFOP	03 0800Z	32004KT	CAVOK	10/10	Q1015
Rouen	Date+heure de l'observation en UTC	Vent en surface	Ceiling and visibilit OK	températures	Pression

LFOP : indicateur d'emplacement OACI.

0800Z : jour + heure de l'observation en heure minutes UTC, suivi de la lettre Z (pour Zoulou)

32004KT : signifie un vent en surface du 320° (direction d'où vient le vent), de vitesse 04 nœud (moyenne sur 10 minutes).

CAVOK : signifie que toutes les conditions ci-dessous simultanément réunies :

- visibilité horizontale en surface supérieure ou égale à 10 km.
- pas de nuage en dessous de 1500 (ou plus selon les conditions géographiques local ou MSA).
- pas de cumulo-nimbus.
- pas de précipitations, ni orages, ni tempêtes de sable ou de poussière, ni brouillards minces, ni chasse-poussière, chasse-sable ou chasse-neige basse. S'il n'y a pas de nuages, mais que CAVOK pas utilisable (visibilité inférieure à 10 km par exemple) on utilisera l'abréviation : SKC

10/10 : température et point de rosée, en degrés Celsius précédés d'un « M » si négatifs.

Q1015 : pression QNH en HPa, précédé de la lettre Q. [3]



LE PHÉNOMÈNE DU BROUILLARD

INTRODUCTION

Ce chapitre comporte la définition du brouillard, les paramètres qui favorisent et défavorisent la formation de ce dernier. Ensuite, nous allons présenter son processus de formation, sa dissipation et leurs différents types ainsi que le cycle de vie du brouillard. Enfin nous allons citer quelques méthodes utilisées pour détecter ce phénomène.

II. LE BROUILLARD

II.1. DEFINITIONS

Est la suspension dans l'atmosphère de très petites gouttelettes d'eau (le diamètre des gouttelettes du brouillard atteint 1 à 10 microns de diamètre [11]) réduisant la visibilité au sol à moins d'un kilomètre. Les gouttelettes d'eau sont maintenues en suspension par les mouvements turbulents de l'air, leurs charges électriques identiques les écartent les unes des autres.

C'est un phénomène basique et assez courant en automne et en hiver, pourtant régi par des lois physiques assez complexes et est surtout l'un des phénomènes météorologiques les plus difficilement prévisibles.

"Le brouillard est en fait un nuage qui réduit la visibilité à moins d'un kilomètre et dont la base touche le sol".

Ils se notent par deux ou trois traits horizontaux sur les cartes météo :

Abréviation METAR	FG
Symbole	≡
Classification	Nuage bas (Famille C)
Altitude	Surface



Fig. II.1 : Nappe de brouillard à Lisbonne (Portugal) sous le pont du 25 Avril.

II.2 PARAMETRES QUI FAVORISENT LA FORMATION DES BROUILLARDS

Météorologique : Pour qu'un brouillard se forme, plusieurs conditions doivent être réunies : des températures basses et un taux d'humidité élevé afin que la vapeur d'eau se condense.

Il faut également qu'il y ait dans l'air un certain nombre de particules, solides ou liquides. Appelées noyaux de condensation, elles permettent aux gouttes d'eau de se fixer dessus et de s'accumuler pour former progressivement le brouillard. La quantité d'eau sous forme de vapeur se condense en gouttelettes doit être au moins de 0.5 g/Kg d'air. Autre condition, le vent ne doit être ni trop fort pour éviter la dispersion des gouttelettes d'eau, ni trop faible, car cela empêche leur suspension dans l'air.

Il existe plusieurs processus par lesquels la vapeur d'eau se condense au voisinage de la surface terrestre et donc plusieurs types de brouillard.

Physique : Le bilan énergétique à la surface de la Terre :

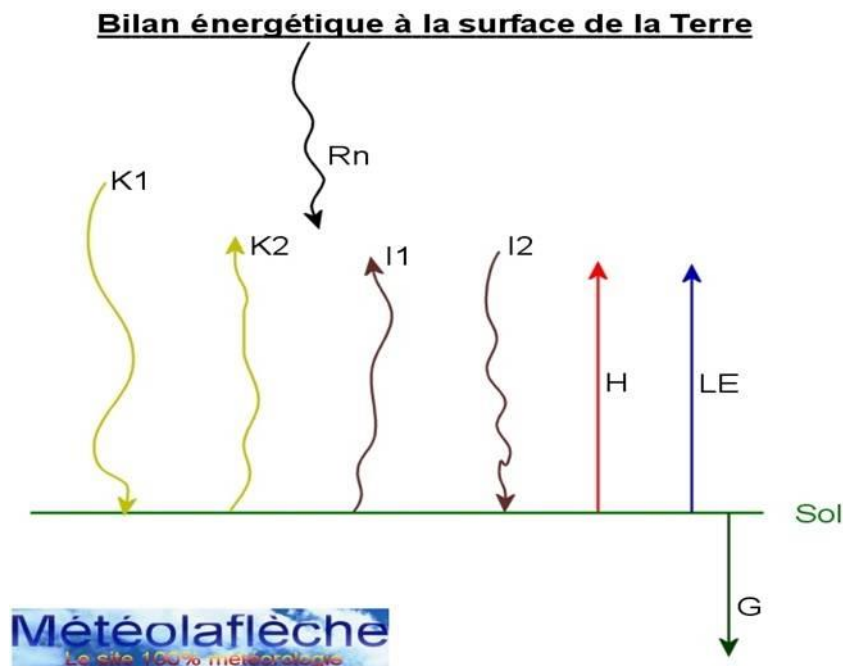


Fig. II.2 : Le bilan énergétique à la surface de la Terre.

Avec :

K1 : flux solaire incident transmis.

K2 : flux solaire incident réfléchi vers l'espace.

I1 : flux infrarouge émis par la surface.

I2 : flux infrarouge reçu par la surface.

H : flux de chaleur sensible (flux turbulent).

LE : flux de chaleur latente (flux turbulent).

G : flux de chaleur échangé avec le sous-sol.

Rn : flux radiatif net.

Sur 24 heures, l'ensemble des flux radiatifs et des flux turbulents s'équilibrent :

$$Rn = K1 + K2 + I1 + I2 = H + LE - G \quad [12]$$

II.3 PARAMETRES QUI DEFAVORISENT LA FORMATION DES BROUILLARDS

- Forte turbulence ou vent fort supérieur à 10 nœuds : l'air humide se mélange avec l'air sec ce qui empêche la saturation.
- Vent nul ou vent trop faible sur les premiers mètres au-dessus de la surface terrestre
- Ciel nuageux : réduit le refroidissement radiatif du sol
- Forte dépression de la température du point de rosée : ce qui mène à un refroidissement moins intense.



II.4 PROCESSUS DE FORMATION

Les différents processus de formation de brouillard sont bien connus, mais leur localisation et leur intensité restent difficiles à prévoir avec précision.

On en déduit les 3 processus fondamentaux de formation du brouillard :

- Le refroidissement de l'air au voisinage du sol peut se produire suivant 3 processus indépendants et éventuellement cumulatifs :
 - rayonnement du sol (brouillard radiatif).
 - contact avec un sol froid (brouillard d'advection).
 - détente adiabatique le long d'une pente (Brouillard d'ascendance).
- Brouillard dû à l'apport de vapeur d'eau (brouillard d'évaporation).
- mélange de masses d'air (brouillard mixte). [13]

II.5 DEVELOPPEMENT DES BROUILLARDS

Le brouillard peut se former de différentes manières. Une distinction est faite en termes de développement entre brouillard de rayonnement, d'advection, d'évaporation, d'ascendance et le brouillard mixte, qui sont les principaux brouillards. Il arrive que ces différentes formes apparaissent de manière combinée.

II.5.1. Brouillard de rayonnement (radiatif)

Il se forme par refroidissement nocturne de la surface terrestre, généralement en fin de nuit. Ce brouillard est typiquement terrestre et peut persister plusieurs jours en période hivernale. Il se forme généralement durant la nuit à cause du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre et le refroidissement associé de la couche d'air basse. Il se dissipe en matinée sous l'action du rayonnement solaire, en commençant par la base, évoluant parfois en une couche de nuages bas (stratus). [14]

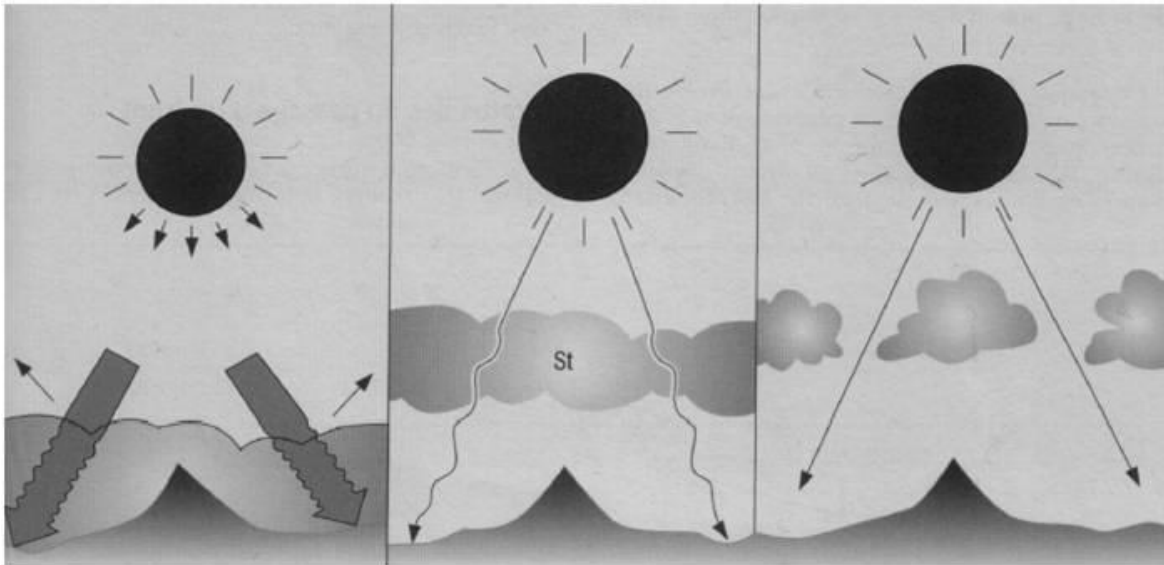


Fig. II.3 : Brouillard de rayonnement (radiatif).

II.5.2. 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 en minuscules gouttelettes maintenues en suspension par la turbulence et le vent léger. 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. Il existe deux types de brouillard d'advection : le brouillard d'advection chaud et le brouillard d'advection froid.

C'est la forme de brouillard qui dure le plus longtemps ; il peut persister pendant plusieurs jours, voire semaines selon les circonstances. Leur dissipation se produit avec le réchauffement de la surface froide ou par un changement de masse d'air, au passage d'un front par exemple. [14]

Note : le smog est un type de brouillard d'advection, il se présente dans les agglomérations urbaines.

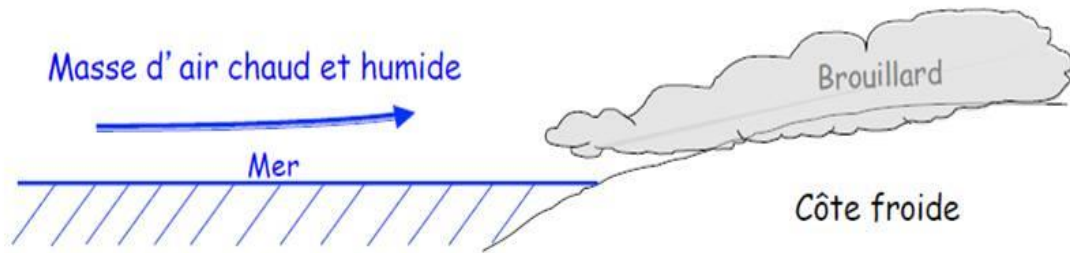


Fig. II.4 : Brouillard d'advection.

II.5.3. Brouillard d'ascendance ou orographique

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 provenant de la vallée à l'assaut du relief. En s'élevant l'air se refroidit par détente adiabatique et atteint son point de condensation. Un brouillard se condense alors le long de la pente, aussi appelé brume de montagne. Le brouillard est visible sous la forme d'un nuage autour du sommet de la montagne. [15]

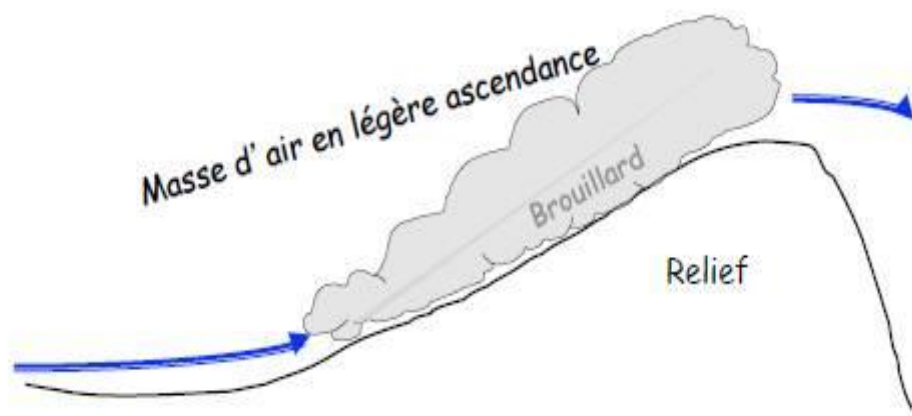


Fig. II.5 : Brouillard d'ascendance ou orographique.

II.5.4. Brouillard d'évaporation (fumée de mer)

C'est un brouillard qui se forme sur les grandes étendues d'eau (lacs ou mers).

Un vent faible mais froid souffle depuis la terre vers la mer (1). Cet air froid et sec se charge en humidité par évaporation de l'eau au-dessus de laquelle il passe. Il atteint alors la saturation (point de rosée) et des gouttelettes d'eau se condensent au-dessus de la mer (2) [6].

Le même mécanisme peut se produire au-dessus d'un lac ou d'étendues marécageuses.

Ce type de brouillard peut se former par exemple en Méditerranée en hiver quand de l'air froid à -5 ou -10 °C s'écoule des Alpes vers la mer. Il se forme également après des précipitations orageuses [14]. Il existe deux types de brouillard d'évaporation : le **Brouillard de vapeur** et le **Brouillard frontal**.

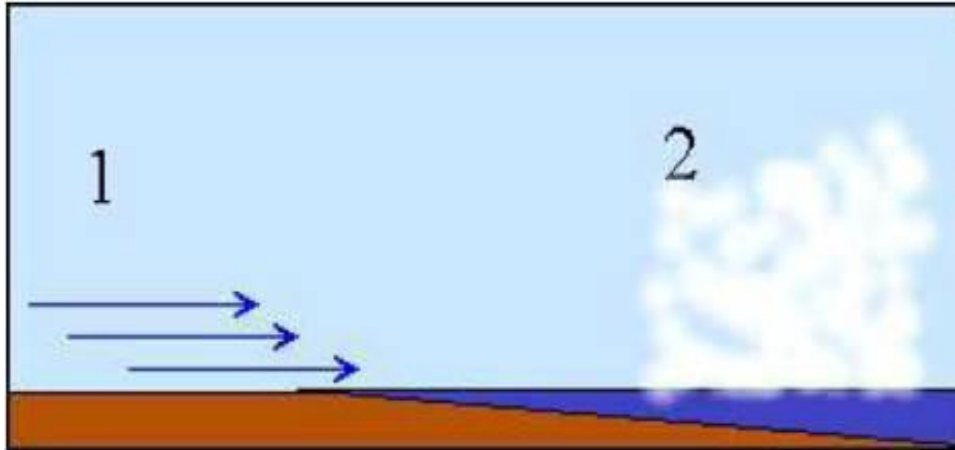


Fig. II.6 : Brouillard d'évaporation (fumée de mer).

