

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE
BLIDA-1-



Université Saad Dahleb Blida 1
Institut D'aéronautique Et des études
Spatiales
Département de la navigation aérienne



Mémoire de fin d'études
Master en Aéronautique
Option : Exploitation

Thème :

Amélioration de la prévision de la visibilité réduites par le
phénomène de vent de sable au sud de l'Algérie

Promoteur :

LAGHA Mohand

Encadreur :

MOKHTARI Morad

MEHBALI Ayoub

Réalisé par :

HARRAT Abdelbarie

CHEKIRED Abderrahim

2024/2025

RÉSUMÉ

La modélisation du cycle d'aérosols désertiques est un problème majeur en prévision opérationnelle du temps, en particulier en prévision aéronautique, du fait que le désert couvre plus de 80% de la superficie de l'Algérie. Les poussières désertiques ont une implication directe sur l'aviation civile.

Il est donc important de mieux comprendre l'évolution et le transport à longue distance de ce type d'aérosols afin d'évaluer leur impact sur le trafic aérien.

Pour la prévision opérationnelle des événements du sable en Algérie, les prévisionnistes utilisent le modèle ALADIN-DUST à 14 km de résolution (M. Mokhtari, 2012). Ce modèle est opérationnel à l'ONM depuis février 2014.

Récemment, une correction locale a été intégrée à la carte des sources potentielles de poussière dans SURFEX afin d'améliorer la représentation de ces sources, en particulier autour des stations météorologiques situées dans le sud de l'Algérie. Cette modification vise à affiner la modélisation des émissions de poussière dans ces régions, en tenant compte des observations locales pour une meilleure précision.

Dans le but de prospecter la fiabilité et la capacité de ces modifications à améliorer les visibilités réduites sur les stations d'aérodrome du Sud de l'Algérie.

ملخص

تُعدّ نمذجة دورة الهباء الجوي الصحراوي من التحديات الرئيسية في مجال التنبؤ التشغيلي بالطقس، خصوصاً في التنبؤات الخاصة بالملاحة الجوية، نظراً لكون الصحراء تغطي أكثر من 80% من مساحة الجزائر. وتشكل الجسيمات الرملية المحمولة في الجو تأثيراً مباشراً على حركة الطيران المدني، الأمر الذي يجعل من الضروري فهم آليات تطورها وانتقالها لمسافات بعيدة، بهدف تقييم تأثيرها على حركة النقل الجوي.

وفي إطار التنبؤ التشغيلي بطواهر العواصف الرملية في الجزائر، يعتمد خبراء الأرصاد الجوية على نموذج (الادين داست) بدقة تبلغ 14 كيلومتراً وهو نموذج يعمل بصفة تشغيلية في الديوان الوطني للأرصاد الجوية منذ فبراير 2014.

ويأتي هذا الجهد في سياق تقييم مدى موثوقية وفعالية هذه التعديلات في تحسين التنبؤ بالرؤية المنخفضة في مطارات الجنوب الجزائري.

ABSTRACT

The modeling of the desert aerosol cycle is a major issue in operational weather forecasting, particularly in aeronautical forecasting, due to the fact that the desert covers more than 80% of Algeria's territory. Desert dust has a direct impact on civil aviation. Therefore, it is important to better understand the evolution and long-range transport of these types of aerosols in order to assess their impact on air traffic.

For the operational forecasting of sand events in Algeria, forecasters use the ALADIN-DUST model with a resolution of 14 km. This model has been operational at the National Meteorological Office (ONM) since February 2014.

Recently, a local correction was integrated into the dust source potential map in SURFEX; in order to improve the representation of these sources, particularly around meteorological stations located in southern Algeria. This modification aims to refine the modeling of dust emissions in these regions by taking local observations into account for improved accuracy.

This effort is part of an initiative to assess the reliability and capability of these modifications in improving reduced visibility forecasts at aerodrome stations in southern Algeria.

REMERCIEMENTS

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

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

Nous remercions sincèrement monsieur Ayoub MEHBALI et Monsieur Mohamed MOKHTARI. En tant qu'encadreurs de mémoire, Ils sont toujours montrés à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce projet, aussi pour l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer, nous disons merci.

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

Nous tenons plus particulièrement à remercier nos parents pour leur soutien dans nos plus durs moments.

Nous voulons également remercier l'ensemble du corps enseignant de l'institut d'aéronautique et des études spatiales de BLIDA, pour leurs efforts, leurs conseils durant notre cursus universitaire.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	2
REMERCIEMENTS.....	4
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX.....	11
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES	12
INTRODUCTION GENERALE	14
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA METEO	16
INTRODUCTION	17
1.1 DEFINITION DE LA METEOROLOGIE.....	17
1.1.1 Objectifs de la météorologie	17
1.1.2 Méthodes et outils	18
1.1.3 Applications de la météorologie.....	18
1.2 COMPOSITION ET PROPRIETES DE L'ATMOSPHERE.....	19
1.2.1 Composition chimique	19
1.2.2 Propriétés physiques de l'atmosphère	20
1.2.3 Rôle de l'atmosphère	21
1.3 LA STRUCTURE VERTICALE DE L'ATMOSPHERE.....	21
1.3.1 Les couches de l'atmosphère	22
1.3.2 Phénomènes caractéristiques par couche.....	23
1.4 LA VISIBILITE.....	23
1.4.1 La visibilité météorologique	24
1.4.2 La visibilité aéronautique	24
1.4.3 La mesure de la visibilité	25
1.5 LES SERVICES METEOROLOGIQUES EN ALGERIE.....	27
1.6 LE MESSAGE METEOROLOGIQUE METAR.....	28
CONCLUSION	29
CHAPITRE 2 : LE PHENOMENE DE VENT DE SABLE	
.....	30
INTRODUCTION	31
2.1 DEFINITIONS ET TERMINOLOGIE	31
2.1.1 Lithométéores : définition générale.....	31
2.1.2 Typologie des vents de sable et de poussière.....	31

2.1.3 Différences entre sable, poussière et brume sèche.....	32
2.1.4 Terminologie météorologique et codes SYNOP/METAR.....	32
2.2 ORIGINE ET MECANISMES DES VENTS DE SABLE	33
2.2.1 Mécanismes de soulèvement des particules	33
2.2.2 Conditions météorologiques favorables.....	33
2.2.3 Influence du relief et de la végétation	33
2.3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET OPTIQUES DU SABLE	
ATMOSPHERIQUE	34
2.3.1 Composition minéralogique	34
2.3.2 Distribution granulométrique.....	34
2.3.3 Propriétés optiques.....	34
2.3.4 Effets climatiques et environnementaux	34
2.4 CLIMATOLOGIE DES VENTS DE SABLE EN ALGERIE	
SAHARIENNE.....	35
2.4.1 Zones géographiques les plus exposées.....	35
2.4.2 Variabilité saisonnière et dynamique annuelle.....	35
2.4.3 Données statistiques et indicateurs issus des observations	36
2.5 METHODES DE DETECTION ET DE PREVISION DES VENTS DE	
SABLE	36
2.5.1 Les observations météorologiques en surface	36
2.5.2 L'apport de l'imagerie satellitaire.....	37
2.5.3 La prévision numérique des poussières	38
2.6 LIMITES ACTUELLES DES PREVISIONS DES VENTS DE	
SABLE	39
2.6.1 Une résolution encore trop limitée	39
2.6.2 Des sources d'émission mal représentées.....	39
2.6.3 Insuffisance du réseau d'observation météorologique au sol.....	40
CONCLUSION	40
CHAPITRE 3 : L'IMPACT DES VENTS DE SABLE	
SUR L'AVIATION.....	41
INTRODUCTION	42
3.1 EFFETS DES VENTS DE SABLE SUR LA VISIBILITE ET LA	
NAVIGATION	42
3.1.1 Conditions de vol et seuils de visibilité VMC et IMC	43
3.1.2 Impact des vents de sable sur la visibilité.....	44
3.2 REPERCUSSIONS SUR LES OPERATIONS AERIENNES.....	45

3.2.1 Limitations opérationnelles liées à la faible visibilité	45
3.2.2 Risques pour la sécurité aérienne	46
3.2.3 Perturbations économiques et logistiques	47
3.3 RISQUES TECHNIQUES POUR LES AERONEFS	50
3.3.1 Abrasion et usure des composants critiques	50
3.3.2 Encrassement et ingestion des moteurs.....	51
3.3.3 Conséquences sur la maintenance et la sécurité aérienne.....	53
3.4 ÉTUDES DE CAS DE PERTURBATIONS REELLES	54
3.4.1 Bilan	54
3.5 MESURES D'ATTENUATION ET STRATEGIES AEROPORTUAIRES.....	55
3.5.1 Gestion de crise en temps réel sur les aéroports sahariens	55
3.5.2 Déroutement, annulation et maintien au sol des vols	55
3.5.3 Adapter l'infrastructure aux défis du désert.....	56
3.5.4 Mieux prévoir pour mieux anticiper	56
3.5.5 Une coordination renforcée entre tous les acteurs	56
CONCLUSION	57
CHAPITRE 4 : VALIDATION DE LA PREVISION DES VISIBILITES EN CONDITIONS DE VENT DE SABLE	58
INTRODUCTION	59
4.1 DEFINITION DE LA PREVISION EN AEROLOGIE DESERTIQUE :	59
4.2 LES PRINCIPAUX MODELES UTILISEES A L'OFFICE NATIONAL DE LA METEO	60
4.2.1 ALADIN	60
4.2.2 ALADIN-DUST.....	61
4.2.3 AROME	62
4.3 LES ETAPES D'UNE PREVISION METEOROLOGIQUE.....	63
4.3.1 Recueillir les observations et assimiler les données.....	63
4.3.2 Simuler le comportement de l'atmosphère en trois dimensions	64
4.3.3 L'analyse des simulations par les prévisionnistes.....	64
4.4 LA QUALITE DES PREVISIONS	64
4.5 CONTEXTE DU SUJET ET BUTS POURSUIVIS	65
4.6 ZONE D'ETUDE.....	65
4.7 LES DONNEES DE L'ETUDE	66

