

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



Ministère De l'Enseignement Supérieure Et De
La Recherche Scientifique



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA-1-

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

Département de Navigation Aérienne

Mémoire De Fin D'étude

En Vue De L'obtention Du Diplôme Master

En Aéronautique

Spécialité : Opérations Aériennes

Thème

**ETUDE COMPARATIVE DES MODELES DE PREVISION
DU BROUILLARD A L'ISSUE AROME**

Réalisé par :

M^{elle} LASNAMI Roufaida

M^{elle} KARKACHE Narimene

Dirigé par :

Pr. Tahar REZOUG: Promoteur

Mr. Khalid Deiboune :Co-promoteur

Dr.Mohamed MOKHTARI: Encadrant

Blida, juillet 2024

RESUME

La visibilité est un paramètre très important en aviation. Une baisse de visibilité significative due au brouillard peut rendre la circulation aérienne dangereuse ou impossible, d'où son impact sur l'exploitation et l'accessibilité des aéroports. Cela souligne l'importance d'une prévision précise du brouillard. Dans ce mémoire, une étude comparative entre les différentes formules de paramétrisation de la visibilité réduite causée par le brouillard, calculée à partir des sorties AROME, a été réalisée. De plus, une validation de ces prévisions de visibilité par les observations obtenues des METAR de l'Aérodrome d'Alger DAAG a été effectuée. L'objectif global de ce travail est d'améliorer la prévision du brouillard et préparer les entrées des modèles pour une approche de prévision d'ensemble.

Mots-clés : Visibilité, paramétrisation, brouillard, AROME.

ABSTRACT

Visibility is a very important parameter in aviation. A significant reduction in visibility due to fog can make air traffic dangerous or impossible, hence its impact on airport operations and accessibility. This highlights the importance of accurate fog forecasting. In this thesis, a comparative study between the different formulas for the parameterization of reduced visibility caused by fog, calculated from AROME outputs, was performed. In addition, a validation of these visibility forecasts by the observations obtained from the METAR of the Algiers Aerodrome DAAG was carried out. The overall objective of this work is to improve fog prediction and prepare model inputs for an overall forecasting approach.

Keywords: Visibility, parameterization, fog, AROME.

ملخص

الرؤية هي معيار مهم للغاية في الطيران. يمكن أن يؤدي الانخفاض الكبير في الرؤية بسبب الضباب إلى جعل الحركة الجوية خطيرة أو مستحيلة، ومن ثم تأثيرها على عمليات المطار وإمكانية الوصول إليه. هذا يسلط الضوء على أهمية التنبؤ الدقيق بالضباب. وفي هذه الأطروحة، أجريت دراسة مقارنة بين الصيغ المختلفة لتحديد معالم الرؤية المنخفضة الناجمة عن الضباب، محسوبة من مخرجات أروم. بالإضافة إلى ذلك، تم التحقق من صحة تنبؤات الرؤية هذه من خلال الملاحظات التي تم الحصول عليها من METAR لمطار الجزائر العاصمة DAAG. الهدف العام لهذا العمل هو تحسين التنبؤ بالضباب وإعداد مدخلات نموذجية لنهج شامل للتنبؤ.

الكلمات الرئيسية: الرؤية، وضع المعايير، الضباب، أروم.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements les plus sincères vont à toute personne ayant la bonté et la patience de nous aider dans notre travail par leurs précieux conseils et recommandations.

Nous tenons à remercier **Mr REZOUG.T**, directeur du Laboratoire des Sciences Aéronautiques et promoteur de ce travail, pour son soutien inconditionnel tout au long de notre recherche.

Nous adressons nos sincères remerciements à **Mr DEIBOUNE.K**, notre encadrant, pour nous avoir proposé ce thème, pour ses suggestions pertinentes qui nous ont permis d'améliorer la qualité de notre travail, et pour sa disponibilité tout au long de notre période de recherche.

Nous tenons aussi à remercier **Mr MOKHTARI.M**, notre encadrant à l'ONM, pour son aide précieuse.

Nos remerciements s'adressent également à **Mr CHIKHI.W** pour son apport précieux en informations.

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail de recherche.

Nous remercions également chaleureusement l'ensemble des professeurs de l'Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales de Blida pour leur soutien constant, leur partage de connaissances et leur contribution à notre formation.

Nos remerciements s'adressent également à nos familles pour leur présence réconfortante, leurs paroles sages et leur aide précieuse dans les moments difficiles.

Dédicaces

Louange à ALLAH pour tout ce que j'ai réalisé.

Je dédie humblement ce travail modeste :

À moi-même Roufaïda,

En reconnaissance des efforts que j'ai fournis et des sacrifices que j'ai consentis.

À mon très cher père,

Qui a été un pilier de soutien inconditionnel, m'encourageant à chaque étape et me poussant à donner le meilleur de moi-même.

À ma très chère mère,

Qui a toujours cru en moi, même dans les moments où je doutais de moi-même. Sa présence constante et ses encouragements m'ont permis de surmonter les obstacles et ses prières ont accompagné mon chemin.

À mes très chers frères khireddine et Yahia,

Qui ont toujours été là pour moi, dans les bons comme dans les mauvais moments.

À mon très cher grand-père,

Qui a illuminé ma vie par sa sagesse et sa gentillesse.

À la mémoire de mes très chères grand-mères,

Qui ont quitté ce monde, mais dont les souvenirs resteront à jamais gravés dans mon cœur.

À toute ma grande famille

Qui m'ont toujours soutenu et aimé.

À ma binôme et amie Narimene,

Qui a rendu mes années d'université inoubliables et avec qui j'ai eu la chance de travailler à ses côtés.

À mes chères amies Amel, Hadjer et Aya.

À toutes mes chères amies que j'ai rencontrées dans cette université Ines, Selma et Imene.

À toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

LASNAMI Roufaïda

Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail :

A mon très cher père

Ma source de vie, d'amour et d'affection à mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, Ce travail est autant le tien que le mien, car c'est grâce à toi que j'ai pu atteindre ce jour. Puisse ALLAH, le tout -puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

Je t'aime, papa

A ma très chère mère

A mon paradis, ma source de joie et mon bonheur, ma copine et le fil d'espoir qui allume mon chemin, Peu importe ce que je fais ou ce que je dis, je ne pourrai jamais te remercier assez pour tout ce que tu as fait pour moi. Tes sacrifices et ton amour inconditionnel ont façonné la personne que je suis aujourd'hui. Ton soutien constant et ta bienveillance ont été mes plus grands cadeaux. Je te suis infiniment reconnaissante d'être ma mère.

Je t'aime, mama

A mes chères frères Abdenour et Fayçal

Chaque jour passé à vos côtés est un trésor que je chérirai toujours. Ce travail est dédié à vous, pour votre amour inconditionnel et votre soutien sans faille. Je suis fier de vous avoir comme frères.

A ma copine Maroua

Tu es bien plus qu'une simple amie pour moi ; tu es comme une sœur. Chaque seconde passée à tes côtés a été remplie de complicité, de soutien et de rires. Tu as été là à chaque étape, un pilier sur lequel je pouvais toujours compter. Ensemble, nous avons donné le meilleur de nous-mêmes dans notre spécialité, et cette réussite est aussi la tienne.

A mes copines Djihene, Ines, Selma, les amies précieuses qui rendent chaque moment spécial. Cette dédicace est un témoignage de notre amitié exceptionnelle.

A tous mes cousines et mes cousins et ma grande famille, merci pour votre amour et encouragements

Sans oublier mon binôme Roufaïda, la partenaire la plus précieuse avec qui j'ai vécu les meilleurs moments et surmonté les défis pour présenter notre travail avec succès. Sa compréhension et son soutien constants tout au long de ce projet ont été vraiment appréciés.

Karkache Narimene

TABLE DES MATIERES

RESUME	I
DEDICACES	III
TABLE DES MATIERES	V
LISTE DES FIGURES	IX
LISTES DES TABLEAUX	X
LISTE DES ABREVIATIONS	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : LES PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA METEOROLOGIE	2
INTRODUCTION	3
I.1 L'Atmosphère	3
I.1.1 Composition	3
I.1.2 Propriétés de l'atmosphère	4
I.1.3 La structure verticale de l'atmosphère	5
I.2 La visibilité	8
I.2.1 La visibilité météorologique	8
I.2.2 La visibilité aéronautique	9
I.2.3 La portée optique météorologique (POM)	9
I.2.4 La portée visuelle de piste (PVP\RVR)	10
I.2.5 La mesure de la visibilité	10
I.2.5.1 Estimation par l'observateur	10
I.2.5.2 Evaluation par des instruments	10
I.2.6 Les phénomènes météorologiques qui réduisent la visibilité	12
I.2.7 Le message METAR	13
CONCLUSION	15
CHAPITRE II : INTRODUCTION AU PHENOMENE DE BROUILLARD	
INTRODUCTION	16
II.1 Définitions	16
II.1.1 Le brouillard	16
II.1.2 La brume	16
II.1.3 Le smog	16

II.2	Caractéristiques typiques des brouillards	17
II.3	Processus de formation	17
II.4	Les différents types de brouillard	17
II.4.1	Brouillard de rayonnement	18
II.4.1.1	La formation et la dissipation du brouillard de rayonnement	18
II.4.1.2	Conditions propices à la formation de brouillard de rayonnement	19
II.4.1.3	Conditions défavorables à la formation de brouillard de rayonnement	20
II.4.2	Brouillard d'advection	21
II.4.2.1	La formation et la dissipation du brouillard d'advection	21
II.4.2.2	Conditions propices à la formation de brouillard d'advection	22
II.4.3	Brouillard de pente	23
II.4.3.1	La formation du brouillard de pente	23
II.4.3.2	Conditions propices à la formation de brouillard de pente	23
II.4.4	Brouillard d'évaporation	24
II.4.4.1	La formation et la dissipation du brouillard d'évaporation	25
II.4.4.2	Conditions propices à la formation de brouillard d'évaporation	26
II.4.5	Brouillard de mélange	26
II.4.6	Brouillard de précipitation (brouillard frontal)	27
II.4.6.1	La formation et la dissipation du brouillard de précipitation	27
II.4.7	Brouillard d'affaissement de stratus	29
II.4.7.1	La formation et la dissipation du brouillard d'affaissement de stratus	29
II.4.8	Brouillard glacé (brouillard de glace)	30
II.4.8.1	La formation et la dissipation du brouillard de glace	30
II.5	Le brouillard et les précipitations	31
II.6	Méthodes de détection	31
II.6.1	Observations météorologiques classiques par des personnes	32
II.6.2	Stations d'observation automatiques	32
II.6.3	Observations à bord de navires	32
II.6.4	Les caméras Web	33
II.6.5	Téledétection par satellite	33
II.7	Impact du brouillard sur l'aéronautique	34
II.7.1	Les impacts opérationnels du brouillard	34
II.7.2	Les impacts du brouillard sur la sécurité des vols	35
	CONCLUSION	35
	CHAPITRE III : LA PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS	
	INTRODUCTION	36
III.1	Définition de la prévision numérique du temps	36
III.2	Historique	36

III.3 Les différentes fonctions des centres de pnt	37
III.3.1 La réception des observations	37
III.3.2 L'examen critique des observations	38
III.3.3 Assimilation des données	38
III.3.4 La prévision proprement dite	39
III.3.4.1 La grille de modèle numérique de temps	39
III.3.5 L'art du prévisionniste	40
III.4 La qualité des prévisions	41
III.5 Prévision du brouillard à l'aide des modèles PNT	41
III.5.1 Le modèle COBEL	41
III.5.2 Le modèle WRF	41
III.5.3 Le modèle Arpège	42
III.6 Les principaux modèles utilisés a l'ONM	42
III.6.1 Le modèle ALADIN	42
III.6.2 ALADIN-SABLE	44
III.6.3 AROME	46
III.6.3.1 Caractéristiques du modèle de prévision AROME	47
III.6.3.2 La prévision de brouillard par AROME	48
III.7 Paramétrisation de la visibilité	49
III.7.1 Paramétrisation de la visibilité en fonction de la teneur en eau liquide (LWC)	49
III.7.2 Développement de méthodes et de paramétrages	49
III.7.2.1 Paramétrage de la visibilité par rapport à Nd et LWC:	50
III.7.2.2 La visibilité en fonction de l'humidité relative par rapport à l'eau	51
III.7.3 La visibilité en AROME	51
CONCLUSION	52
CHAPITRE IV : VALIDATION DES RESULTATS	
INTRODUCTION	53
IV.1 La zone d'étude	53
IV.2 Les données utilisées :	54
IV.2.1 Les données des visibilités observées	54
IV.2.2 Les équations empiriques utilisées pour l'étude	54
IV.3 Méthodologie :	55
IV.3.1 Calcul de la visibilité	55
IV.3.2 L'étude et l'analyse des situations météorologiques :	55
IV.3.2.1 La situation de la journée 21 Janvier 2022	55
IV.3.2.2 La situation de la journée de 25-02-2022	58
IV.3.3 L'étude et l'analyse globale des données :	60
IV.3.3.1 Tableau de contingence	60
IV.3.3.2 Table de contingence de toute la période étudiée	62

CONCLUSION	67
CONCLUSION GENERALE	68
LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	70
ANNEXE	74

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I-1: Diagramme de La répartition des gaz Atmosphérique terrestres.	4
Figure I-2: Structure verticale de l'atmosphère.	8
Figure I-3: Le diffusomètre.	11
Figure I-4: Le transmissiomètre.	11

Chapitre II

Figure II-1: Le brouillard de rayonnement.	18
Figure II-2: processus de formation et la dissipation du brouillard de rayonnement	19
Figure II-3: Brouillard d'advection.	21
Figure II-4: processus de formation du brouillard d'advection.	22
Figure II-5: processus de formation du brouillard de pente.	23
Figure II-6: Le brouillard de pente.	24
Figure II-7: Brouillard d'évaporation.	25
Figure II-8: processus de formation de brouillard d'évaporation.	26
Figure II-9: processus de formation de Brouillard de mélange.	27
Figure II-10: processus de formation d'un brouillard préfrontal.	28
Figure II-11: Brouillard d'affaissement de stratus.	29
Figure II-12: Brouillard glacé (brouillard de glace).	30
Figure II-13: Un brouillard capturé par l'instrument MODIS du satellite Terra de la NASA.	34

Chapitre III

Figure III-1: Les systèmes d'observation utilisés en météorologie opérationnelle.	38
Figure III-2: La grille du modèle numérique.	40
Figure III-3: Organigramme simplifié de la chaine de PNT.	40
Figure III-4 : Domaine Aladin/Algérie.	44
Figure III-5 : Domaine Aladin-sable/Algérie].	45
Figure III-6 : Domaine AROME/Algérie	47
Figure III-7 : la Prévision de brouillard par Arome et l'image satellite Météosat	48

Chapitre IV

Figure IV-1: localisation de l'aéroport houari Boumediene DAAG.	53
Figure IV-2: les visibilité(m) en fonction du temps (h)	56
Figure IV-3: Les Visibilitées V(LWC),V(LWC,Nd),V(Arome),V(Obs)	57
Figure IV-4: les visibilité en (m)en fonction de temps (h)	58
Figure IV-5: les visibilité v(LWC),v(LWC,nd),v(arome),v(obs)	59

LISTES DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I-1: Décodage d'un METAR.	14
--	----

Chapitre III

Tableau III-1: Caractéristiques principales de ALADIN/Algérie [36].	43
Tableau III-2: Caractéristiques principales ALADIN-SABLE /Algérie [36].	45
Tableau III-3: Caractéristiques principales AROME/Algérie [36]	46

Chapitre IV

Tableau IV-1 : Les coordonnées géographiques de l'aéroport DAAG	53
Tableau IV-2: Équations empiriques pour la prévision de la visibilité réduite par le brouillard	54
Tableau IV-3: les visibilités calculées et les observations enregistrées en (m)	55
Tableau IV-4: les visibilités calculées et les observations enregistrées pour la journée 25-02-2022	58
Tableau IV-5: table de contingence	61
Tableau IV-6: Table de contingence pour la formule(LWC).	63
Tableau IV-7: Tableau de contingence pour la formule(LWC,Nd).	64
Tableau IV-8: Table de contingence pour la formule(AROME).	65
Tableau IV-9: Table des indexes.	66

LISTE DES ABREVIATIONS

ALADIN : Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International.

AROME: Application of Research to Operations at Mesoscale.

ARPEGE: Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle.

BTD:Brightness temperature difference.

CAVOK:Ceiling and Visibility OK .

CNRM :Centre national de Recherches Météorologique .

COBEL :Code de brouillard à l'échelle locale.

ECMWF:European center for medium-range weather forecasts.

FAR : False Alarm Ratio.

FRAM:Field of radiometry and modeling of fog.

FSSP:Forward Scattering Spectrometer Probe.

HR: L'humidité relative.

IFS: Integrated Forecasting System.

IFR: Instrument Flight Rules.

LWC: Liquid Water Content.

METAR :Meteorological Airport Report.

MESO-NH: MESO scale Non Hydrostatic.

MSA : Minimum Sector Altitude.

NCEP: Centres nationaux de prévision environnementale.

Nd : La Concentration en nombre de gouttelettes.

OACI : Organisation de L'Aviation Civile Internationale.

OBS : Observations.

OMM : Organisation Météorologique Mondiale.

ONM : Office National De La Météorologie.

PC : Percentage Correct.

PNT : Prévision Numérique du Temps.

POD : Probability Of Detection.

POM : Portée Optique Météorologique.

PTA : Pouvoir Transmissif de l'Atmosphère.

PVISICLD: Visibility due to clouds (liquid water and ice water).

PVISIHYD: Visibility due to hydrometeors.

QNH: Query Nautical Height.

RVR: Runway Visual Range.

SURFEX : SURFace Externalisée.

TAF : Terminal Aerodrome Forecast.

Td : Temperature de point de rosée.

UTC: Temps universel coordonné.

VFR : Visual Flying Rules.

Vis : Visibilité.

VMI : Visibilité Météorologique Instrumentale.

WRF: Weather Research and Forecasting Model.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans le secteur de l'aviation, la visibilité réduite causée par le brouillard affecte considérablement les opérations aériennes, engendrant une série de conséquences néfastes. Les vols peuvent être retardés, voire annulés, entraînant des perturbations importantes dans les programmes de voyage des passagers et des perturbations économiques pour les compagnies aériennes. De plus, les conditions de visibilité réduite peuvent entraîner un changement des règles de vol à vue (VFR) aux règles de vol aux instruments (IFR). Cette réduction rapide de la visibilité augmente considérablement les risques d'accidents, mettant en danger la vie des pilotes, des passagers et des personnes au sol.

Devant ces défis, la prévision de ce phénomène s'impose comme un outil essentiel qui permet d'anticiper et de mieux comprendre ce phénomène complexe. Les scientifiques et les chercheurs dans le domaine météorologique s'emploient à développer des systèmes de prévision et à intégrer de nouvelles données et à affiner les algorithmes de prévision afin d'accroître la précision et la fiabilité des modèles.

L'objectif de notre travail consiste à faire une étude comparative de la modélisation de la prévision de la visibilité réduite causée par le brouillard à partir des sorties du modèle de prévision numérique du temps (PNT) exploité actuellement au niveau de l'Office National de la Météorologie AROME (Application of Research to Operations at MEscale). La validation de nos résultats se fera sur la base de la méthode des tableaux de contingence qui sera appliquée sur les résultats obtenus par les trois modèles, en prenant comme échantillon l'aérodrome Houari Boumediene Alger (DAAG). Les prévisions seront comparées aux observations des METAR de l'aérodrome en question.

Ce travail présente aussi une phase préparatoire pour une approche de la prévision d'ensemble du brouillard, sachant que, les résultats obtenus permettront sans doute de mettre en évidence les autres modèles (formules) qui peuvent constituer les entrées du modèle global de la prévision d'ensemble.

Cette thèse est constituée de quatre chapitres, dans le premier chapitre nous introduirons quelques notions fondamentales de la météorologie concernant l'atmosphère terrestre, nous présenterons aussi la visibilité et ses types. Dans le deuxième chapitre nous parlerons en détail le phénomène du brouillard. Nous étudierons les différents types de brouillard, en mettant en lumière le processus de formation et de dissipation spécifique à chacun enfin nous aborderons également les moyens de détection de ce phénomène.

Le troisième chapitre donnera aperçu sur la prévision numérique du temps et présentera les différents modèles utilisés internationalement et nationalement pour la prévision du brouillard. Enfin, nous verrons les différentes méthodes utilisées pour la paramétrisation de la visibilité réduite par le brouillard.

Le chapitre quatrième vise la validation des résultats par la mise en évidence de l'utilisation des équations de visibilité dans le domaine de la prévision numérique du brouillard, En couplant ces équations au modèle AROME et en comparant les résultats aux observations, notre objectif est de contribuer à l'amélioration de la précision des prévisions de visibilité et à une meilleure compréhension de ces phénomènes météorologiques complexes.

Chapitre I

**LES PRINCIPES FONDAMENTAUX
DE LA METEOROLOGIE**

Introduction

La météorologie est l'un des piliers les plus importants du domaine aéronautique. Ce chapitre présente quelques notions fondamentales de la météorologie. Premièrement, nous définissons l'atmosphère terrestre, sa composition et son découpage vertical. Ensuite, nous traitons quelques notions sur la visibilité et ses types, ainsi que les limites qui la réduisent et les méthodes pour la mesurer. De plus, nous proposons une explication du message METAR avec son décodage.