II.5.5. Brouillard mixte (mélange)

Avec du brouillard mixte, il y simultanément un refroidissement et une augmentation de l'humidité de l'air. Ceci se produit dans un turbulent mélange d'air chaud, humide et froid. Lorsque deux masses d'air fortement humides mais non saturées et de température nettement différentes sont mélangées par un brassage important, il en résulte une nouvelle température telle que le nouvel rapport de mélange de saturation r_w peut être inférieur au nouvel rapport de mélange r . d'où excès de vapeur d'eau qui peut donner naissance à un brouillard de « mélange ». [15]



Fig. II.7 : Brouillard mixte (mélange)

Autres types de brouillard :

- **Le brouillard par affaissement de stratus** : Il s'agit de brouillard se formant par abaissement progressif de la base d'une couche de stratus. [13]
- **Le brouillard de précipitation** : Un brouillard est dû aux précipitations, si un type de précipitations est observé au moment de l'occurrence du brouillard ou au cours de l'heure précédant sa formation. Ceci est basé sur l'hypothèse que l'humidification et le refroidissement des basses couches de l'atmosphère grâce à l'évaporation des précipitations peuvent mener à la formation du brouillard. [13]
- **Brouillard givrant ou frimas, un cas spécifique de brouillard de rayonnement**
C'est un brouillard composé de gouttelettes d'eau surfondue (à l'état liquide par température négative, elles gèlent au moindre contact. Les brouillards givrants peuvent entraîner des dépôts importants sur les chaussées, barrières de sécurité, mais également sur la végétation, sur les lignes électriques, etc. [17]

II.6 CYCLE DE VIE DES BROUILLARDS DE TYPE RADIATIF

II.6.1. Phase de formation

La première phase, dite de formation, correspond à un refroidissement radiatif du sol, lorsque la surface rayonne plus de chaleur qu'elle n'en reçoit de l'atmosphère, ce qui provoque une inversion de température en basses couches lorsque le vent est faible. Si le point de saturation est atteint au sol, il y a formation de rosée et si le refroidissement du sol se propage aux niveaux supérieurs, il y a formation de gouttelettes d'eau par condensation. La formation du brouillard est d'une part fortement liée à la capacité du sol à se refroidir et d'autre part à l'intensité de la turbulence.

La couche nocturne étant stable, la turbulence est essentiellement d'origine dynamique due au cisaillement du vent. Une faible turbulence est nécessaire pour que le refroidissement radiatif se propage verticalement. Toutefois si la turbulence est trop faible, la saturation, qui ne peut pas se diffuser sur la verticale, se traduit par un dépôt de rosée important. Au contraire, une turbulence trop forte diminue le taux de refroidissement de la surface en augmentant le mélange (Fig.II.8).

Cependant, une turbulence plus forte n'empêchant pas la formation du brouillard permet un développement plus rapide de celui-ci. Des nappes de brouillard peuvent ainsi se former pour des niveaux intermédiaires de turbulence. La fin de la période de formation correspond à une

augmentation de la turbulence, associée à une turbulence tridimensionnelle dans la couche de brouillard, et bidimensionnelle à son sommet. [15]

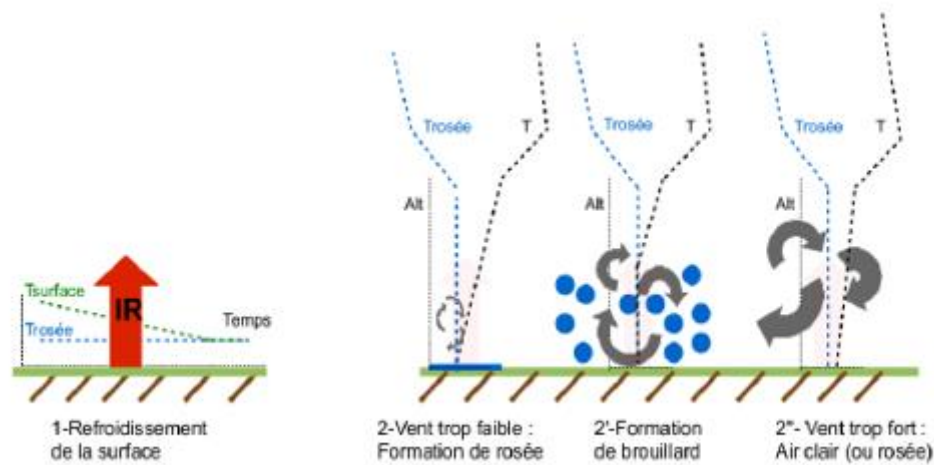


Fig. II.8 : Formation du brouillard.

II.6.2. Phase mature

En se développant verticalement, le brouillard atteint sa phase mature (Fig.II.9). Le sommet de la couche de brouillard devient le siège principal des processus qui pilotent l'évolution du brouillard, avec le refroidissement radiatif et l'entraînement avec l'air des couches supérieures. La couche de surface passe d'un état stable à un état neutre ou légèrement instable. Une convection froide se met en place : en effet, le sommet du brouillard se refroidit par rayonnement infrarouge et par évaporation. Une couche plus froide se forme et plonge vers le sol par gravité, entraînant un brassage de la parcelle condensée. De l'air plus sec, provenant du dessus du brouillard, peut alors être entraîné dans le brouillard. Toutefois, à ces mouvements verticaux peuvent s'ajouter des mouvements horizontaux dus à des processus de méso-échelle, des advections d'humidité ou de chaleur pouvant modifier le développement du brouillard. [18]

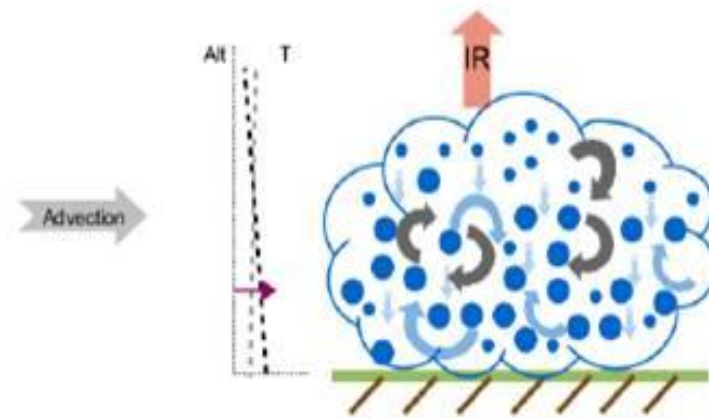


Fig. II.9 : Phase mature du brouillard.

II.6.3 Phase de dissipation

La dissipation intervient lorsque la turbulence dépasse un seuil critique. Cela peut être dû à une augmentation du vent, qui mélange l'air saturé du brouillard avec celui plus sec situé au-dessus de la couche d'inversion, ou à un réchauffement de la surface par le rayonnement solaire.

Au lever du soleil, le rayonnement solaire influence de deux façons le cycle de vie du brouillard : Par le réchauffement de la couche de brouillard et par le réchauffement du sol. Le rayonnement solaire est en partie réfléchi par le brouillard, dont l'albédo est élevé, est en partie absorbé, ce qui provoque un lent réchauffement de la couche de brouillard, et est en partie transmis au sol. Le sol se réchauffe par l'absorption du rayonnement solaire, ce qui provoque un réchauffement progressif des plus basses couches du brouillard. Ceci rend l'atmosphère légèrement instable et augmente la turbulence, ce qui accélère l'évaporation par le bas du brouillard. L'intensité de ce réchauffement dépend du type de surface et de la turbulence (de la même façon que pour le refroidissement à la formation), mais aussi du contenu en eau du brouillard. Plus le contenu en eau est important, plus le brouillard absorbe la chaleur. La rosée ou la sédimentation peuvent retarder la dissipation du brouillard après le lever du soleil. En effet, leur évaporation due au chauffage radiatif alimente le brouillard en vapeur d'eau et maintient un refroidissement, ce qui peut maintenir sa sursaturation et retarder l'évaporation des gouttelettes. Mais la sédimentation peut également accélérer la dissipation en vidant le brouillard de son eau.

Le brouillard s'évapore par le bas, il peut ensuite s'élever en stratus ou se dissiper entièrement. La présence d'une couche nuageuse au-dessus du brouillard peut également conduire à sa dissipation en renvoyant le rayonnement infrarouge émis par le sommet du brouillard (Fig.II.10). [18]

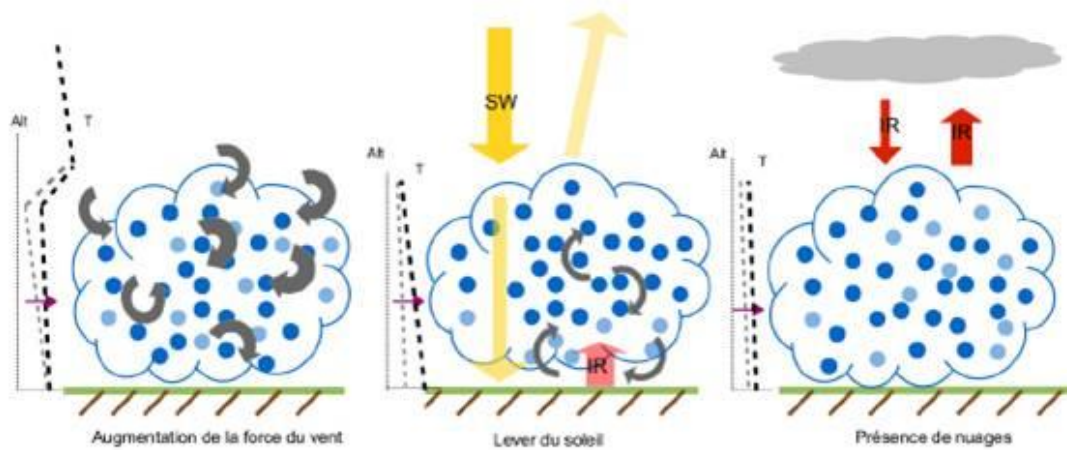


Fig. II.10 : Dissipation du brouillard.

II.7 DISSIPATION DES BROUILLARDS

La dissipation du brouillard se produit lorsqu'un réchauffement permet aux gouttelettes ou aux cristaux de glace de s'évaporer. Ceci se passe par réchauffement solaire, par passage au-dessus d'une surface plus chaude, par assèchement dû à la subsidence d'air sec d'altitude ou par mélange avec de l'air plus sec par les vents. [19]



Fig. II.11 : Dissipation du brouillard sur la Maine de Bouchemaine.

II.8 OUTILS DE DETECTION

Les outils de détection englobent les observations en surface et en altitude, ainsi que les sorties des modèles de prévision numérique du temps. [13]

a) **Observations météorologiques classiques**

Sont les plus anciennes et les plus classiques parmi les méthodes de diagnostic de l'atmosphère. Elles permettent d'atteindre les paramètres physiques directs, comme la température, la pression, le vent, les précipitations. Le volume de données ainsi accessibles n'est qu'une fraction relativement réduite de l'ensemble des observations utilisées dans les modèles de prévision numérique. Les premières mesures réalisées concernaient la température de l'air, la pression atmosphérique et les précipitations. Des capteurs inventés il y a plusieurs siècles restent encore utilisés, même si certains sont maintenant en voie d'abandon, comme les baromètres à mercure, les thermomètres à mercure et à alcool, et les pluviomètres collecteurs (dans des seaux). [20]

b) **Stations d'observation automatiques**

Ce sont des équipements qui effectuent automatiquement des mesures météorologiques et qui transmettent également automatiquement les résultats de ces mesures. Elles ont été réalisées soit pour être utilisées à terre, soit pour être abandonnées en mer sur des bouées fixes ou dérivantes. Les stations montées sur bouées devant faire face à certaines conditions particulières d'exploitation seront l'objet d'un paragraphe spécial [21], mais elles remplacent de plus en plus les stations avec personnel à cause de leur moindre coût.

Développées pour les services météorologiques nationaux, elles sont maintenant utilisées également pour la recherche météorologique, pour divers utilisateurs spécialisés comme la météorologie agricole et le suivi des conditions routières, même par les météorologues amateurs. [22]

c) **Observations à bord de navires**

Le choix des navires se fait dans le cadre de collaborations internationales et en accord avec les compagnies maritimes. L'objectif est de réaliser des mesures prioritairement sur des zones pauvres en observations.

Les stations automatiques mesurent les paramètres atmosphériques de base (la pression, la température, l'humidité, le vent) mais également la température de l'eau en surface. Elles sont envoyées toutes les heures par satellite (Iridium et Inmarsat) au centre de Météo-France de Toulouse.

Ces mesures sont dans la mesure du possible accompagnées d'observations visuelles, effectuées par les marins, sur l'état de la mer (période et direction de la houle et des vagues induites par le vent, présence de glaces et d'icebergs) et du ciel (type et hauteur des nuages, visibilité, nébulosité). Les observations automatiques nourrissent les modèles numériques de prévision du temps. Elles sont précieuses pour le prévisionniste spécialisé en météorologie marine qui les compare aux données des modèles de prévision. Les informations sur les nuages permettent également de mieux interpréter les images satellites qui ne permettent pas de différencier un nuage bas d'un brouillard par exemple.

d) Imagerie satellitaire

L'imagerie satellite peut être utilisée pour aider à prévoir le brouillard potentiel formations, ou pour vérifier les zones où le brouillard persistant est répandu. Le canal de 3,9 / 10,7 micromètres est utilisé la nuit pour représenter présence de brouillard ou de stratus de bas niveau. Pendant la journée, satellite visuel l'imagerie est l'outil préféré pour représenter les zones de brouillard/nuages bas. Des estimations approximatives de la profondeur et de l'étendue du brouillard peuvent être déterminées par les différences de canaux infrarouges (IR), mais la surface et des rapports de sondage restent des indicateurs plus précis du brouillard réel profondeur. Dans les cas où les rapports de surface corrélatifs ne sont pas disponibles, L'imagerie infrarouge peut être une alternative efficace. [23]

e) Les sorties des modèles numériques

La prévision numérique du temps (PNT) est une application de la météorologie et de l'informatique. Elle repose sur le choix d'équations mathématiques offrant une proche approximation du comportement de l'atmosphère réelle. Ces équations sont ensuite résolues, à l'aide d'un ordinateur, pour obtenir une simulation accélérée des états futurs de l'atmosphère. Le logiciel mettant en œuvre cette simulation est appelé un modèle de prévision numérique du temps. [24]

Les modèles mathématiques basés sur les mêmes principes physiques peuvent être utilisés pour générer soit des prévisions météorologiques à court terme ou les prévisions climatiques à long terme ; ces derniers sont largement appliqués pour la compréhension et la projection des changements climatiques. [25]



IMPACT DU BROUILLARD SUR L'AVIATION

INTRODUCTION

Tout au long de son histoire, l'aviation est restée intimement liée à la météorologie. Il y a eu des avancées technologiques de toutes sortes - de meilleurs avions, des systèmes de navigation aérienne améliorés et un programme de formation des pilotes systématisé mais la météorologie continue d'être un élément de premier plan.

Dans le monde de l'aviation, les mots conditions météorologiques ne désignent pas seulement « ce qui est en train de se produire » mais aussi « ce qui va se produire durant le vol ». Tout dépendant de l'information qu'il reçoit, le pilote choisira d'entreprendre ou d'annuler son vol. Dans cette section, nous examinons un élément météorologique particulier et l'influence qu'il peut avoir sur la faisabilité d'un vol.

III.1 MINIMAS OPERATIONNELS ET ACCESSIBILITE DES AERODROMES

III.1.1 Aéroport Accessible

C'est un aéroport confirmé déjà comme adéquat et satisfait les minima métrologiques en termes de plafond et de visibilité durant une période de validité allant de 1H avant jusqu'à 1H après l'heure prévue d'arrivée sur ce terrain.

Les composantes du vent sur l'axe longitudinal et latéral de la piste doivent être vérifiées et comparées aux limitations de l'avion. [26]

III.1.2 Les minima opérationnels

Les minima opérationnels est l'ensemble des limites de certains paramètres significatifs au-dessus desquels l'exécution ou la poursuite de certains procédures d'approche, d'atterrissage ou de décollage est interdite à un équipage. [27]

III.1.3 Minima Opérationnels D'aéroport

Les minima opérationnels sont les valeurs qui définissent les limites d'utilisation d'un aéroport. Ils sont exprimés sous forme d'altitude ou de hauteur minimale et de visibilité ou RVR minimales.