4.7.1 Données de concentration et de vent	66
4.7.2 Données METAR et visibilité observée.....	67
4.8 METHODOLOGIE	67
4.8.1 Calcul de la visibilité brute	68
4.8.2 Calcul de la vitesse du vent.....	68
4.8.3 Application de la correction empirique	69
4.8.4 Calcul de la visibilité corrigée	70
4.9 COMPARAISON AVEC LES OBSERVATIONS	70
4.9.1 Sélection des cas d'étude	70
4.9.2 Comparaison des visibilités simulées et observées	73
4.10 ANALYSE STATISTIQUE GLOBALE DES RESULTATS.....	77
4.10.1 Évaluation graphique (résumé des cas étudiés)	77
4.10.2 Résultats	78
CONCLUSION	78
CONCLUSION GENERALE.....	80
LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	82

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

FIGURE 1.1: STATION METEOROLOGIQUE TYPIQUE UTILISEE POUR LA COLLECTE DE DONNEES ATMOSPHERIQUES.....	18
FIGURE 1.2: LES PROPRIETES DE L'AIRE.....	20
FIGURE 1.3: STRUCTURE VERTICALE DE L'ATMOSPHERE.....	21
FIGURE 1.4: LE TRANSMISSIOMETRE.....	26
FIGURE 1.5: LE DIFFUSOMETRE.....	26

CHAPITRE 2

FIGURE 2.1: TEMPETE DE SABLE.....	31
FIGURE 2.2: UNE PARTICULE DE SABLE.....	34
FIGURE 2.3: TEMPETE DE SABLE SAHARIEN MASSIVE (MODIS, 21 MARS 2018	38

CHAPITRE 3

FIGURE 3.1: REDUCTIONS DE VISIBILITE PAR LES VENTS DE SABLE.....	45
FIGURE 3.2: ACCIDENTS AERIENS LIES AUX CONDITIONS METEO (ESTIMATION MONDIALE	47
FIGURE 3.3: EFFETS VISIBLES DE L'EXPOSITION AU SABLE SUR UN MOTEUR D'AVION	52

CHAPITRE 4

FIGURE 4.1: CARTE SOURCE DU MODEL ALADIN-DUST	62
FIGURE 4.2: LES ETAPES D'UNE PREVISION METEOROLOGIQUE	63
FIGURE 4.3: LA ZONE D'ETUDE.....	66
FIGURE 4.4: IMAGE SATELLITAIRE DU 18 JUIN 2023 de 09h à 12h.....	71
FIGURE 4.5: IMAGE SATELLITAIRE DU 26 MARS 2024 de 15h à 18h	72
FIGURE 4.6: IMAGE SATELLITAIRE DU 04 AVRIL 2024 de 15h à 18h.....	72
FIGURE 4.7: IMAGE SATELLITAIRE DU 28 AVRIL 2024 de 18h à 21h.....	73
FIGURE 4.8: ÉVOLUTION COMPAREE DES VISIBILITES SIMULEES ET OBSERVEES A MECHERIA	74
FIGURE 4.9: COMPARAISON DES VISIBILITES ISSUES DE L'OBSERVATION ET DU MODELE A OUARGLA	75

FIGURE 4.10: COURBES DE VISIBILITE : OBSERVATION ET SIMULATION CORRIGEE A OUARGLA.....	76
FIGURE 4.11: ÉVOLUTION COMPAREE DES VISIBILITES SIMULEES ET OBSERVEES A BECHAR.....	77

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1

TABLEAU 1.1: LES COUCHES DE L'ATMOSPHERE 22

TABLEAU 1.2: TABLEAU EXPLIQUE UN EXEMPLE D'UN METAR 29

CHAPITRE 3

TABLEAU 3.1: MINIMA DE VISIBILITE ET DE DISTANCE PAR RAPPORT AUX NUAGES

POUR LES VMC (OACI ANNEXE 2)..... 44

TABLEAU 3.2: TABLEAU DE VOLS RETARDES A CAUSE D'UNE TEMPETE DE SABLE..... 49

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

AEROME : Application of Research to Operations at MEscale

AFTN : Aeronautical Fixed Telecommunication Network

ALADIN : Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International

ANAC : Agence Nationale de l'Aviation Civile

AOD : Aerosol Optical Depth / Épaisseur optique des aérosols

ARPEGE : Action de Recherche Petite Échelle – Grande Échelle

BSC-DREAM8b : Barcelona Supercomputing Center – Dust Regional Atmospheric Model

C° : Degré Celsius

CNPM : Centre National de Prévision Météorologique

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

EGSA : Établissement de Gestion des Services Aéroportuaires

EPIC : Établissement Public à Caractère Industriel et Commercial

FAA : Federal Aviation Administration

Fe₂O₃ : Oxyde de fer

IATA : International Air Transport Association

IMC : Instrument Meteorological Conditions

IR : Instrument Rating

ISS : International Space Station

Km : Kilomètre

METAR : Meteorological Aerodrome Report

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSG : Meteosat Second Generation

MSG/SEVIRI : Meteosat Second Generation / Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager

NAAPS : Navy Aerosol Analysis and Prediction System

NOTAM : Notice to Airmen

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

ONM : Office National de la Météorologie

POM : Portée Optique Météorologique

RVR : Runway Visual Range

SEVIRI : Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager

SiO₂ : Dioxyde de silicium

SIGMET : Significant Meteorological Information

SPECI : Special Weather Report (METAR d'urgence)

TAF : Terminal Aerodrome Forecast

UV : Ultraviolet

VMC : Visual Meteorological Conditions

INTRODUCTION GENERALE

Depuis toujours, l'homme a dû composer avec les caprices de l'atmosphère. Parmi les phénomènes naturels les plus marquants dans les régions désertiques figure le vent de sable, qui soulève d'immenses nuages de particules, réduisant brutalement la visibilité et affectant de nombreux secteurs d'activité. Aujourd'hui, avec l'essor des transports aériens et l'importance croissante de la sécurité des vols, l'impact des vents de sable sur l'aviation est devenu un enjeu crucial.

En effet, dans le sud de l'Algérie, les épisodes de vent de sable sont fréquents, soudains, et parfois violents. Ils peuvent provoquer l'annulation ou le déroutement de vols, menacer la sécurité des aéronefs et gêner les opérations au sol. Leur principal effet est une réduction sévère de la visibilité, rendant les décollages, atterrissages, voire la navigation elle-même, particulièrement risqués. Les pilotes doivent alors se reposer entièrement sur les instruments, et les exploitants aéroportuaires sur des prévisions météorologiques fiables.

Cependant, la prévision précise de la visibilité en présence de sable reste une tâche complexe. Elle dépend de multiples facteurs : la vitesse et la direction du vent, la nature du sol, la concentration de particules en suspension, ainsi que la précision des modèles numériques utilisés pour simuler ces événements. À cela s'ajoute la difficulté d'obtenir des observations fiables sur le terrain, notamment dans les zones sahariennes, peu équipées en stations météorologiques.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire. Il vise à évaluer et améliorer la qualité des prévisions de visibilité lors d'épisodes de vents de sable, en exploitant les simulations fournies par le modèle numérique ALADIN-Dust, couplées aux observations opérationnelles issues des messages METAR. Bien que le modèle ALADIN-Dust soit opérationnel à l'Office National de la Météorologie (ONM) depuis 2014, des améliorations récentes ont été apportées, notamment l'intégration d'une correction locale dans le schéma SURFEX, visant à affiner la représentation des sources d'émission de poussière.

Une méthodologie de correction empirique est proposée dans ce travail, permettant d'ajuster les résultats bruts du modèle en fonction de la dynamique réelle du vent mesurée localement, afin d'obtenir une représentativité plus fidèle des conditions de visibilité au sol.

Ce travail est structuré en quatre chapitres. Les deux premiers présentent les bases nécessaires à la compréhension du contexte météorologique, du phénomène de vent de sable, et de son comportement dans l'atmosphère saharienne. Le troisième chapitre s'intéresse à l'impact concret de ces phénomènes sur le secteur aérien, notamment en matière de sécurité, de navigation et de gestion opérationnelle. Le dernier chapitre est consacré à l'analyse des performances du modèle de prévision, à travers une série d'études de cas, des comparaisons avec les données d'observation, et une approche statistique de validation.

L'objectif final est d'apporter une contribution utile aux prévisionnistes et aux décideurs aéroportuaires, en renforçant la fiabilité des prévisions de visibilité dans un environnement particulièrement exigeant, afin de garantir une meilleure anticipation et une gestion plus efficace des risques liés au vent de sable dans les aéroports du sud algérien.

CHAPITRE 1 : GENERALITES **SUR LA METEO**

INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous présentons les bases nécessaires à la compréhension de l'atmosphère terrestre, de ses propriétés physiques et de sa structure verticale. Certaines notions météorologiques fondamentales y sont abordées afin d'établir le cadre général dans lequel s'inscrit ce travail. Une attention particulière est portée à la notion de visibilité, à ses conditions d'observation, ainsi qu'aux services et outils utilisés pour la surveillance et la transmission des informations météorologiques.

1.1 DEFINITION DE LA METEOROLOGIE :

La météorologie est une branche des sciences de l'atmosphère qui étudie les phénomènes physiques et dynamiques se produisant dans l'atmosphère terrestre. Elle se focalise principalement sur les processus régissant le temps qu'il fait, à savoir la température, la pression, l'humidité, le vent, la nébulosité, les précipitations, etc. Son objectif fondamental est de comprendre, d'analyser et de prévoir l'évolution de ces paramètres sur différentes échelles temporelles et spatiales.