Météorologie

La météorologie est la science qui étudie l'atmosphère terrestre et les phénomènes qui s'y produisent. La météorologie permet d'établir des prévisions météorologiques en s'appuyant sur des modèles mathématiques à court comme à long terme. Elle est également appliquée pour la prévision de la qualité de l'air, pour l'étude des changements climatiques et pour l'analyse dans plusieurs domaines de l'activité humaine [1].

I.1 L'Atmosphère

L'atmosphère est une enveloppe gazeuse entourant la Terre qui est caractérisée par sa composition, sa température, sa pression et son humidité en chaque point. Elles sont connues par des observations et des mesures qui permettent de construire un modèle d'atmosphère appelé l'atmosphère standard [2]. C'est dans l'atmosphère que l'on rencontre les principaux phénomènes influençant la météo et le climat sur Terre.

I.1.1 Composition

L'air atmosphérique est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. En plus de ces composants gazeux, on trouve en suspension dans l'atmosphère des particules diverses de dimensions microscopiques (débris minéraux et végétaux, particules de sel marin provenant de l'évaporation des embruns, etc.).

- **L'air sec :**

L'air sec est lui-même un mélange de plusieurs gaz, de composition pratiquement constante dans les couches inférieures intéressant les météorologistes [2]. La figure ci-dessous montre la répartition des gaz atmosphériques terrestres.

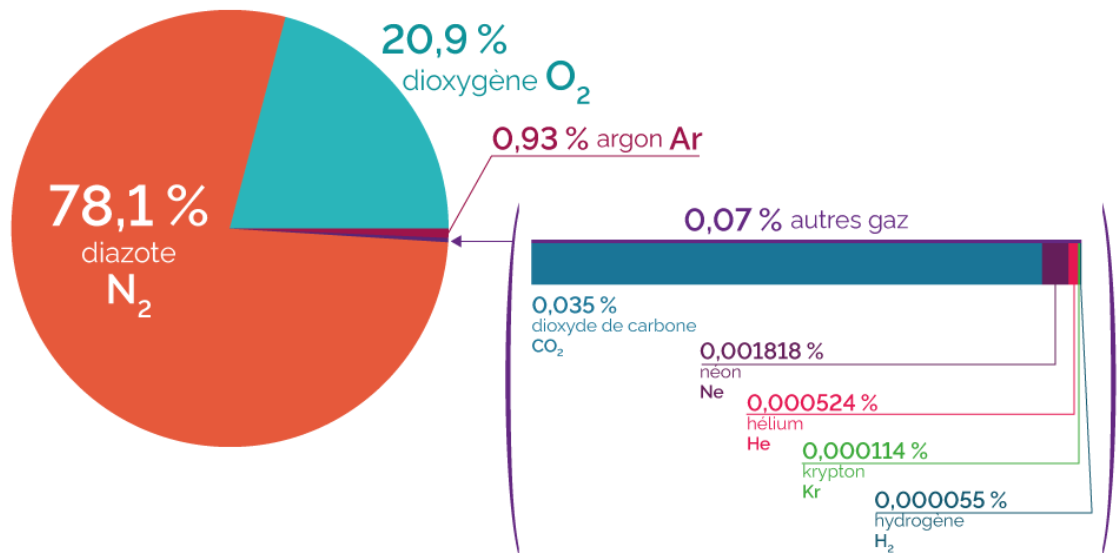


Figure I-1:Diagramme de La répartition des gaz Atmosphérique terrestres [3].

La vapeur d'eau :

La vapeur d'eau est une composante atmosphérique extrêmement importante. C'est d'abord à l'état gazeux que la substance eau est transportée d'un endroit à l'autre dans l'air, à l'échelle globale. Lorsqu'elle se condense, il y a formation de nuages qui, à leur tour, amènent des précipitations. L'atmosphère transporte d'immenses quantités d'eau (vapeur) et d'énergie (chaleur latente) et les redistribue de manière à garder l'équilibre d'eau et d'énergie autour de la Terre. Aussi, la vapeur d'eau absorbe continuellement les radiations infrarouges (chaleur), ce qui complique l'équilibre énergétique de la Terre [4].

I.1.2 Propriétés de l'atmosphère

L'air a pour principale propriété d'être inerte, fluide, visqueux, expansible et compressible. En ce sens, il n'échappe pas à la thermodynamique [5].

- **Inertie**

L'air étant inerte et ayant une masse, il faut une force pour le mettre en mouvement [5].

- **Fluidité**

L'air est aussi très fluide ; il tend à occuper tout l'espace libre et à exercer une pression sur tous les corps qu'il entoure [5].

- **Viscosité**

La viscosité de l'air est une propriété importante. Si elle lui permet de se mouvoir et de

Provoquant ainsi un effet d'entraînement sur les couches voisines, elle empêche par contre le cisaillement du vent d'atteindre des valeurs démesurées [5].

- **Expansibilité et compressibilité**

Dès qu'en un point de l'atmosphère, la pression d'une masse d'air augmente par rapport à la pression environnante ; l'air prend de l'expansion et tend à occuper plus d'espace.

Si c'est par contre la pression environnante qui augmente, le volume de cette masse diminuera parce qu'il est comprimé [5].

- **Thermodynamique**

On peut dire que sous l'effet des changements de pression et de température, l'air est aussi thermodynamique que tous les autres gaz [5].

I.1.3 La structure verticale de l'atmosphère

L'atmosphère terrestre est divisée en cinq couches concentriques en fonction du profil vertical des variations moyennes de température de l'air, de sa composition chimique, de son mouvement et de sa densité [6].

1. La troposphère

La troposphère est la première et la plus proche couche de l'atmosphère dans laquelle nous vivons tous. La hauteur de cette couche va du niveau de la mer (0 km) à environ 8 à 20 km, selon la latitude. La troposphère est plus basse dans les régions polaires et plus haute sous les tropiques, en moyenne, elle est d'environ 12 km.

La température de l'air dans la troposphère varie d'environ +17 °C en moyenne à -51 °C. Ainsi, plus il fait haut, plus il fait froid, environ -0,65 °C tous les 100 mètres.

La principale chose à savoir sur la troposphère est qu'elle contient le plus d'air, soit environ 80 % de la masse de l'atmosphère.

Une autre chose importante est que presque tous les phénomènes météorologiques se produisent dans la troposphère : nuages, précipitations, turbulences, etc [6].

2. La stratosphère

La stratosphère est la deuxième couche de l'atmosphère à partir de la Terre, après la troposphère. Sa hauteur est de 12 km en moyenne à environ 50 km.

Contrairement à la couche inférieure de l'atmosphère, la température de l'air dans la stratosphère se comporte différemment : à une altitude de 11 à 25 km, elle continue de baisser, mais pas autant que dans la troposphère, jusqu'à environ $-56,5$ °C. C'est pourquoi cette région de l'atmosphère est appelée « tropopause » ou arrêt temporaire du changement de température. Puis, entre 25 et 40 km, les choses deviennent encore plus intéressantes : la température monte de 50 °C à $+0,8$ °C. Ce phénomène s'appelle une inversion. Ensuite, la température reste constante jusqu'à 50 km, ce qui forme une nouvelle « pause » : la stratopause.

La principale chose à savoir sur la stratosphère est qu'elle contient une autre couche importante de l'atmosphère : la couche d'ozone. Il protège la Terre des rayons ultraviolets [6].

3. La mésosphère

La mésosphère est la troisième couche de l'atmosphère, La hauteur de cette couche est de 50 à 80-85 km.

La température dans la mésosphère diminue également avec l'altitude. La mésosphère, ou plutôt la mésopause, la couche intermédiaire suivante, est la couche la plus froide de ce qu'on appelle avec une température maximale de -90 °C [6].

4. La thermosphère

La thermosphère est la quatrième couche de l'atmosphère. La hauteur de cette couche est de 80 km à 600-800 km. Elle est également connue sous le nom de « haute atmosphère ». C'est la couche la plus fine avec environ 0,05 % de la masse totale d'air.

La température de la thermosphère dans la couche inférieure continue de baisser de 90 °C dans la mésopause à 120 °C, puis augmente avec l'altitude à environ $1\ 200$ à $2\ 000$ °C à environ 200 à 300 km, puis reste inchangée dans ses couches supérieures, de sorte que cette couche forme également une autre pause, la thermopause.

La chose la plus importante à savoir sur la thermosphère est que la plupart des satellites spatiaux y volent (mais aussi dans la couche suivante), ainsi que la Station spatiale internationale à 408 km et les navettes spatiales qui y transportent les équipages [6].

5. L'exosphère

L'exosphère est le dernier cinquième des principales couches de l'atmosphère, La hauteur de cette couche est comprise entre 500 et 1 000 km, selon l'activité solaire, et jusqu'à 10 000 km.

Cette couche est aussi parfois appelée partie supérieure de la thermosphère et est également appelée « zone de dispersion », en raison de l'absence presque totale de gaz par rapport aux couches inférieures qui s'écoulent dans l'espace interplanétaire. L'exosphère est trop loin au-dessus de la Terre pour les phénomènes météorologiques. Mais il existe aussi un grand nombre de satellites.

La température de l'exosphère ne change pas beaucoup et reste plus ou moins dans les limites du niveau précédent d'environ +1 200 °C à +2 000 °C ou plus [6].

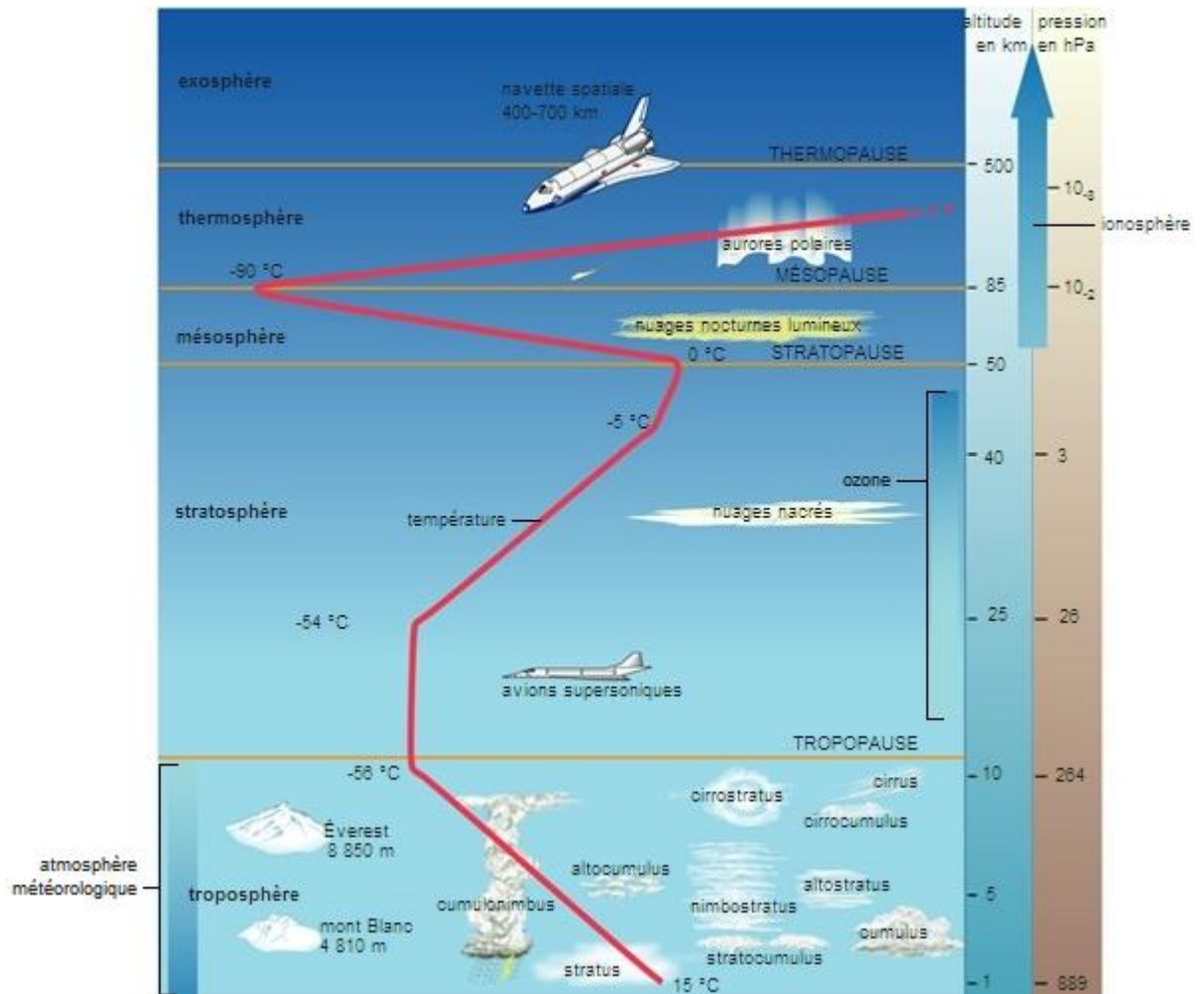


Figure I-2: Structure verticale de l'atmosphère[7].

I.2 La visibilité

I.2.1 La visibilité météorologique

- **Définition**

La 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 déterminé, 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 [8].

- **Types de visibilité météorologique**

La visibilité horizontale : la plus grande distance à laquelle on peut voir, à l'horizontale, dans une direction donnée, mesurée par référence à des objets ou des sources lumineuses dont la distance est connue [8].

La visibilité verticale : la plus grande distance à laquelle on peut voir en regardant vers le haut dans une couche dont la base est à la surface, comme le brouillard ou une chute de neige [9].

I.2.2 La visibilité aéronautique

La visibilité pour l'exploitation aéronautique correspond à la plus grande des deux valeurs suivantes :

a) la plus grande distance à laquelle on peut voir et reconnaître un objet noir de dimensions appropriées situé près du sol lorsqu'il est observé sur un fond lumineux ;

b) la plus grande distance à laquelle on peut voir et identifier des feux d'une intensité voisine de 1 000 candelas lorsqu'ils sont observés sur un fond non éclairé. [10].

- **La visibilité dominante**

Valeur de la visibilité la plus grande, observée conformément à la définition de visibilité, qui est atteinte dans au moins la moitié du cercle d'horizon ou au moins la moitié de la surface de l'aérodrome. Ces zones peuvent comprendre des secteurs contigus ou non contigus [10].

- **Visibilité aéronautique minimale**

C'est la valeur la plus basse de la visibilité. Contrairement à la visibilité dominante, il n'y a pas de contraintes sur la part du cercle d'horizon devant être affectée par une mauvaise visibilité. Elle n'est codée que sous certaines conditions :

- Si elle est inférieure à la moitié de la visibilité dominante, et qu'elle est inférieure à 5 000 m,

- Dans tous les cas, si elle est inférieure à 1 500m [11].

I.2.3 La portée optique météorologique (POM)

Elle est définie par l'OMM comme le paramètre devant représenter la visibilité. C'est la distance à laquelle l'intensité d'un faisceau lumineux est atténuée par l'atmosphère à 5% de son intensité d'origine. Cette définition ne dépend que de la

transparence de l'atmosphère ; elle est objective et équivalente, en moyenne, à la distance limite de la vision humaine de jour [12].

I.2.4 La portée visuelle de piste (PVP\RVR)

Elle est la meilleure estimation de la distance à laquelle le pilote voit les marques ou les lumières balisant la piste. Elle dépend de la transparence de l'atmosphère (la portée optique météorologique), de l'intensité des sources lumineuses (le balisage de la piste), et de la luminance de fond [12].

I.2.5 La mesure de la visibilité

I.2.5.1 Estimation par l'observateur

A l'origine de l'observation, la visibilité météorologique a été définie comme une distance estimée par un observateur humain. Il peut ainsi visuellement déterminer la visibilité à partir d'objets sélectionnés selon leurs caractéristiques géométriques et photométriques et dont la distance au point d'observation est connue. Cette estimation visuelle de la visibilité est toutefois subjective. Elle dépend aussi bien des caractéristiques de la source lumineuse et des facteurs de transmission de l'atmosphère que des capacités de perception et d'interprétation de l'observateur. Les observations humaines de jour sont de bonnes qualités mais de nuit, il est plus difficile de déterminer avec précision la visibilité. En effet, par obscurité totale, l'intensité de la source lumineuse est plus importante qu'au crépuscule ou en plein jour. Les repères lumineux de visibilité contribuent à la détermination de la visibilité et doivent donc être choisis de manière adéquate [13].

I.2.5.2 Evaluation par des instruments

La mesure de la visibilité s'effectue à l'aide d'un visibilimètre. Il peut s'agir d'un diffusomètre ou d'un transmissomètre combiné à un luminancemètre [13].

1. Les diffusomètres

Les diffusomètres estiment la visibilité au sens de la POM sur la totalité de la plateforme. Elle se nomme Visibilité Météorologique Instrumentale (VMI) sur les aérodromes réalisant des approches à vue VFR (Visual Flying Rules). Ce sont des capteurs permettant une mesure fiable de la POM grâce au coefficient d'extinction de l'atmosphère. Bien que n'utilisant qu'un petit volume de mesure (quelques dm³), ils permettent de réaliser des mesures objectives et répétitives de la POM, en enlevant l'incertitude d'estimation de l'observateur. L'étendue de

mesure de la distance de visibilité avec un diffusomètre est plus large, de 10 mètres à 10 kilomètres sur un aéroport [13].



Figure I-3:Le diffusomètre [14].

2. Le transmissomètre

Un transmissomètre est le deuxième instrument de mesure de visibilité. Il délivre la valeur du Pouvoir Transmissif de l'Atmosphère (PTA). En combinant ce paramètre à l'intensité lumineuse de l'atmosphère et à l'intensité des lampes de balisage (pour l'éclairage des pistes), le transmissomètre permet de calculer la Portée Visuelle de Piste (RVR). Il s'agit d'un équipement nécessaire à l'homologation des pistes réalisant des approches de précision IFR de catégorie I à III. En effet, la visibilité est un paramètre très important pour l'aéronautique et la RVR répond aux besoins d'aide à l'atterrissage. Les transmissomètres mesurent la POM mais sur une gamme limitée, de 75 à 1500 mètres avec un pas de 30 mètres [13].



Figure I-4:Le transmissiomètre [14].

I.2.6 Les phénomènes météorologiques qui réduisent la visibilité

Une mauvaise visibilité peut engendrer des risques majeurs et des pertes humaines et matérielles. Deux catégories de phénomènes météorologiques peuvent être la cause.

a. Les hydrométéores

Un hydrométéore se compose de particules d'eau, liquide ou solide, en suspension ou en chute dans l'atmosphère, ou soulevées de la surface du globe par le vent, ou déposées sur d'autres objets [15].

- **Les nuages** : Un nuage est un hydrométéore consistant en une suspension dans l'atmosphère de minuscules particules d'eau liquide ou de glace, ou des deux à la fois, et ne touchant généralement pas le sol [15].
- **Brouillard** : Le brouillard est une suspension dans l'atmosphère de très petites gouttelettes d'eau réduisant la visibilité horizontale à la surface du globe à moins de 1 kilomètre [5].
- **La brume** : la brume une suspension dans l'atmosphère de microscopiques gouttelettes d'eau réduisant la visibilité horizontale entre de 1 et 5 kilomètres [5].
- **Les précipitations** : sont toutes les formes de particules d'eau, liquides ou solides, qui tombent de l'atmosphère et atteignent le sol. La neige, la pluie, et la bruine sont des types de précipitations [16].
- **Chasse-neige** : ensemble de particules de neige soulevées du sol par un vent suffisamment fort et turbulent [15].

b. Lithométéores

Un lithométéore est un ensemble de particules qui sont pour la plupart solides et non aqueuses. Ces particules sont en suspension dans l'atmosphère ou soulevées du sol par le

Vent [15].

Deux catégories de lithométéores sont prises en compte.

a. Des particules en suspension

- **Brume sèche** : est une suspension dans l'air de particules extrêmement petites invisibles à l'œil nu et suffisamment nombreuses pour donner à l'air un aspect opalescent, La brume sèche se produit dans l'air stable et n'est

généralement que de quelques milliers de pieds d'épaisseur, mais peut s'étendre vers le haut à 15000 pieds (4600 m) [16].

- **Brume de sable** : Suspension dans l'atmosphère de poussières ou de petites particules de sable, qui ont été soulevées du sol, antérieurement au moment de l'observation, par une tempête de poussière ou de sable qui peuvent s'être produites soit sur le lieu d'observation ou à proximité, soit loin de ce dernier [15].

- **Fumée** : Suspension dans l'atmosphère de petites particules provenant de la combustion [15].

b. Des particules soulevées par le vent

- **Chasse-poussière ou chasse-sable** : Ensemble de particules de poussière ou de sable soulevées du sol à des hauteurs faibles ou modérées, sur le lieu d'observation ou dans son voisinage, par un vent suffisamment fort et turbulent [15].

- **Tempête de poussière ou de sable** : Ensemble de particules de poussière ou de sable puissamment soulevées du sol par un vent fort et turbulent, jusqu'à de grandes hauteurs [15].

- **Tourbillon de poussière ou de sable** : Ensemble de particules de poussière ou de sable, accompagnées parfois de petits débris, soulevées du sol sous forme d'une colonne tourbillonnante de hauteur variable, à l'axe sensiblement vertical de faible diamètre [15].

I.2.7 Le message METAR

Le message d'observation météorologique standardisé METAR (METeorological Aerodrome Report) est utilisé dans le domaine de l'aviation. Il fournit des informations précises et actualisées sur les conditions météorologiques actuelles d'un aéroport.