Suivant le type de procédure considéré, les paramètres significatifs figurent parmi les éléments suivants :

- Pour le décollage, exprimées en fonction de la portée visuelle de piste et/ou de la visibilité et, au besoin, en fonction de la base des nuages ;
- Pour l'atterrissage avec approche classique, exprimées en fonction de la visibilité et /ou de la portée visuelle de piste, de l'altitude/hauteur minimale de descente (MDA/MDH) et, au besoin, en fonction de la base des nuages ; et
- Pour l'atterrissage avec approche de précision, exprimées en fonction de la visibilité et/ou de la portée visuelle de piste et de l'altitude/hauteur de décision (DA/DH) comme étant appropriée à la catégorie d'exploitation.

III.1.4 Détermination Des Minima

Lors de la détermination des minima opérationnels d'aérodrome s'appliquant à une opération quelconque, on doit tenir compte pleinement des éléments suivants :

- a) type, performances et caractéristiques de manœuvrabilité de l'avion ;
- b) composition de l'équipage de conduite, compétence et expérience de ses membres ;
- c) dimensions et caractéristiques des pistes appelées à être utilisées ;
- d) mesure dans laquelle les aides au sol, visuelles et non visuelles existantes répondent aux besoins, ainsi que leurs performances ;
- e) équipement disponible à bord de l'avion pour la navigation l'acquisition de références visuelles et/ou le contrôle de la trajectoire de vol au cours de l'approche, de l'atterrissage et de l'approche interrompue ;
- f) obstacles situés dans les aires d'approche et d'approche interrompue et altitude/hauteur de franchissement d'obstacles à utiliser pour la procédure d'approche aux instruments ;
- g) moyens utilisés pour déterminer et communiquer les conditions météorologiques ;
- h) obstacles situés dans les aires de montée au décollage et marges de franchissement nécessaires. [28]

III.2. CONTRAINTES METEOROLOGIQUES SUR L'AVIATION

III.2.1. Généralités

Les dangers météorologiques sont bien réels pour l'aviation : ils représenteraient environ **13%** des causes d'accidents aériens. Mais il faut relativiser : tous les accidents liés à la météo n'aboutissent pas obligatoirement à une catastrophe de grande ampleur : dans la plupart des cas, il s'agit d'incidents au moment du décollage ou de l'atterrissage, principalement liés au Brouillard ou à des pistes verglacées, occasionnant alors une grande frayeur aux membres d'équipage et aux passagers. [29]

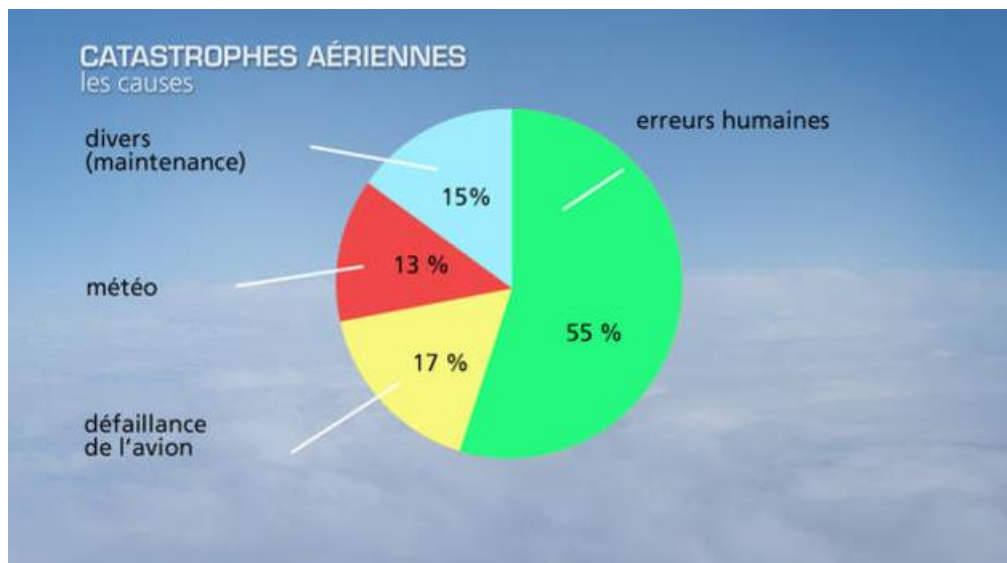


Fig. III.1 : catastrophes aériennes. [29]

III.2.2 Brouillard

III.2.2.1 Impact Du Brouillard Sur La Visibilité

Le brouillard est le limiteur de visibilité le plus courant dans l'aviation. Il a la capacité de limiter la visibilité en surface à moins 1 km ; par conséquent, les impacts opérationnels du brouillard peuvent être importants.

Les conditions de brouillard réduisent souvent le flux d'arrivée / de départ des avions et peuvent devenir suffisamment denses pour rendre un aéroport inaccessible.



Fig. III.2 : réductions de visibilité par le brouillard à l'aéroport de Londres.

Lorsque le brouillard est prévu, les équipages devront envisager des remplaçants d'aéroport ou des ETP alternatifs et emporter du carburant supplémentaire en raison des conditions générées par le brouillard et en cas de déroutements ou de retards aux heures d'atterrissage programmées. Le brouillard peut réduire rapidement la visibilité, d'où un changement des règles de vol à vue (VFR) aux règles de vol aux instruments (IFR) en quelques minutes s'impose. Cette réduction rapide de la visibilité se produit principalement, avec types de brouillard d'advection ou conditions de pente ascendante. Le brouillard de rayonnement se produit généralement plus progressivement, car la température diminue avec le temps jusqu'au point de rosée. [30]

III.2.2.2 Impact du Brouillard sur le Trafic Aérien

Le brouillard est un phénomène particulièrement dangereux pour tous les types de transports, routiers, aéronautiques ou maritimes et parmi les nombreuses variables qui peuvent affecter la planification du voyage, l'une des plus cruciales est les perspectives météorologiques, influencer sur la planification de l'itinéraire, perturber les horaires, et dans des cas extrêmes peuvent même empêcher un vol d'avoir lieu (Annulation du vol) . [30]

Le brouillard a malgré tout un impact sur le trafic aérien, même dans les aéroports les plus modernes, et peut également entraîner des retards importants et des pannes du système de transport, Non seulement les vols peuvent être reportés ou annulés si l'aéroport est couvert de brouillard, mais les vols de correspondance peuvent aussi subir à leur tour même les mêmes contraintes, si les conditions météorologiques sont bonnes à l'aéroport de départ. [31]

Bien que les avions n'aient pas besoin de visibilité en vol, le brouillard au sol constitue une gêne et un problème lors des atterrissages et des décollages [29]. La réduction de la visibilité qui accompagne les brouillards présente un danger pour la sécurité humaine et la navigation. C'est le facteur météorologique qui affecte le plus les opérations aériennes, les caractéristiques topographiques se ressemblent toutes à basse altitude, ce qui rend essentielle une bonne navigation de route. Ceci n'est réalisable que dans de bonnes conditions de visibilité. [32]

Les avions et les aéroports sont équipés d'une technologie performante pour voler en toute sécurité dans des mauvaises visibilités (ce que l'on appelle IFR, Instrument Flight Rules). Pour pouvoir atterrir dans des conditions caractérisées par le brouillard, les avions et les aéroports doivent notamment être pourvus d'équipements spécifiques, d'un système d'aide à l'atterrissage par mauvaise visibilité (ILS : guidage latéral et vertical ou GNSS : procédures satellitaires). Et pour éviter tout accident sur la plateforme aéroportuaire lorsque la visibilité est inférieure à 600 mètres, la durée d'espacement entre deux atterrissages ou deux décollages est rallongée, multipliée par deux. Comptez 6 minutes au lieu de 3 minutes habituellement (interview de François Chevrier, contrôleur aérien de l'aéroport de Toulouse Blagnac). [33]

III.2.2.3 Effet Néfaste Du Brouillard Sur La Sécurité Des Vols

Le brouillard présente à la fois des problèmes de sécurité et de coût pour les opérateurs. Les Statistiques des accidents de l'aviation générale aux États-Unis de 1982 à 2013 indiquent que le brouillard était associé à 40% de tous les décès dans les catégories liées au plafond, à la visibilité ou aux précipitations. [30]

Ces retards ou annulations ont des conséquences économiques directes et indirectes. A titre d'exemple, le brouillard givrant observé à l'aéroport Heathrow de Londres juste avant la période des fêtes de 2006 a immobilisé tous les avions durant près de trois jours, ce qui a causé des pertes estimées à 25 millions de livres sterling pour la seule compagnie British Airways (Gadher et Baird 2007, Gultepe et al 2009). [31]

Le brouillard a également été à l'origine d'un autre accident :

Comme la catastrophe de l'aéroport de Tenerife en 1977 - la pire catastrophe aérienne au monde et Crash d'un avion turc au Népal : le brouillard responsable.

-17 décembre 1976 : le vol Aeroflot s'écrase contre un remblai ferroviaire à cause du brouillard lors de son approche de l'aéroport de Kiev, faisant 48 morts parmi les 55 personnes à bord.

-15 novembre 1978 : le vol Loftleidir, un DC-8, assurant la liaison Djeddah

Colombo au Sri Lanka s'écrase dans un champ de cocotiers après avoir raté son approche, à cause du mauvais temps et du brouillard, faisant 183 morts sur les 262 personnes à bord.

-12 décembre 1986 : le vol Aeroflot s'écrase dans un bois près de Berlin lors de son approche par temps de brouillard. Les pilotes n'avaient pas compris les instructions de la tour de contrôle qui leur précisait d'atterrir sur la piste de gauche au lieu de celle de droite. 72 des 82 personnes à bord périssent dans l'accident.

-17 février 2018 : crash mortel d'un avion de tourisme à Val Sonnette à cause de brouillard.

[34]

III.2.3 Impact Des Conditions Météorologiques Sur Les Exploitants (Etude De Cas : Tassili Airlines Exercice 2019)

Etude des statistiques de l'année 2019 dans la compagnie Tassili Airlines :

La météorologie est l'une des principales causes des retards et annulations des vols, on s'intéresse ici à la visibilité car on est rarement limité par le plafond

La visibilité sur le réseau d'exploitation de TASSILI, elle est impactée par deux choses soit par le sable (fin mars jusqu'à début juillet) sinon le reste par le phénomène de brouillard

1. Etude du volet retard

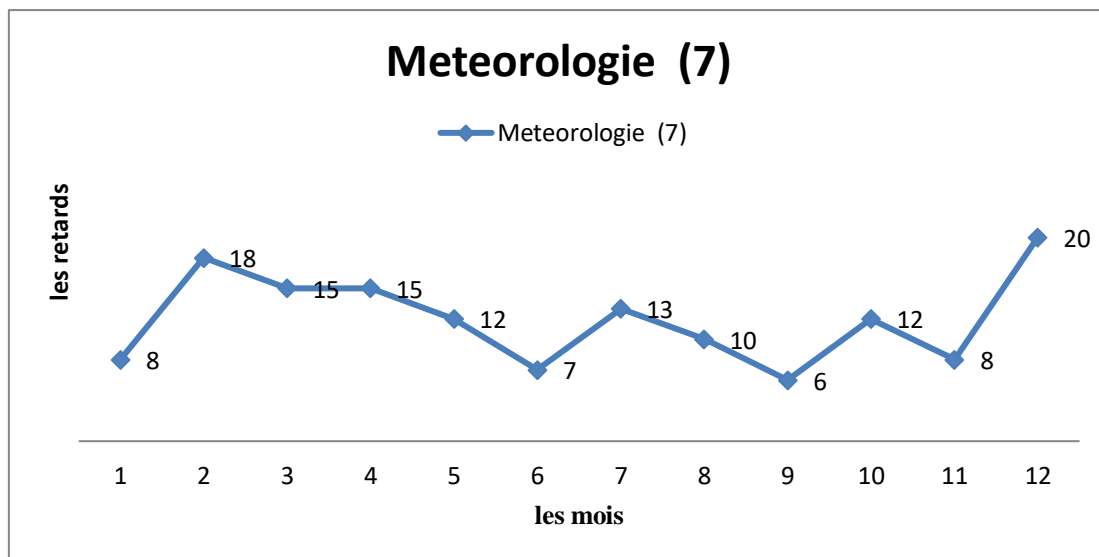


Fig. III.3 : Evolutions des retards en fonction de mois causé par la météo.

Durant cette année on remarque deux valeurs significatives de vols qui ont été retardés à cause de la météo pendant le mois février début mars à cause de soulèvement de sable et en décembre à cause des brouillards.

- Comparaison des retards impactés par la météo par rapport les autres causes :

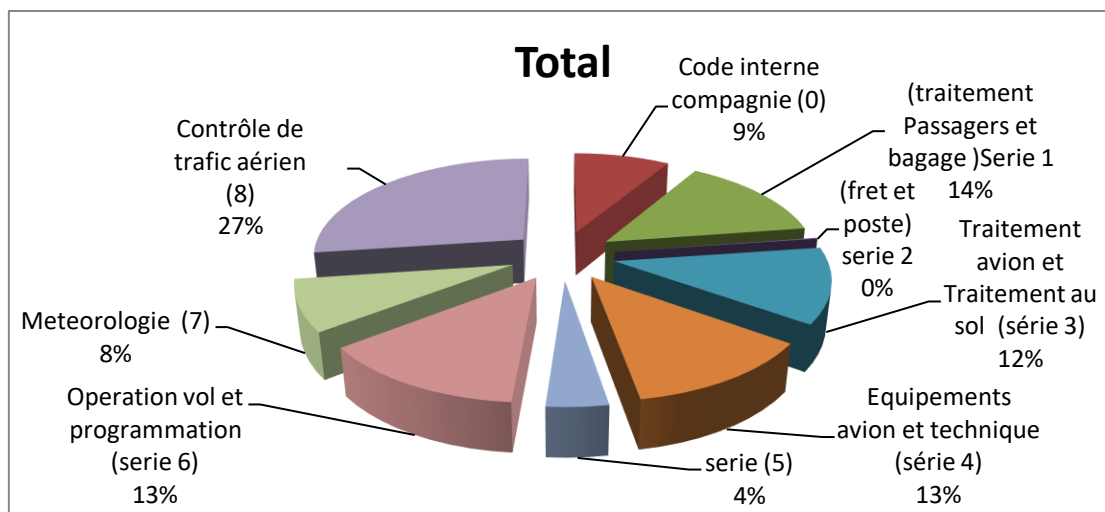


Fig. III.4 : Etat 2019 par causes des vols retardés.

2. Etude du volet annulation

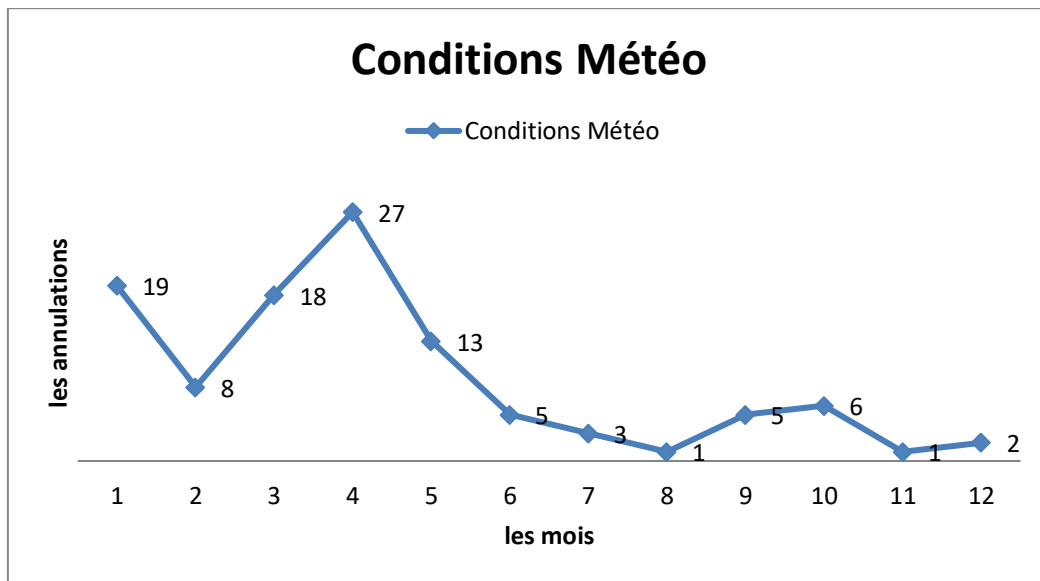


Fig. III.5 : Evolutions des annulations en fonction de mois causées par la météo.