En d'autres termes, la météorologie s'intéresse aux interactions entre les éléments atmosphériques qui déterminent les conditions météorologiques à court terme, contrairement à la climatologie qui traite des moyennes et des variations à long terme. Elle s'appuie sur un réseau d'observations météorologiques (stations au sol, ballons-sondes, satellites, radars) et sur des modèles numériques pour élaborer des prévisions opérationnelles, utiles notamment dans les secteurs de l'agriculture, de l'énergie, du transport aérien, ou encore de la gestion des risques naturels.[1]

1.1.1 Objectifs de la météorologie :

La météorologie a pour objectifs principaux :

- Observer les conditions atmosphériques actuelles.
- Analyser les données recueillies pour comprendre les mécanismes des phénomènes météorologiques.
- Prévoir l'évolution du temps à court terme, généralement sur quelques heures à quelques jours.[2]

1.1.2 Méthodes et outils :

Les météorologues utilisent divers outils pour collecter et analyser les données atmosphériques :

- **Stations météorologiques** : pour mesurer localement les paramètres atmosphériques.
- **Satellites** : pour observer à grande échelle les systèmes météorologiques.
- **Radars météorologiques** : pour détecter les précipitations et leur intensité.
- **Modèles numériques** : pour simuler l'évolution de l'atmosphère et établir des prévisions.



Figure 1.1: Station météorologique typique utilisée pour la collecte de données atmosphériques.

1.1.3 Applications de la météorologie :

La météorologie joue un rôle crucial dans de nombreux domaines :

- **Agriculture** : planification des semis et des récoltes.

- **Transport** : sécurité aérienne, maritime et routière.
- **Gestion des risques naturels** : prévention des inondations, des tempêtes, etc.
- **Énergie** : optimisation de la production d'énergie renouvelable.

1.2 COMPOSITION ET PROPRIETES DE L'ATMOSPHERE :

1.2.1 Composition chimique :

L'atmosphère terrestre est un mélange gazeux composé principalement d'azote (N₂) et d'oxygène (O₂), qui constituent ensemble environ 99 % de sa masse :

- Azote (N₂): 78,09 %
- Oxygène (O₂): 20,95 %
- Argon (Ar): 0,93 %
- Dioxyde de carbone (CO₂) : ~0,04 % (concentration variable)
- Vapeur d'eau (H₂O) : variable de 0 à 4 % selon les régions et les altitudes
- Autres gaz (néon, hélium, krypton, ozone, etc.) : traces

Les gaz à effet de serre, bien que présents en faible quantité (CO₂, CH₄, N₂O, vapeur d'eau), jouent un rôle déterminant dans le bilan radiatif de la planète et la régulation de sa température.

L'atmosphère contient aussi des aérosols : particules solides ou liquides en suspension (poussières, suies, sels marins, pollens, cendres volcaniques, etc.), qui influencent la qualité de l'air, la formation des nuages, et la visibilité.[3]

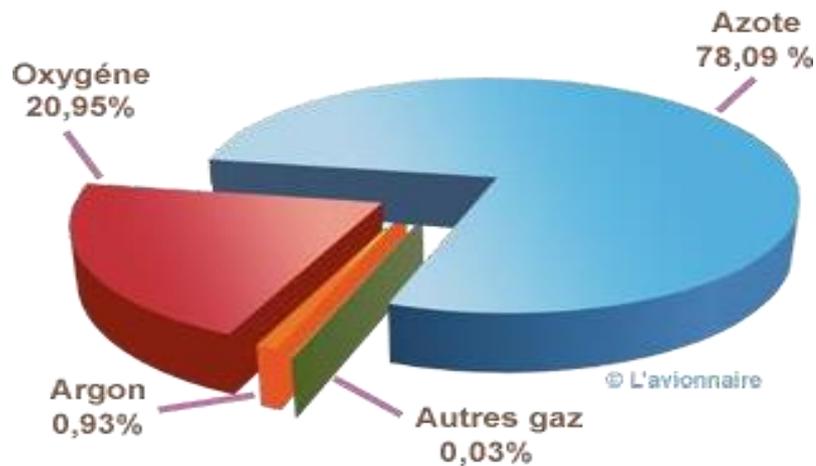


Figure 1.2: les propriétés de l'aire

1.2.2 Propriétés physiques de l'atmosphère :

a) Pression atmosphérique :

La pression atmosphérique est la force exercée par le poids de l'air sur une surface donnée. Au niveau de la mer, elle est d'environ 1013 hPa (hectopascals). Elle diminue avec l'altitude en raison de la raréfaction de l'air.

b) Température :

La température de l'atmosphère varie avec l'altitude et selon les couches atmosphériques. Par exemple, dans la troposphère, la température diminue en moyenne de 6,5 °C tous les 1000 mètres.

c) Densité de l'air :

La densité de l'air, c'est-à-dire sa masse volumique, diminue avec l'altitude. Cela signifie que l'air est plus dense au niveau de la mer qu'en altitude, ce qui a des implications pour la respiration et l'aérodynamique.

d) Humidité

L'humidité représente la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air. Elle influence la formation des nuages, des précipitations et joue un rôle dans la sensation de chaleur ou de froid ressentie par le corps humain.

1.2.3 Rôle de l'atmosphère :

L'atmosphère terrestre joue plusieurs rôles essentiels :

- Protection contre les rayonnements solaires : la couche d'ozone absorbe une grande partie des rayons ultraviolets nocifs.
- Régulation thermique : l'effet de serre naturel maintient une température moyenne propice à la vie.
- Distribution de l'eau : l'atmosphère transporte la vapeur d'eau, permettant les précipitations et le cycle de l'eau.
- Support de la vie : elle fournit l'oxygène nécessaire à la respiration des êtres vivants.[4]

1.3 LA STRUCTURE VERTICALE DE L'ATMOSPHERE :

L'atmosphère terrestre est une enveloppe gazeuse subdivisée en couches superposées, caractérisées par des profils thermiques distincts, c'est-à-dire des variations de température avec l'altitude. Cette stratification, bien que continue, a permis de définir plusieurs niveaux selon des critères thermodynamiques et chimiques, à savoir : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère.

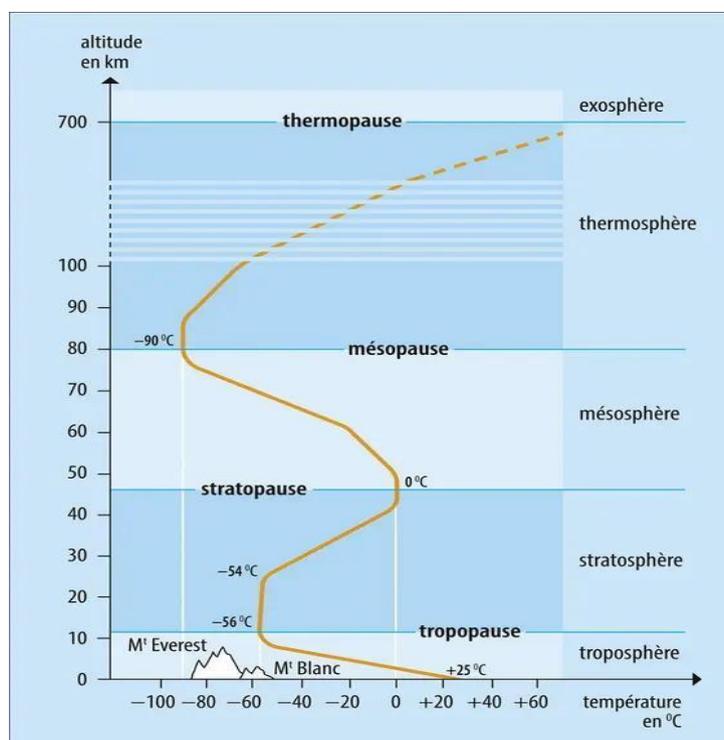


Figure 1.3: Structure verticale de l'atmosphère

1.3.1 Les couches de l'atmosphère :

L'atmosphère est divisée en quatre couches principales selon la variation de la température avec l'altitude :[5]

Couche	Altitude approximative	Caractéristiques principales
Troposphère	0 – 12 km	Siège des phénomènes météorologiques ; température décroît avec l'altitude
Troposphère	12 – 50 km	Présence de la couche d'ozone ; température augmente avec l'altitude
Mésosphère	50 – 85 km	Température en forte baisse ; phénomènes lumineux comme les étoiles filantes
Thermosphère	85 – 600 km (et +)	Température très élevée (>1500°C) ; présence d'ions (ionosphère)
Exosphère	>600 km	Zone de transition vers l'espace, très faible densité de particules

Tableau 1.1: Les couches de l'atmosphère

Dans ce mémoire on s'intéresse à la troposphère. C'est la couche atmosphérique la plus basse, s'étendant de la surface terrestre jusqu'à environ 8 à 18 km d'altitude, selon la latitude (plus épaisse à l'équateur, plus mince aux pôles). Elle contient plus de 80 % de la masse atmosphérique et l'essentiel de la vapeur d'eau, des poussières, et des phénomènes météorologiques actifs tels que les nuages, les précipitations, les orages et les vents forts.

Dans cette couche, la température diminue en moyenne de 6,5 °C par kilomètre d'altitude. C'est également dans la troposphère que l'on retrouve les

vents responsables du soulèvement des poussières désertiques, qui peuvent fortement réduire la visibilité horizontale, notamment au voisinage des aérodomes situés dans les régions sahariennes.

Pour l'aviation, cette couche est primordiale car elle concerne les phases de décollage, d'approche et de croisière basse, où les conditions de visibilité sont déterminantes pour la sécurité des vols. Les vents de sable qui y circulent peuvent engendrer des réductions critiques de visibilité, gênant la navigation aérienne et imposant des ajustements opérationnels (retards, déroutements, annulations).[6]

1.3.2 Phénomènes caractéristiques par couche :

Chaque couche de l'atmosphère possède des conditions physiques distinctes (température, densité, composition chimique) qui influencent les phénomènes naturels qui s'y produisent. En étudiant ces couches, les scientifiques peuvent mieux comprendre où et comment se manifestent certains événements atmosphériques, tels que les orages, les aurores boréales ou les rentrées de météorites. Ces phénomènes, bien que très différents les uns des autres, sont tous liés à la structure verticale de l'atmosphère et à ses interactions avec l'énergie solaire.[7]

- Stratosphère : avions de ligne (vols à haute altitude), couche d'ozone (filtration UV)
- Mésosphère : météores qui se consomment
- Thermosphère : aurores polaires, ISS et satellites en orbite basse
- Exosphère : orbite des satellites géostationnaires

1.4 LA VISIBILITE :

La visibilité désigne la capacité d'un observateur à distinguer clairement un objet dans l'atmosphère, à une certaine distance, en fonction de la transparence de l'air. Elle dépend de la quantité de lumière diffusée et absorbée par les particules présentes dans l'atmosphère telles que la vapeur d'eau, les poussières, les gouttelettes de brouillard ou encore les fumées. Ainsi, la visibilité est directement influencée par la présence de phénomènes atmosphériques réduisant la clarté : pluie, neige, brouillard, aussi poussières désertiques et sable en suspension.