Élaboré à partir de paramètres mesurés ou estimés, le METAR est mis à jour régulièrement, généralement toutes les heures ou demi-heures. Cette fréquence garantit que les pilotes et les contrôleurs aériens disposent en permanence des

informations les plus récentes sur les conditions météorologiques de l'aéroport, permettant ainsi une meilleure planification et une sécurité accrue des vols.

- **Exemple d'un METAR :**

METAR: DAAG 181330Z 34010KT CAVOK 25/11 Q1017

Tableau I-1: Décodage d'un METAR.

DAAG	Indicateur d'emplacement OACI. Aéroport international d'Alger Houari Boumédiène
181330Z	Jour + heure de l'observation en heure et minutes UTC, suivi de la lettre Z (pour Zoulou) Le 18 à 13:30 UTC.
34010KT	un vent en surface du 340° (direction d'où vient le vent), de vitesse 10 nœud
CAVOK	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.
25/11	Température et point de rosée, en degrés Celsius précédés d'un « M » si négatifs.
Q1017	Pression QNH en HPa, précédé de la lettre Q.

Conclusion

Dans cette exploration des principes fondamentaux de la météorologie, nous avons parcouru les composants essentiels de l'atmosphère terrestre, sa composition, son découpage vertical, ainsi que le rôle crucial de la substance de l'eau dans ses phénomènes. De plus, nous avons examiné en détail les différents aspects de la visibilité, ses types, les obstacles à une bonne visibilité et les méthodes de mesure correspondantes.

Chapitre I

**INTRODUCTION AU PHENOMENE
DE BROUILLARD**

Introduction

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail le phénomène du brouillard, un élément météorologique qui peut avoir un impact significatif sur l'aviation. Nous débuterons par une définition précise du brouillard ainsi que l'examen de ses caractéristiques distinctives. Ensuite, nous étudierons les différents types de brouillard, en mettant en lumière le processus de formation et de dissipation spécifique à chacun. Nous aborderons également les moyens de détection de ce phénomène, essentiels pour la sécurité des vols. Enfin, nous analyserons l'impact du brouillard sur l'aviation.

II.1 Définitions

II.1.1 Le brouillard

Le brouillard se compose de gouttes d'eau microscopiques en suspension dans l'air, ou d'un mélange de gouttes d'eau et de fumée ou de poussières fines, qui réduisent la portée horizontale de visibilité à moins d'un kilomètre. Dans le brouillard, l'air semble habituellement collant et humide et, lorsqu'on regarde attentivement, on peut voir des gouttelettes flotter dans l'air. Le brouillard est généralement blanchâtre, sauf à proximité de sources locales de pollution, où il peut être jaunâtre ou grisâtre [17].

II.1.2 La brume

La brume se compose de gouttes d'eau microscopiques ou de particules très hygroscopiques en suspension dans l'air. Les gouttelettes y sont plus petites et plus éparées que dans le brouillard ; la portée horizontale de visibilité est donc meilleure. La brume est souvent grisâtre [17].

II.1.3 Le smog

Le smog désigne une brume jaunâtre tirant sur le brun, constituée d'un mélange de polluants atmosphériques. Ce mot provient de la contraction de deux mots anglais smoke (fumée) et fog (brouillard). Il apparaît principalement sur les grandes villes lorsqu'une forte humidité s'allie à une pollution atmosphérique durable, cela crée une sorte d'aérosol humide qui peut être dangereux pour la santé [18].

II.2 Caractéristiques typiques des brouillards

Ces caractéristiques varient en fonction du type, de l'état d'évolution et de l'altitude des

Brouillards.

- **Le rayon des gouttelettes**

Le rayon des gouttelettes pour un brouillard de rayonnement est d'environ 2,5 à 5 μm alors que pour un brouillard d'advection, il est d'environ 10 μm [18].

- **L'épaisseur de la couche**

Leurs épaisseurs oscillent de quelques dizaines à quelques centaines de mètres [18].

- **Le contenu en eau liquide**

L'échelle de variation typique du contenu en eau liquide va de quelques mg.m^{-3} à quelques centaines de mg.m^{-3} , mais la valeur maximale dépasse rarement 0,1 à 0,3 g.m^{-3} au sol. La valeur maximale du contenu en eau liquide se situe autour de 100 mg.m^{-3} pour un brouillard de radiation et de 200 mg.m^{-3} pour un brouillard d'advection[18].

II.3 Processus de formation

Bien que plusieurs processus puissent être à l'origine du brouillard et que de nombreux facteurs influencent sa formation, leurs mécanismes de formation peuvent être réduits à trois processus principaux :

- Le mélange vertical de couches d'air humide de différentes températures (brouillard d'advection) [18].

- Le refroidissement de l'air à son point de saturation (brouillard de rayonnement) [18].

- L'addition de vapeur d'eau à l'air (brouillard frontal) [18].

II.4 Les différents types de brouillard

En fonction des processus physiques et des conditions dynamiques qui interviennent dans sa formation, les brouillards peuvent être classés en différents types.

II.4.1 Brouillard de rayonnement

Le brouillard de rayonnement est un brouillard mince (habituellement de 1 à 10 mètres d'épaisseur) qui se forme au-dessus des zones terrestres, mais qui peut s'avancer au-dessus de l'eau si des vents légers soufflant vers la mer se lèvent pendant la nuit. Ce brouillard s'étend rarement à plus d'un kilomètre du rivage. Il se forme le plus souvent à la fin de l'automne et au début de l'hiver, quand les nuits sont plus longues et que les zones terrestres contiennent beaucoup d'humidité [19].



Figure II-1:Le brouillard de rayonnement [20]

II.4.1.1 La formation et la dissipation du brouillard de rayonnement

Le brouillard de rayonnement se forme pendant les nuits humides lorsque le ciel est dégagé et que la vitesse du vent est inférieure à environ cinq nœuds. Il apparaît au lever du soleil quand le sol humide commence à se refroidir, ce qui produit de la condensation dans l'air avoisinant. Cependant, il se dissipe habituellement peu après le lever du soleil, lorsque la chaleur du soleil ou l'augmentation de la vitesse du vent assèche l'air. Par un jour d'hiver calme, le brouillard de rayonnement peut persister tout au long de la journée, en particulier dans les zones entourées de terrain surélevé.

Lorsque le brouillard de rayonnement au-dessus de l'eau commence à se lever, il produit souvent une couche de stratus bas qui pourrait disparaître rapidement. Si une couverture nuageuse plus élevée s'approche, le brouillard pourrait durer plus longtemps. Cependant, le brouillard de rayonnement ne touche que les plaisanciers matinaux se trouvant dans les ports et les embouchures de cours d'eau [19].

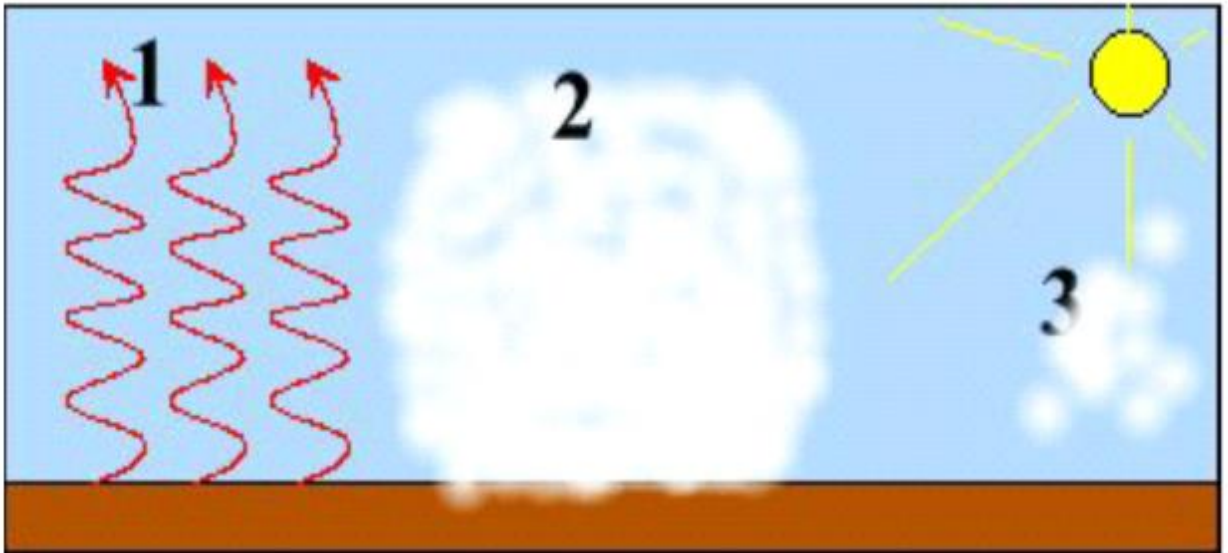


Figure II-2: processus de formation et la dissipation du brouillard de rayonnement [21]

II.4.1.2 Conditions propices à la formation de brouillard de rayonnement

- **Ciel dégagé** : pour optimiser le processus de refroidissement radiatif, plus la nuit est longue, plus la période de refroidissement est longue et plus la probabilité que du brouillard se forme est grande. Par conséquent, les brouillards de rayonnement sont plus fréquents au-dessus du sol tard à l'automne et en hiver [17].

- **Faible dépression du point de rosée au coucher du soleil ($T - T_d$)** : permet la formation de brouillard avec un refroidissement moins intense [17].

- **Vents faibles, inférieurs à 10 nœuds, ou faible turbulence** : un léger mouvement de l'air entraîne davantage d'air humide en contact direct avec la surface froide du sol, ce qui répartit l'effet de refroidissement plus rapidement sur une couche suffisamment épaisse [17].

- **Augmentation de la valeur du rapport de mélange avec l'altitude ($dr/dz > 0$)** : favorise la formation d'un brouillard persistant et dense [17].

-Surface mouillée : permet la formation de brouillard avec un refroidissement moins intense [17].

-Topographie locale : dans une vallée ou sur des terres basses, en présence d'un drainage d'air froid, le refroidissement de l'air est favorisé. Étant donné que l'air plus froid descend le long des pentes et se ramasse au creux des vallées, c'est dans les zones basses que l'on observe normalement la formation de brouillard de rayonnement. Dans ces circonstances, le brouillard de rayonnement est parfois appelé brouillard de vallée [17].

7. Noyaux de condensation : plus il y a de noyaux, plus la phase de condensation est favorisée [17].

II.4.1.3 Conditions défavorables à la formation de brouillard de rayonnement

-Vents forts (supérieurs à 10 nœuds) : la vapeur d'eau disponible est diffusée par le mélange de l'air humide près de la surface et de l'air plus sec au-dessus ; le brouillard peut alors se lever et former des stratus [17].

-Ciel nuageux : a pour effet de limiter le refroidissement radiatif de la surface [17].

-Importante dépression du point de rosée : pour permettre la formation de brouillard, il faudrait un refroidissement plus marqué que celui qui peut survenir la nuit [17].

-Absence de vent sur les quelques mètres les plus bas : permet à la rosée ou à la gelée blanche de se déposer [17].

II.4.2 Brouillard d'advection

Le brouillard d'advection se forme habituellement au large, mais peut aussi se produire au-dessus de la banquise et du manteau neigeux. Il est généralement plus dense au-dessus de l'eau qu'au-dessus des masses terrestres adjacentes et couvre souvent une zone étendue [19].



Figure II-3:Brouillard d'advection[22]

II.4.2.1 La formation et la dissipation du brouillard d'advection

Le brouillard d'advection se forme lorsque de l'air chaud et humide circule au-dessus d'une surface froide, comme un grand plan d'eau. Quand l'air refroidit, une partie de l'humidité qu'il contient se condense pour former du brouillard. Le brouillard d'advection est généralement associé à des vents modérés (de 8 à 17 nœuds environ). Les vents plus légers produisent du brouillard moins dense et les vents plus forts forment une couche de stratus bas.

Le brouillard d'advection se produit habituellement au large lorsque de l'air relativement plus chaud circule au-dessus de plans d'eau plus froide. Il peut aussi se former lorsqu'un front chaud se déplace au-dessus d'un manteau neigeux important. Le brouillard d'advection est particulièrement fréquent dans les zones où les

courants entraînent l'eau plus profonde et plus froide vers la surface, un phénomène connu sous le nom de « remontée d'eau froide ».

Le brouillard d'advection tend à être persistant et reste souvent toute la journée au-dessus de l'eau, bien qu'il puisse se dissiper plus près du rivage. Il finit habituellement par disparaître s'il se déplace au-dessus d'un courant d'eau plus chaude ou après le passage d'un front froid. Le réchauffement diurne et une augmentation de la vitesse du vent (18 nœuds ou plus) contribuent aussi à assécher la masse d'air [19].

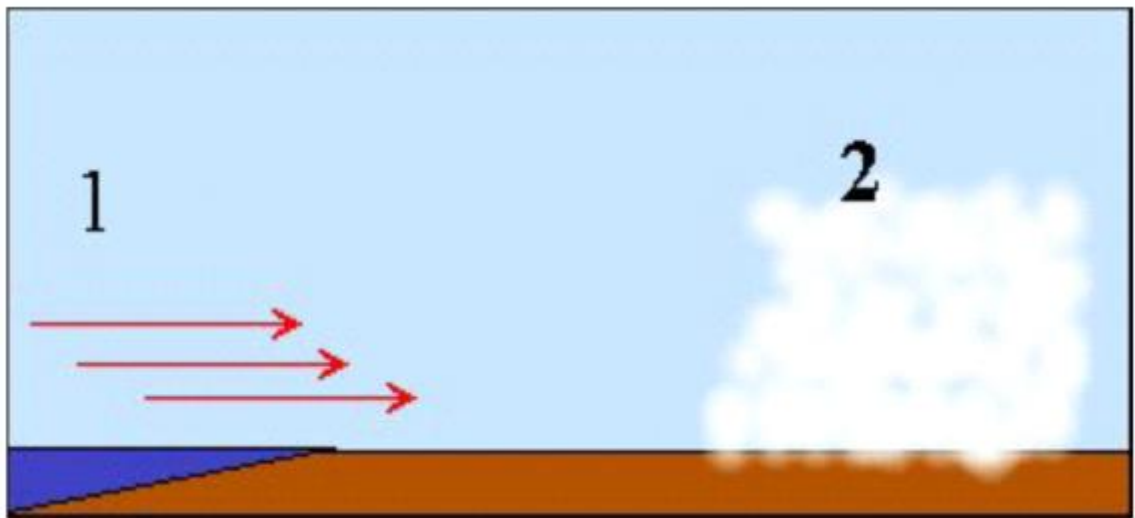


Figure II-4: processus de formation du brouillard d'advection [21]

II.4.2.2 Conditions propices à la formation de brouillard d'advection

-Humidité relative élevée : si l'air est humide, il nécessite moins de refroidissement [17].

-Stratification stable dans la basse atmosphère : de l'air chaud au-dessus de la surface froide [17].

- Vents modérés (de 8 à 17 nœuds) : le brouillard est moins dense avec des vents plus faibles, alors que des vents forts entraînent la formation de stratus ou de stratocumulus) [17].

-La différence entre la température de l'air et la température de la surface doit être une valeur élevée : quand l'air est chaud, le refroidissement par advection est favorisé [17].

-Forts gradients de température horizontaux : favorisent le contraste surface-air dans l'air froid et les vents modérés [17].

II.4.3 Brouillard de pente

II.4.3.1 La formation du brouillard de pente

La formation de brouillard de pente résulte d'un refroidissement adiabatique consécutif à l'expansion de l'air à mesure qu'il s'élève le long d'une pente. Les vents amorcent le mouvement ascendant le long de la pente. Le refroidissement de l'air jusqu'à son point de rosée entraîne une saturation. La présence de noyaux de condensation conjuguée au refroidissement continu produit de la condensation qui entraîne la formation de brouillard. Ce type de brouillard est essentiellement un nuage qui touche terre ou, pour être plus précis, il y a une élévation du sol qui, en raison de son altitude, finit par « toucher » le nuage [17].

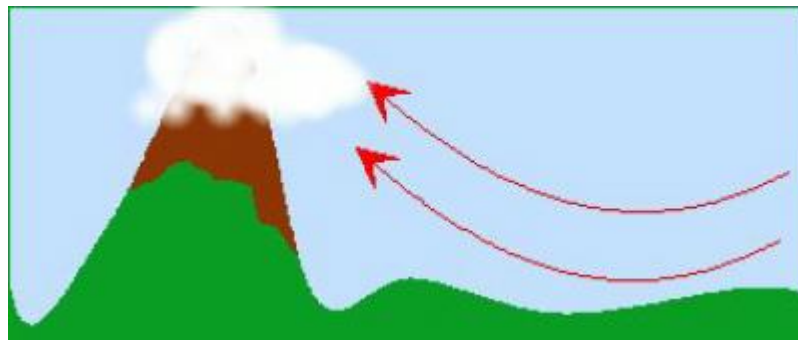


Figure II-5: processus de formation du brouillard de pente[21]

II.4.3.2 Conditions propices à la formation de brouillard de pente

-Terrain montagneux ou en pente : de sorte que le refroidissement adiabatique peut survenir à mesure que l'air est forcé de s'élever [17].

-Vent ascendant ou vent du large : le brouillard est moins dense avec des vents plus faibles, alors que des vents forts entraînent plus de mélange à proximité du sol de sorte qu'il peut y avoir formation de stratus ou de stratocumulus. La force du vent est importante ; cependant son effet dépend de plusieurs facteurs, tels que la pente elle-même, l'humidité relative de l'air et la rugosité du terrain [17].

- Humidité relative élevée (faible valeur $T - T_d$) : nécessite moins de refroidissement [17].

-Augmentation de l'humidité avec l'altitude [17].

-Masse d'air stable [17].



Figure II-6:Le brouillard de pente[23]

II.4.4 Brouillard d'évaporation

Le brouillard d'évaporation, appelé ainsi parce qu'il ressemble à de la vapeur s'élevant de l'eau, est également connu sous le nom de fumée de mer et fumée de mer arctique. Il se produit pendant les mois les plus froids de l'année, quand l'air est beaucoup plus froid que l'eau qui se trouve en dessous.

Le brouillard d'évaporation peut avoir plusieurs mètres d'épaisseur. Lorsque l'air est lourd et que la température est sous le point de congélation, il produit souvent du givrage sur la surface des navires, notamment sur les câbles et les cordages [19].



Figure II-7:Brouillard d'évaporation[24]

II.4.4.1 La formation et la dissipation du brouillard d'évaporation

Le brouillard d'évaporation se forme par évaporation, lorsque de l'air froid et sec circule au-dessus d'un plan d'eau plus chaude. Lorsque l'air froid entre en contact avec l'eau plus chaude, la couche d'air inférieure près de la surface de l'eau se réchauffe. Une partie de l'eau s'évapore dans cette couche d'air plus chaud, qui ensuite s'élève et se mélange à l'air plus froid du dessus. Ce mélange refroidit suffisamment l'air pour amener une partie de la vapeur d'eau qui vient de s'ajouter à se condenser en fines gouttelettes.

Le brouillard d'évaporation se forme plus facilement quand l'écart de température entre l'air et l'eau est plus élevé. Ainsi, il apparaît plus souvent tôt le matin et à l'automne.

Il a aussi plus de chances de se produire lorsqu'il y a beaucoup d'humidité et que les vents sont relativement légers. En hiver, le brouillard d'évaporation se forme souvent au-dessus de l'eau libre près des lignes de côte et des espaces d'eau entourés des glaces de la mer Arctique.

Le brouillard d'évaporation se dissipe habituellement lorsque la vitesse du vent dépasse cinq nœuds, ou quand le réchauffement solaire ou le vent soufflant d'une

zone plus chaude réduit l'écart de température entre l'air et l'eau à moins de 15 °C [19].

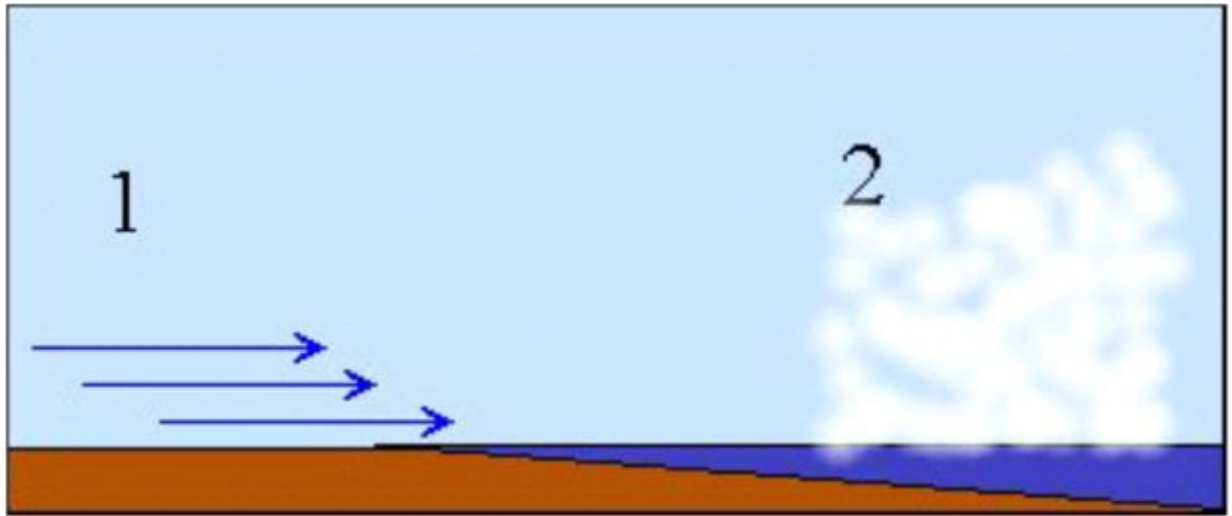


Figure II-8: processus de formation de brouillard d'évaporation [21]

II.4.4.2 Conditions propices à la formation de brouillard d'évaporation

- **Tôt le matin** : l'air est froid par rapport à la température de l'eau [17].
- **À l'automne** : l'air est froid par rapport à la température de l'eau [17].
- **Vents faibles** : des vents forts dissipent la vapeur d'eau [17].
- **Humidité relative élevée** : ce qui nécessite moins d'évaporation [17].
- **Concentration élevée de noyaux de condensation** : pour faciliter le processus de condensation [17].