Ce graphe illustre une valeur significative pendant le mois d’avril à cause de soulèvement de sable dans le secteur sud aux terrains VFR ce qui entraîne une obligation d’annuler les vols carrément par contre au mois de décembre on n’a pas beaucoup de vol annulé cause brouillard parce qu’il génère le plus souvent des retards que des annulations.

- Comparaison de l’impact des conditions météo sur les annulations des vols par rapport aux autres causes :

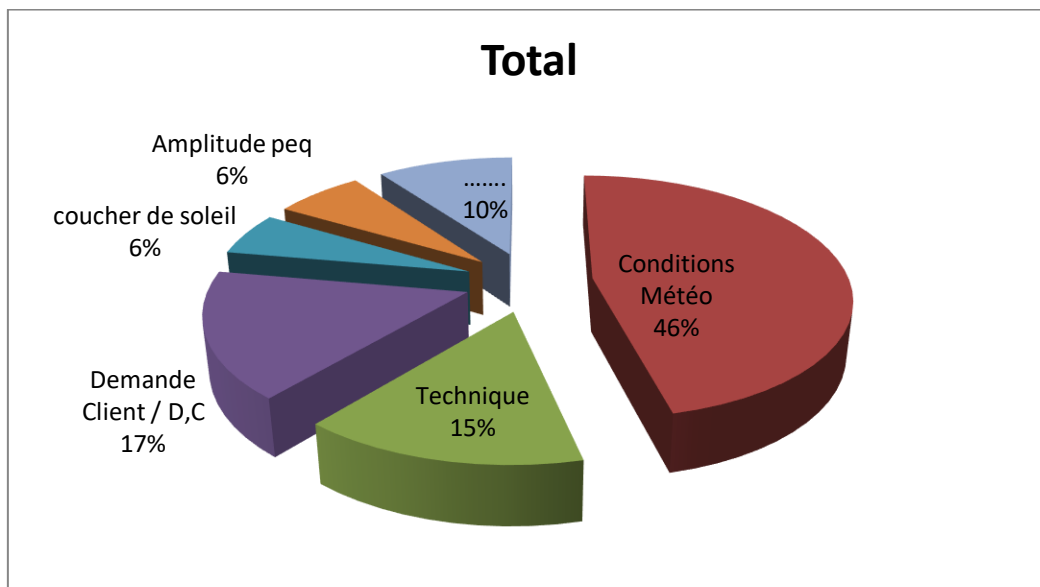


Fig. III.6 : Etat des vols annulés par causes 2019.

3. Etude du volet irrégularités

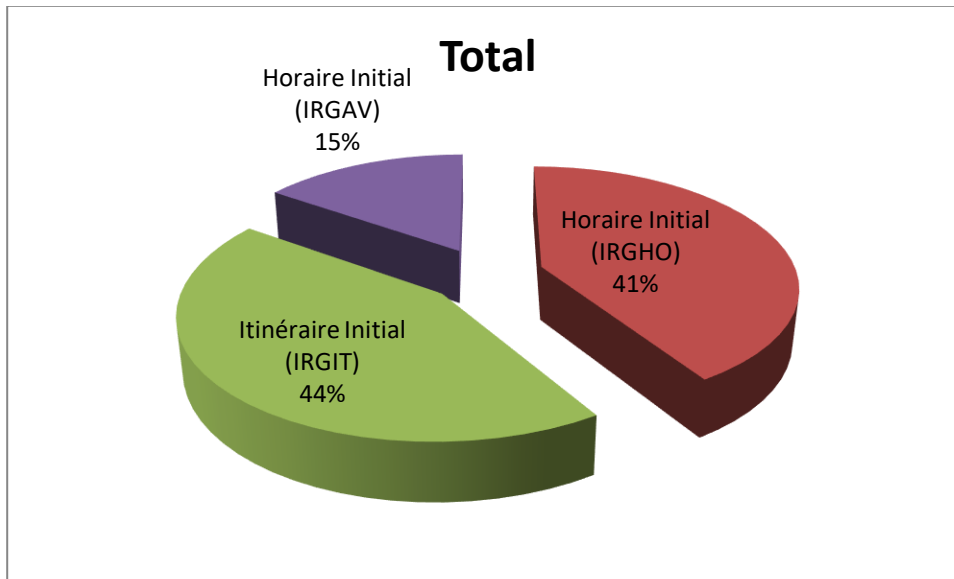


Fig. III.7 : Etat des vols irréguliers par cause 2019.

Ce graphique présente le pourcentage de chaque irrégularité décrit ci-dessous :

IRGHO: retarder le départ d'un vol

IRGAV: changer le type d'avion

IRGIT: changer l'itinéraire d'un vol

III.3 SOLUTIONS

III.3.1 Procédures de faible visibilité (LVP)

Lorsque la visibilité à un aéroport tombe en dessous d'un mile (1500m) (décrit par les pilotes et les aéroports comme RVR - Runway Visual Range), l'aéroport applique les procédures de faible visibilité (LVP). Pendant les LVP, le trafic aérien réduira le nombre d'aéronefs taxés et décollant pour prévenir les accidents et les incidents [35].

Ces Procédures sont appliquées à un aérodrôme en vue d'assurer la sécurité de l'exploitation lors des approches de précision CAT II et III et des décollages par faible visibilité. Celles-ci permettent aux compagnies aériennes d'exploiter des aérodrômes dans des conditions météorologiques défavorables et avec des minima inférieurs comme pour les opérations CATI.

Par conséquent, les LVP sont très avantageux pour augmenter la facilité de service de l'aire de manœuvre et augmenter l'attractivité d'un aérodrome pour ses utilisateurs. [36]



Fig. III.8 : Procédures de faible visibilité.

III.3.2 Solutions face aux brouillards

Brouillard de rayonnement

- Lorsque des conditions de brouillard de rayonnement existent, il est judicieux d'examiner la configuration du temps au cours des jours précédents pour voir si le brouillard s'est produit et à quelle heure de la journée et à quelle température.
- La surveillance de la température et du point de rosée dans un aéroport peut aider les contrôleurs et les pilotes à prévoir le début du brouillard de rayonnement et à planifier les opérations en conséquence.
- Si vous effectuez des opérations de vol locales, telles que la formation au pilotage, méfiez-vous de prendre l'air quand il y a levée de brouillard en début d'après-midi alors que les conditions de brouillard de rayonnement existent toujours - vous pourriez vous retrouver à passer la nuit ailleurs !
- Si vous prévoyez de voler vers un aérodrome où existent des conditions de brouillard de rayonnement,
 - chronométrez votre arrivée prévue pendant environ une heure après midi locale lorsque le chauffage solaire maximum a lieu.
 - Prévoir des retards et transporter du carburant d'urgence supplémentaire.

Brouillard frontal

- Voler à basse altitude, c'est-à-dire en dessous de l'altitude de sécurité, dans des conditions de brouillard frontal et de nuages bas peut rapidement devenir extrêmement dangereux si les règles de vol à vue ne peuvent pas être respectées. Tenter de voler entre des couches de Stratus, ce qu'on appelle la «boîte aux lettres», peut entraîner un impact avec le CFIT du terrain si la visibilité vers l'avant et la conscience de la situation sont perdues.

Brouillard d'advection

- Dans les cas où le brouillard d'advection peut rapidement rendre un aéroport inutilisable, le même risque peut également s'appliquer aux dérives potentielles et les pilotes devraient s'assurer qu'une endurance appropriée au carburant est disponible et que les remplaçants peu susceptibles d'être affectés par le brouillard d'advection restent à portée dans le cas où le temps de destination se détériore de façon inattendue.

[37]



LA PRÉVISION DU BROUILLARD PAR LE MODÈLE AROME

INTRODUCTION

Le brouillard constitue l'un des phénomènes météorologiques les plus importants et les plus complexes à prévoir. Dans cet objectif, des études de prévisibilité du brouillard ont été effectuées au début des années 60. Aujourd'hui la prévision du temps est incontournable, mais pour prévoir la couleur du ciel de demain, les météorologues ont besoin des modèles de simulation de l'atmosphère.

Il est bien connu que pour tenter de prédire les aspects comportementaux d'un système, il est nécessaire de créer son modèle approximatif mathématique. Aussi bien valable en économie qu'en météorologie, ce modèle doit être défini à partir de lois d'évolution. En le faisant « tourner » on simule alors le comportement du système à différentes échéances à partir d'un état initial préalablement défini.

L'atmosphère étant un vaste espace et les lois qui la régissent étant complexes, les modèles numériques réalisent un nombre incommensurable d'opérations arithmétiques. Le traitement humain paraît donc impossible et il a fallu attendre le développement des ordinateurs dans les années 50 pour pouvoir espérer modéliser l'atmosphère. Aujourd'hui, il est quasiment impossible de se séparer de ces méthodes de calcul, car le modèle météorologique informatique est à la base de toute prévision du temps.

Dans ce chapitre nous allons parler sur la PNT, ses différentes fonctions et ses étapes, ainsi que la qualité des prévisions. Nous citerons, également, les modèles utilisés pour la prévision météorologique. Enfin, nous expliciterons les différentes méthodes utilisées pour la paramétrisation de la visibilité réduite par le brouillard.

De nombreux paramètres sont pris en compte dans les modèles : variables d'état de l'atmosphère et au niveau du sol (températures, humidité, vent, etc.) ; processus physiques au niveau de l'atmosphère et du sol ou encore l'interaction entre le sol et l'atmosphère (et inversement). Grâce à toutes ces données, les supercalculateurs sont en mesure de créer des cartes de modélisations numériques.

IV.1. DEFINITION DE LA PNT

La prévision numérique du temps est une application de la météorologie et de l'informatique qui exécutent des calculs afin de prévoir l'état futur de chaque grandeur atmosphérique par petits pas de temps finis en se basant sur une estimation de son état présent, en reposant sur

des équations mathématiques offrant une approximation plus proche en utilisant un modèle numérique de prévision du temps . [38]

Un modèle de prévision numérique du temps (PNT) est constitué d'un ensemble des lois d'évolution de l'atmosphère (plus ou moins simplifiées) discrétisées sur la grille de calcul.

En pratique, un modèle de PNT est composé de deux parties :

- La dynamique qui décrit l'évolution du fluide atmosphérique dans les conditions adiabatiques à l'échelle de la grille de discrétisation choisie (partie résolue).
- La physique qui décrit l'ensemble des processus non explicitement résolus à l'échelle de la grille de discrétisation (partie non-résolue) mais qui ont une influence significative sur les échelles résolues par les équations de la partie dynamique et qui sont associés à des processus diabatiques. On parle alors de paramétrisations physiques. Elles représentent principalement les échanges de chaleur dans l'atmosphère et avec la surface, les transports induits par la turbulence, ainsi que les changements de phase de l'eau. [39]

Chaque pays du monde dispose d'un Service Météorologique National (SMN), ayant pour mission de réaliser des observations régulières de l'atmosphère et d'élaborer des prévisions pour le gouvernement, l'industrie et le public. Mais seuls les pays les plus avancés disposent de centres de Prévision Numérique du Temps (PNT), dont les produits sont également distribués aux autres pays, en échange de leurs observations, dans le cadre de l'Organisation Météorologique Mondiale.

➤ Les différentes fonctions des centres de PNT :

- La première fonction importante est la réception des observations
- La deuxième fonction est l'examen critique des observations pour détecter les éventuelles observations fausses (si un système de mesure est défaillant), redondantes, ou biaisées.
- La troisième fonction consiste à produire, à partir de l'ensemble varié et hétérogène des observations récentes, un « état » de l'atmosphère sous forme de champs mathématiques qui pourront servir à démarrer le modèle de prévision.
- La quatrième fonction est la prévision proprement dite, qui est réalisée par un modèle numérique de l'atmosphère
- La dernière fonction importante d'un centre de PNT est la vérification a posteriori des prévisions. [40]

IV.2. LA GRILLE DU MODELE NUMERIQUE

L'atmosphère est composée d'une infinité de points et le temps se découpe en une infinité de périodes. On découpe ainsi l'atmosphère de façon à obtenir un nombre fini de morceaux et un nombre fini d'échéances : c'est la numérisation. Cette discrétisation crée un réseau constitué de points situés à l'intersection de méridiens et de parallèles et ce, à différentes altitudes. Ce réseau de points, également appelé grille définit alors la maille du modèle comme la distance horizontale séparant deux points deux à deux opposés.

De plus, le modèle est également caractérisé par le nombre de niveaux verticaux définissant ainsi la stratification atmosphérique et par le pas de temps qui sépare deux échéances de calcul.

Le modèle calcule alors l'évolution d'un certain nombre de paramètres physiques au sein d'une portion d'atmosphère au cours d'échéances successives. [41]

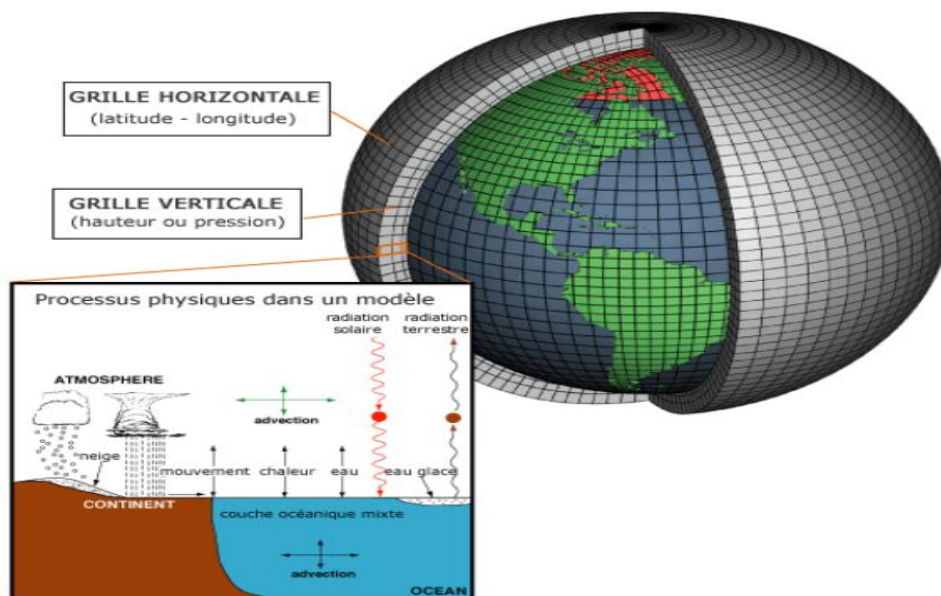


Fig. IV.1 : Vue de la Terre découpée en une multitude de petites zones notons ici la grille horizontale et la grille verticale. [41]

IV.3. LES ETAPES D'UNE PREVISION

Une prévision météorologique est élaborée en quatre étapes fondamentales : l'observation, l'assimilation des données observées pour obtenir une représentation du temps qu'il fait, la simulation de l'évolution de l'atmosphère au moyen de modèles numériques et l'analyse des résultats par les prévisionnistes.

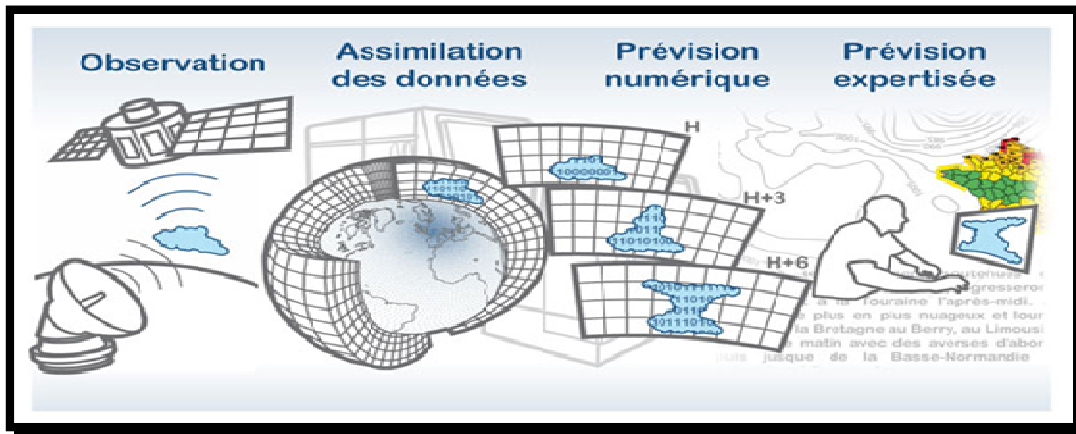


Fig. IV.2 : les étapes d'une prévision météorologique.