En météorologie et en aéronautique, la visibilité est une notion essentielle, car elle influence directement la sécurité des déplacements, aussi bien au sol qu'en vol. On distingue généralement plusieurs types de visibilité selon les méthodes d'observation et le cadre d'utilisation.[8]

1.4.1 La visibilité météorologique :

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), la visibilité météorologique est définie comme étant la distance maximale à laquelle un objet noir de dimensions normales peut être vu et reconnu de jour, sur fond de ciel à l'horizon ; ou, de nuit, la distance à laquelle cet objet pourrait être vu s'il était éclairé comme en plein jour.

En pratique, la visibilité est estimée visuellement par un observateur qualifié, ou mesurée à l'aide d'instruments automatiques comme le transmissiomètre ou le diffusomètre. Cette estimation est influencée par :

- La concentration en particules en suspension (poussières, brume sèche, brouillard),
- Les conditions d'éclairage (jour, nuit, soleil rasant),
- Et les caractéristiques du terrain (objets de référence visibles ou non).

1.4.2 La visibilité aéronautique :

La visibilité aéronautique, telle que définie par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) dans l'Annexe 3, correspond à la plus grande des deux distances suivantes :

- La distance à laquelle un objet sombre peut être distingué sur fond clair (portée optique météorologique – POM),
- Ou la distance à laquelle des feux de piste d'intensité normalisée (1000 candelas) peuvent être vus et reconnus sur fond sombre.

Elle est donc à la fois une mesure physique de la transparence de l'air et une mesure opérationnelle, liée aux besoins du pilote en conditions de vol, d'approche et d'atterrissage.

Un concept associé est la portée visuelle de piste (Runway Visual Range – RVR), qui est la distance sur laquelle un pilote placé sur l’axe d’une piste peut voir les balisages lumineux. Elle est mesurée automatiquement et intégrée dans les METAR lorsque la visibilité est inférieure à 1500 mètres.

Les vents de sable et les poussières sahariennes réduisent fortement la visibilité aéronautique, représentant un risque critique pour les manœuvres au sol et en vol. [9]

1.4.3 La mesure de la visibilité :

La mesure de la visibilité constitue un élément fondamental dans l’observation météorologique, notamment pour la sécurité des activités terrestres, maritimes et aériennes. Elle permet de quantifier la transparence de l’atmosphère et d’identifier les conditions dans lesquelles la perception visuelle est altérée. Deux méthodes principales sont utilisées : la mesure visuelle par l’observateur et la mesure instrumentale à l’aide de capteurs automatisés.

a) Mesure visuelle :

Dans de nombreuses stations météorologiques, la visibilité est encore estimée de manière visuelle. Un observateur qualifié estime la distance maximale à laquelle un objet de référence (bâtiment, tour, montagne, etc.) peut être vu et reconnu clairement, en fonction de sa taille et de sa position connue.

Cette méthode, bien que subjective, est reconnue par l’Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et reste utilisée dans le réseau d’observation synoptique international. Elle permet notamment une évaluation rapide, utile en l’absence d’instruments automatisés ou en complément d’une mesure technique.

b) Mesure instrumentale :

La mesure automatisée de la visibilité repose sur des capteurs optiques capables de quantifier l’atténuation de la lumière dans l’atmosphère. Les deux instruments les plus couramment utilisés sont :

- **Le transmissiomètre** : Cet instrument mesure la réduction de l'intensité lumineuse entre une source émettrice et un récepteur placé à distance fixe. Il permet de calculer directement la portée optique météorologique (POM), qui est l'un des indicateurs standards de visibilité.



Figure 1.4: Le transmissiomètre

- **Le diffusomètre** : Aussi appelé visibilimètre à diffusion avant, il évalue la quantité de lumière diffusée dans un petit volume d'air. À partir de cette donnée, la POM est estimée selon des modèles optiques adaptés aux conditions atmosphériques.



Figure 1.5: Le diffusomètre

Ces mesures sont utilisées dans les stations automatiques, mais aussi dans les systèmes d'assistance à l'atterrissage, où la RVR (Runway Visual Range) est mesurée à proximité des pistes pour fournir une information directe et précise aux pilotes.

1.5 LES SERVICES METEOROLOGIQUES EN ALGERIE :

En Algérie, la mission d'observation, d'analyse et de prévision météorologique est assurée par l'Office National de la Météorologie (ONM). Cet organisme public à caractère industriel et commercial (EPIC), placé sous la tutelle du ministère des Travaux publics et des Transports, joue un rôle central dans la surveillance du climat et la prévision des phénomènes météorologiques à l'échelle nationale.

L'ONM est chargé de:

- Assurer la collecte, le traitement et la diffusion des données météorologiques ;
- Fournir des prévisions à court, moyen et long terme à l'échelle nationale et régionale ;
- Contribuer à la sécurité aérienne à travers les services météorologiques dédiés à l'aviation civile (aérodromes, FIR, etc.) ;
- Participer aux programmes internationaux de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

Il exploite un réseau de stations météorologiques automatiques et synoptiques réparties sur l'ensemble du territoire, y compris dans les régions sahariennes. Ces stations collectent en temps réel les données de température, humidité, vent, visibilité, pression et phénomènes météorologiques.

L'ONM utilise plusieurs modèles numériques de prévision, dont :

- Le modèle ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International),

- Sa version spécialisée ALADIN-DUST, utilisée pour simuler les émissions et le transport des poussières désertiques.

Les produits issus de ces modèles sont utilisés pour :

- Élaborer les bulletins météorologiques généraux (grand public, agriculture, énergie, etc.) ;
- Alimenter les prévisions spécialisées pour l'aéronautique, comme les METAR, TAF et SIGMET ;
- Soutenir les autorités en cas de phénomènes météorologiques dangereux (vents forts, tempêtes de sable, orages violents, etc.).

L'ONM participe également à la formation des prévisionnistes, en collaboration avec le Centre National de Prévision Météorologique (CNPM). Il joue un rôle actif dans les projets de recherche appliquée, notamment dans le domaine de l'amélioration de la prévision de la visibilité et de la modélisation des aérosols désertiques, en partenariat avec des centres régionaux ou des universités.[10]

1.6 LE MESSAGE METEOROLOGIQUE METAR :

Le METAR (*Meteorological Aerodrome Report*) est un message météorologique d'observation utilisé dans le domaine aéronautique. Il fournit, sous un format codé normalisé au niveau international, un résumé concis des conditions météorologiques observées sur un aéroport donné, à une heure précise. Ce message est mis à jour régulièrement, en général toutes les heures, et permet aux pilotes, contrôleurs aériens et services de navigation aérienne de disposer d'une information fiable et rapide sur l'état de l'atmosphère à proximité d'un aéroport.

La rédaction suit une structure codée et standardisée, composée de plusieurs blocs successifs. Chaque élément respecte un ordre strict, conformément aux recommandations de l'OACI et de l'OMM.

Exemple : METAR DAAG 121000Z 24012KT 3000 SA SCT020 25/13 Q1015

Exemple	Signification
METAR	Type de message météorologique régulier
DAAG	Code OACI de la station (ici : Aéroport Houari Boumédiène - Alger)
121000Z	Observation faite le 12 à 10h00 UTC
24012KT	Vent de 240°, 12 nœuds
3000	Visibilité horizontale de 3000 mètres
SA	Phénomène présent : sable en suspension
SCT020	Nuages épars (scattered) à 2000 pieds
25/13	Température de 25 °C, point de rosée de 13 °C
Q1015	Pression au niveau de la mer : 1015 hPa

Tableau 1.2: tableau explique un exemple d'un METAR

CONCLUSION :

En résumé, ce chapitre a permis de poser les bases fondamentales de la météorologie et des paramètres qui influencent la visibilité atmosphérique. Ces notions sont essentielles pour comprendre l'origine, l'évolution et la prévision des phénomènes de réduction de la visibilité, notamment dans les contextes désertiques.

CHAPITRE 2 : LE
PHENOMENE DE VENT DE
SABLE

INTRODUCTION :

Le vent de sable est un phénomène météorologique fréquent dans les zones arides, notamment au sud de l'Algérie. Ce chapitre a pour objectif d'analyser en profondeur les mécanismes physiques à l'origine du soulèvement et du transport des particules désertiques, ainsi que leurs impacts sur la visibilité et l'environnement

2.1 DEFINITIONS ET TERMINOLOGIE :

2.1.1 Lithométéores : définition générale :

Les vents de sable et de poussière font partie d'une catégorie météorologique appelée lithométéores. Ce terme, défini par l'Organisation météorologique mondiale (OMM), désigne l'ensemble des phénomènes atmosphériques liés à des particules solides non aqueuses, comme le sable, la poussière ou encore la fumée. Ces particules sont en général soulevées du sol par le vent ou restent en suspension dans l'air, affectant la visibilité et la qualité de l'atmosphère.[11]



Figure 2.1: tempête de sable

2.1.2 Typologie des vents de sable et de poussière :

Dans les observations météorologiques, plusieurs termes sont utilisés pour décrire ces phénomènes selon leur intensité et leur comportement.