II.4.5 Brouillard de mélange

Le brouillard de mélange prend naissance à l'interface de deux masses d'air d'origines et de températures différentes. En effet, la rencontre de deux masses d'air humide, mais non sursaturé, et de températures différentes, peut produire une zone de mélange dans laquelle la vapeur se trouve naturellement sursaturée. Un nombre important de molécules d'eau sous forme de vapeur peut alors s'agglomérer sur les noyaux de condensation présents. Le brouillard qui se forme est généralement léger et de courte durée. Lorsqu'un tel brouillard prend naissance dans les régions d'un système frontal où l'air chaud et l'air froid entrent en contact et se mélangent (surfaces frontales), on parle de brouillard de passage frontal [25].

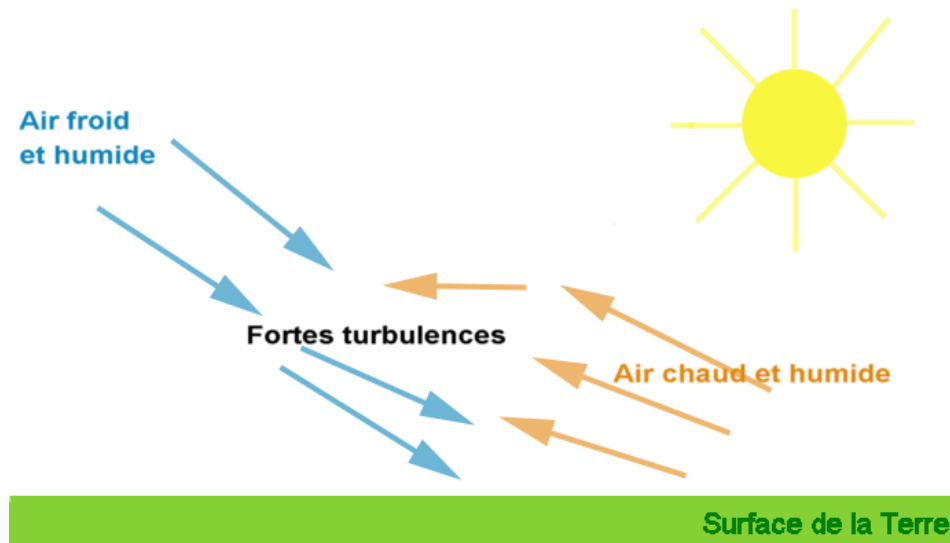


Figure II-9: processus de formation de Brouillard de mélange[26]

II.4.6 Brouillard de précipitation (brouillard frontal)

Comme son nom l'indique, ce type de brouillard vient avec les précipitations. On l'appelle aussi brouillard frontal, car il se forme souvent à l'avant d'un front chaud et après le passage d'un front froid. Ce brouillard se déplace avec la pluie [19].

II.4.6.1 La formation et la dissipation du brouillard de précipitation

Lorsque des précipitations tombant d'un nuage traversent l'air plus sec se trouvant plus bas, une partie de ses gouttelettes s'évapore en vapeur d'eau, ce qui augmente l'humidité dans l'air. Lorsque l'air atteint son point de saturation, une partie de cette vapeur se condense sous forme de brouillard.

Le brouillard de précipitation est plus susceptible de se transformer en bruine qu'en forte pluie, car les gouttelettes plus fines s'évaporent plus facilement et sont moins portées à dissiper le brouillard, une fois qu'il s'est formé. Plus les vents sont légers et plus la durée des précipitations est longue, plus la présence de brouillard est possible.

Lorsque ce type de brouillard est associé à un front chaud, il est dû principalement aux précipitations qui tombent à l'avant du front. On le désigne sous le nom de « brouillard préfrontal ». Comme la pluie provient de plus haut dans l'atmosphère, où l'air est plus chaud, elle s'évapore plus rapidement qu'habituellement lorsqu'elle traverse l'air beaucoup plus frais se trouvant plus bas.

Le brouillard de précipitation peut aussi se former après le passage d'un front froid. Lorsque les précipitations gagnent la couche d'air froid et stable en tombant,

l'humidité augmente jusqu'à ce que l'air soit saturé. Le brouillard se forme lorsque l'humidité dans l'air se condense. Ce « brouillard post frontal » est similaire au brouillard de rayonnement, car il se produit aussi quand le ciel est dégagé, quand le vent est faible et quand la surface est humide.

Le brouillard de précipitation se dissipe lorsque la vitesse du vent augmente, après le passage du front chaud ou froid, et lorsque l'air dans la couche inférieure de l'atmosphère se réchauffe [19].

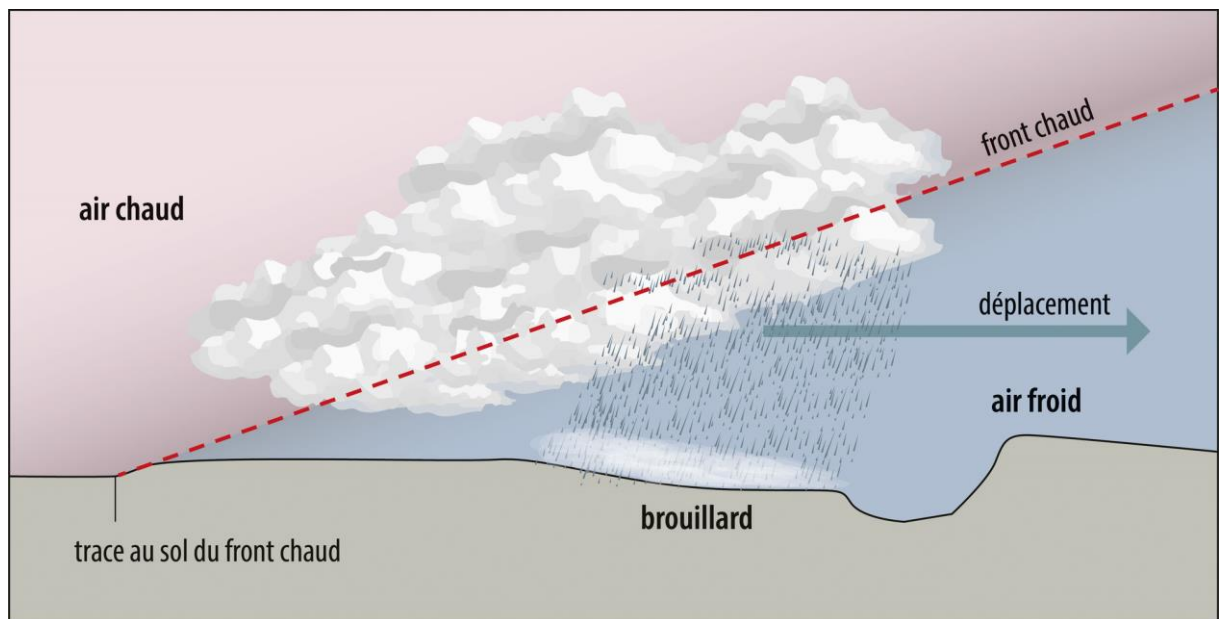


Figure II-10: processus de formation d'un brouillard préfrontal [25]

II.4.7 Brouillard d'affaissement de stratus

Le brouillard d'affaissement de stratus est en fait la base d'un stratus très bas. Il est moins courant que le brouillard d'advection et le brouillard de rayonnement [19].



Figure II-11:Brouillard d'affaissement de stratus[19]

II.4.7.1 La formation et la dissipation du brouillard d'affaissement de stratus

Le processus à l'origine de la formation de brouillard d'affaissement de stratus commence habituellement la nuit, lorsque le ciel est dégagé au-dessus d'un stratus bas. À mesure que la chaleur rayonne vers l'espace, la partie supérieure du nuage commence à refroidir et une partie de son humidité se condense en fines gouttelettes d'eau. Ces gouttelettes additionnelles entraînent l'extension de la base du nuage vers le bas, jusqu'à ce qu'il atteigne la surface.

Il est fort probable que le brouillard d'affaissement de stratus se forme lorsque l'air près de la surface de la Terre est froid et que l'atmosphère est très stable. Les conditions idéales se retrouvent lorsque l'inversion marine se forme dans la couche limite est à moins de 400 mètres de hauteur.

Le brouillard d'affaissement de stratus se dissipe sous le passage d'un front froid qui déstabilise l'atmosphère ou lorsque le réchauffement solaire ou des vents chauds font augmenter la température de l'air près de la surface [19].

II.4.8 Brouillard glacé (brouillard de glace)

Le brouillard glacé se compose de minuscules cristaux de glace. Il ne se produit que pendant les mois d'hiver les plus froids, le plus souvent dans les régions du nord, car il ne se forme qu'à très basse température. Dans l'Arctique, il peut arriver que le brouillard glacé rende la visibilité pratiquement nulle.

Les minuscules cristaux de glace du brouillard glacé peuvent rendre les conditions glissantes lorsqu'ils se déposent sur les ponts des navires et d'autres surfaces. Le brouillard glacé peut aussi causer des rayons lumineux étincelants dans l'air se trouvant directement au-dessus d'une source de lumière. Ce phénomène inhabituel est dû à la réflexion et la réfraction de la lumière par les cristaux de glace formant le brouillard [19].



Figure II-12:Brouillard glacé (brouillard de glace)[27].

II.4.8.1 La formation et la dissipation du brouillard de glace

Le brouillard glacé se produit à des températures extrêmement froides qui transforment de fines gouttelettes d'eau se trouvant dans l'air en cristaux de glace.

La température seuil varie selon les endroits, mais la formation de brouillard glacé est très rare à des températures supérieures à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et assez courante lorsque la température de l'air est inférieure à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le brouillard glacé ne peut se former qu'en présence d'une source d'humidité à proximité et quand les vents sont légers.

Le brouillard glacé peut être extrêmement dense et se prolonger nuit et jour jusqu'à ce que la température se réchauffe suffisamment. Il se dissipe aussi lorsque les vents de surface augmentent à plus de cinq nœuds ou que la basse atmosphère devient instable [19].

II.5 Le brouillard et les précipitations

Le brouillard entraîne couramment des précipitations sous forme de bruine ou de neige très légère. La bruine se produit souvent lorsque l'humidité atteint 100 % et que les fines gouttelettes d'eau formant le brouillard commencent à s'agglutiner en gouttelettes plus grosses. La bruine verglaçante apparaît lorsque la température de l'air descend à moins de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les précipitations aussi peuvent causer du brouillard. Lorsque de la pluie chaude traverse une couche d'air plus frais en tombant, une partie de l'eau de pluie s'évapore et se condense dans l'air frais, ce qui crée du brouillard. Ce type de brouillard peut être assez dense et se maintient en général jusqu'à ce que la pluie se déplace hors de la zone.

Lorsque la pluie tombe sur du brouillard déjà formé, cela améliore souvent la visibilité en défaisant la concentration élevée de fines gouttelettes qui rend les choses difficiles à voir. Il est rare que la visibilité soit inférieure à un kilomètre lors d'un épisode de pluie modérée accompagnée de brouillard. Il en va de même lors d'un épisode de forte pluie, sauf que l'intensité de cette pluie risque de causer aussi des problèmes de visibilité. Par contre, la visibilité est souvent réduite lors d'un épisode de bruine accompagnée de brouillard, sans doute parce que les gouttelettes de bruine sont plus fines et plus nombreuses que les gouttes de pluie [19].

II.6 Méthodes de détection

Le brouillard est un phénomène de fine échelle, résultant de processus physiques complexes, ses différents processus de formation sont très bien connus, mais nous

ne pouvons pas déterminer exactement où et comment le brouillard apparaîtra en fonction du temps. Nous décrivons quelques méthodes utilisées par les prévisionnistes à prendre en compte.

II.6.1 Observations météorologiques classiques par des personnes

Ces observations fournissent les détails les plus précis sur la présence de brouillard et de stratus, avec une fiabilité optimale. Cependant, au sol, les stations effectuant ces observations sont généralement très éloignées les unes des autres, ce qui explique la résolution spatiale limitée de ces données [17].

II.6.2 Stations d'observation automatiques

Ces stations sont de plus en plus courantes, mais elles se limitent souvent à fournir les données météorologiques de base telles que la température, la pression, le point de rosée et le vent. Dans ces cas, les données rapportées peuvent au mieux fournir des indications incertaines sur la présence de brouillard ou de stratus.

Les systèmes automatisés d'observations météorologiques installés dans de nombreux aéroports intègrent un capteur de visibilité qui tente de mesurer la visibilité telle que perçue par l'œil humain. Ce capteur utilise une technique de diffusion avant, émettant une source lumineuse pulsée détectée par un capteur. Des algorithmes convertissent ensuite l'atténuation de la lumière émise en une mesure de visibilité. Cependant, ces capteurs ne disposent pas d'une capacité d'émission directionnelle et supposent que la visibilité est uniforme dans toutes les directions.

En combinant les informations fournies par le capteur de visibilité et celles du célomètre, le prévisionniste peut généralement inférer des informations sur la nature de l'obstacle à la vision [17].

II.6.3 Observations à bord de navires

Les observations effectuées à bord de navires ne fournissent souvent pas d'informations spécifiques sur la visibilité et la hauteur du plafond, offrant plutôt des données plus générales. Cependant, les navires utilisés à des fins de recherche océanographique, glaciologique ou atmosphérique tendent à fournir des renseignements plus détaillés [17].

II.6.4 Les caméras Web

Les caméras Web représentent une ressource précieuse pour les prévisionnistes. Pendant les heures de jour où leur signal est disponible, elles peuvent combler les lacunes entre les stations d'observation traditionnelles, offrant ainsi au prévisionniste un aperçu précis des conditions locales. De plus, la mise à jour fréquente des images, à des intervalles de quelques minutes, permet une excellente résolution temporelle. Bien qu'elles ne fournissent pas d'estimations numériques de la visibilité, les caméras Web peuvent s'avérer particulièrement utiles pour diagnostiquer le brouillard. Dans certains cas, elles peuvent également aider à identifier la présence éventuelle de stratus bas [17].

II.6.5 Télédétection par satellite

La majorité des recherches impliquant l'application de données et d'images satellitaires sont utilisées pour la détection. Dans les endroits où il n'y a pas d'observations in situ ou où il est difficile de mettre en place des sites d'observation, l'importance des données satellitaires joue un rôle crucial dans la prévision. La majorité de la recherche sur la détection du brouillard dans l'imagerie par satellite utilise des canaux infrarouges. Le satellite détecte l'énergie solaire réémise sous forme de chaleur provenant des nuages et des particules atmosphériques dans le canal infrarouge. Pour la détection du brouillard nocturne, les longueurs d'onde de bande dont la portée est d'environ $\sim 3,8$ et ~ 11 μm sont utilisées en raison de leurs propriétés d'émissivité. La méthode de seuillage Brightness Temperature Diference (BTD) est largement utilisée pour détecter le brouillard dans les images satellites. Le concept derrière cette méthode est basé sur l'interaction des gouttelettes de brouillard avec les propriétés d'émissivité et de réflectance de la bande [28].



Figure II-13:Un brouillard capturé par l'instrument MODIS du satellite Terra de la NASA[29].

II.7 Impact du brouillard sur l'aéronautique

II.7.1 Les impacts opérationnels du brouillard

En aéronautique, le brouillard est un facteur limitant la visibilité. Sa capacité à réduire la visibilité au sol en dessous d'un kilomètre peut avoir des conséquences opérationnelles majeures, perturbant considérablement le trafic aérien.

Dans des conditions de brouillard, le débit des départs et arrivées d'avions est souvent réduit. La visibilité compromise affecte tant les pilotes que les contrôleurs aériens, entravant la fluidité des opérations. Dans les cas les plus extrêmes, le brouillard dense peut entraîner des retards importants, des annulations de vols, voire la fermeture temporaire d'aéroports. En prenant l'exemple de l'aéroport international de San Francisco, avec de bonnes conditions visuelles, jusqu'à 60 arrivées par heure sont possibles. Cependant, avec des nuages bas (stratus et brouillard), l'efficacité chute à 25 à 30 arrivées par heure [30].

Aux États-Unis, la météo est responsable de 87% des retards au sol, dont 23% sont dus à des vents défavorables, 35% à des bases de nuages bas, 16% à des

orages, 8% à de la neige et du givrage, 7% à une visibilité limitée, et 11% à d'autres facteurs [30].

II.7.2 Les impacts du brouillard sur la sécurité des vols

Des conditions météorologiques défavorables peuvent être à l'origine d'accidents d'aviation. Des résultats des recherches visaient à identifier les causes, les facteurs contributifs et les problèmes liés aux accidents causés par la météo en aviation générale suggèrent que les facteurs les plus courants causant des accidents mortels liés aux conditions météorologiques sont une faible hauteur de plafond (20 %), le brouillard (14 %), le vent (10 %) et la nuit (9 %) [30].

L'accident du vol PLL LOT149, survenu en 1969, constitue un triste rappel des risques encourus lorsqu'on néglige la visibilité réduite dans l'aviation. Alors qu'il approchait de l'aéroport de Bruxelles-Zaventem, reliant Varsovie à Bruxelles, l'appareil a percuté un arbre, provoquant une inclinaison dangereuse. Bien qu'aucun décès n'ait été déploré, cet incident met en lumière les dangers potentiels d'une faible visibilité.

Malgré des informations indiquant une visibilité de seulement 400 mètres, bien en dessous des 1 100 mètres minimums requis à l'époque, le pilote a poursuivi son approche. Cette décision a eu des conséquences dramatiques, soulignant l'importance capitale de respecter les procédures de sécurité et les minimums de visibilité établis.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre offre une exploration approfondie du phénomène du brouillard et de son influence sur l'aviation. À travers une analyse détaillée de sa définition, de ses différentes manifestations et des moyens de détection.

Chapitre III

LA PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS

Introduction

Le brouillard est un phénomène météorologique de petite échelle. Les différents processus de formation et les types de brouillard sont bien connus, mais leur localisation et leur intensité restent difficiles à prévoir avec précision. Cependant, avec le développement de l'informatique, la prévision du brouillard et d'autres phénomènes météorologiques s'améliore.

Ce chapitre approfondira la prévision numérique du temps. Tout d'abord, nous donnerons un aperçu historique de son développement et des principales fonctions des centres de prévision numérique du temps (PNT). L'objectif principal de ce chapitre est de démontrer les différents modèles utilisés internationalement et nationalement pour la prévision du brouillard. Enfin, nous verrons les différentes méthodes utilisées pour la paramétrisation de la visibilité réduite par le brouillard.

III.1 Définition de la prévision numérique du temps

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 [31]. Les techniques mises en œuvre permettent de résoudre, avec les méthodes du calcul numérique, les équations décrivant le comportement de l'atmosphère, c'est-à-dire de déterminer les valeurs futures de ses grandeurs caractéristiques en partant de valeurs initiales connues grâce aux observations météorologiques [32].

III.2 Historique

À la fin du XIXe siècle, l'école norvégienne de météorologie, avec à sa tête Wilhelm Bjerknes, a posé les bases de la météorologie moderne. L'essor des communications modernes, le télégraphe notamment, a permis la transmission quasi instantanée des résultats de mesures permettant l'établissement de cartes de pression, de température, d'humidité et de vitesse de vent. La prévision du temps s'est concrétisée dans le développement de l'art du prévisionniste à interpréter ces cartes et à les extrapoler dans l'espace et le temps.

Après la Seconde Guerre mondiale, l'essor du calcul scientifique mais aussi de la mesure par sondage passif ou actif (comme avec le radar) ont décuplé les ambitions de la prévision météorologique. Il devenait possible de résoudre de façon plus ou moins approchée les équations aux dérivées partielles qui contrôlent la dynamique de l'atmosphère. Ces équations déterminent l'évolution temporelle et spatiale des quantités physiques et chimiques qui décrivent l'atmosphère comme la température, la pression, le vent, l'humidité, etc., autant de quantités qui sont fondamentales pour la prévision du temps. En première approche, il s'agit de résoudre les équations de la mécanique des fluides d'une couche mince de fluide sur une sphère en rotation en équilibre hydrostatique (c'est-à-dire que le gradient de pression vertical du fluide contre balance la gravité). La comparaison des sorties numériques du modèle, de plus en plus fines, et des cartes de mesures devenait possible [33].

III.3 Les différentes fonctions des centres de PNT

III.3.1 La réception des observations :

On entend par « observation » toute donnée chiffrée caractérisant l'état de l'atmosphère ou des milieux connexes. Ces observations sont très variées, on notera plus particulièrement :

- Les mesures réalisées au niveau du sol par les Services Météorologiques du monde entier, soit dans des stations terrestres, soit sur des bouées en mer.
- Les mesures d'altitude réalisées par des ballons ascensionnels (radiosondages) ou par des radars météorologiques.
- Les mesures réalisées par les satellites météorologiques ou plus généralement les satellites d'observation de la Terre.
- Les mesures réalisées à bord d'avions ou de navires commerciaux [34].