IV.3.1 Recueillir les observations et assimiler les données

Prévoir le temps qu'il fera demain, il faut déjà connaître le temps qu'il fait aujourd'hui. Plus on veut aller loin dans le temps, plus la zone sur laquelle il faut caractériser le temps qu'il fait doit être étendue. L'observation constitue ainsi la première étape d'une prévision. Les données d'observation utilisées par les modèles de prévision proviennent des satellites météorologiques et fournies par des stations au sol, des radiosondages, des capteurs embarqués sur des avions de ligne et des navires de commerce ou installés sur des bouées ancrées et dérivantes.

Toutes ces observations sont ensuite traitées pour en extraire les informations "utiles" au modèle de prévision : on parle d'assimilation des données. Environ 22 millions de données d'observations sont utilisées chaque jour par les modèles à l'issue de l'étape d'assimilation. Les données issues des observations sont combinées à d'autres informations, comme des prévisions très récentes, pour établir un état initial de l'atmosphère que le modèle saura utiliser. Les observations sont également utilisées par les prévisionnistes, d'une part pour le suivi de la situation en cours, d'autre part pour la détection et la correction d'éventuelles erreurs de prévision.

IV.3.2 Simuler le comportement de l'atmosphère en trois dimensions

A partir de cet état initial, les modèles simulent l'évolution de l'atmosphère, qu'ils découpent en une grille en trois dimensions aux mailles plus ou moins larges. La simulation s'appuie sur les lois physiques qui gouvernent l'évolution atmosphérique : principalement les lois de la mécanique des fluides, complétées par celles qui régissent les changements d'état de l'eau (condensation, évaporation, formation des précipitations), la turbulence, le rayonnement ou encore les nombreuses interactions avec la surface terrestre et même l'espace.



De l'observation à la prévision expertisée, en passant par l'assimilation des données et la modélisation : pour affiner les prévisions, les améliorations portent sur l'ensemble de la chaîne.

Pour décrire l'état de l'atmosphère et effectuer leurs calculs, les modèles numériques de prévision du temps et du climat découpent l'atmosphère en boîtes élémentaires contenant chacune une valeur de pression, de vent, de température, d'humidité... Sur l'horizontale, ce découpage est défini par la distance de maille de la grille du modèle, et sur la verticale, par le nombre de niveaux du modèle. Distance de maille et nombre de niveaux varient selon la finesse souhaitée, la puissance de calcul disponible, la vocation du modèle (prévision à courte échéance, simulation climatique, prévision saisonnière...). Pour les phénomènes dépassant la taille de leur maille, les modèles suivent ces lois physiques en toute rigueur. En revanche, les phénomènes plus petits ne sont pas "décrits" explicitement dans le modèle. Ils sont pris en compte par le biais d'algorithmes spécifiques qui simulent leur influence moyenne à l'intérieur des mailles du modèle.

Pour effectuer les milliards de calculs nécessaires à la résolution des équations mathématiques simplifiées qui traduisent l'évolution de l'atmosphère, on utilise des supercalculateurs.

IV.3.3 L'analyse des simulations par les prévisionnistes

Les résultats des simulations effectuées par les modèles ne sont pas encore des prévisions météorologiques. Il s'agit de scénarios d'évolution des principaux paramètres météorologiques en tous les points de la grille qui représente l'atmosphère. L'expertise des prévisionnistes est indispensable pour analyser ces résultats complexes et les traduire en informations concrètes. Ils choisissent parmi les différents scénarios celui qui apparaît comme le plus probable et le déclinent en « produits de prévision » adaptés aux utilisateurs, à savoir des cartes et des bulletins de prévision. Les prévisionnistes caractérisent aussi les risques de phénomènes dangereux et prennent les décisions relatives à la vigilance. De plus, ils assurent un contact direct avec certaines catégories d'utilisateurs, comme les services en charge de la sécurité civile. [42]

IV.4. LA QUALITE DES PREVISIONS

La qualité des prévisions numériques du temps est variable suivant le paramètre considéré et selon l'échéance. Aux échéances courtes la température est en général prévue avec une erreur ne dépassant pas quelques degrés, et le vent avec une erreur ne dépassant pas quelques mètres par secondes, sauf dans les zones orageuses. Pour les précipitations, notamment orageuses, on n'en est pas à ce niveau de qualité, car des petites erreurs sur les quantités précédentes se traduisent par des erreurs plus importantes sur les précipitations.

Prévoir avec précision la quantité de neige en hiver reste difficile, surtout quand la température est proche de 0°C au sol, et qu'une petite erreur de température peut entraîner une erreur sur la nature des précipitations (pluie ou neige). C'est également le cas du brouillard, qui reste très difficile à prévoir, même quelques heures à l'avance, car sa formation dépend de l'humidité qui est très variable. [40]

IV.5. PREVISION DU BROUILLARD A L'AIDE DES MODELES DE PMN

PM : La prévision météorologique est une application des connaissances en météorologie et des techniques modernes de prises de données et d'informatique pour prévoir l'état de l'atmosphère à un temps ultérieur.

Concepts fondamentaux

L'orientation donnée par les modèles de prévision météorologique numérique (PMN) constitue l'un des outils les plus importants pour la prévision météorologique opérationnelle. Ces modèles sont essentiellement des programmes informatiques qui exécutent des calculs afin de prévoir l'état futur de l'atmosphère en se basant sur une estimation de son état présent.

Plusieurs fois par jour, les données provenant de diverses mesures :

- des mesures au sol aux mesures par satellite, in situ à distance.
- sont recueillies et intégrées pour produire des estimations de l'état réel de l'atmosphère à un moment donné, sous forme d'analyse maillée. Une analyse sert de condition initiale (données d'entrée) pour le modèle PMN. À l'aide de méthodes numériques de résolution des équations décrivant les mouvements de l'atmosphère, les modèles prévoient l'état futur de chaque grandeur atmosphérique par petits pas de temps finis (minutes à dizaines de minutes), de façon répétitive, jusqu'à l'obtention de la solution à l'heure finale de la prévision. [43]

Les étapes d'une prévision météorologique :

❖ Acquisition des données.

Les données sont acquises par un ensemble de systèmes qui donnent la pression, la température, l'humidité, la direction et vitesse du vent, les précipitations, les conditions nuageuses, etc., à la surface et en altitude. Ces systèmes ont chacun leur fréquence de prise de donnée.

- Les observations horaires, spéciales et aux six heures :
 - ✓ Les stations météorologiques de surface, comme les observations d'aéroports (humaine ou automatique) sous forme de METAR.
 - ✓ Les stations automatiques hors aéroports.
 - ✓ Les bouées fixes ou dérivantes et les rapports de navires.
- Les observations aux 12 heures :
 - ✓ Les stations de lâcher de ballon-sonde qui donnent des observations sur la structure verticale de l'atmosphère.
 - ✓ Les données de stations de surface climatologiques.
 - ✓ Les données de télédétection : Les radars météorologiques ; Les satellites météorologiques.
- ❖ Analyse du prévisionniste (météorologue qui prévoit opérationnellement par contraste avec celui qui est en recherche):
 - Analyse des données.
 - Application de techniques expérimentales pour estimer le déplacement et le comportement des systèmes indépendamment des modèles numériques.

EXPLICATION : Il analyse l'ensemble des données de surface et d'altitude à partir de cartes météorologiques tracées par ordinateur sur une station de travail, comme SYNERGIE de Météo-France et AWIPS du Station de travail AWIPS où sont affichés différents champs météorologiques National Weather Service, ou manuellement pour se faire une idée de la circulation atmosphérique actuelle, de la trajectoire passée des systèmes et de leur état de développement. Grâce à des techniques héritées de l'école norvégienne de météorologie, il analyse les fronts, les creux de surface et d'altitude, les advections du mouvement vertical, etc. pour déterminer la trajectoire future de ces systèmes.

Ces techniques ont fait leur preuve, pour des périodes allant jusqu'à 48 heures et même plus pour certaines d'entre elles. Il obtient ainsi une idée qualitative de ce qui va se passer.

❖ Prévision numérique (Modèle). [44]

IV.6. LES PRINCIPAUX MODELES UTILISES A L'ONM

ALADIN

Le modèle numérique ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) est un modèle bi-spectral à aire limitée. C'est en fait la version à aire limitée du modèle global ARPEGE. Historiquement, il a été développé depuis le début des années 90 au sein d'un large consortium regroupant de nombreux centres météorologiques en Europe et en Afrique du nord. [45]

La version opérationnelle ALADIN-Algérie couvre toute l'Algérie. Elle a une résolution horizontale de 8 km x 8 km et une résolution verticale de 70 niveaux. Le premier niveau est situé à 17 mètres et le dernier niveau à 65 kilomètres.

ALADIN-Algérie est utilisé en opérationnel à l'ONM depuis novembre 2006.

Depuis Janvier 2014 ce modèle tourne sur la machine IBM de l'ONM.

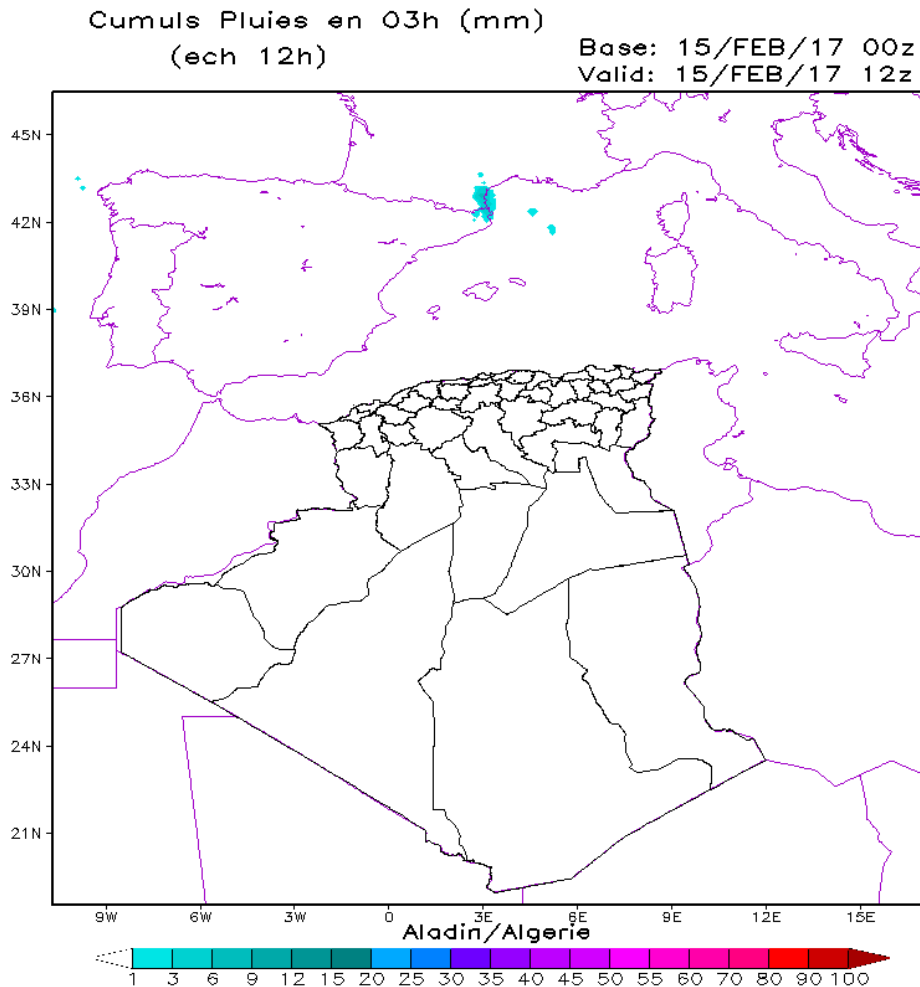


Fig. IV.3 : Domaine Aladin

ALADIN_DUST

ALADIN_DUST est une version d'ALADIN qui permet la prévision du cycle atmosphérique des poussières désertiques. ALADIN_DUST est un couplage entre le modèle atmosphérique ALADIN et le schéma de surface SURFEX (SURFace EXternalisée). Cette version est le fruit de coopération entre l'Office National de Météorologie et Météo France. Depuis l'acquisition de l'ONM d'un supercalculateur, cette version est devenue opérationnelle à l'ONM.

La version ALADIN_DUST couvre toute l'Algérie. Elle a une résolution horizontale de 14 km x 14 km et une résolution verticale de 70 niveaux. Le premier niveau est situé à 17 mètres et le dernier niveau à 65 kilomètres.

ALADIN_DUST permet la prévision des concentrations de poussière désertique, les visibilités 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.

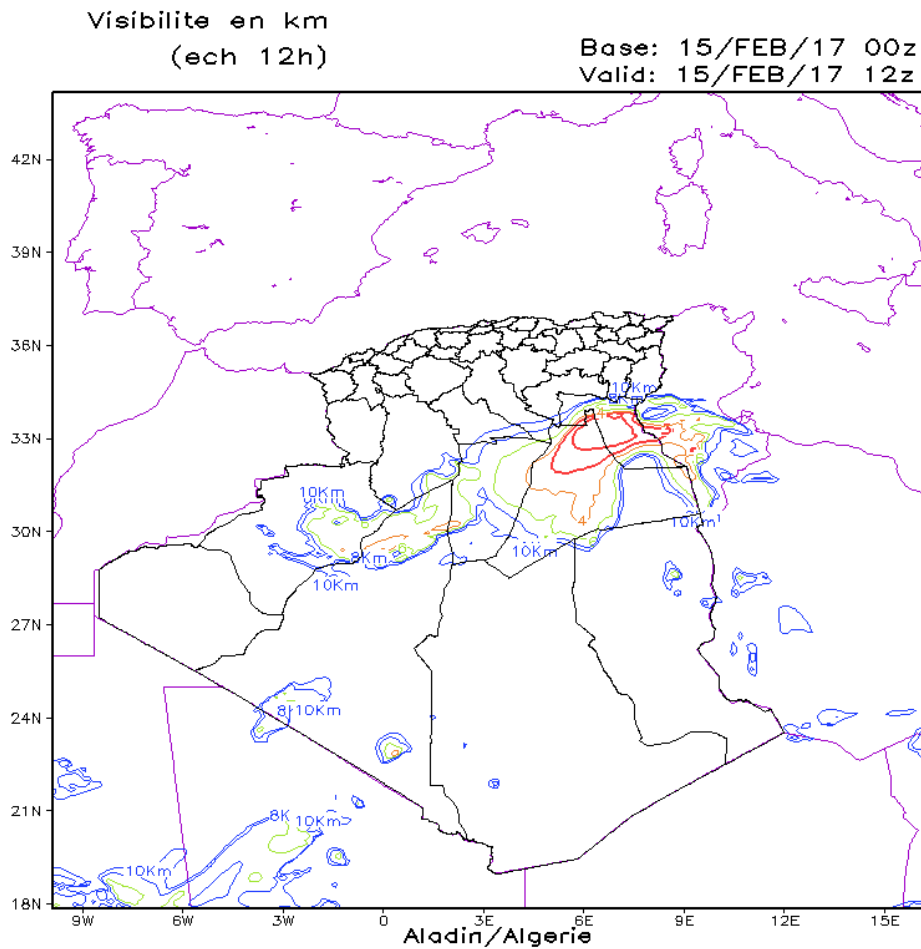


Fig. IV.4 : Domaine Aladin_dust

AROME

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.

AROME a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux tels que les fortes pluies, les orages violents, le brouillard...). [46]

La version AROME couvre la partie nord de l'Algérie. Elle a une résolution horizontale de 3 km x 3 km et une résolution verticale de 41 niveaux. Le premier niveau est situé à 17 mètres et le dernier niveau à 45 kilomètres.