La chasse-poussière ou chasse-sable correspond à un soulèvement modéré de particules, souvent à basse altitude, causé par un vent turbulent. Lorsqu'on est en présence d'un soulèvement massif et dense de particules réduisant fortement la visibilité, on parle alors de tempête de sable ou de tempête de poussière. Ces événements sont particulièrement redoutés dans les zones désertiques, car ils peuvent durer plusieurs heures et parcourir de longues distances.

Enfin, on utilise le terme brume de poussière ou brume de sable lorsque les particules fines restent suspendues dans l'air, même après que le vent a cessé. L'atmosphère devient alors brumeuse et sèche, avec une visibilité souvent dégradée sur plusieurs kilomètres.[11]

2.1.3 Différences entre sable, poussière et brume sèche :

Il est utile de faire la distinction entre ces trois types de particules.

Le sable est constitué de grains relativement gros, souvent visibles à l'œil nu, dont le diamètre dépasse généralement les 50 microns. Ces grains sont projetés sur quelques dizaines ou centaines de mètres seulement avant de retomber rapidement.

La poussière, quant à elle, est composée de particules beaucoup plus fines, souvent inférieures à 50 microns. Elle peut rester longtemps en suspension dans l'air et être transportée sur des centaines de kilomètres, parfois jusqu'en Europe à partir du Sahara.

Enfin, la brume sèche ou "dry haze" désigne une atmosphère trouble, légèrement opaque, provoquée par des particules très fines (aérosols) souvent invisibles individuellement. Ce phénomène donne à l'air un aspect voilé et atténue la clarté du ciel, même en l'absence de vent.[12]

2.1.4 Terminologie météorologique et codes SYNOP/METAR :

Dans les bulletins d'observation météo (METAR ou SYNOP), utilisés notamment dans l'aviation, chaque phénomène est codifié pour faciliter la lecture rapide et l'échange d'informations à l'échelle internationale. Voici les principaux codes utilisés :

- SA : désigne du sable soulevé par le vent.

- DU : indique la présence de poussière dans l'air.
- SS : signifie qu'une tempête de sable est en cours.
- DS : signale une tempête de poussière.
- HZ : représente la brume sèche ou le haze.

Ces codes sont essentiels pour alerter les équipages sur la réduction potentielle de visibilité et pour prendre les précautions nécessaires, que ce soit au sol ou en vol.

2.2 ORIGINE ET MECANISMES DES VENTS DE SABLE :

2.2.1 Mécanismes de soulèvement des particules :

Le soulèvement des particules de sable et de poussière se produit principalement sous l'effet du vent, lorsque sa vitesse dépasse un certain seuil. Ce phénomène dépend fortement de la rugosité du sol, de l'humidité et de la granulométrie des particules. Trois mécanismes de base sont à distinguer :[13]

- Saltation : Les particules moyennes sont arrachées du sol et déplacées par bonds successifs.
- Suspension : Les particules fines sont soulevées et maintenues en altitude sur de longues distances.
- Reptation : Les plus grosses particules roulent ou glissent en surface sous l'effet de l'impact des particules en saltation.

2.2.2 Conditions météorologiques favorables :

Les vents de sable surviennent surtout dans des conditions de forte instabilité atmosphérique et de gradients de pression marqués. Les situations les plus fréquentes incluent : [14]

- Le passage de fronts froids ou d'ondes de gravité
- Les dépressions thermiques (basses pressions générées par le fort chauffage diurne)
- Les orages secs avec rafales descendantes (downbursts)

2.2.3 Influence du relief et de la végétation :

Les vents de sable sont plus fréquents dans les régions plates, arides et dépourvues de végétation. Cependant, des effets de canalisation peuvent apparaître dans les vallées, augmentant localement la vitesse du vent. Les

zones à sol nu ou récemment perturbé (par l'agriculture ou la déforestation) constituent des sources très actives de particules éoliennes.[15]

2.3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET OPTIQUES DU SABLE ATMOSPHERIQUE :

2.3.1 Composition minéralogique :

Le sable atmosphérique d'origine saharienne contient majoritairement du quartz (SiO_2), mais aussi des feldspaths, carbonates (comme la calcite et la dolomite), et oxydes de fer (Fe_2O_3). Cette composition varie selon la région source et a un impact direct sur les propriétés radiatives du nuage de sable.[16]

2.3.2 Distribution granulométrique :

La taille des particules varie de moins de $1\ \mu\text{m}$ (poussière fine) à plus de $100\ \mu\text{m}$ (sable grossier). Les particules les plus fines peuvent rester en suspension plus longtemps et être transportées plus loin, tandis que les plus lourdes tombent rapidement.[17]

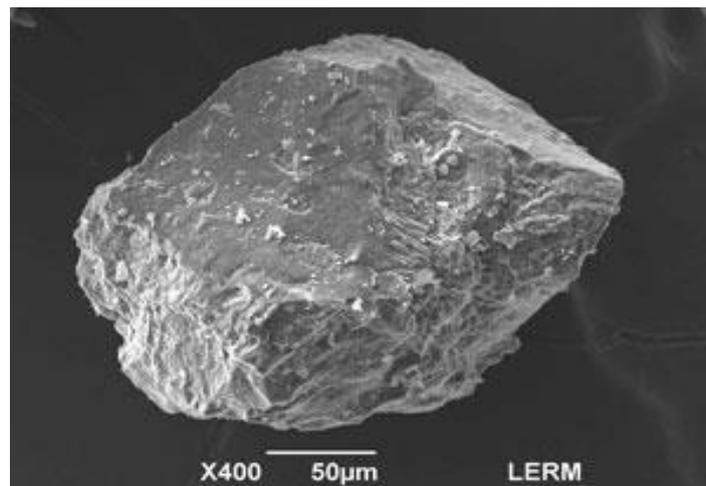


Figure 2.2: une particule de sable

2.3.3 Propriétés optiques :

Les particules de sable affectent le rayonnement solaire par absorption et diffusion. Leurs propriétés optiques, telles que l'indice de réfraction, influencent la profondeur optique des aérosols (AOD) et l'albédo. Cela modifie le bilan radiatif global.[18]

2.3.4 Effets climatiques et environnementaux :

Les aérosols désertiques agissent sur le climat en modifiant la température de surface et en jouant un rôle dans la formation des nuages. Ils peuvent aussi

enrichir les sols ou les océans lorsqu'ils se déposent, tout en altérant la visibilité atmosphérique.[19]

2.4 CLIMATOLOGIE DES VENTS DE SABLE EN ALGERIE SAHARIENNE :

Les régions sahariennes d'Algérie sont parmi les plus affectées par les vents de sable au niveau du continent africain. Ces phénomènes ont des conséquences environnementales, sanitaires et opérationnelles importantes, notamment pour les plateformes aéroportuaires situées au sud du pays. La compréhension de leur répartition géographique, de leur fréquence saisonnière et de leurs caractéristiques météorologiques constitue une base essentielle pour améliorer les stratégies de prévision.

2.4.1 Zones géographiques les plus exposées :

L'exploitation des informations disponibles monte clairement que certaines wilayas, notamment Tamanrasset, Adrar, In Salah, Béchar et Illizi, sont très exposés aux soulèvements de sable et de poussière. Ces zones subissent le passage des masses d'air sahariennes occasionnant de forts vents de secteur nord-est ou sud-est. La nature sablonneuse et peu consolidée des sols, l'absence quasi-totale de végétation et les forts gradients thermiques en journée sont propices à l'émission des particules. Par conséquent, les aéroports qui y sont installés, tels qu'in Salah et Tamanrasset, sont régulièrement concernés par des phénomènes de baisse de visibilité, impactant négativement la régularité des vols.[20]

2.4.2 Variabilité saisonnière et dynamique annuelle :

Les vents de sable ne sont pas un phénomène uniforme tout au long de l'année. Bien qu'ils soient observés plus fréquemment de mars à juillet, notamment lorsque les températures augmentent rapidement à l'extérieur. En été, le soleil réchauffe la couche supérieure du sol, de sorte que l'air commence à s'élever du sol. De plus, les vents Superficiels qui ont tendance à être relativement forts soufflent. Lors de ces tempêtes de vent, les particules de sable fines se soulèvent facilement en une tempête.

En été, il y a d'autres phénomènes météorologiques que la tempête de sable. Par exemple, le développement d'orages secs est également typique ici, accompagné de vents puissants. De tels phénomènes sont appelés haboob et

des murs de sable se forment, qui sont un élément réellement dangereux, notamment pour les avions. L'automne et l'hiver, respectivement, sont plus calmes en termes de vent de sable et en sont rarement observés.[21]

2.4.3 Données statistiques et indicateurs issus des observations :

Les stations météo automatiques et les rapports d'aéroports, comme les METAR et SPECI, permettent de suivre de près les épisodes de vents de sable et de poussière. Des codes spécifiques comme DU (poussière), SA (sable) ou HZ (brume sèche) sont utilisés pour signaler les conditions qui réduisent fortement la visibilité.

Selon les données de l'Office National de la Météorologie (ONM), le phénomène est particulièrement marqué dans certaines régions comme Adrar ou In Salah. Là-bas, on compte en moyenne entre 25 et 40 jours par an où la visibilité tombe en dessous de 1000 mètres à cause du sable ou de la poussière en suspension. Et dans les cas les plus extrêmes, elle peut descendre sous les 300 mètres, ce qui perturbe fortement le trafic aérien.

En combinant ces observations avec les résultats de modèles météorologiques comme ALADIN_Dust, les spécialistes arrivent à mieux comprendre comment ces tempêtes évoluent et varient d'une année à l'autre. Il en ressort que les années les plus sèches sont souvent aussi celles où les vents de sable sont les plus fréquents, car le sol, plus sec, se laisse plus facilement emporter par le vent.[22]

2.5 METHODES DE DETECTION ET DE PREVISION DES VENTS DE SABLE :

Pour anticiper les situations de visibilité réduite liées aux vents de sable, plusieurs outils sont mobilisés, allant des observations au sol aux satellites, en passant par des modèles numériques spécialisés. Chaque source d'information apporte un éclairage différent sur le phénomène, et c'est leur complémentarité qui permet d'en affiner la compréhension et d'améliorer la prévision.