L'Organisation météorologique mondiale dirige les observations en effectuant environ 10^7 observations individuelles toutes les 6 heures. Elles sont réparties sur l'ensemble du globe terrestre et tout est mis en œuvre pour qu'elles arrivent le plus rapidement possible dans les centres de Prévision Numérique du Temps (PNT), en

général moins de trois heures après la réalisation de la mesure. Ces centres doivent posséder des systèmes de télécommunication et de traitement de l'information puissants pour recevoir, traiter et archiver les observations au fur et à mesure de leur disponibilité [33].

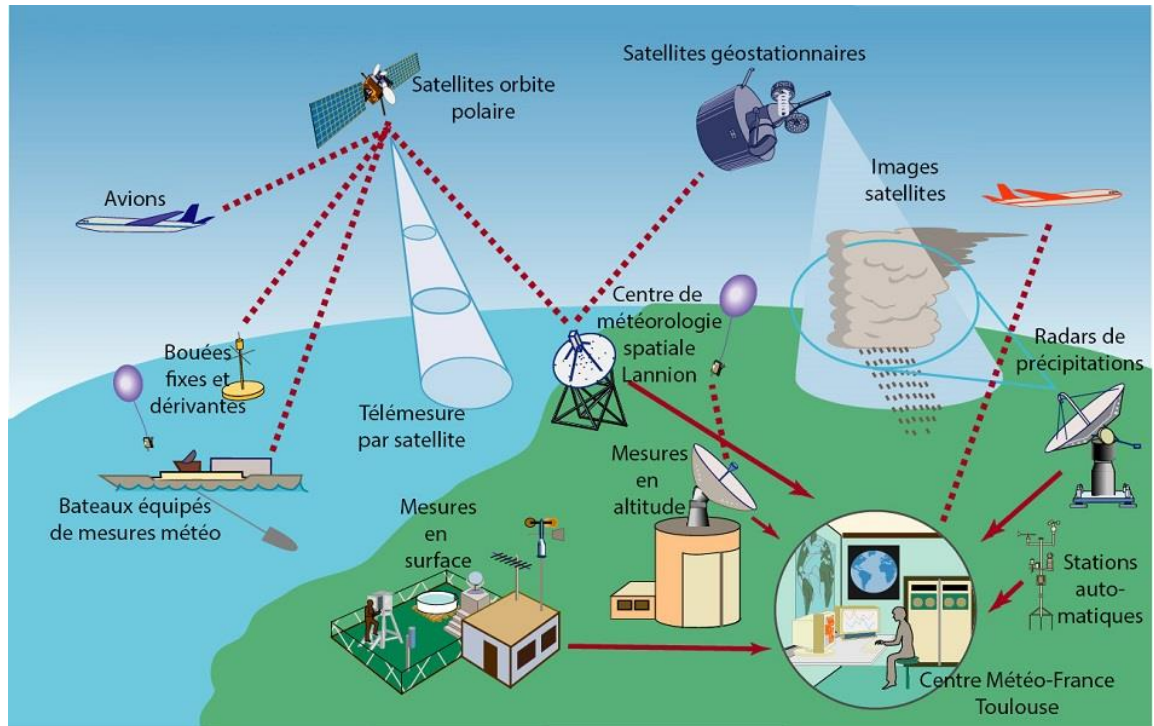


Figure III-1: Les systèmes d'observation utilisés en météorologie opérationnelle [34].

III.3.2 L'examen critique des observations

Cette fonction est généralement faite en comparant des observations voisines, ou bien en comparant chaque observation à une prévision récente du même paramètre. Si l'observation est très différente de la prévision, on aura tendance à la considérer comme suspecte, sauf si elle est confirmée par des observations voisines et indépendantes. Les anomalies constatées sur certaines observations sont signalées aux services originaires, qui peuvent alors prendre des mesures correctives [34].

III.3.3 Assimilation des données

À partir de l'ensemble varié et hétérogène des observations récentes, on produit un « état » de l'atmosphère sous forme de champs mathématiques qui pourront servir à démarrer le modèle de prévision. Cette tâche de production de l'état initial

de la prévision a pour nom Assimilation des données. On vise naturellement à produire l'état initial le plus proche possible de la réalité à un instant donné, mais cela est très difficile car les observations sont toutes affectées de petites incertitudes, ne sont pas synchrones et ne couvrent pas tous les points du globe. Il faut donc interpoler spatialement et temporellement et rechercher l'état initial « le plus probable » compte tenu de l'ensemble des informations disponibles [34].

III.3.4 La prévision proprement dite

Elle est réalisée par un modèle numérique de l'atmosphère. Le modèle résout les équations de la dynamique des fluides et calcule les états successifs pour se projeter dans le temps à 24h, 48h, etc... Les principaux centres de PNT utilisent en fait plusieurs configurations des modèles de prévision : une version couvrant l'ensemble du globe pour une prévision générale à échéance de plusieurs jours, puis une ou plusieurs versions « régionales » couvrant des zones d'intérêt particulier, comme leur territoire national ou leurs régions d'outremer, pour une prévision à échéance plus courte et sur une grille de calcul plus fine [34].

III.3.4.1 La grille de modèle numérique de temps

Une grille de modèle numérique de temps est un réseau en trois dimensions utilisé pour diviser l'atmosphère en zones de mailles de tailles variables. Chacune de ces mailles, ou cellules de grille, est associée à des conditions météorologiques spécifiques à l'endroit qu'elle couvre, telles que la température, la pression, la teneur en humidité, le vent et sa direction.

- **La résolution de la grille**

La résolution de la grille est définie par la distance entre les points de la grille. Plus la résolution est fine, plus les mailles sont petites et plus les données sont précises. Mais une résolution fine nécessite davantage de calculs, ce qui peut ralentir le processus de prévision.

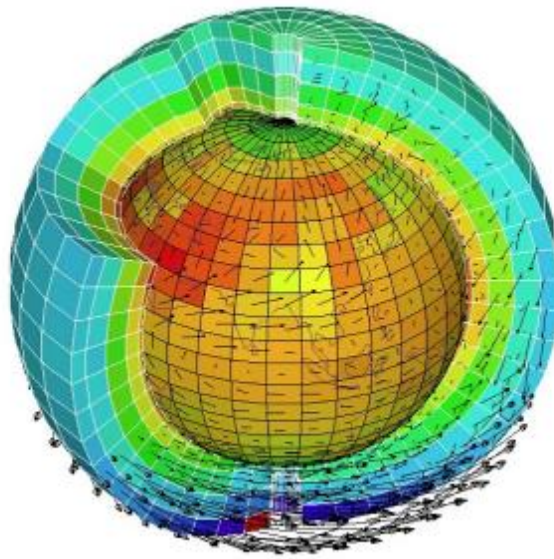


Figure III-2: La grille du modèle numérique[35].

III.3.5 L'art du prévisionniste

Les prévisions du modèle sont ensuite soumises à l'expérience du prévisionniste. S'appuyant sur son expérience, il peut détecter une anomalie dans la prévision, et le cas échéant la corriger avant diffusion aux clients, dont le grand public et les médias. Les prévisions sont ensuite communiquées au grand public, via Internet, la télévision et la radio. Elles sont aussi produites à la demande de clients spécifiques [33].

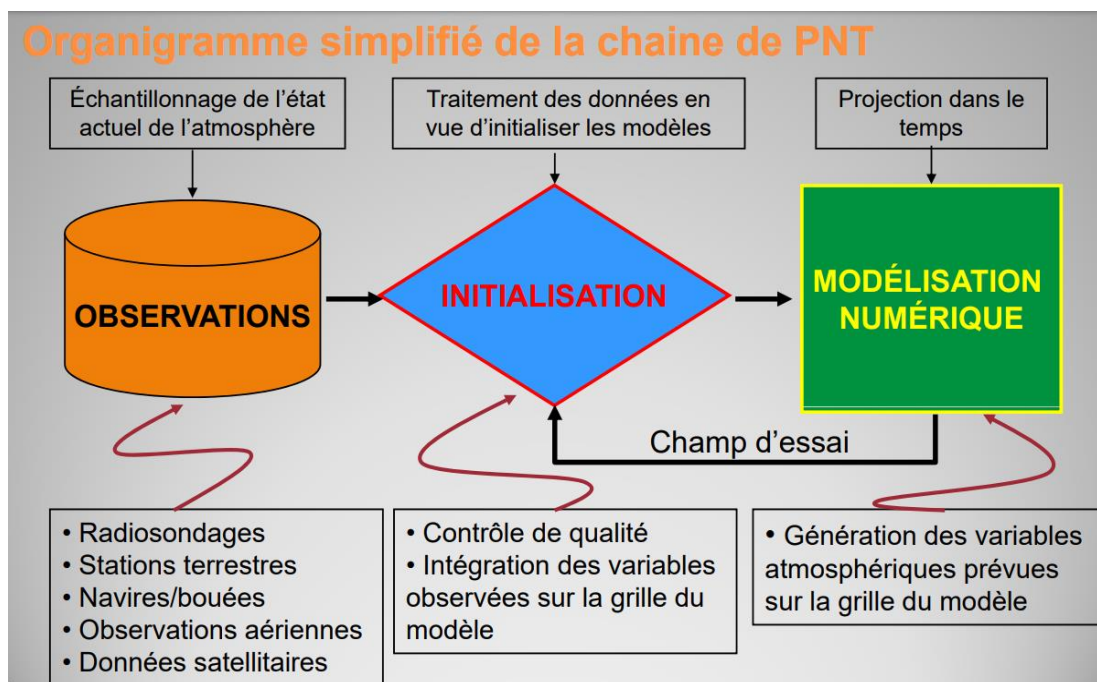


Figure III-3: Organigramme simplifié de la chaîne de PNT [36].

III.4 La qualité des prévisions

La qualité de l'information numérique est cependant conditionnée par les incertitudes inhérentes à la connaissance de l'état de l'atmosphère à un instant donné et aussi par les limitations imposées aux modèles de prévision. Les incertitudes inhérentes à l'observation de l'atmosphère et à l'utilisation d'observations irrégulièrement réparties sur le globe sont des facteurs d'erreur introduits dans l'analyse [37].

Par exemple la température est en général prévue avec une erreur ne dépassant pas quelques degrés, et que cette petite erreur 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 [34].

III.5 Prévision du brouillard à l'aide des modèles PNT

III.5.1 Le modèle COBEL

COBEL (acronyme de "Code de brouillard à l'échelle locale") est un modèle 1D Développé en France par le Laboratoire d'Aérodynamique et le CNRM Ce modèle a été conçu initialement pour simuler l'évolution de la couche limite atmosphérique en condition stable à très stable. Il est couplé à un modèle 3D de prévision numérique pour prendre en compte la circulation à mésoéchelle.

Le modèle COBEL inclut une paramétrisation turbulente spécialement adaptée aux couches stables ainsi qu'un schéma radiatif à haute résolution spectrale. La résolution verticale utilisée pour les prévisions opérationnelles est très fine (20 niveaux verticaux dans les 200 premiers mètres) de manière à avoir une représentation très précise de la structure de la couche limite atmosphérique nocturne[38].

III.5.2 Le modèle WRF

Le WRF (Weather Research and Forecasting Model) est un système de prévision météorologique numérique à méso-échelle de pointe conçu pour les applications de recherche atmosphérique et de prévision opérationnelle. Il comporte deux cœurs dynamiques, un système d'assimilation de données et une architecture logicielle prenant en charge le calcul parallèle et l'extensibilité du système. Le modèle sert à un large éventail d'applications météorologiques à des échelles allant de quelques

dizaines de mètres à plusieurs milliers de kilomètres. L'effort pour développer le WRF a commencé à la fin des années 1990.

Pour les chercheurs, WRF peut produire des simulations basées sur les conditions atmosphériques réelles (c'est-à-dire à partir d'observations et d'analyses) ou de conditions idéalisées. WRF offre aux prévisions opérationnelles une plate-forme flexible et efficace sur le plan informatique, tout en reflétant les progrès récents en physique, en numérique et en assimilation de données apportés par les développeurs de la vaste communauté de recherche. WRF est actuellement utilisé opérationnellement au les Centres nationaux de prévision environnementale (NCEP) et dans d'autres centres météorologiques nationaux, ainsi que dans des configurations de prévision en temps réel dans des laboratoires, des universités et des entreprises [39].

III.5.3 Le modèle Arpège

Le Système de Prédiction Numérique Planétaire Arpège est un élément essentiel de la prévision météo opérationnelle de Météo France.

Il fait partie intégrante du logiciel Arpège IFS et est conçu, développé et maintenu en collaboration avec l'ECMWF.

Le modèle Arpège fonctionne à une résolution horizontale d'environ 7,5 km en France et 35 km aux Antipodes. Il traite des données telles que : vent, température, humidité : vapeur d'eau, eau liquide, cristaux de glace, pluie, neige, processus physiques tels que : rayonnement, physique microscopique, processus de surface, phénomènes de sous-grille : turbulence, convection. Il permet de prédire l'évolution de phénomènes de grande échelle (dépressions, anticyclones) et pour la prévision jusqu'à 3-4 jours d'échéance.

III.6 Les principaux modèles utilisés a l'ONM

III.6.1 Le modèle ALADIN

ALADIN, qui signifie Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International, est un modèle qui réalise de manière opérationnelle des adaptations dynamiques à des échelles relativement fines. L'adaptation dynamique consiste à interpoler des champs fournis à différents instants par un modèle dit de « grande

échelle » et à intégrer un modèle plus fin avec les champs issus de cette interpolation de manière à les adapter à un relief et à des conditions de surface plus détaillées.

Le modèle ALADIN est une collaboration mutuellement bénéfique entre Météo France et les services météorologiques nationaux d'Europe centrale et orientale dans le domaine de la prévision numérique du temps. Le modèle ALADIN est conçu sur la notion de compatibilité avec le système « père » Arpège/IFS [40].

ALADIN-Algérie est utilisé en opérationnel à l'ONM depuis novembre 2006[41].

Tableau III-1: Caractéristiques principales de ALADIN/Algérie [36].

Couverture	Maille fixe de 8 km centrée sur l'Algérie
Résolution verticale	70 niveaux allant de 17 mètres à 67 kilomètres d'altitude
Couplage	Couplé au modèle ARPEGE toutes les 3 heures
Fréquence des sorties	Deux fichiers de sortie par jour (00h et 12h)
Échéance maximale	Prévisions jusqu'à 72 heures (3 jours)

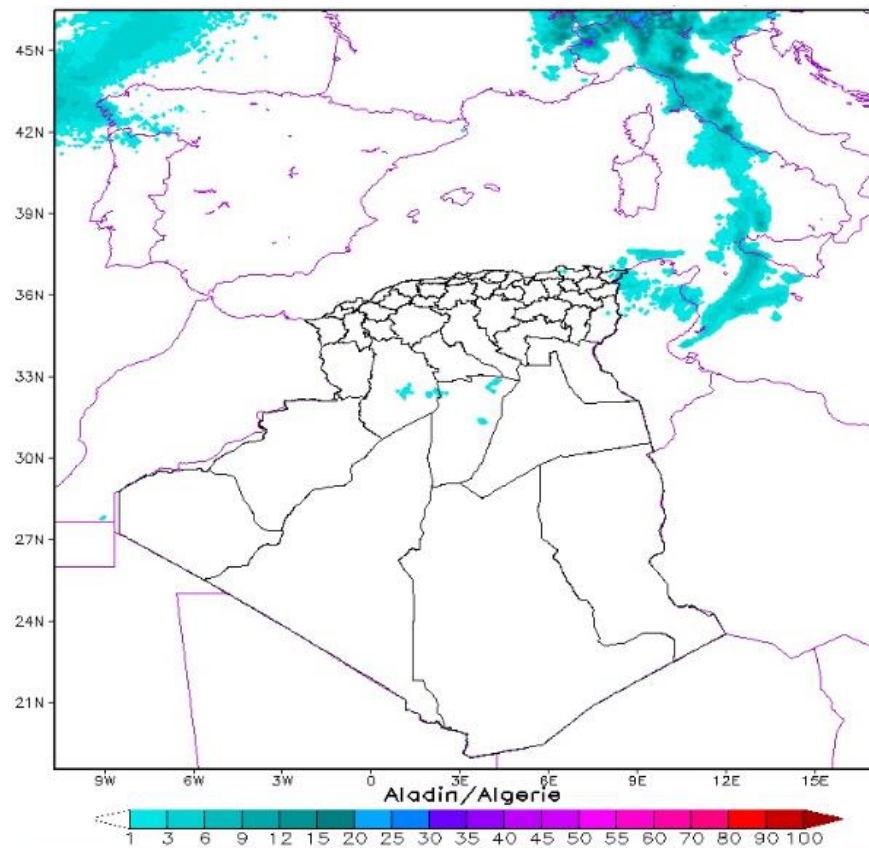


Figure III-4 : Domaine Aladin/Algérie[41].

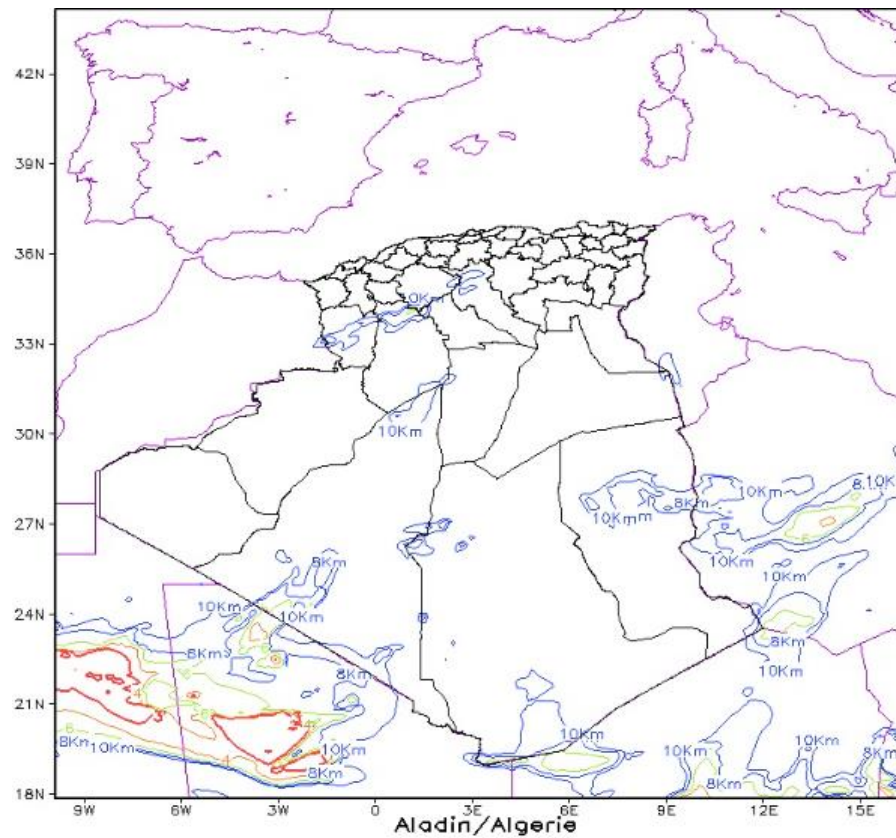
III.6.2 ALADIN-SABLE

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

ALADIN_SABLE 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 [41].

Tableau III-2:Caractéristiques principales ALADIN-SABLE /Algérie [36].

Couverture	Maille fixe 14km centrée sur l'Algérie
Résolution verticale	70 niveaux allant de 17 mètres à 67 kilomètres d'altitude
Couplage	Couplé au modèle ARPEGE toutes les 3 heures
Fréquence des sorties	Deux fichiers de sortie par jour (00h et 12h)
Échéance maximale	Prévisions jusqu'à 72 heures (3 jours)

**Figure III-5 :** Domaine Aladin-sable/Algérie[41].

III.6.3 **AROME**

Le modèle AROME (Application de la Recherche à l'Opérationnel à Mésos-Echelle) est le modèle de prévision numérique du temps à maille fine exploité en opérationnel à Météo-France. Il est opérationnel depuis décembre 2008. Il a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux tels que les fortes pluies méditerranéennes, les orages violents, le brouillard ou les îlots de chaleur urbains en période de canicule [42].

Le modèle AROME est utilisé par l'ONM pour la modélisation à échelle fine. Il est opérationnel depuis Mars 2014[41].