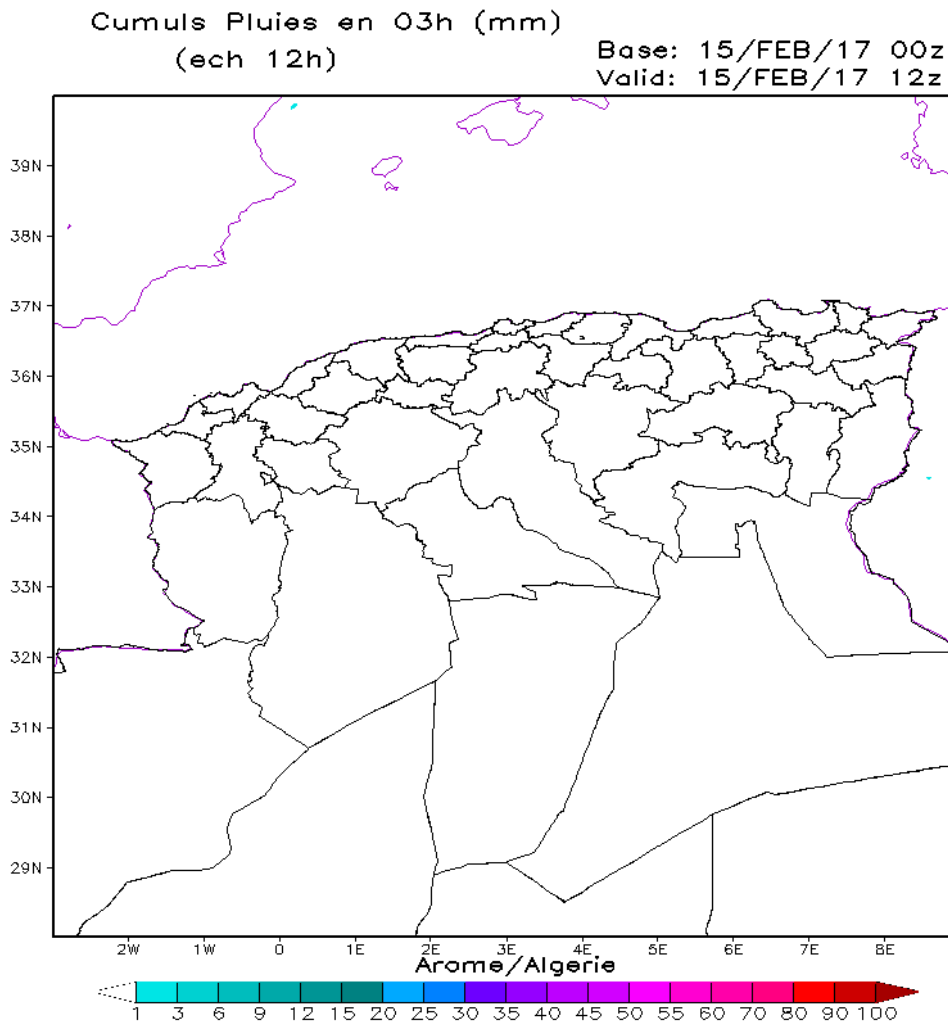


Fig. IV.5 : Domaine AROME

IV.7 CONTEXTE ET OBJECTIFS DU TRAVAIL

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de validation d'une étude sur la tendance du modèle AROME à prévoir ce phénomène qui a été réalisée par une coopération entre l'ONM et IAB (Zekhmi, 2015). Cette étude est basée sur une relation empirique permettant de convertir la concentration des hydrométéores en visibilité. Les résultats obtenus ont été validés sur les trois aéroports suivants : Alger, Oran et Constantine. Depuis 2015, cette méthode a été adoptée à l'ONM pour la chaîne de production opérationnelle.

Afin d'améliorer cette méthode et prendre en compte d'autres phénomènes qui rentrent en jeu dans la formation ou la dissipation du brouillard ce mémoire est proposé

L'objectif de ce travail est :

- Améliorer la prévision du brouillard sur les aéroports situés au nord de l'Algérie.

- Généraliser l'étude effectuée par Melle Zekhmi dans le cadre de son PFE à d'autres aérodrômes.
- Valider et calculer les scores.

IV.8 LA PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Dans notre travail nous allons généraliser l'étude sur tout le nord de l'Algérie qui est souvent couverte par le phénomène du brouillard en travaillant, pour la validation, avec les données d'observation sur les différentes stations à l'intérieur de la couverture du modèle AROME en plusieurs échéances pendant la journée sur toute une période hivernale.

Les stations synoptiques utilisées pour le contrôle des résultats sont apparues ci-après :

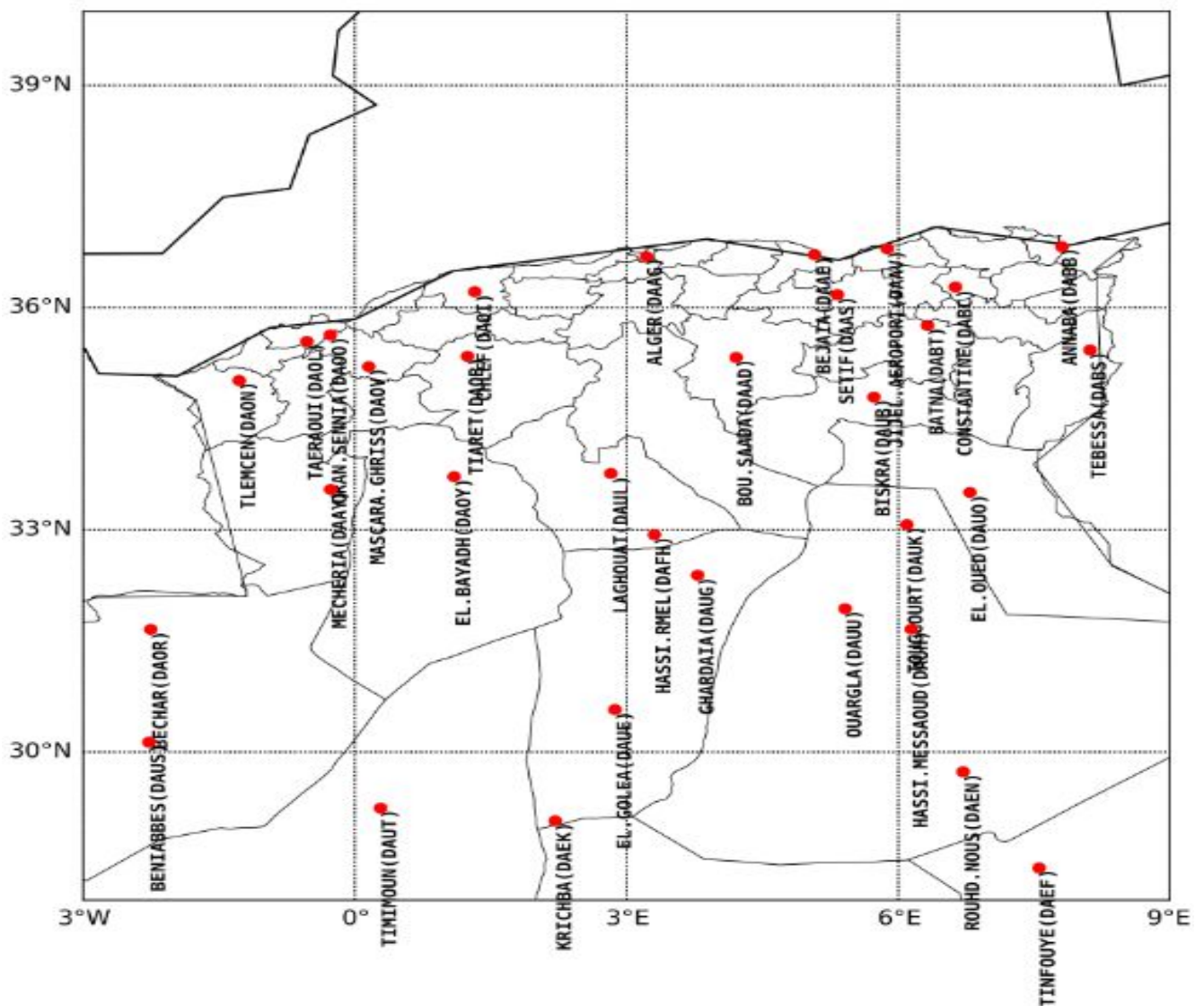


Fig. IV.6 Stations météo professionnelles à l'intérieur du domaine AROME

IV.9 LES DONNEES DE L'ETUDE

IV.9.1. Les données des visibilitées observées

Nous avons utilisés des valeurs de visibilité observées pendant la période hivernale 2016 à 2020 à partir des messages METARs (METeorological Airport Report) extraits d'un service d'information météorologique fourni par OGIMET. OGIMET utilise des données disponibles gratuitement sur le net, principalement de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), et il utilise un logiciel ouvert pour les traiter. Le but de ce site est de fournir des données sur les conditions météorologiques actuelles de manière rapide et professionnelle.

Ces valeurs observées sont rédigés chaque demi-heure et parfois toutes les heures.

IV.9.2 Les relations empiriques utilisées pour l'étude

Gultepe et al. (2006) ont appliqué des différentes méthodes pour la paramétrisation de la visibilité sur des modèles méso-échelle non hydrostatique avec un plan microphysique détaillé pour montrer la différence dans le calcul de la visibilité en utilisant les anciennes et les nouvelles équations. Et d'après le mémoire déjà présenté par (Zekhmi, 2015), les relations empiriques que nous allons utiliser pour valider l'étude sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : paramétrisation utilisé pour calculer la visibilité

Le paramètre utilisé dans l'équation de paramétrisation.	L'équation de la paramétrisation.
En fonction du contenu en eau liquide (LWC)	$\mathbf{Vis_1 = 0.027 LWC^{0.88}}$
	$\mathbf{Vis_2 = 0.219 LWC^{-0.9603}}$
En fonction de LWC et la concentration numérique des gouttelettes (N_d)	$\mathbf{Vis_3 = \frac{-1.002}{(LWC * N_d)^{0.6473}}}$
Vis ₄ est une nouvelle relation	$\mathbf{Vis_4 = \frac{0.8771}{(LWC * N_d)^{0.49034}}}$
En fonction de l'humidité relative (HR)	$\mathbf{Vis_5 = -41.5 \ln (HR) + 192.3}$



IV.10 METHODOLOGIE

Le principe de la méthode d'évaluation de la qualité de la prévision est le suivant ; on a les observations provenant de toutes les sources d'information disponibles (stations météorologiques et le site instrumenté d'observation du brouillard), et en utilisant les paramètres de prévisions journalières d'occurrence de brouillards denses sur la région Nord en les mettant en calcul dans nos relations. La comparaison statistique de ces deux valeurs doit alors permettre d'évaluer de manière quantitative la qualité de la prévision.

IV.11 TRAITEMENT DES OBSERVATIONS

IV.11.1 Présentation de l'échantillon

L'échantillon complet représente 360 jours répartis sur :

- hiver 2016-2017 : décembre 2016, janvier 2017, février 2017 (90 jours),
- hiver 2017-2018 : décembre 2017, janvier 2018, février 2018 (90 jours),
- hiver 2018-2019 : décembre 2018, janvier 2019, février 2019 (90 jours).
- hiver 2019-2020 : décembre 2019, janvier 2020, février 2020 (90 jours).

En premier lieu, nous avons traité les observations provenant des messages METAR sur la région Nord de l'Algérie pour toute la période hivernale de l'année 2016 jusqu'à 2020. Nous avons, ensuite, extrait les situations concernées par le phénomène de brouillard. Puis nous avons analysé ces observations pour faire sortir les aéroports les plus touchés et les classer par régions (Nord-Est), (Nord-Ouest), afin de déduire la période la plus fréquente.



IV.11.2 analyse des observations METAR

Tableau IV.2 : analyse des METAR

Région	NORD_EST																NORD_WEST								
Station	D A A G	D A A D	D A A E	D A A S	D A A V	D A B B	D A B C	D A B S	D A B T	D A F H	D A O B	D A O I	D A O V	D A O Y	D A U H	D A U L	D A U C	D A U T	D A U U	D A A Y	D A A L	D A O N	D A O O	t o t a l	
Durée /P1 JRS	21	1	1	3	0	7	6	5	10	4	9	10	8	12	1	2	1	0	1	1	0	1	2	1	154
Durée /P2 JRS	17	0	0	5	1	11	5	2	1	0	7	2	3	7	0	0	1	1	0	4	7	3	1	1	88
Durée /P3 JRS	18	2	0	2	0	6	8	4	10	0	6	5	5	6	0	0	0	0	0	3	1	1	6	2	112
Durée /P4 JRS	11	2	0	3	0	3	8	4	4	0	2	4	6	10	1	2	0	0	0	3	1	1	4	2	120
Nbr de jrs totale	67	5	1	13	1	27	27	15	25	4	4	21	22	35	2	4	2	1	1	2	4	3	8	1	/

Les aérodrômes touchés par les brouillards choisis pour cette étude sont regroupés dans le tableau suivant :

P1 (période 1) :12-2016/01-2017/02-2017.

P2 :12-2017/01-2018/02-2018.

P3 :12-2018/01-2019/02-2019.

P4 :12-2019/01-2020/02-2020.

Ces aéroports sont présentés sur cette carte dans le carré rouge

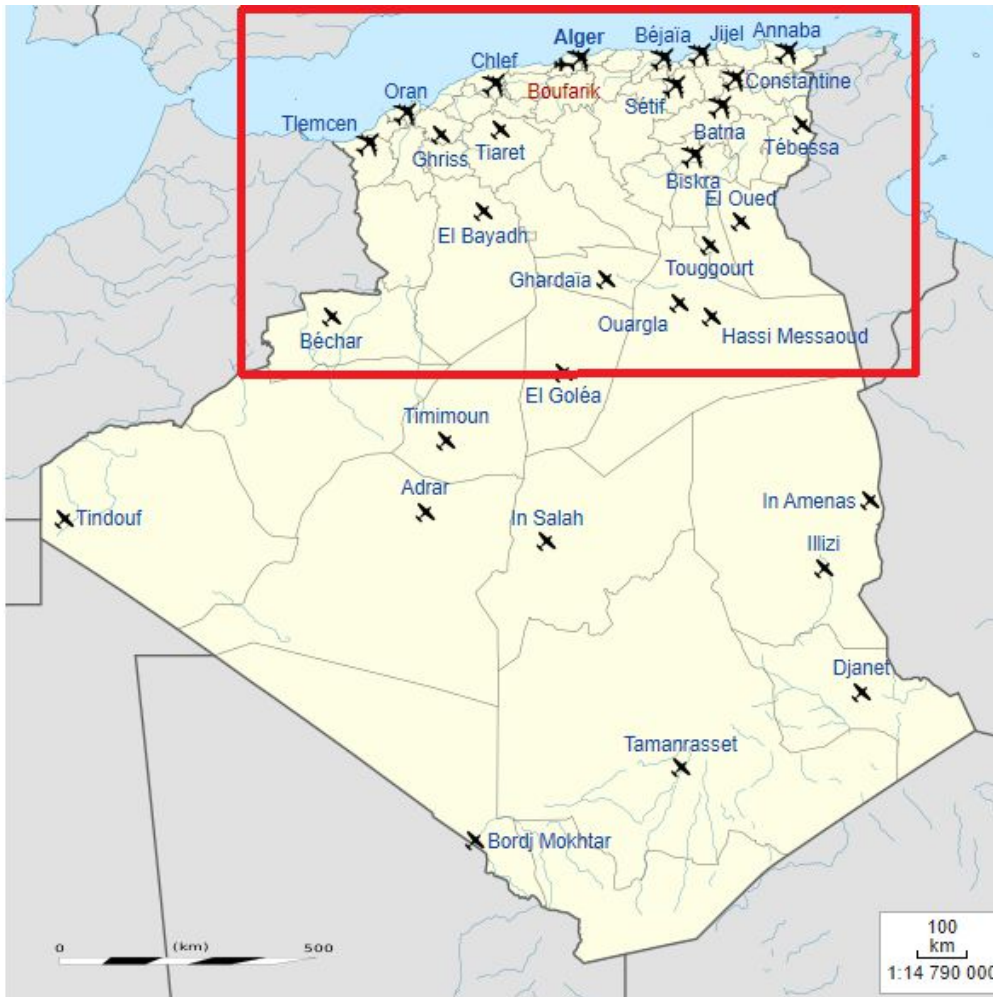


Fig. IV.7. Carte statique des aéroports d'Algérie.