2.5.1 Les observations météorologiques en surface :

Le réseau de stations météorologiques, en particulier les stations automatiques implantées dans les aéroports sahariens, constitue le premier

maillon de la chaîne de détection des phénomènes liés au sable. Les observations régulières, transmises sous forme de rapports METAR et SPECI, fournissent à intervalles horaires – ou en cas de changements soudains – des informations précieuses sur la visibilité ainsi que sur la nature des phénomènes observés à proximité du sol. Par ailleurs, des indicateurs tels que le renforcement du vent et la baisse de l'humidité relative permettent d'identifier des conditions favorables à l'émission de poussières et de sable.

Néanmoins, la couverture géographique de ces stations reste insuffisante au regard de l'immensité du territoire saharien. Cette limitation constitue un obstacle à la surveillance en temps réel de l'évolution d'un événement éolien à grande échelle. Afin de compléter ces données ponctuelles, d'autres sources d'information, notamment issues de la télédétection et de la modélisation, sont mobilisées pour une analyse plus globale et continue des épisodes sableux.

2.5.2 L'apport de l'imagerie satellitaire :

Les satellites d'observation permettent de suivre les vents de sable sur de grandes étendues, y compris là où il n'existe aucun poste d'observation au sol. Certains capteurs, comme ceux embarqués sur les satellites MODIS (Terra et Aqua), offrent des cartes de distribution des aérosols en quasi-temps réel. Ils fournissent notamment des données sur l'épaisseur optique des poussières (AOD), ce qui donne une idée de la densité des panaches en altitude.

D'autres satellites, à l'instar de Meteosat (MSG) ou de Sentinel-5P, offrent une vision complémentaire, avec la capacité de suivre l'évolution des masses sableuses à une échelle fine, tant sur le plan spatial que temporel. Ces observations sont précieuses pour détecter des épisodes rapides ou d'envergure, souvent difficiles à saisir avec des moyens conventionnels. Il convient toutefois de souligner que leur performance peut être altérée par la couverture nuageuse ou des conditions de lumière défavorables, qui compliquent l'interprétation des images.[23]

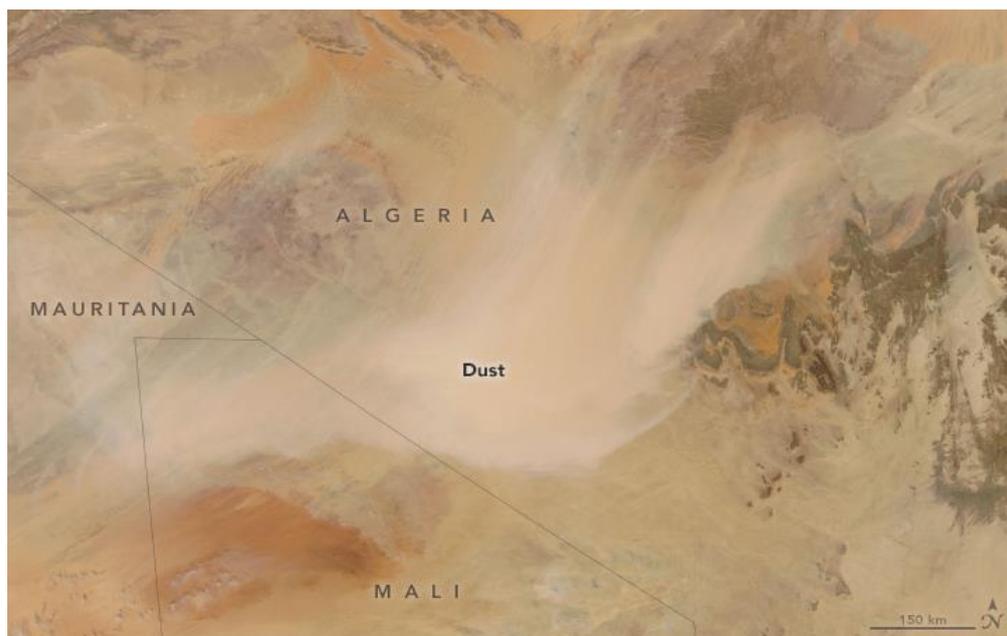


Figure 2.3: Tempête de sable saharien massive (MODIS, 21 mars 2018)

2.5.3 La prévision numérique des poussières :

Les modèles atmosphériques ont beaucoup progressé dans la représentation des particules désertiques. En Algérie, l'ONM s'appuie notamment sur le modèle ALADIN_Dust, qui permet de simuler l'émission, le transport et le dépôt des poussières. Ce modèle régional fonctionne avec une résolution adaptée au territoire national et tient compte des paramètres locaux comme la nature du sol ou la force du vent.

En complément, des modèles à échelle plus large comme ARPEGE Dust fournissent les conditions générales nécessaires à l'alimentation d'ALADIN. Ces simulations sont précieuses pour prévoir, plusieurs jours à l'avance, les trajectoires des panaches de sable qui pourraient affecter des aéroports sensibles du Sud.

Bien que ces outils soient puissants, leur précision reste conditionnée à la qualité des données initiales. L'absence d'observations dans certaines zones désertiques ou l'incertitude sur les sources d'émission peuvent limiter l'efficacité des prévisions. C'est pourquoi l'intégration des données satellites, des mesures au sol et des retours d'expérience est essentielle pour affiner les résultats.[24]

2.6 LIMITES ACTUELLES DES PREVISIONS DES VENTS DE SABLE :

Bien que des progrès considérables aient été réalisés dans la modélisation atmosphérique et l'intégration de données satellitaires, il est toujours très difficile de prévoir les vents de sable dans les régions désertiques comme le sud de l'Algérie. On rencontre donc ces limites par divers aspects : la résolution spatiale des modèles (le plus souvent de l'ordre de quelques kilomètres), la difficulté pour localiser avec précision les sources d'émission, et surtout il n'y a pas de données d'observation au sol. Si nous n'analysons pas ces faiblesses, nous ne pourrions identifier les pistes d'amélioration à suivre pour nos systèmes de prévision.

2.6.1 Une résolution encore trop limitée :

Les modèles numériques utilisés pour simuler l'émission et le transport des poussières opèrent généralement à des résolutions horizontales de l'ordre de 10 à 20 km. Si cette maille est suffisante pour des prévisions à l'échelle synoptique, elle reste parfois trop grossière pour capter des phénomènes localisés, comme les soulèvements de poussières d'origine convective ou liés à des variations fines du relief.

De plus, la représentation verticale peut aussi être limitée, notamment dans les couches basses de l'atmosphère (couche limite planétaire), là où les mécanismes d'émission prennent naissance. Cette contrainte réduit la précision des prévisions sur la concentration de poussières en surface, et donc sur la visibilité réelle dans les aéroports exposés.[25]

2.6.2 Des sources d'émission mal représentées :

La qualité des prévisions repose en grande partie sur la capacité du modèle à identifier correctement les zones sources de poussière. Or, cette identification dépend de plusieurs facteurs : la nature du sol, l'humidité résiduelle, la rugosité de surface, ou encore l'occupation du territoire (zones sablonneuses, lit de sebkhas, zones agricoles abandonnées, etc.).

Dans de nombreuses régions sahariennes, ces informations sont soit inexistantes, soit obsolètes ou imprécises. Par exemple, certaines zones actives en émission ne sont pas recensées dans les bases de données des modèles, ce qui entraîne une sous-estimation du phénomène. Inversement,

des régions théoriquement « sources » peuvent en réalité être stabilisées par la croûte désertique ou par une végétation clairsemée non prise en compte.[21]

2.6.3 Insuffisance du réseau d'observation météorologique au sol :

L'un des problèmes majeurs dans les zones désertiques algériennes réside dans la rareté des stations d'observation météorologique. Hormis quelques aéroports équipés de stations automatiques (METAR/SPECI), le réseau au sol est très peu dense, ce qui complique considérablement la validation des prévisions et l'amélioration des modèles.

Cette absence de données in situ affecte plusieurs aspects :

- La calibration des modèles, faute de mesures de concentration ou de visibilité,
- Le contrôle qualité des simulations,
- Et la réaction en temps réel, notamment pour les alertes aéronautiques.

L'intégration d'outils de télédétection ou de capteurs mobiles (stations nomades, LIDAR, drones) reste encore marginale, mais constitue une voie prometteuse pour combler ce vide informationnel.[26]

CONCLUSION :

Ce chapitre a mis en lumière la complexité du phénomène de vent de sable, en détaillant ses origines dynamiques, ses zones d'émission principales, ainsi que les conséquences directes sur la visibilité. Ces connaissances sont indispensables pour évaluer la performance des modèles de prévision dans ce contexte spécifique.

CHAPITRE 3 : L'IMPACT DES **VENTS DE SABLE SUR** **L'AVIATION**

INTRODUCTION :

Les régions sahariennes du sud de l'Algérie sont régulièrement exposées à des phénomènes de vents de sable, dont les conséquences dépassent largement le simple inconfort visuel. Dans le domaine de l'aéronautique, ces événements représentent un risque majeur pour la sécurité des vols, en raison de leur capacité à réduire considérablement la visibilité, à perturber la navigation, et à affecter les performances techniques des aéronefs. L'aviation civile comme militaire est directement concernée par ces perturbations, qui peuvent entraîner la fermeture d'aéroports, la modification de trajectoires de vol, ou encore des déroutements non planifiés.

Le transport aérien repose en grande partie sur des conditions météorologiques prévisibles et stables. Lorsqu'une tempête de sable survient, la situation devient complexe, notamment pour les phases d'approche, de décollage ou de roulage, où la visibilité au sol est un facteur critique. Par ailleurs, au-delà des aspects opérationnels, les particules abrasives soulevées par ces vents peuvent endommager les turbines, encrasser les capteurs et altérer les systèmes embarqués.

Dans ce chapitre, nous analyserons en détail les différents effets des vents de sable sur l'activité aéronautique, tant du point de vue opérationnel que technique. Nous appuierons notre propos sur des exemples concrets observés dans le sud algérien, et évoquerons les solutions d'atténuation aujourd'hui disponibles ou en cours de développement.