Tableau III-3:Caractéristiques principales AROME/Algérie [36]

Couverture	Maille fixe 3km
Résolution verticale	41 niveaux
Couplage	Couplé à ALADIN toutes les heures
Fréquence des sorties	Deux fichiers de sortie par jour (00h et 12h)
Échéance maximale	Maximum 48heures

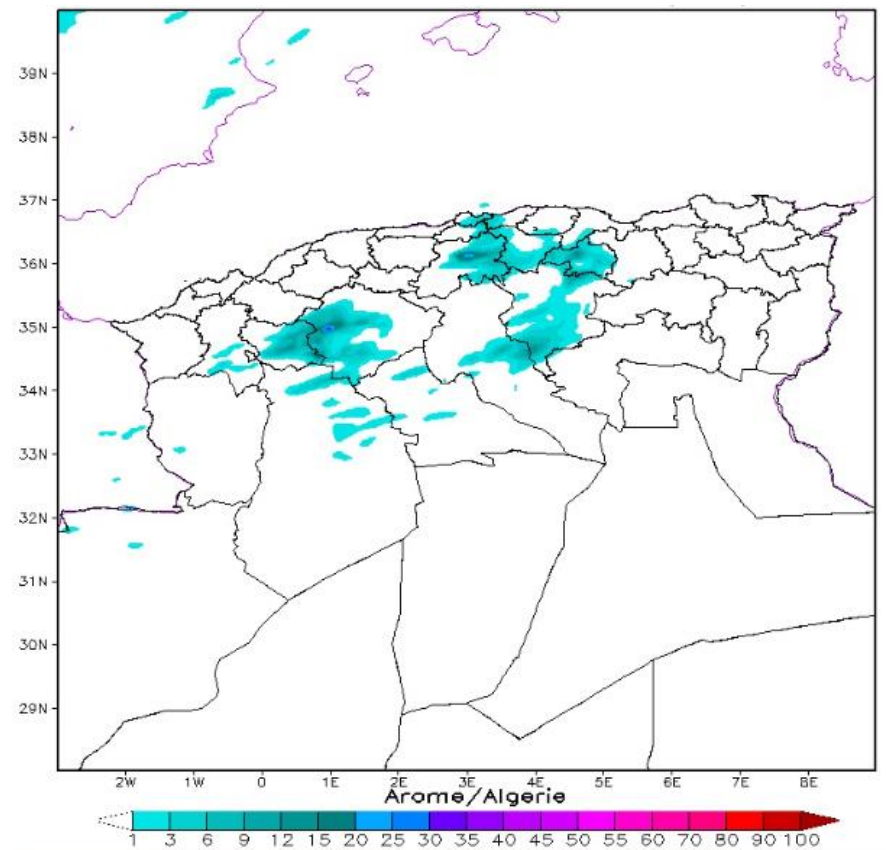


Figure III-6 : Domaine AROME/Algérie[41]

III.6.3.1 Caractéristiques du modèle de prévision AROME

Le modèle de prévision AROME est intégré dans l'ensemble de la base logicielle commune aux modèles IFS, ARPEGE et ALADIN. Il hérite à la fois des codes du modèle opérationnel ALADIN, pour le cœur dynamique du modèle, et du modèle communautaire de recherche MESO-NH, pour les paramétrisations physiques. AROME se distinguera des modèles opérationnels actuels principalement par :

- Une amélioration substantielle de la résolution horizontale** : Il vise un maillage comparable à 2-3 km, soit une résolution quatre fois plus fine que le modèle opérationnel ALADIN-France.

- Un système d'équations plus précis que les autres modèles opérationnels** : il ne repose pas sur approximation hydrostatique qui limite la précision des prévisions à des résolutions fines.

-Une représentation plus fine du cycle de l'eau : Dans le modèle AROME permettra une meilleure représentation des processus microphysiques par L'intégration de six équations d'évolution temporelle. Le modèle simulera différentes catégories d'hydrométéores telles que l'eau liquide nuageuse, l'eau liquide précipitante, la glace primaire, le grésil et la neige roulée.

-Des paramétrisations plus avancées des phénomènes sous-maille : AROME prendra également connaissance d'autres paramètres du modèle de recherche MESO-NH. La paramétrisation des mouvements turbulents sous-maille repose principalement sur une équation d'évolution de l'énergie cinétique turbulente avec une fermeture d'environ 1,5.

III.6.3.2 La prévision de brouillard par AROME

La prévision du brouillard est un enjeu institutionnel essentiel. D'après l'analyse d'une dizaine de cas favorables au brouillard pendant l'hiver 2005-2006, il a été démontré qu'Arôme apporte déjà une valeur ajoutée significative, que l'on continue d'améliorer en considérablement son initialisation, sa modélisation et son intégration avec le modèle local de brouillard COBEL [43].

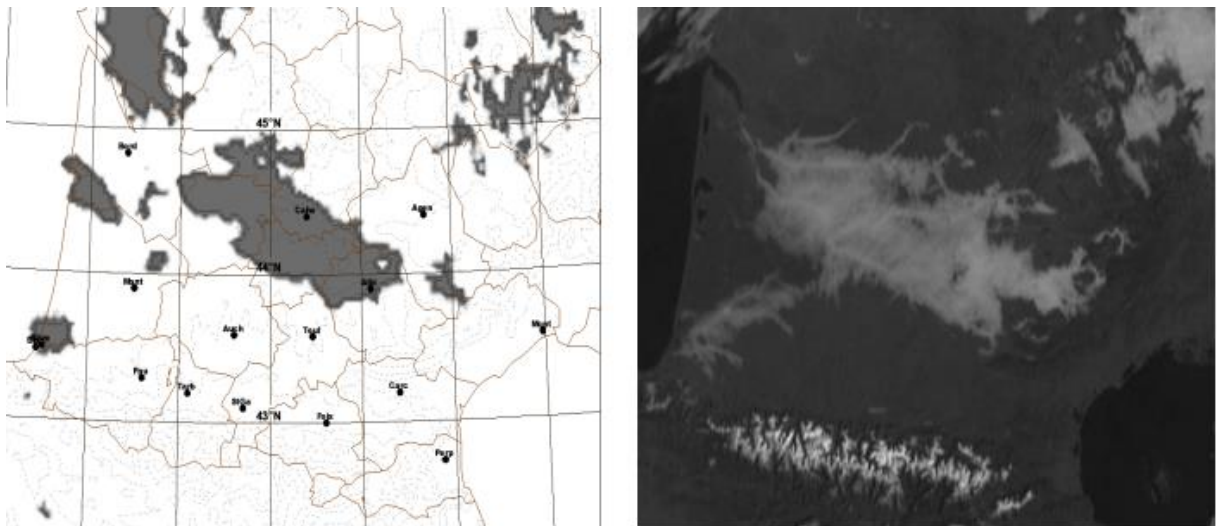


Figure III-7 : la Prévision de brouillard par Arôme et l'image satellite Météosat [43]

À gauche, la représentation en gris correspond aux prévisions de brouillard, tandis qu'à droite, l'image satellite Météosat montre les zones concernées par le brouillard en gris clair. Ceci illustre la situation sur le sud-ouest de la France le 11 novembre 2005.

III.7 Paramétrisation de la visibilité

III.7.1 Paramétrisation de la visibilité en fonction de la teneur en eau liquide (LWC)

Dans cette formule La visibilité est calculée uniquement à partir de la teneur en eau liquide nuageuse (LWC) en suivant l'algorithme de Kunkel (1984)[44] :

$$\text{Vis(LWC)} = - \frac{\ln(0.02)}{144.7(\text{LWC})^{0.88}} \quad \text{(III.1)}$$

III.7.2 Développement de méthodes et de paramétrages

La relation entre la visibilité et le brouillard était auparavant simplifiée à une question de teneur en eau liquide (LWC), comme le décrivait Kunkel en 1984.

Des recherches plus récentes menées par Gulpe et al ont intégrées un nouveau paramétrage pour prédire la visibilité dans le brouillard pour les modèles de prévision météorologique numérique. Ils ont utilisé des données d'observations in situ recueillies pendant la campagne FRAM (Field of Radiometry and Modeling of Fog) en Ontario, Canada, pendant l'hiver 2005-2006.

Leur nouveau paramétrage a montré une relation non linéaire entre la visibilité (Vis) et la teneur en eau liquide (LWC) et la concentration en nombre de gouttelettes (Nd).

- **Calcul du paramètre d'extinction :**

Le paramètre d'extinction (β) est calculé à partir des mesures de la sonde FSSP en utilisant la relation suivante :

$$\beta_{\text{ext}} = \sum Q_{\text{ext}} n(r) \pi r^2 dr \quad \text{(III.2)}$$

Où :

n : est la densité numérique des particules dans une taille de bac sous forme de rayon (r).

Q_{ext} : est le coefficient d'extinction de Mie. Lié à la concentration numérique, au rayon des particules et à la longueur d'onde de la lumière visible.

Pour les gouttes d'eau, β_{ext} approche 2 lorsque le rayon des gouttes dépasse 4 μm et pour les gouttes d'eau plus petites que 4 μm , β_{ext} varie entre 3,8 et 0,9[45].

- **Conversion de l'extinction en visibilité :**

L'extinction (β) est convertie en visibilité (Vis) à l'aide d'une équation [45] :

$$vis = - \frac{\ln(0.02)}{\beta_{ext}} \quad (\text{III.3})$$

III.7.2.1 Paramétrage de la visibilité par rapport à Nd et LWC:

En utilisant les observations in situ recueillies pendant l'expérience Radiation and Aerosol Climate Experiment (RACE) , LWC, Nd, et β_{ext} sont utilisés pour obtenir une relation entre Visobs et $(LWC, Nd)^{-1}$ (appelé indice de brouillard) comme [45]:

$$Vis(LWC, Nd) = \frac{1}{(LWC \cdot Nd)^{0.65}} \quad (\text{III.4})$$

Gultepe et Isaac (1997) proposent une méthode pour déterminer Nd en fonction de la température à l'aide de l'équation suivante :

$$Nd = - 0.071T^2 + 2.213T + 141.56 \quad (\text{III.5})$$

Où :

Nd est exprimée en cm^{-3} et T en $^{\circ}\text{C}$. On remarquera qu'il y a une grande variabilité dans cette relation et que l'équation peut dépendre fortement de la nature et de la quantité des noyaux de condensation des nuages, et non seulement de la température [17].

III.7.2.2 La visibilité en fonction de l'humidité relative par rapport à l'eau

L'humidité relative (HR) est le rapport entre la quantité de vapeur d'eau réellement présente dans l'air et la quantité maximale de vapeur d'eau nécessaire à la saturation à cette température (et pression) particulière. Il s'agit du rapport entre la teneur en vapeur d'eau de l'air et sa capacité [46].

L'équation suivante permet d'obtenir la visibilité (en km) en fonction de l'humidité relative HR (en %) [17] :

$$\text{Vis(Hr)} = -41.5 \ln(\text{HR}) + 192.3 \quad (\text{III.6})$$

III.7.3 La visibilité en AROME

Le calcul de la visibilité repose sur la formule de Koschmieder qui relie la visibilité horizontale aux coefficients d'extinction des différents hydrométéores (eau liquide, glace, neige, pluie et grésil). Les équations de base sont les suivantes [47]:

$$\text{PVISICLD} = \frac{-\ln(0,05)}{0,013 + \beta_{\text{cld}} + \beta_{\text{ice}}} \quad (\text{III.7})$$

D'où :

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

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

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

$$\text{PVISIHVD} = \frac{-\ln(0,05)}{0,013 + \beta_{\text{rain}} + \beta_{\text{snow}} + \beta_{\text{graupel}}} \quad (\text{III.8})$$

D'où :

PVISIHVD : Visibilité due aux hydrométéores en mètres.

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

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

β_{graupel} : Coefficient d'extinction dû au grésil.

Remarque :

Les coefficients d'extinction β sont calculés en utilisant cette relation : $\beta = a \cdot C^b$

D'où :

C : Teneur en hydrométéores (eau - glace - pluie - neige - grésil).

a, b : Coefficients déterminés empiriquement.

Conclusion

La prévision numérique du temps joue un rôle important dans la prévision du brouillard. Nous avons présenté les centres de prévision numérique du temps (PNT) et la qualité de leurs prévisions. Nous avons également cité les modèles de prévision utilisés et donné un aperçu des méthodes de paramétrisation de la visibilité.

ChapitreIV

VALIDATION DES RESULTATS

Introduction

Ce quatrième chapitre représente la partie pratique de notre mémoire de fin d'études, visant à améliorer la précision des prévisions numériques concernant le brouillard et la brume, deux paramètres cruciaux influençant la visibilité. Dans ce contexte, nous les données METAR de l'aérodrome DAAG seront exploitées pour valider les résultats donnés par les équations de visibilité mentionnées dans le chapitre précédent avec les sorties du modèle AROME.

IV.1 La zone d'étude

La région d'Alger a été choisie comme zone d'étude en raison de la présence de l'aéroport international Houari Boumediene d'Alger(DAAG). Le tableau ci-dessous présente les coordonnées géographiques de cet aéroport :

Tableau IV-1 : Les coordonnées géographiques de l'aéroport DAAG

Code OACI	Code IATA	Altitude	Latitude	Longitude
DAAG	ALG	25m	36°41'40" Nord	3°13'01" Est

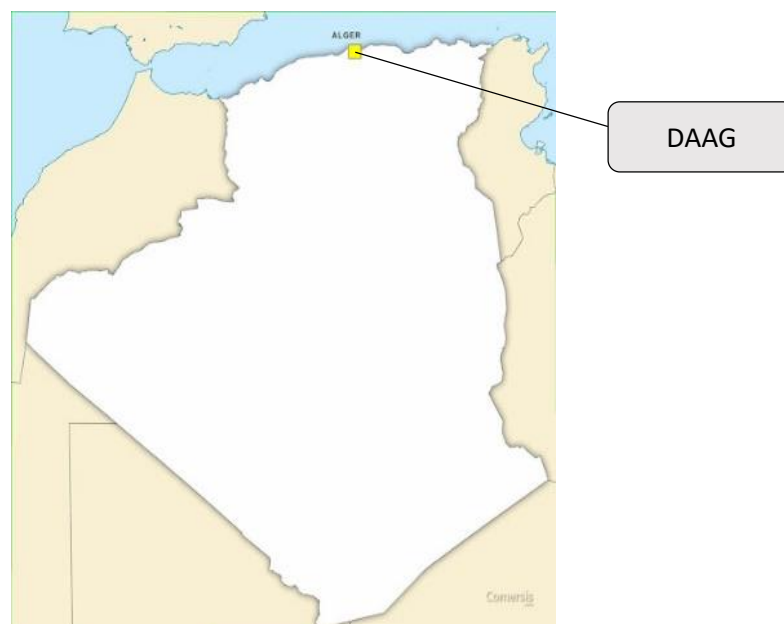


Figure IV-1:localisation de l'aéroport houari Boumediene DAAG.

IV.2 Les données utilisées :

IV.2.1 Les données des visibilités observées

Nous avons utilisé les visibilités observées sur une période totale de 55 jours, pendant deux mois. Nous avons choisi 27 jours du mois de janvier et 28 jours du mois de février de l'année 2022. Ces données ont été extraites des messages METAR (METeorological Airport Report) fournis par OGIMET. Ce dernier est un outil en ligne largement utilisé pour accéder aux données météorologiques du monde entier, fournissant aux utilisateurs des informations météorologiques en temps réel et historiques.

IV.2.2 Les équations empiriques utilisées pour l'étude

Pour modéliser la prévision de la visibilité réduite par le brouillard, nous allons utiliser différentes équations empiriques présentées dans le tableau ci-dessous. Ces équations ont été étudiées et discutées en détail dans le chapitre précédent.

Tableau IV-2: Équations empiriques pour la prévision de la visibilité réduite par le brouillard

Le paramètre utilisé dans l'équation de Paramétrisation	L'équation de la paramétrisation.
En fonction du contenu en eau liquide (LWC)	$\text{Vis(LWC)} = - \frac{\ln(0.02)}{144.7(\text{LWC})^{0.88}}$
En fonction de LWC et la concentration numérique des gouttelettes (Nd)	$\text{Vis(LWC,Nd)} = \frac{1}{(\text{LWC.Nd})^{0.65}}$
En fonction de l'humidité relative (HR)	$\text{Vis(Hr)} = - 41.5 \ln (\text{HR}) + 192.3$

IV.3 Méthodologie :

IV.3.1 Calcul de la visibilité

Notre travail consiste tout d'abord à calculer la visibilité en utilisant les différentes formules présentées dans le tableau. Pour ce faire, nous avons développé des programmes en langage R dans lesquels nous avons intégré les données d'entrée (LWC, température et humidité relative). Ces programmes permettent ensuite de calculer la visibilité. Et puisque notre but est d'améliorer la prévision du brouillard, on choisit la méthode du minimum, où nous prenons la valeur minimale de visibilité chaque heure. Cette approche permet de capturer les conditions les plus brumeuses afin d'affiner les prévisions.

IV.3.2 L'étude et l'analyse des situations météorologiques

IV.3.2.1 La situation de la journée 21 Janvier 2022

Pour une analyse approfondie, nous avons choisi la journée du 21 janvier 2022 comme échantillon afin de comparer les visibilités aux observations. Ces valeurs exprimées en mètre et données chaque heure de (3h00 du matin à 10 du matin) sont présentées dans le tableau :

Tableau IV-3:les visibilités calculées et les observations enregistrées en (m)

Heure	V(LWC)	V(LWC,Nd)	V(Hr)	V(AROME)	V(OBS)
3	48,02711	192,5071	10000	124,0572	4000
4	44,24975	176,6204	10000	117,5524	200
5	42,23632	168,2359	10000	113,9468	200
6	40,37951	159,911	10000	110,5287	900
7	36,49862	142,9733	10000	103,068	4000
8	38,04817	149,3384	10000	106,1021	3700
9	40,87662	158,2869	10000	111,4537	6000
10	1133,754	6787,038	10000	1052,071	8000

Les résultats de tableaux sont présentés graphiquement :

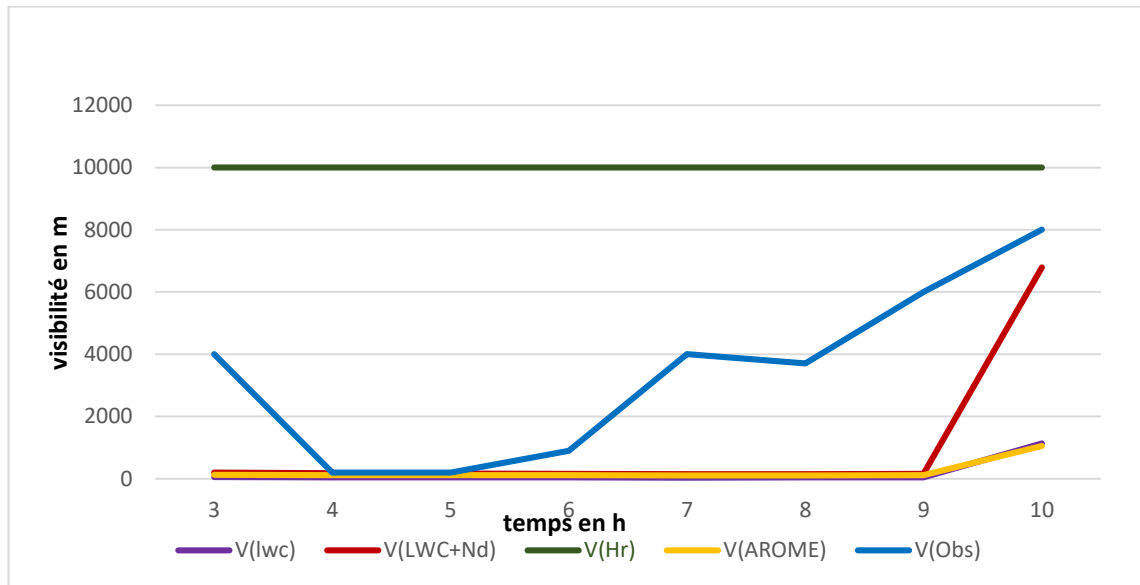


Figure IV-2:les visibilités(m) en fonction du temps (h)

Analyse de graphe :

Pour la visibilité en fonction de l'humidité relative V(Hr) il est notable que de 3 :00h jusqu'au 10 :00h la visibilité est supérieure à 10Km.

Pour une meilleure visualisation, nous avons créé un deuxième graphe sans les valeurs de visibilité en fonction de l'humidité relative(Hr) est les valeurs dont la visibilité est bonne et où le brouillard et la brume n'existent pas sont considérées comme 5000 m.

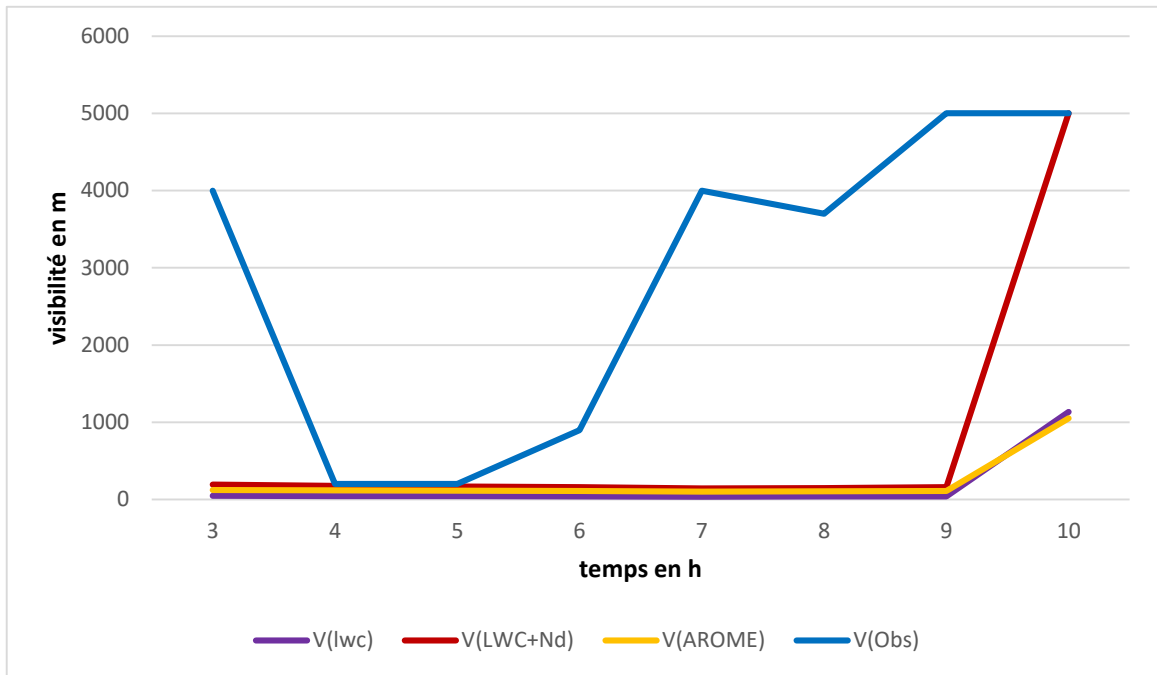


Figure IV-3: Les Visibilités V(LWC),V(LWC,Nd),V(Arome),V(OBS)

-On observe que les visibilités V(LWC), V(LWC,Nd) et V(AROME) suivent une tendance similaire. De 3h à 9h, la visibilité est inférieure à 1 km, indiquant la présence de brouillard. À partir de 9h, elle augmente progressivement pour dépasser 1 km, signalant la dissipation du brouillard. La visibilité V (LWC,Nd) continue de s'améliorer, atteignant et dépassant 5 km.