Résultats :

D'après le tableau 1 :

- La période où le brouillard est plus fréquent avec 154 jours est **la période typique 1** que nous allons utiliser dans la partie suivante
- les aéroports les plus touchés par le brouillard sont :

Tableau IV.3 : résultat d'analyse.

Région	NORD-WEST			NORD-EST		
Aérodrome	DAOO ORAN	DAOL TAFRAOUI	DAAY Mecheria	DAAG ALGER	DAOY EL.BAYADH	DABT Batna DAOI Chelf



Durée	21 Jrs	12 Jrs	10 Jrs	21 Jrs	12 Jrs	10 Jrs
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Le tableau IV.3 représente les aéroports les plus touchés par le phénomène de brouillard sur la région nord avec la durée de persistance de ce dernier pendant la période hivernale P1

Un histogramme explicatif :

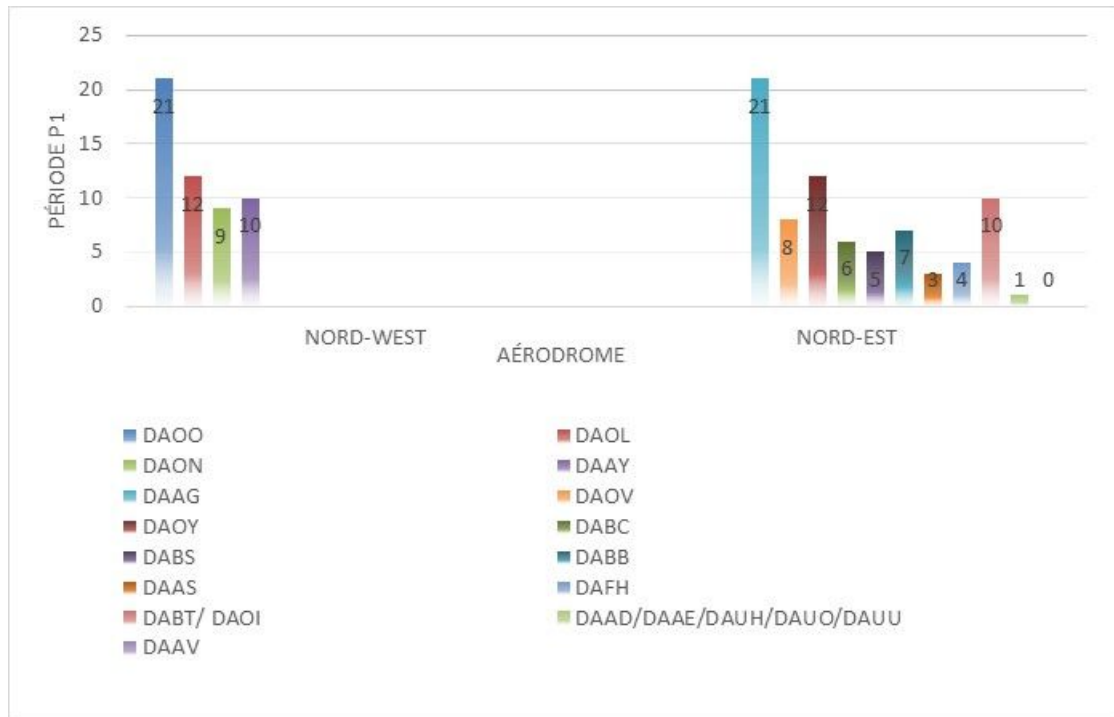


Fig. IV.8 : représente le Graphique des Aéroports touché par le brouillard en fonction de la période la plus fréquente.

Cet histogramme illustre les différents aéroports présentés par l'indicateur d'emplacement OACI du Nord-Est et Nord-Ouest par nombre de jours couverts par le brouillard en fonction de la période typique P1 déjà choisie.

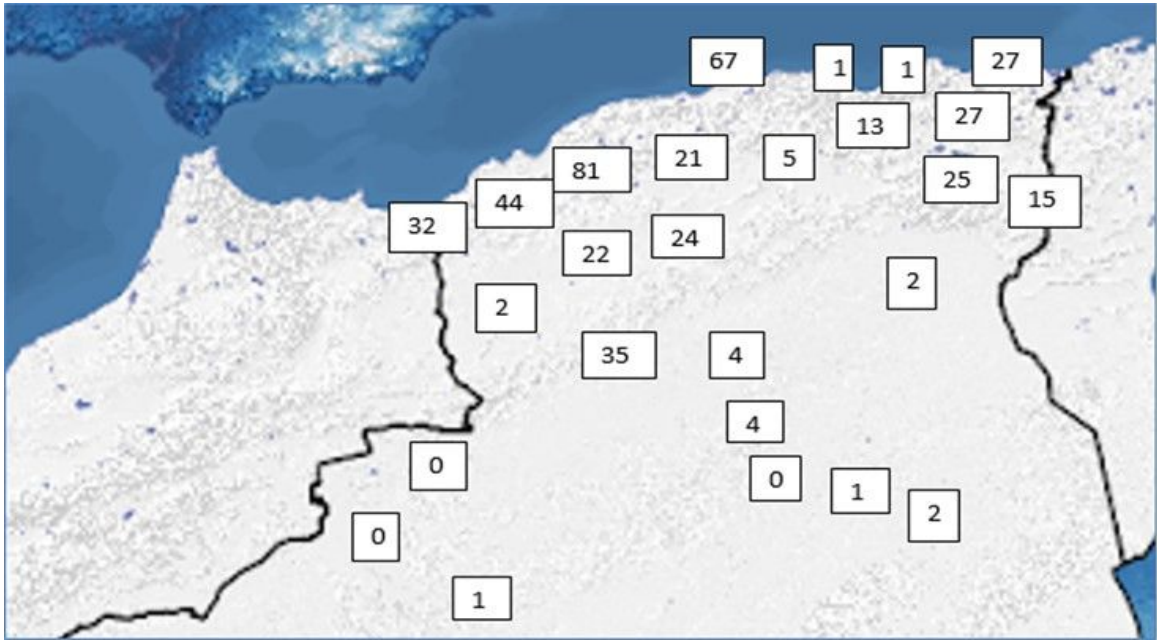


Fig. IV.9 : Carte des stations touchées par le brouillard en trois hivers successifs.

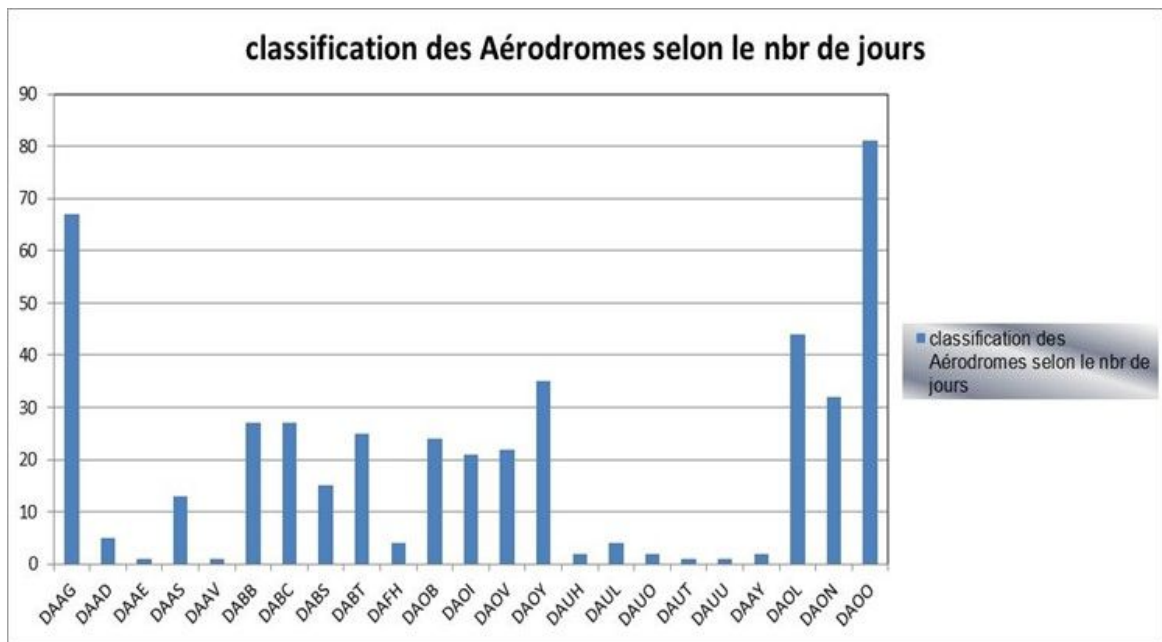


Fig. IV.10 : graphe illustre les cas de brouillard totaux par station.

IV.12 ANALYSE STATISTIQUE GLOBALE DES DONNEES

Le but de cette étude globale est de tester la performance du système de prévision proposé, et d'estimer la qualité de la prévision des brouillards denses, c'est-à-dire d'évaluer le degré de corrélation qui existe entre la prévision, que nous appellerons caractère «FCST», et l'observation de ces derniers, que nous appellerons caractère «OBS». Nous avons effectué l'étude statique présentée dans ce chapitre.

Ces deux caractères n'étant pas traduisibles en nombres, nous avons choisi pour présenter les données un outil bien adapté qui consiste en l'élaboration de tables de contingence. Le calcul du score, destiné à chiffrer l'intensité de la liaison qui existe entre les deux caractères «Prévi» ou «FCST» et «Obs».

Description de la méthode de vérification

La méthode la plus courante utilisée pour vérifier la qualité de la prévision des brouillards par rapport aux observations est la table de contingence. Un système de prévision parfait ne produirait que des occurrences et corrigerait les négatifs, et éviterait les ratés ou les fausses alarmes.

Cette table se présente sous forme de table (2x2) ou (3x3) selon que nous partagerons les caractères «FCST» et «Obs» en deux ou trois sous-classes respectivement.

Tableau IV.4 : Tableau de contingence de Finley (1884)

OBS	OBS.YES	OBS.NO
FCST		
FCST.YES	17588 (a)	3329 (b)
FCST.NO	1438 (c)	726 (d)
Total	23081(n)	

Dans cette table, il y a une ligne pour chaque catégorie observée et une colonne pour chaque catégorie prévue. Une prévision "hit (a)" signifie que le modèle prévoit une situation de brouillard et qu'il est présent ; une prévision "false alarm (b)" signifie que le modèle a prévu une situation de brouillard et qu'il n'est pas présent ; une prévision "missed (c)" signifie que le modèle a prévu une journée sans brouillard mais qu'il était présent. A partir de cette table on peut élaborer des scores de réussite de la prévision en termes d'indicateurs.



Les formulations des indicateurs utilisés dans cette étude sont présentées ci-dessous :

-Précision, proportion correcte (Accuracy) :

$$Pc = \frac{a+d}{n} \quad Pc = 0.793466487587193 \text{ (79\%)}$$

-Score de biais (frequency bias)

Mesure le taux de la fréquence des événements prévus par rapport aux événements observés. Il indique si le système de prévision a tendance à sous-estimer ($B < 1$) ou surestimer ($B > 1$) la prévision du brouillard. Ce score varie de 0 à l'infini et le score parfait est 1. Elle est calculée comme suit :

$$B = \frac{a+b}{a+c} \quad B = 0.010993903079995795$$

-La probabilité de détection (probability of detection, hit rate) :

Mesure la fraction des événements observés effectivement prévus. La fourchette de ce score est de 0 à 1 et le score parfait est 1.

$$H = \frac{a}{a+c} \quad H = 0.9244192158099442$$

-Taux de fausse alarme (probabilité de fausse détection) :

La probabilité de fausse détection donne quant à elle la proportion de prévisions inexactes de l'événement sur le nombre de fois où l'événement ne s'est pas produit. Remarquez que cette mesure diffère du taux de fausses alarmes, que l'on mesure par la proportion de prévisions inexactes d'un événement sur son nombre de prévisions.

$$F = \frac{b}{b+d} \quad F = 0.8209617755856968$$

-Proportion de fausse alarme :

Mesure la fraction des événements prévus qui n'ont pas été observés. Ce score prend des valeurs de 0 à 1. Une prévision parfaite a un score FAR qui est nul.

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad FAR = 0.1591528421857819$$

-Indice de menace (threat score, critical success index):

$$TS = \frac{a}{a+b+c} \quad TS = 0.7867591142921046$$

L'indice de menace TS est peut-être moins transparent que les autres indices. Afin de saisir son utilité, il faut revenir à la remarque suivante : il est facile d'obtenir une importante proportion de prévisions exactes lorsqu'il s'agit d'événements rares, puisque la plupart des prévisions négatives s'avéreront correctes. C'est-à-dire, d est un grand nombre, mais qui n'est pas tellement indicatif de l'aptitude ou de l'utilité d'une prévision.



Avec: $n = a + b + c + d$

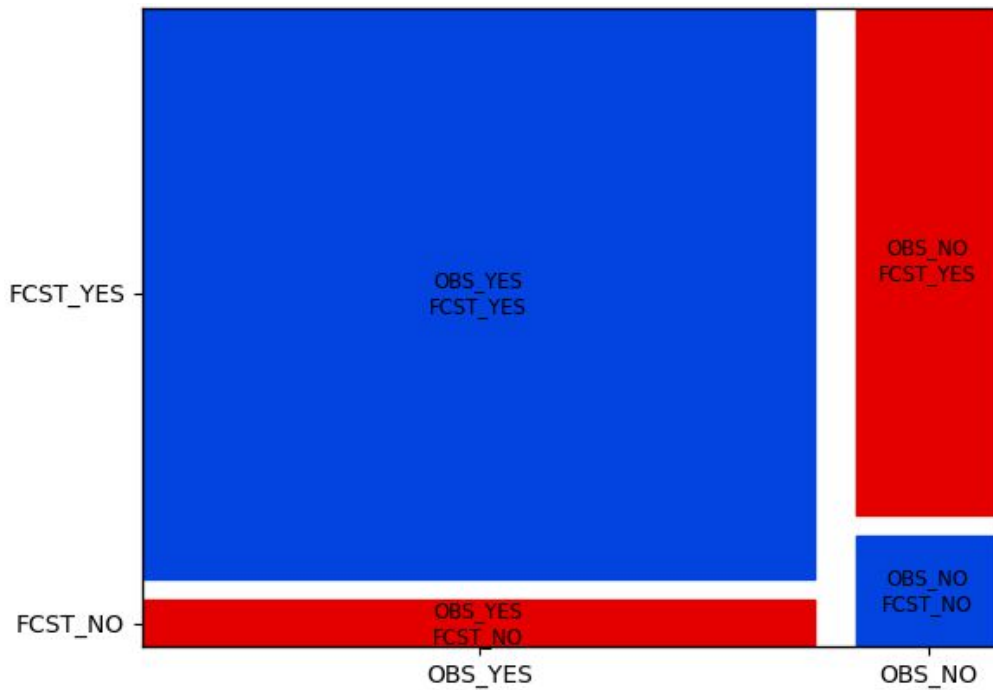


Fig. IV.11 : Diagramme en mosaïque de la table de contingence

Ce diagramme illustre les résultats de la table de contingence ci-dessus, en bleu les cas de bonnes prévisions (brouillard et non brouillard), et en rouge représente le cas des fausses alertes et les non détections (ratés).

IV.12.1 Analyse de la table de contingence

Pour les trois hivers, on compte 17588 cas de brouillards bien prévus pour 1438 non détections (brouillard observé et non prévu) et 3329 fausses alertes (brouillard non observé et prévu). Ceci conduit à une proportion de 79% de bonnes prévisions (brouillard et non brouillard). On peut aussi remarquer que 76% des brouillards observés sont bien prévus et que 20% des prévisions de brouillards conduisent à l'observation du brouillard.

Il est intéressant de regarder l'asymétrie de la répartition des erreurs entre les fausses alertes et les non détections.