3.1 EFFETS DES VENTS DE SABLE SUR LA VISIBILITE ET LA NAVIGATION :

Les vents de sable, fréquents en zones désertiques comme en Algérie, réduisent fortement la visibilité en soulevant des particules de poussière. Cela complique la navigation terrestre, aérienne et maritime en effaçant les repères visuels, en altérant la perception des distances et en encrassant les équipements. Ces conditions peuvent provoquer des accidents routiers, des perturbations aériennes (retards, déroutages) et des risques pour la navigation côtière. Une vigilance renforcée et des prévisions météorologiques fiables sont donc essentielles pour limiter les risques.

3.1.1 Conditions de vol et seuils de visibilité VMC et IMC :

En aviation, la météo joue un rôle essentiel. C'est pourquoi des règles précises encadrent les conditions dans lesquelles un avion peut voler en toute sécurité, en fonction de la visibilité et de l'éloignement par rapport aux nuages. On distingue alors deux types de conditions bien connues des pilotes : le vol à vue (VMC) et le vol aux instruments (IMC). Passer de l'un à l'autre n'est pas anodin, cela change tout, des procédures à suivre jusqu'aux qualifications exigées pour l'équipage, sans oublier l'équipement que l'avion doit embarquer. C'est dire à quel point la visibilité est un facteur décisif dans la gestion d'un vol.

- **Conditions Météorologiques de Vol à Vue (VMC) :**

Les Conditions Météorologiques de Vol à Vue désignent un cadre opérationnel dans lequel la visibilité est suffisante pour permettre aux pilotes de se repérer principalement à l'aide d'éléments visuels extérieurs, tels que le relief, des repères géographiques ou la présence d'autres aéronefs. Pour assurer la sécurité dans ces conditions, des seuils minimaux de visibilité et de distance verticale et horizontale par rapport aux nuages sont établis par les autorités compétentes, notamment l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI). Ces exigences varient selon l'altitude, la classe d'espace aérien concernée, ainsi que le type de vol (vol à vue ou vol aux instruments). En VMC, la capacité du pilote à percevoir directement son environnement constitue un élément clé pour la prévention des collisions et le respect des séparations minimales.[27]

Altitude de vol	Visibilité en vol	Distance horizontale des nuages	Distance verticale des nuages
Au-dessus de 3 000 ft (ou 1 000 ft au-dessus du terrain, la plus élevée des deux)	5 km (en dessous de 10 000 ft) / 8 km (au-dessus de 10 000 ft)	1 500 m	1 000 ft

En dessous de 3 000 ft (ou 1 000 ft au-dessus du terrain, la plus élevée des deux)	5 km	Clair de tout nuage	En vue de la surface
--	------	---------------------	----------------------

Tableau 3.1: Minima de visibilité et de distance par rapport aux nuages pour les VMC (OACI Annexe 2)

- **Conditions Météorologiques de Vol aux Instruments (IMC) :**

À l'inverse des VMC, les Conditions Météorologiques de Vol aux Instruments correspondent à une situation dans laquelle la visibilité, ou la distance par rapport aux nuages, est inférieure aux seuils réglementaires autorisant le vol à vue. Dans un tel environnement, la navigation visuelle devient impraticable, obligeant les pilotes à s'appuyer exclusivement sur les instruments de bord pour assurer la conduite de l'aéronef, la navigation et la gestion de la séparation avec les autres trafics. Le vol en IMC requiert une qualification spécifique, appelée *Instrument Rating* (IR), ainsi qu'un avion correctement équipé en moyens de navigation, de communication et de surveillance. Les phases d'approche et d'atterrissage en IMC présentent un niveau de complexité élevé, et sont généralement conditionnées par la *Portée Visuelle de Piste* (RVR – *Runway Visual Range*), un paramètre essentiel qui détermine les minima opérationnels à respecter selon la catégorie de l'approche instrumentale utilisée.[27]

3.1.2 Impact des vents de sable sur la visibilité :

Dans les régions désertiques et semi-arides, quand le vent se lève, ce n'est pas juste du sable qui vole, c'est toute la visibilité qui peut changer en quelques minutes. Le vent soulève de fines particules de poussière et de sable qui restent suspendues dans l'air, formant une sorte de brume sèche. Cette poussière diffuse et absorbe la lumière, ce qui rend la vue lointaine très difficile, voire impossible par moments.

Parfois, quand la concentration de poussière dans l'air devient trop élevée, on a du mal à voir clairement devant soi. La visibilité peut chuter brutalement, parfois à quelques centaines de mètres, voire moins dans les cas les plus intenses. C'est là que ça devient risqué, surtout pour les avions ou les véhicules

sur la route, un moment d'inattention dans ce genre de conditions peut vraiment causer des accidents.

Autre chose importante : la taille des particules. Les plus petites mettent beaucoup plus de temps à retomber. Avec un peu de vent, elles peuvent voyager très loin, bien au-delà de l'endroit où la tempête a commencé. Et ce n'est pas seulement une question de poussière : l'humidité, la chaleur, et même l'angle du soleil dans le ciel peuvent changer la manière dont la lumière se propage et donc influencer ce qu'on voit, ou ce qu'on ne voit plus. [28]



Figure 3.1: réductions de visibilité par les vents de sable

3.2 REPERCUSSIONS SUR LES OPERATIONS AERIENNES :

Dans les régions arides et désertiques comme le sud de l'Algérie, les vents de sable représentent une menace sérieuse pour la régularité et la sécurité du transport aérien. Ces phénomènes météorologiques extrêmes ont des conséquences opérationnelles notables, affectant aussi bien les infrastructures aéroportuaires que les plans de vol des compagnies aériennes. Cette section explore les principales répercussions du vent de sable sur les opérations aériennes, à travers les limitations imposées par la faible visibilité, les risques accrus d'accidents, ainsi que les perturbations économiques et logistiques qu'ils engendrent.

3.2.1 Limitations opérationnelles liées à la faible visibilité :

Lorsqu'une tempête de sable survient, la visibilité peut se détériorer en quelques instants, tombant en dessous des seuils requis pour assurer les phases critiques du vol, telles que l'atterrissage ou le décollage. Cette baisse

soudaine de la visibilité rend difficile l'identification précise de la piste, des feux de balisage ou des obstacles à proximité, ce qui augmente nettement les risques opérationnels. Dans de telles conditions, l'interruption des opérations devient parfois inévitable, conduisant à des retards, des modifications d'itinéraires ou à l'annulation pure et simple de certains vols.

La présence de sable sur les pistes peut nuire à l'adhérence des trains d'atterrissage, compromettant ainsi l'efficacité du freinage et les performances des aéronefs lors des phases au sol. En parallèle, l'accumulation de poussière sur les dispositifs sensibles – tels que les capteurs météorologiques, les antennes de navigation ou les systèmes de surveillance – risque de provoquer des anomalies de lecture, voire des défaillances momentanées. Cette instabilité technique complexifie le travail des contrôleurs aériens, contraints de gérer le trafic dans un contexte opérationnel moins fiable.

Les infrastructures aéroportuaires situées dans le sud algérien, à Tamanrasset, Ouargla ou Adrar, sont régulièrement confrontées à ce type de perturbations, tout comme celles implantées dans d'autres régions arides, notamment au Sahel ou au Moyen-Orient.[29]

3.2.2 Risques pour la sécurité aérienne :

Les conditions météorologiques défavorables figurent parmi les causes les plus fréquentes d'accidents dans le secteur aérien. Parmi elles, la faible visibilité, qu'elle soit due au brouillard, aux chutes de neige ou aux poussières désertiques, joue un rôle central dans un grand nombre d'incidents répertoriés par les organismes d'enquête. Ce facteur impacte particulièrement les phases sensibles du vol, comme le décollage et l'atterrissage, où une bonne perception visuelle reste essentielle à la sécurité des manœuvres.

La figure suivante illustre la répartition estimée des accidents aériens attribués aux différents phénomènes météorologiques, selon les données analysées par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), la Federal Aviation Administration (FAA) et l'Association Internationale du Transport Aérien (IATA).[30]

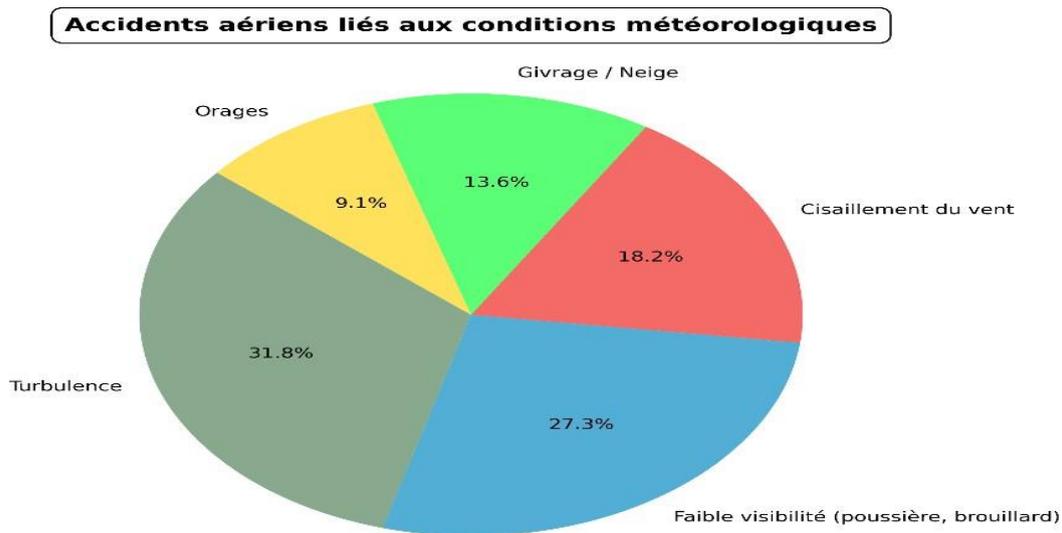


Figure 3.2: Accidents aériens liés aux conditions météo (estimation mondiale)

Ces données confirment le rôle critique de la visibilité dans la sécurité aérienne. Dans les régions sahariennes, les tempêtes de sable peuvent réduire la visibilité à moins de 500 mètres, voire à quelques dizaines de mètres, rendant toute manœuvre aérienne dangereuse. Cette vulnérabilité impose aux autorités aéronautiques la nécessité de renforcer les capacités de prévision, d’alerte et de coordination avec les services météorologiques.