-Pour les observations À partir de 3h, la visibilité commence à diminuer, indiquant la présence de brouillard. Elle atteint une valeur minimale de 200 mètres à 4h. De 4h à 6h, elle reste inférieure à 1 km.

Entre 6h et 9h, on observe la présence de brume (visibilité entre 1 et 5 km). De 9h à 10h, la visibilité est très bonne.

IV.3.2.2 La situation de la journée de 25-02-2022

Le tableau ci-dessus expose les résultats de paramétrisation de la visibilité ainsi que les observations enregistrées sur la zone d'Alger, exprimées en m et données en fonction du temps pour la journée du 25-02-2022.

Tableau IV-4: les visibilités calculées et les observations enregistrées pour la journée 25-02-2022

T(H)	V(LWC)	V(LWC,ND)	V(HR)	V(AROME)	V(OBS)
0	235,3002	1114,735	10000	318.0605	8000
1	20,98353	71,87269	10000	67,3407	500
2	17,00031	56,82112	10000	55,97777	300
4	18,57393	62,60731	10000	60,60765	800
5	19,55992	66,65474	10000	63,41208	300
6	22,0286	75,96288	10000	70,13736	300
7	19,40547	66,27365	10000	62,97795	300
8	21,34845	73,60684	10000	68,32455	4000

Le Graphe

Les données du tableau sont illustrées de manière graphique ci-dessus :

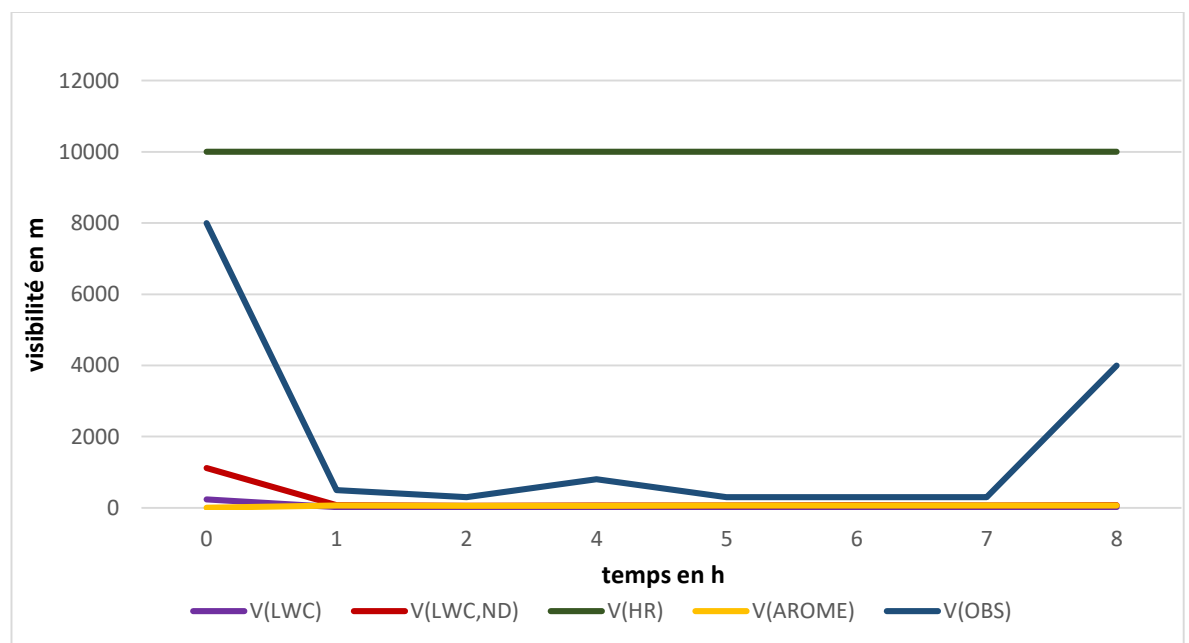


Figure IV-4: les visibilités en (m) en fonction de temps (h)

Analyse du graphe :

-pour tous les échéances étudiées on remarque que la paramétrisation de visibilité en fonction de l'humidité relative dépasse 1000m ,ce qui indique qu'il n'y a pas de brouillard.

Le graphe presente les valeurs de $V(LWC)$, $V(LWC,ND)$, $V(AROME)$, $V(OBS)$ pour une analyse precise Où l'on a considéré que toutes les bonnes visibilités sont égales à 5000 mètres.

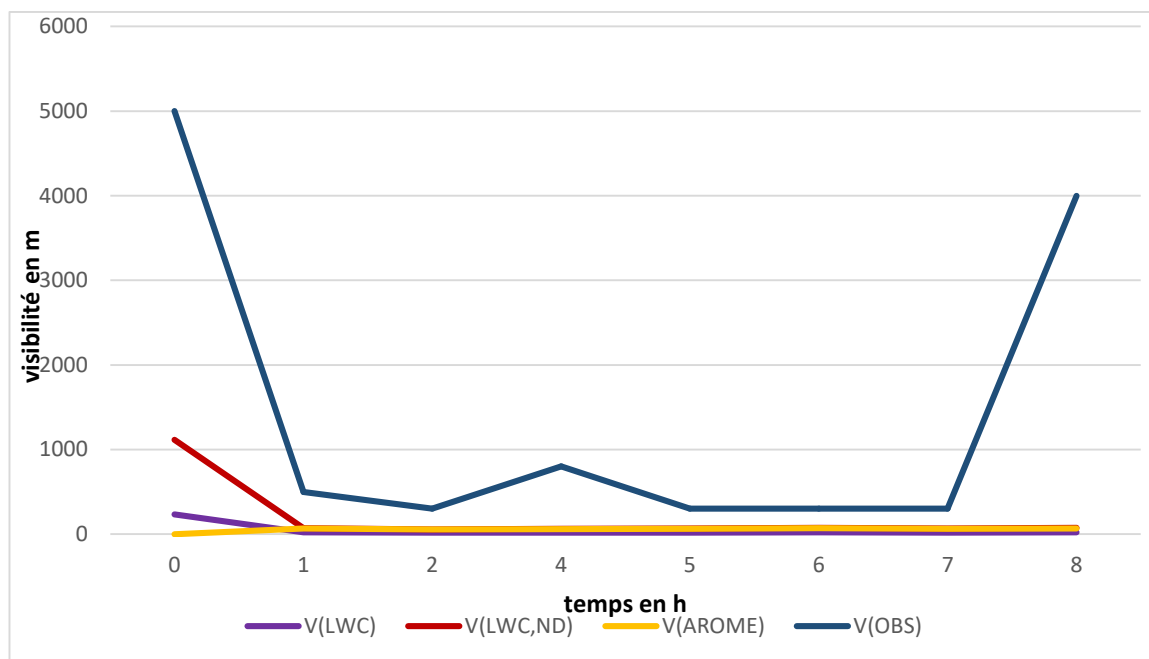


Figure IV-5: les visibilités $v(LWC)$, $v(LWC,nd)$, $v(arome)$, $v(obs)$

Analyse de graphe :

-Nous observons que les valeurs des observations diminuent à partir de minuit, où la visibilité était initialement claire. Durant cette période, des brumes sont observées et la visibilité continue de diminuer jusqu'à 1 heure on remarque la présence de brouillard où les valeurs sont inférieures à 1000 mètres. Par la suite, bien que la brume persiste, la visibilité commence à augmenter progressivement.

À partir minuit, la visibilité en fonction de LWC et ND a commencé à se dégrader, sa valeur initiale était supérieure à 1000 mètres, atteignant précisément 1114,735 mètres.

Après minuit, Une diminution graduelle a été constatée, ou La visibilité atteint son point le plus bas à 56,82112 mètres ce qui confirme la présence de brouillard.

A Minuit : Les paramétrisations $v(LWC)$ et $V(arome)$ ont produit des valeurs de visibilité similaires qui diminuaient graduellement, indiquant la présence de brouillard dès minuit.

Les deux paramétrages ont mesuré les valeurs minimales de visibilité à 2 heures, ce qui confirme la présence de brouillard dense à ce moment-là. Toute la période d'étude, les valeurs de visibilité sont restées inférieures à 1000 mètres jusqu'à 8 heures, attestant de la persistance du brouillard tout au long de la période d'étude

Conclusion :

Selon l'analyse des données et des observations, il est confirmé que le brouillard s'est formé et a persisté pendant la période étudiée. On a constaté que :

- La qualité de la prévision de la visibilité en fonction de l'humidité relative $V(Hr)$ est très mauvaise et ne correspond pas aux observations.
- Les formules de prévision de la visibilité basées sur la teneur en liquide $V(LWC)$, la concentration en nombre de gouttelettes $V(LWC, Nd)$ et le modèle AROME $V(AROME)$ ont bien prédit le phénomène de brouillard.
- Parmi ces méthodes, la formule $V(LWC, Nd)$ offre la meilleure qualité de prévision.

IV.3.3 L'étude et l'analyse globale des données :

IV.3.3.1 Tableau de contingence

Dans le but d'une Analyse exhaustive et Après avoir calculé les visibilités par les équations empiriques, nous passons à la création d'une table de contingence entre les observations et les prévisions pour chaque formule, tous d'abord on va focaliser sur le classement de nos visibilités en 3 groupes selon les critères suivants :

- Very Bad (Brouillard) : visibilité inférieure ou égale à 1000m.
- Bad (Brume) : visibilité entre 1000m et 5000m.
- Good : visibilité supérieure ou égales à 5000m.

Tableau IV-5:table de contingence

		Prévision			
		Very bad	Bad	Good	Somme
Observation	Very bad	a	b	c	J
	Bad	d	e	f	K
	Good	g	h	i	L
	Somme	M	N	O	T

Les indices :

A partir de cette table de contingence, on a calculé trois (3) indices pour évaluer la qualité de la prévision :

Pourcentage correcte (PC) : Ce score indique la proportion de prévisions correctes. Il varie de 0 à 1,

1 étant le score parfait. Cependant, ce score peut être trompeur car il est fortement influencé par la catégorie la plus fréquente, généralement aucun événement dans le cas d'événements rares. Il est calculé à l'aide de la formule :

$$PC = \frac{a+e+i}{T} * 100 \quad (\text{IV.1})$$

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

$$POD = \frac{e+d+e}{K+J} * 100 \quad (\text{IV.2})$$

Le taux de fausses alarmes (FAR) indique le pourcentage d'événements "oui" prédits qui ne se sont finalement pas produits. Le score FAR varie de 0 à 1, la valeur parfaite étant 0. Ce score est sensible aux fausses alarmes et ignore les omissions (événements non prédits qui se sont produits). Il est également très sensible à la

fréquence climatologique de l'événement (la probabilité naturelle qu'il se produise)
Il est calculé à l'aide de la formule :

$$FAR = \frac{g+h}{N+M} * 100 \quad (IV.3)$$

IV.3.3.2 Table de contingence de toute la période étudiée

Nous avons mené notre étude en analysant toute l'ensemble de la période ensuite nous avons examiné chaque période séparément les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous

Remarque

La paramétrisation de la visibilité en fonction de l'humidité relative a donné des valeurs de visibilité supérieure à 10Km pendant toute la période choisie cela la rend inutile pour notre étude qui se concentre sur la prévision du brouillard.

Par conséquent, nous allons l'éliminer de l'étude globale

Formule (LWC)**Tableau IV-6:** Table de contingence pour la formule(LWC).

Observation	prévision				
	ALL				
		VERY BAD	BAD	GOOD	SUM
	VERY BAD	49	1	3	53
	BAD	57	0	2	59
	GOOD	779	114	242	1135
	TOTAL	885	115	247	1247
	JANVIER				
		VERY BAD	BAD	GOOD	SUM
	VERY BAD	40	1	3	44
	BAD	40	0	2	42
	GOOD	361	60	98	519
	TOTAL	441	61	103	605
	FEVRIER				
		VERY BAD	BAD	GOOD	SUM
	VERY BAD	9	0	0	9
	BAD	17	0	0	17
	GOOD	418	54	144	616
	TOTAL	444	54	144	642

Formule (LWC,Nd)

Tableau IV-7: Tableau de contingence pour la formule(LWC,Nd).

OBSERVATION	prévision				
	ALL				
		VERY BAD	BAD	GOOD	SUM
	VERY BAD	45	3	5	53
	BAD	52	4	3	59
	GOOD	664	107	364	1135
	TOTAL	761	114	372	1247
	JANVIER				
		VERY BAD	BAD	GOOD	SUM
	VERY BAD	37	2	5	44
	BAD	38	2	2	42
	GOOD	296	59	164	519
	TOTAL	371	63	171	605
	FEVRIER				
		VERY BAD	BAD	GOOD	SUM
	VERY BAD	8	1	0	9
	BAD	14	2	1	17
	GOOD	368	48	200	616
	TOTAL	390	51	201	642

Formule (AROME)

Tableau IV-8: Table de contingence pour la formule(AROME).

OBSERVATION	Prévision				
	ALL				
		VERY BAD	BAD	GOOD	SUM
	VERY BAD	49	1	3	53
	BAD	57	0	2	59
	GOOD	784	96	255	1135
	TOTAL	890	97	260	1247
	JANVIER				
		VERY BAD	BAD	GOOD	SUM
	VERY BAD	40	1	3	44
BAD	40	0	2	42	
GOOD	364	50	105	519	
TOTAL	444	51	110	605	
FEVRIER					
	VERY BAD	BAD	GOOD	SUM	
VERY BAD	9	0	0	9	
BAD	17	0	0	17	
GOOD	420	46	150	616	
TOTAL	446	46	150	642	

Tableau IV-9: Table des indexes.

	ALL		
Index	Formule(LWC)	Formule(LWC,ND)	Formule(AROME)
PC	23.33%	33.11%	24.37%
POD	0.51	0.53	0.51
FAR	0.89	0.88	0.89
JANVIER			
PC	22.80%	33.55%	23.96%
POD	0.46	0.49	0.46
FAR	0.84	0.82	0.84
FEVRIER			
PC	23.83%	32.71%	24.76%
POD	0.65	0.69	0.65
FAR	0.95	0.81	0.94

Analyse des tables de contingence

Pour la formule en fonction de LWC

On remarque que :

- Le pourcentage de prévisions correctes est de 23,33% sur l'ensemble des deux mois, avec 22,80% pour janvier et 23,83% pour février.
- La probabilité de détection des événements 'brouillard' et 'brume' (catégories 'very bad' et 'bad') est acceptable avec un POD de 0,51 sur l'ensemble de la période. Le POD est meilleur en février (0,65) qu'en janvier (0,46), indiquant une meilleure performance de détection pour le brouillard et la brume pendant ce mois.
- Les scores de fausses alarmes sont élevés, avec un FAR de 0,89 sur l'ensemble de la période. Le nombre de fausses alarmes est plus important en janvier (0,84) qu'en février (0,95)

Pour la formule en fonction de LWC et Nd

- Le pourcentage de prévisions correctes s'élève à 33,11% sur l'ensemble des deux mois, avec 33,55% pour janvier et 32,71% pour février.
- La probabilité de détection des événements 'brouillard' et 'brume' est acceptable avec un POD de 0,53 sur l'ensemble de la période. Le POD est meilleur en février (0,69) qu'en janvier (0,49), indiquant une meilleure performance de détection pour le brouillard et la brume pendant ce mois.
- Les scores des fausses alarmes sont élevés ils atteindre (0.88) pour toute la période, **(0.82)** pour le mois de janvier et **(0.81)** pour le mois de février.

Pour la formule AROME

- Le pourcentage correct est assez faible : **24.37%** pour la totalité des deux mois, (**23.96%**) pour le mois de janvier et (**24.76%**) pour le mois de février.
- La probabilité de détection des événements 'very bad' et 'bad' est acceptable avec un POD de 0,51 sur l'ensemble de la période. Le POD est de 0,65 en février et de 0,46 en janvier.
- Les scores des fausses alarmes sont élevés ils atteindre (0.89) pour toute la période, (0.84) pour le mois de janvier et (0.94) pour le mois de février.

Conclusion

On constate que :

- les pourcentages corrects obtenus sont plutôt faibles en raison de la méthode du minimum que nous avons utilisée.

La probabilité de détection (POD) était acceptable pour toutes les formules

- Toutes les formules ont montré une capacité acceptable à détecter les événements cibles (brouillard et brume). Parmi les formules évaluées, celle basée sur la teneur en eau liquide (LWC) et la concentration en gouttelettes se distingue par les meilleures performances en termes d'index PC et POD. De plus, elle présente un taux de fausses alarmes (FAR) inférieur aux autres formules.

Conclusion générale

Le brouillard est un phénomène météorologique fréquent, mais sa complexité le rend difficile à prévoir. Il peut réduire la visibilité à moins de 1 km en surface et représente un danger invisible aux impacts considérables, touchant l'économie, les transports, les opérations et la sécurité. Face à ces répercussions majeures, l'amélioration des prévisions reste un défi crucial. L'adoption de technologies avancées comme la télédétection et les simulations numériques offre un potentiel prometteur pour une meilleure compréhension et une prévision plus fiable du brouillard.

Avant d'aborder la partie pratique, nous avons effectué une recherche approfondie sur les principes fondamentaux de la météorologie, la visibilité et ses types, le brouillard, ses types, ses conditions de formation et son impact sur l'aviation. Ensuite, nous nous sommes intéressés à la prévision numérique du temps, aux différents modèles de prévision en nous concentrant sur le modèle AROME, et aux relations de paramétrisation de la visibilité. Dans la Partie pratique, La période d'étude sélectionnée comprend 27 jours de janvier et 28 jours de février. Ce choix a été choisie par la fréquence accrue du brouillard pendant cette période.

La méthodologie adoptée repose sur une comparaison des performances de quatre formules de paramétrisation de la visibilité et Les données de visibilité observée qui ont été extraites des messages METAR de l'aérodrome d'Alger, La comparaison des performances montré que :

La paramétrisation en fonction de l'humidité relative (RH) présente des performances médiocres, avec des valeurs prédites souvent éloignées des observations réelles.

Les formules de paramétrisation basées sur LWC et ND, ainsi que le modèle AROME, génèrent des prévisions de visibilité plus proches des observations réelles que la formule basée sur l'humidité relative.

Parmi les quatre formules, la paramétrisation en fonction de la (LWC, ND) s'est avérée la plus performante, produisant les valeurs de visibilité les plus proches des observations réelles.

Cette étude met en lumière l'importance de choisir des formules de paramétrisation appropriées pour la prévision du brouillard. Les résultats obtenus constituent une base solide pour le développement d'un modèle de prévision d'ensemble du

brouillard plus performant, en intégrant les formules les plus efficaces et en exploitant les atouts de chaque approche.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] « La météorologie », Fondation Eduki . Consulté le: 10 avril 2024 [En ligne]. Disponible sur: https://www.eduki.ch/fr/doc/dossier_4_meteo.pdf
- [2]« METEOROLOGIE ». Académie de Montpellier, (2014), Consulté le:10 avril 2024 [En ligne]. Disponible sur: <https://pedagogie.ac-montpellier.fr/sites/default/files/ressources/3 - Meteo - CAEA et BIA 470033.pdf>
- [3] « L'effet de serre - myMaxicours ». Consulté le:13 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.maxicours.com/se/cours/l-effet-de-serre/>
- [4] Projet Atmosphère Canada « La vapeur d'eau et le cycle de l'eau». Environnement Canada Consulté le: 13 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://publications.gc.ca/collections/collection_2017/eccc/En56-172-2001-12-1-fra.pdf
- [5] Ounnar,F., « Cours météorologie M1 Opérations Aériennes »,Université de Blida1.
- [6]« The five main layers of atmosphere. Explained - Windy.app ». Consulté le: 13 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://windy.app/textbook/five-main-layers-of-atmosphere.html>
- [7] É. Larousse, « Structure de l'atmosphère – Média LAROUSSE ». Consulté le: 13 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Structure_de_l%E2%80%99atmosph%C3%A8re/1306233
- [8] « Mesures de visibilité en mer ». Concertation « centre manche », (1 avril 2022).
- [9] Vickers.G., Buzza.S.,Schmidt.D., Mullock.J., « Le Temps Dans Les Prairies ». NAV CANADA.
- [10] Annexe 3 de l'OACI :Assistance météorologique à la navigation aérienne internationale ,Dix-huitième édition ,(Juillet 2013),34-35.
- [11] Consulté le: 5 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://aerodidact.enm-toulouse.fr/mod/glossary/showentry.php?eid=118>
- [12] Lambergeon.D.,Leroy.M., « L'automatisation de l'observation météorologique sur les aérodromes français », (2006),p.10.
- [13] Civate.M.,Mandel.F., « La mesure de la visibilité ». (décembre 2008).