-Exemple d'un cas où le modèle a marqué une asymétrie :

Date	Ech	Station	visAROM	visMETAR
12012017	06	DAOV (Mascara)	2694	0100
18022017	09	DABT (Batna)	2108	0050

16022017	21	DAAG (Alger)	205	1500
19022018	06	DAOO (Oran)	1373	0050
25012018	09	DAOO	291	1500
19122017	18	DAOY (El Bayadh)	99	1500
21012019	03	DAOY	221	1500

-Exemple de déchiffrement d'une série de données :

Le 16/02/2017 | à 21:00H | la station d'Alger | la visibilité du modèle AROME dans une zone de périmètre 3km (calculer à partir du liquide water) = 205 mètre | la visibilité observé dans le METAR = 1500 mètre

À 21 T U, les couches stables au voisinage du sol. L'inversion thermique au voisinage du sol favorise la formation, l'air plus chaud se trouvant au-dessus de l'air froid. La couche limite atmosphérique est donc dans un état thermiquement stable conduisant à une turbulence relativement peu développée, ce qui facilite l'apparition du brouillard.

Ces simulations ont confirmé que les processus physiques impliqués dans le cycle de vie du brouillard peuvent être différents selon la nature géographique de la surface. Elles ont aussi mis en évidence que la prévision numérique du brouillard en zone côtière est sensible à la température de la surface de la mer, à la topographie locale, et à l'occupation du sol. De plus, la prévision du brouillard côtier dépend fortement de la capacité du modèle à reproduire correctement la circulation de brise au cours de l'après-midi et les processus radiatifs en début de nuit. Les simulations systématiques des cas de brouillard ont montré la capacité du modèle Méso- NH à reproduire l'occurrence du brouillard avec néanmoins un taux relativement élevé de fausses alarmes, en particulier à la station côtière.



IV.12.2 Résultats

L'analyse de ces tables de contingence met donc en évidence un biais pour la prévision d'occurrence du brouillard. Le modèle numérique permet une augmentation significative du nombre de brouillards bien prévus.

Ce travail alors a permis de valider la qualité du modèle AROME pour représenter la formation et l'évolution d'une couche de brouillard, la simulation des cas réels a par ailleurs montré que les erreurs de simulation étaient principalement imputables aux erreurs sur les paramètres d'initialisation.

CONCLUSION

Etant donné que le modèle AROME a un biais sur le LWC prévu, les formulations existantes reliant la visibilité au contenu en eau liquide ne sont pas adaptées au comportement d'AROME. Les paramétrisations réalisées à partir du LWC prévu par le modèle AROME et les visibilités observées améliorent nettement la visibilité calculée, principalement lorsque le LWC est élevé.



CONCLUSION GENERALE

De nos jours, le brouillard continue à perturber fortement la vie socio-économique, en particulier au niveau des transports routiers et aériens. Le thème du brouillard répond à un besoin fort en prévision météorologique. La prédiction du plafond nuageux et de la visibilité à la surface est un formidable défi pour les services de prévisions météorologiques et par conséquent les services aéronautiques.

Notre étude est effectuée en vue de l'amélioration de la qualité de la prévision du brouillard avec le model AROME sur la région du nord d'Algérie.

Ce mémoire comprend les connaissances et les notions de base météorologique, la visibilité et les instruments employés pour la mesurer. Une étude climatologique qui a pour objectif d'identifier les principales caractéristiques locale et synoptique basée sur la notion d'événement de brouillard, la caractérisation des conditions de formation, de maturité ainsi que de dissipation du brouillard et les méthodes utilisées pour détecter ce phénomène. Ensuite une étude statistique sur l'impact de brouillard sur l'aviation inclut les procédures et les solutions envisagées face aux brouillards. Et enfin une prévisibilité du brouillard avec le modèle AROME sur le nord de l'Algérie pendant trois périodes hivernales successifs. L'étude de cas basée sur une relation empirique adéquat selon les résultats de travail précédent permettant de convertir la concentration des hydrométéores en visibilité, en prenant en compte d'autres phénomènes qui rentrent en jeu dans la formation ou la dissipation du brouillard. Il a été clairement identifié que cette relation permet d'améliorer nettement la visibilité calculée à l'aide des variables pronostiques du modèle AROME, nos résultats montrent que le modèle AROME a pu prévoir l'occurrence de brouillard et détecter les zones de faibles visibilités aux alentours des régions étudiées.

Cette étude est l'une des études qui se sont intéressées à la prévision du brouillard par les modèles opérationnels et constitue un premier pas vers un chemin d'investigations multidisciplinaires qui intéresse la direction de la météorologie nationale et l'ONM.



LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LAURENT, ÉCONOMIDES. ROBIN, MASSET., 2015. Activité : Cartographie de Situations De Brouillard Dans l'Est De La France. Météo à l'école, 7p.
- [2] AYMERIC, SPIGA. Introduction Aux Sciences De L'atmosphère. Institut Pierre-Simon Laplace. Université Pierre Et Marie Curie. Niveau Licence, Cours, 2013_2014, 93p.
- [3] Météorologie du BIA. 125_202p.
- [4] Météo France : Tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France. Glossaire-visibilité. [En ligne]. Disponible sur : < <http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/154673-visibilite>> Page Consultée Le 03/07/2020.
- [5] Wikipédia : visibilité. (05/ 2020), Disponible sur : <<https://fr.wikipedia.org/wiki/Visibilité>> Page Consultée Le 27/06/2020.
- [6] SANAE, AKRARI. visibilité et nuages bas centre d'excellence en télédétection de Casablanca.13 novembre 2013.87p.
- [7] Wikipédia : Transmissiomètre. [En ligne]. (Modifié le 09/01/ 2020), Disponible sur :<<https://fr.wikipedia.org/wiki/Transmissiom%C3%A8tre>> page consultée le 15/07/2020.
- [8] Wikipédia : Diffusomètre. [En ligne]. (Modifié le 25/03/ 2020), Disponible sur :<<https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusom%C3%A8tre>> Page Consultée Le 15/07/2020.
- [9] Wikipédia : Céloètre. [En ligne]. (Modifié le 30/04/ 2018), Disponible sur :<<https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lom%C3%A8tre>> Page Consultée Le 15/07/2020.
- [10] organisation de l'aviation civile internationale, Assistances météorologiques à la navigation aérienne : annexe 3. Seizième édition Juillet 2007.
- [11] Météo France : Tout Savoir Sur La Météo, Le Climat Et Météo-France. [En Ligne]. (Modifié Le 04/10/2017), Disponible Sur : <<http://www.meteofrance.fr/actualites/53120635-le-brouillard-est-il-un-nuage>> Page Consultée Le 29/07/2020.
- [12] Meteolafleche : Le Brouillard. [En Ligne].Disponible Sur : <[http://www. Meteolafleche .com/brouillard.html](http://www.Meteolafleche.com/brouillard.html)> Page Consultée Le 17/07/2020.
- [13] SANAE, AKRARI. Visibilité Et Nuages Bas Centre D'excellence En Télédétection De Casablanca.13 Novembre 2013.87p.
- [14] Météo France : Tout Savoir Sur La Météo, Le Climat Et Météo-France. [En Ligne]. (Modifié Le 04/10/2017), Disponible Sur : <<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/le-brouillard#>> Page Consultée Le 03/08/2020.

- [15] Météo blue, Brouillard. [En ligne]. Disponible Sur :<<https://content.meteblue.com/fr/metescool/le-temps/nuage/brouillard>> Page Consultée Le 07/08/2020.
- [16] Météorologie du BIA. [PDF].V2.30P.
- [17] Météo France, Glossaire, Brouillard. [En ligne]. Disponible Sur :<<http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/149663-brouillard-givrant>> Page Consultée Le 05/08/2020.
- [18] MARIE, MAZOYER. Impact Du Processus D'activation Sur Les Propriétés Microphysiques Des Brouillards Et Sur Leur Cycle De Vie. Thèse De Doctorat : Océan, Atmosphère Et Surfaces Continentales. Université De Toulouse. Institut National Polytechnique De Toulouse (INP Toulouse).01/04/2016.271p.
- [19] Wikipédia : Brouillard. [En Ligne]. (Modifié Le 16 Juillet 2020 à 00:10.), Disponible Sur :< <https://fr.wikipedia.org/wiki/brouillard> > Page Consultée Le 07/08/2020.
- [20] LEROY, MICHEL. Observations Météo Au Sol : Que Mesure-T-On Et Qu'en Fait-On?.In : Encyclopédie De L'environnement. 13-10-2018. Disponible Sur :<https://www.encyclopedie-environnement.org/air/observations-meteo-au-sol/#1_en_quoi_consistent_les_reseaux_dobservation_au_sol> Page Consultée Le 06/08/2020.
- [21] H. TREUSSART, Président - C. A. KETTERING - M. SANUKI - S. P. VENKITESHWARAN - Mlle A. MAN.OMM Note Technique N° 52, Secrétariat De l'Organisation Météorologique Mondiale • Genève • Suisse 1963, P1. [Pdf]. [En Ligne].Disponible Sur : <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=1960&fbclid> Page Consultée Le 09/08/2020.
- [22] Wikipédia : Station Météorologique Automatique. [En Ligne]. (Modifié Le 12 Juin 2019), Disponible Sur :<https://fr.wikipedia.org/wiki/station_m%C3%A9t%C3%A9orologique_automatique> Page Consultée Le 09/08/2020.
- [23] Jetex. FBO Networks, Ground Handling, Flight Support, Jet Fuel. Weather Conditions Affecting Aviation- Fog. [En Ligne].Disponible Sur:<<https://www.jetex.com/weather-conditions-and-aviation-fog/#:~:text=fog%20forms%20when%20the%20dew,which%20do%20not%20fall%20earthward.>> Page Consultée Le 09/08/2020.
- [24] Wikipédia : Prévision Numérique Du Temps. [En Ligne]. (Modifié Le 26 Novembre 2019), Disponible Sur :<https://fr.wikipedia.org/wiki/pr%C3%A9vision_num%C3%A9rique_du_temps> Page Consultée Le 13/08/2020.

[25] Wikipédia : Préviation Numérique Du Temps-Numerical Weather Prediction. [En Ligne]. Disponible Sur : <https://fr.qwe.wiki/wiki/numerical_weather_prediction> Page Consultée Le 13/08/2020.

[26] DERIOUCH, MOULOU. Opérations Aériennes. ETOPS. Blida. Université Saad Dahleb. Master1. Cours. 31p.

[27] République Du Congo, Agence National De L'aviation Civil. Guide Relatif Aux Règles De Conception Et D'établissement Des Minima Opérationnels D'aérodrome. Réf : G-DSA-7220-ANS-PANS-OPS. septembre 2017. 20p. [En ligne]. Disponible sur : <<http://www.anacongo.org/wp-content/uploads/2019/01/guide-sur-les-minimas-operationnels>> Page Consultée Le 19/09 /2020.

[28] OACI. exploitation technique d'aéronefs. partie 1. aviation de transport commercial international-avions onzième Edition, juillet 2018. 302p.

[29] Actualités Météo, Crash Aérien : Comment La Météo Peut Faire Tomber Un Avion ?. [En Ligne]. (Modifié Le 27/03/15 à 06h24), Disponible Sur <<https://actualite.lachainemeteo.com/actualite-meteo/2015-03-27/crash-aerien-comment-la-meteo-peut-faire-tomber-un-avion-27708>> Page Consultée Le 28/07/2020.

[30] Weather Conditions Affecting Aviation- Fog. [En Ligne]. (Modifié Le 07/09/2017), Disponible Sur <<https://www.jetex.com/Weather-Conditions-And-Aviation-Fog>> Page Consultée Le 27/07/2020.

[31] Studylib. Sciences De L'environnement-Climat. Garry, Toth, Ismail, Gultepe. Et Al. Environnement Canada – Manuel Sur Le Brouillard ET La Préviation Du Brouillard. [En Ligne]. Disponible Sur : <<https://studylibfr.com/doc/665638/Environnement-Canada-%E2%80%93-Manuel-Sur-Le-Brouillard-Et-La-Pr%C3%A9viation-Du-Brouillard>> Page Consultée Le 13/08/2020.

[32] Dangers Météorologiques Pour L'aviation - Nav Canada. [En Ligne]. Disponible Sur: <<https://www.navcanada.ca/fr/media/publications/local%20area%20weather%20manuals/lawm-atlantic-2-fr.pdf>> Page Consultée Le 08/08/2020.

[33] Vidéo Aéronautique : Ce Brouillard Qui Ralentit Le Trafic Aérien. [En Ligne]. (Modifié Le 07/09/2017), Disponible Sur : <<https://www.aernewstv.com/fr/transport/surete-securite-aerienne/3007-ce-brouillard-qui-ralentit-le-traffic-aerien.html>> Page Consultée Le 27/06/2020.

[34] Wikipédia : Liste D'accidents Aériens. [En Ligne]. (Modifié Le 31 Août 2020 à 13:19), Disponible Sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/liste_d%27accidents_a%C3%A9riens> Page

Consultée Le 28/07/2020.

[35] ADAM TWIDELL. How Does Weather Affect My Private Jet Flight?. [En Ligne]. (Modifié Le 25/07/2018), Disponible Sur : <<https://blog.privatefly.com/how-does-weather-affect-my-private-jet-flight> > Page Consultée Le 28/07/2020.

[36] HADJALLA YASMINE. Homologue des opérations de départ, d'approche et d'arrivée par faible visibilité. Exploitation aérienne. Blida : université Saad Dahleb. Décembre 2016.

[37] Brouillard. [En Ligne]. (Modifié Le 18 Mai 2020 A 12:21), Disponible Sur : <<https://www.skybrary.aero/index.php/fog>> Page Consultée Le 29/07/2020.

[38] Wikipédia : Préviation Numérique Du Temps. [En Ligne]. (Modifié Le 26 Novembre 2019 à 21:30.), Disponible Sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/pr%C3%A9vision_numerique_du_temps> Page Consultée Le 15/08/2020.

[39] DRISS BARI. Etude Du Brouillard En Zone Côtière Par Modélisation Des Processus Physiques De La Couche Limite Atmosphérique : Cas Du Grand Casablanca (Maroc). Pdf. Disponible Sur : <<https://pdfs.semanticscholar.org/ca38/2c3084c6fb09a5135c22dbdafcc73c59db7a.pdf>> Page Consultée Le 12/08/2020.

[40] BOUGEAULT PHILIPPE. Introduction A La Préviation Météorologique.[En Ligne].InEncyclopédie De L'Environnement . Disponible Sur : <<https://www.encyclopedie-environnement.org/air/introduction-a-prevision-meteorologique/>> Page Consultée Le 13/08/2020.

[41] Météocontact. Les Modèles Météorologiques. [En Ligne]. Cours Météo. Disponible Sur : <<https://www.meteocontact.fr/pour-aller-plus-loin/les-modeles-meteo>> Page Consultée Le 15/08/2020.

[42] Météo France : Tout Savoir Sur La Météo, Le Climat Et Météo-France. [En Ligne].]. (Modifié Le 04/10/2017), Disponible Sur : <<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/la-prevision-du-temps/les-etapes-de-prevision>> Page Consultée Le 20/08/2020.

[43] Studylib.Sciences De L'environnement-Climat. Garry, Toth, Ismail, Gultepe.Et Al. Environnement Canada – Manuel Sur Le Brouillard Et La Préviation Du Brouillard.135p. [En Ligne].Disponible Sur : <<https://studylibfr.com/doc/665638/environnement-canada-%E2%80%93-manuel-sur-le-brouillard-et-la-pr%C3%A9vision-du-brouillard-135p>> Page Consultée Le 21/08/2020.

[44] Wikipédia : Préviation Météorologique. [En Ligne]. (Modifié Le 2 Septembre 2020 à 14:00).Disponible Sur : <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/pr%C3%A9vision_m%C3%A9t%C3%A9orologique> Page Consultée Le 19/08/2020.

[45] Centre National De La Recherche Scientifique. Umr3589. Modèles Atmosphériques. Modèles De Prévision Numérique Du Temps. ALADIN. [En Ligne].Disponible Sur : <
<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article122&lang=fr>> Page Consultée Le 22/09/2020.

[46] Centre National De La Recherche Scientifique. Umr3589. Modèles Atmosphériques. Modèles De Prévision Numérique Du Temps. AROME. [En Ligne].Disponible Sur : <
<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article120&lang=fr>> Page Consultée Le 22/09/2020.