- [14]« Transmissiomètre », Wikipédia. 11 janvier 2021. Consulté le: 19 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Transmissiom%C3%A8tre&oldid=178656201>
- [15]Atlas international des nuages. Consulté le: 19 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://cloudatlas.wmo.int/home.html>
- [16]« Aviation Weather Handbook ». United States Department Of Transportation Federal Aviation Administration Flight Standards Service, (2022).
- [17] Toth.G., Gulpepe.I., Milbrandt.J., Hansen.B., Pearson.G., Fogarty.G., Burrows.W., « Manuel Sur Le Brouillard Et La Prévision Du Brouillard », Environnement Canada.
- [18] Klein.C., « Conception et prototypage d'un lidar pour la mesure du contenu en eau liquide dans le brouillard », Université De Toulouse, (2013).
- [19] « Guide de météo marine national ». Environnement Canada.
- [20]« Pierre-Paul Feyte Photographie | Campagne enveloppée de nappes de brouillard de rayonnement entre Auch et Lasséran. », Pierre-Paul Feyte Photographie. Consulté le: 9 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://www-feyte-fr-photo-deck.com/media/82810b0e-a3bf-11e2-9cb9-132beca859d7-campagne-enveloppee-de-nappes-de-brouillard-de-rayonnement-entr>
- [21]« Les brouillards [Météorologie et aérologie] ». Consulté le: 9 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://bonnanfant.ca-noprof.fr/eleve/BIA/M%C3%A9t%C3%A9orologie%20et%20a%C3%A9rologie_eleve/activities/Meteorologie_et_aerologie_23.xhtml
- [22]« Brouillard d'advection dans le sud-est de la Chine - Xinhua - french.news.cn ». Consulté le: 9 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://french.news.cn/20220527/693c8b1bc00f4e6296059dfad6b594f3/c.html>
- [23]« Montagnes Brouillard Des Nuages - Photo gratuite sur Pixabay ». Consulté le: 9 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://pixabay.com/fr/photos/montagnes-brouillard-des-nuages-8445767/>
- [24] « File:Brouillard d'évaporation - Lac d'Annecy.jpg - Wikimedia Commons ». Consulté le: 9 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brouillard_d%27%C3%A9vaporation_-_Lac_d%27Annecy.jpg
- [25]« File:Brouillard d'évaporation - Lac d'Annecy.jpg - Wikimedia Commons ». Consulté le: 9 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brouillard_d%27%C3%A9vaporation_-_Lac_d%27Annecy.jpg

- [26]« Le brouillard ». Consulté le: 9 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.meteolafleche.com/brouillard.html>
- [27]Consulté le: 10 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://wallhere.com/fr/wallpaper/754424>
- [28] Lakra.k., Avishek.k., « A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts », (mars 2022).
- [29]« Le brouillard de la plaine du Pô visible depuis l'espace : la photo du satellite NASA ». Consulté le: 10 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.netcost-security.fr/science/205479/le-brouillard-de-la-plaine-du-po-visible-depuis-lespace-la-photo-du-satellite-nasa/>
- [30] Kwasiborska.A., Grabowski.M., Sedláčková.A.N., Andrej Novák.A., « The Influence of Visibility on the Opportunity to Perform Flight Operations with Various Categories of the Instrument Landing System »,Sensors,(2023),3-4.
- [31] « Prév́ision numérique du temps - Définition et Explications ». Consulté le: 27 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techno-science.net/glossaire-definiton/Prevision-numerique-du-temps.html>
- [32] Coiffier. J., « Un demi-siècle de prév́ision numérique du temps », Météorologie, V. 8, n° 30, (juin 2000), p. 11.
- [33] Bocquet. M., « La prév́ision numérique du temps », (2014).
- [34] Philippe.B., « Introduction à la prév́ision météorologique », Encyclopédie de l'environnement. Consulté le: 26 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-environnement.org/air/introduction-a-prevision-meteorologique/>
- [35] Malardel.S., « Les modèles de prév́ision météorologique ». Encyclopédie de l'environnement, (10 juillet 2018).
- [36] Mokhtari ,M.,« La prév́ision numérique du temps pour la sécurité des personnes et des biens ».(novembre 2015).
- [37] « IPMA - Prédiction météo numérique ». Consulté le: 26 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ipma.pt/en/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.html>
- [38]« Prév́ision du brouillard - Centre National de Recherches Météorologiques ». Consulté le: 27 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article212>

- [39] « Modèle de recherche et de prévision météorologiques (WRF) | Météorologie à méso-échelle et à micro-échelle ». Consulté le: 26 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>
- [40] Hamadache.B., Benamara. M. A, Mahdi. K., « Exécution de la chaîne opérationnelle du modèle ALADIN », p. 5.
- [41] « Météo Algérie ». Consulté le: 27 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meteo.dz/articles/Mod%C3%A9lisation%20num%C3%A9rique%20du%20temps>
- [42] « AROME - Centre National de Recherches Météorologiques ». Consulté le: 26 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article120&lang=fr>
- [43] Bouttier. F., « Arome, avenir de la prévision régionale », Météorologie, V8, n° 58, (2007)p.12.
- [44] Philip. A., Bergot. T., Bouteloup.Y., Bouysse F., « The Impact of Vertical Resolution on Fog Forecasting in the Kilometric-Scale Model AROME: A Case Study and Statistics », (Octobre 2016).
- [45] Gultepe.I., Milbrandtj. A., « Microphysical Observations and Mesoscale Model Simulation of a Warm Fog Case during FRAM Project », (2007).
- [46] C. Donald Ahrens, "Atmospheric Humidity", Meteorology today, Cengage Learning,(2009).
- [47] Chikhi.W., Ambar.A., Mokhtari.M., "Testing visibility diagnostics in AROME at high resolution", Numerical Weather Prediction Department, Office Nationale de La Météorologie, Algiers, ALGERIA ,(2021).

Annexe

Observations météorologiques dans le message METAR pour DAAG

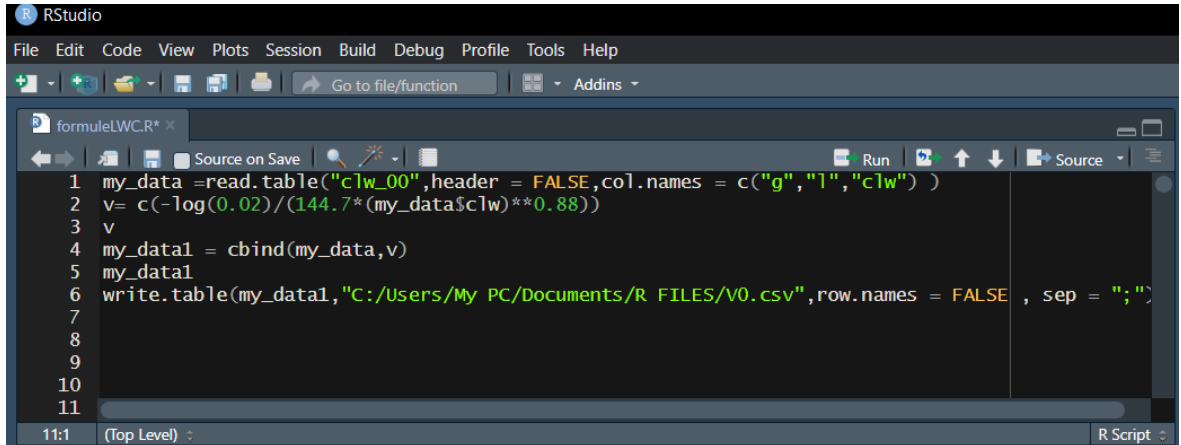


METAR/SPECI de DAAG, Alger / Dar el Beida (Algérie).		
SA	21/01/2022 03:00->	METAR DAAG 210300Z VRB01KT 4000 BR FEW010 02/01 Q1023=
SA	21/01/2022 03:30->	METAR DAAG 210330Z VRB01KT 0600 R23/P2000N R27/P2000N FG FEW010 02/01 Q1023=
SA	21/01/2022 04:00->	METAR DAAG 210400Z VRB01KT 0200 R23/1800D R27/P2000N FG FEW010 01/01 Q1023=
SA	21/01/2022 04:30->	METAR DAAG 210430Z 06001KT 0700 R23/P2000N R27/0650U FG FEW010 02/02 Q1023=
SA	21/01/2022 05:00->	METAR DAAG 210500Z 15003KT 0200 R23/P2000N R27/0800U FG FEW010 01/01 Q1023=
SA	21/01/2022 05:30->	METAR DAAG 210530Z 18002KT 0400 R23/P2000N R27/0350N FG FEW010 01/01 Q1023=
SA	21/01/2022 06:00->	METAR DAAG 210600Z VRB02KT 0900 R23/P2000N R27/P2000N FG FEW010 01/01 Q1023=
SA	21/01/2022 06:30->	METAR DAAG 210630Z 20002KT 4000 BR FEW010 00/M00 Q1023=
SA	21/01/2022 07:00->	METAR DAAG 210700Z VRB02KT 4000 BR FEW010 01/00 Q1023=
SA	21/01/2022 07:30->	METAR DAAG 210730Z VRB01KT 4000 BR FEW010 02/01 Q1023=
SA	21/01/2022 08h00->	METAR DAAG 210800Z VRB01KT 3700 BR FEW010 02/02 Q1023=
SA	21/01/2022 08:30->	METAR DAAG 210830Z VRB02KT 4500 BR FEW010 05/04 Q1024=
SA	21/01/2022 09:00->	METAR DAAG 210900Z 20002KT 6000 NSC 07/04 Q1024=
SA	21/01/2022 09:30->	METAR DAAG 210930Z 25003KT 200V280 6000 NSC 09/04 Q1024=
SA	21/01/2022 10h00->	METAR DAAG 211000Z 22003KT 190V260 8000 NSC 10/04 Q1024=

OGIMET

SA	25/02/2022 00:00->	METAR DAAG 250000Z VRB02KT 8000 SCT010 10/09 Q1020=
SA	25/02/2022 00:30->	METAR DAAG 250030Z 16004KT 3000 BR SCT010 09/07 Q1020=
SA	25/02/2022 01:00->	METAR DAAG 250100Z 00000KT 0500 R05/0600D R09/0600D FG BKN006 09/09 Q1020=
SA	25/02/2022 01:30->	METAR DAAG 250130Z 19001KT 0500 R05/0375D R09/0450D FG BKN006 08/08 Q1020=
SA	25/02/2022 02:00->	METAR DAAG 250200Z VRB02KT 0300 R23/P2000N R27/0350D FG BKN006 07/07 Q1020=
SA	25/02/2022 02:30->	METAR DAAG 250230Z VRB02KT 0300 R23/1400U R27/0375U FG BKN006 07/07 Q1019=
SA	25/02/2022 03:30->	METAR DAAG 250330Z 17003KT 0300 R23/0900U R27/1800U FG BKN006 07/06 Q1020=
SA	25/02/2022 04:00->	METAR DAAG 250400Z 21004KT 0800 R23/0700D R27/2000N FG SCT010 07/06 Q1020=
SA	25/02/2022 04:30->	METAR DAAG 250430Z 20007KT 0800 R23/2000N R27/0800D FG SCT010 08/08 Q1021=
SA	25/02/2022 05:00->	METAR DAAG 250500Z 21004KT 0300 R23/P2000N R27/0650D FG SCT010 09/09 Q1021=
SA	25/02/2022 05:30->	METAR DAAG 250530Z 27004KT 240V300 0300 R23/0250D R27/0350N FG SCT010 09/09 Q1021=
SA	25/02/2022 06:00->	METAR DAAG 250600Z 23003KT 0300 R23/0300N R27/0300N FG SCT010 09/09 Q1021=
SA	25/02/2022 06:30->	METAR DAAG 250630Z 16004KT 0300 R23/0200N R27/0150N FG SCT010 08/08 Q1021=
SA	25/02/2022 07:00->	METAR DAAG 250700Z 12003KT 100V160 0300 R23/0200N R27/1300U FG SCT010 09/08 Q1021=
SA	25/02/2022 07:30->	METAR DAAG 250730Z 20003KT 170V230 2000 BR SCT010 10/10 Q1022=
SA	25/02/2022 08h00->	METAR DAAG 250800Z 21003KT 160V250 4000 BR SCT010 11/10 Q1022=
SA	25/02/2022 08:30->	METAR DAAG 250830Z 22005KT 4000 BR SCT010 11/10 Q1023=

Programmes-en langage R pour le calcul de la visibilité en fonction de (LWC)

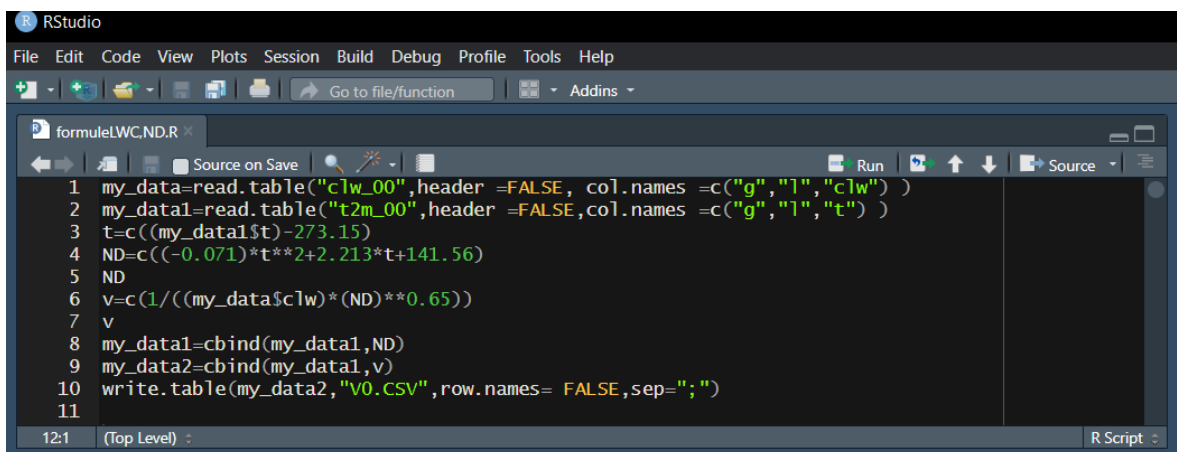


```

1 my_data =read.table("c1w_00",header = FALSE,col.names = c("g","l","c1w") )
2 v= c(-log(0.02)/(144.7*(my_data$c1w)**0.88))
3 v
4 my_data1 = cbind(my_data,v)
5 my_data1
6 write.table(my_data1,"C:/Users/My PC/Documents/R FILES/V0.csv",row.names = FALSE , sep = ";")
7
8
9
10
11

```

Programme en langage R pour le calcul de la visibilité en fonction de (LWC,Nd)

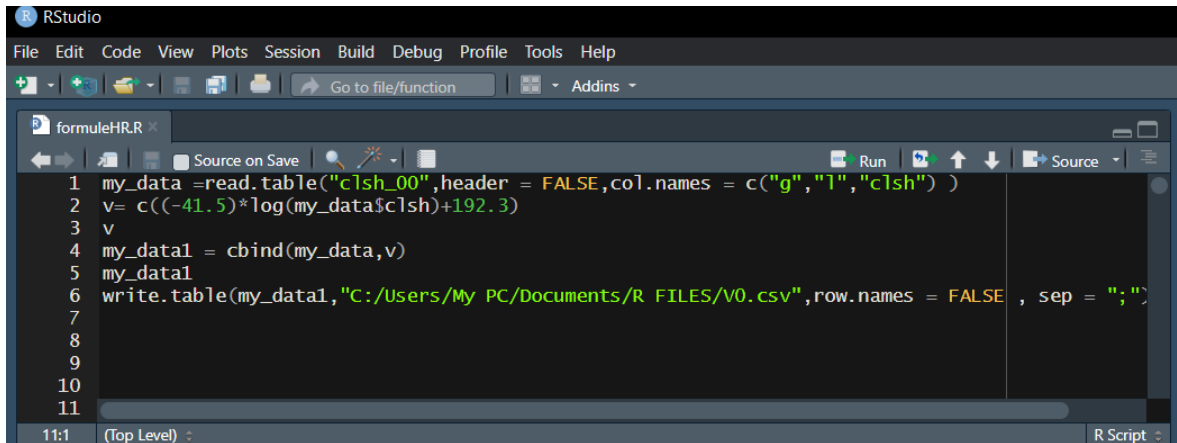


```

1 my_data=read.table("c1w_00",header =FALSE, col.names =c("g","l","c1w") )
2 my_data1=read.table("t2m_00",header =FALSE,col.names =c("g","l","t") )
3 t=c((my_data1$t)-273.15)
4 ND=c((-0.071)*t**2+2.213*t+141.56)
5 ND
6 v=c(1/((my_data$c1w)*(ND)**0.65))
7 v
8 my_data1=cbind(my_data1,ND)
9 my_data2=cbind(my_data1,v)
10 write.table(my_data2,"V0.CSV",row.names= FALSE,sep=";")
11

```

Programme en langage R pour le calcul de la visibilité en fonction de (Hr)

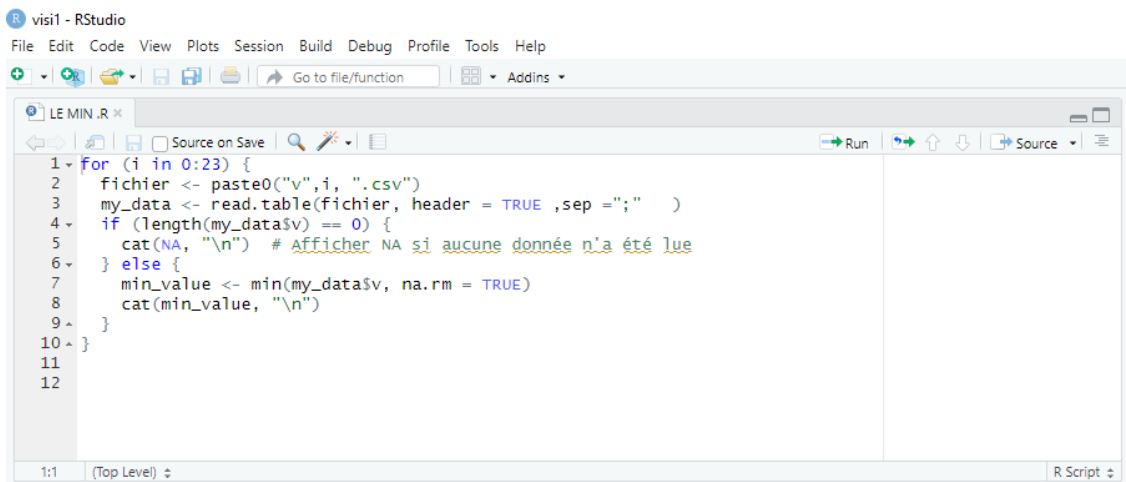


```

1 my_data =read.table("c1sh_00",header = FALSE,col.names = c("g", "l", "c1sh") )
2 v= c((-41.5)*log(my_data$c1sh)+192.3)
3 v
4 my_data1 = cbind(my_data,v)
5 my_data1
6 write.table(my_data1,"C:/Users/My PC/Documents/R FILES/v0.csv",row.names = FALSE , sep = ";")
7
8
9
10
11

```

Programme en langage R pour obtenir la visibilité minimale

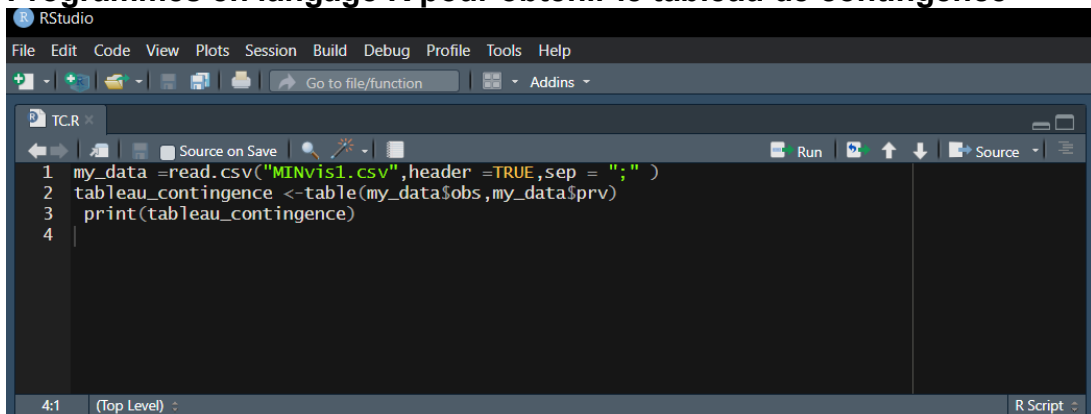


```

1 for (i in 0:23) {
2   fichier <- paste0("v",i, ".csv")
3   my_data <- read.table(fichier, header = TRUE ,sep = ";" )
4   if (length(my_data$v) == 0) {
5     cat(NA, "\n") # Afficher NA si aucune donnée n'a été lue
6   } else {
7     min_value <- min(my_data$v, na.rm = TRUE)
8     cat(min_value, "\n")
9   }
10 }
11
12

```

Programmes en langage R pour obtenir le tableau de contingence



```

1 my_data =read.csv("MINvis1.csv",header =TRUE,sep = ";" )
2 tableau_contingence <-table(my_data$sobs,my_data$prv)
3 print(tableau_contingence)
4

```