3.2.3 Perturbations économiques et logistiques :

En dehors des aspects liés à la sécurité, les vents de sable influencent fortement la ponctualité et la stabilité des opérations aériennes. Face à ces conditions, les compagnies aériennes sont contraintes d’ajuster leurs plannings, de prévoir des équipages de remplacement, et d’assumer les charges financières induites par les retards, les annulations ou les changements de trajectoire.

Pour illustrer de manière concrète ces perturbations, le tableau ci-dessous recense plusieurs vols impactés par des épisodes de vents de sable survenus dans le sud de l’Algérie entre février et août 2024. Il s’agit essentiellement de

trajets reliant les grandes agglomérations du nord aux aéroports situés dans les régions sahariennes.

Numéro de vol	Date du vol	Départ → Arrivée	Heure prévue	Type d'aéronef
AH1163	28/08/2024	Paris CDG → El Oued	14 :35 → 17 :05	Boeing 738
AH6276	07/05/2024	Alger → Mecheria	10 :20 → 11 :50	ATR 72
AH6216	04/04/2024	Alger → Ouargla	15 :20 → 16 :32	Boeing 736
AH6342	30/03/2024	Constantine → Ouargla	15 :57 → 17 :30	Boeing 738
AH6335	29/03/2024	Tamanrasset → Illizi	12 :35 → 14 :25	ATR 72
AH6480	26/03/2024	Ouargla → Adrar	14 :03 → 16 :00	ATR 72
AH6276	24/03/2024	Alger → Mecheria	10 :20 → 11 :50	ATR 72

AH614 2	24/03/202 4	Alger → Adrar	20 :45 → 22 :30	Boein g 736
AH625 2	29/02/202 4	Oran → El Oued	10 :30 → 11 :50	ATR 72
AH622 4	26/02/202 4	Alger → El Bayadh	20 :50 → 22 :25	ATR 72
AH614 2	28/08/202 4	Alger → Adrar	22 :55 → 00 :35	ATR 72

Tableau 3.2: Tableau de vols retardés à cause d'une tempête de sable

Ces cas illustrent l'ampleur des perturbations que peuvent provoquer les épisodes sableux dans les zones arides. L'impact ne se limite pas aux vols eux-mêmes : il touche l'ensemble des maillons de la chaîne aéronautique, des passagers aux compagnies, en passant par les services au sol, la gestion du trafic, voire la maintenance lorsque des particules pénètrent dans les moteurs ou les capteurs sensibles.

Pour l'évaluation des effets du sable sur les opérations aériennes met en lumière plusieurs formes de vulnérabilité : une dégradation de la sécurité en raison de la faible visibilité, une irrégularité croissante du trafic et des coûts supplémentaires pour les exploitants. Dans les régions du sud algérien, où le développement du transport aérien représente un enjeu stratégique, ces contraintes appellent des réponses adaptées. Cela inclut notamment un renforcement des systèmes de prévision, d'alerte, et une modernisation des infrastructures pour mieux anticiper et gérer ces phénomènes extrêmes.

3.3 RISQUES TECHNIQUES POUR LES AERONEFS :

Les vents de sable, au-delà de la réduction de visibilité, exercent également une pression directe sur la structure des aéronefs, avec des impacts souvent différés mais potentiellement sérieux à long terme. Lorsqu'un avion traverse une zone atmosphérique riche en poussières fines, il est soumis à un milieu abrasif et corrosif, susceptible de dégrader la cellule, les capteurs embarqués et particulièrement les moteurs. Bien que généralement invisibles, ces particules solides accélèrent l'usure des matériaux, nuisent à l'aérodynamisme de l'appareil et peuvent entraîner des anomalies mécaniques.

Dans les régions désertiques ou semi-arides, où le trafic aérien est en expansion, les avions sont confrontés à des risques plus importants, en particulier lors des étapes sensibles du vol telles que le décollage, la montée ou l'atterrissage. Même si les impacts ne sont pas toujours visibles à court terme, l'érosion progressive ou les dépôts de particules sur les composants techniques augmentent les besoins en maintenance, la consommation de carburant et le risque de défaillances. L'analyse qui suit s'inscrit dans cette logique, en précisant les catégories de dommages identifiés ainsi que leurs conséquences sur l'exploitation aérienne.[28]

3.3.1 Abrasion et usure des composants critiques :

Lorsqu'un aéronef traverse une masse d'air chargée en sable ou en poussière, ses surfaces extérieures sont soumises à une forme d'érosion mécanique progressive. Les particules en suspension, même de taille microscopique, agissent comme un abrasif. Transportées à grande vitesse par les vents, elles viennent heurter les zones les plus exposées de l'appareil, notamment les bords d'attaque des ailes, des empennages, les entrées d'air, les radômes, ou encore les capteurs externes. Ce phénomène, bien que discret sur le moment, provoque une altération lente mais continue des matériaux.

Les verrières des cockpits et les hublots ne sont pas épargnés. Avec le temps, la surface du vitrage peut perdre en transparence et en uniformité, ce qui peut perturber la vision directe des pilotes, en particulier lors des manœuvres à basse altitude ou dans des conditions de forte luminosité. De même, les capteurs exposés, comme les sondes Pitot, les thermomètres d'ambiance ou les détecteurs de givrage, peuvent subir une dégradation de

leur précision en raison de micro-dommages répétés sur leur surface ou de dépôts accumulés.

L'usure touche aussi des éléments internes lorsqu'elle s'accompagne d'ingestion de sable. Les ailettes de compresseur et les premières turbines, en particulier, sont sensibles à la perte de profil liée à l'érosion. Cette altération modifie les caractéristiques aérodynamiques de ces pièces, réduisant leur rendement et affectant le comportement global du moteur. Dans les zones désertiques, certains opérateurs ont même constaté que les dommages accumulés en quelques semaines de vols équivalaient à plusieurs mois d'opération en atmosphère normale.

Ainsi, l'exposition répétée à des conditions sablonneuses n'est pas anodine. Elle affecte non seulement la performance des aéronefs, mais elle accroît aussi les coûts de maintenance préventive. Pour certaines compagnies opérant dans des régions sensibles, des inspections spécifiques sont mises en place après chaque vol dans une zone impactée, afin de limiter l'apparition de dommages irréversibles.[29]

3.3.2 Encrassement et ingestion des moteurs :

Les moteurs à réaction sont parmi les composants les plus sensibles à l'environnement aérien. Lorsqu'un avion traverse une tempête de sable ou une zone chargée en poussière, les particules fines sont aspirées en grande quantité dans les réacteurs. Ces particules, bien que minuscules, peuvent avoir des effets considérables sur les performances et la fiabilité des moteurs.

Une première conséquence est l'encrassement progressif des composants internes. À haute température, les poussières peuvent fondre partiellement et se déposer sous forme de croûtes ou de résidus sur les surfaces chaudes, comme les chambres de combustion ou les turbines haute pression. Ces dépôts altèrent le flux d'air, modifient la combustion, et réduisent l'efficacité énergétique du moteur. Ils peuvent aussi perturber le refroidissement des pièces critiques, augmentant les risques de surchauffe ou de fissuration thermique



Figure 3.3: Effets visibles de l'exposition au sable sur un moteur d'avion

L'ingestion massive de sable peut aussi endommager mécaniquement les ailettes du compresseur, surtout dans les premiers étages, là où la vitesse d'impact des particules est la plus élevée. Ces impacts répétés entraînent une érosion du profil des pales, ce qui modifie leur capacité à comprimer efficacement l'air. Avec le temps, cela se traduit par une perte de poussée, une augmentation de la température à l'échappement, et une dégradation du rendement global du moteur.

Au-delà des performances, ces phénomènes posent un problème majeur de fiabilité. Des incidents documentés font état d'extinctions moteur en vol, causées par une ingestion excessive de sable ayant perturbé la flamme ou encrassé les injecteurs. D'autres cas ont montré que l'accumulation de dépôts dans les conduits d'air pouvait entraîner une perte de pression, voire un décrochage moteur.

Les constructeurs d'avions et de moteurs reconnaissent aujourd'hui ces risques et recommandent, pour les opérations en environnement désertique, des cycles de maintenance raccourcis, l'utilisation de filtres adaptés ou de revêtements spéciaux pour limiter l'adhérence des particules. Néanmoins, même avec ces mesures, le sable reste un facteur d'usure accélérée et un défi constant pour la sécurité et la durabilité des réacteurs.[31]

3.3.3 Conséquences sur la maintenance et la sécurité aérienne :

Les effets du sable sur les aéronefs ne se limitent pas à une simple usure des pièces mécaniques. Ils influencent directement les programmes de maintenance, la disponibilité opérationnelle des avions, ainsi que le niveau de sécurité lors des phases critiques du vol. Une exposition fréquente à des atmosphères chargées en poussières impose des révisions plus rapprochées, un suivi accru des composants sensibles, et l'exécution d'opérations techniques non prévues initialement dans les cycles standards d'entretien établis par les fabricants.

Cette contrainte engendre une hausse marquée des charges pour les exploitants. Les moteurs exigent des nettoyages répétés, certaines sondes doivent être remplacées à intervalles réduits, et les systèmes de filtration subissent une sollicitation accrue. Ces interventions entraînent une mobilisation permanente des équipes de maintenance, une indisponibilité partielle des appareils, et une diminution de l'efficacité économique de l'exploitation, notamment pour les compagnies opérant avec des marges restreintes ou sur des segments régionaux.

Sur un plan plus critique, les implications sécuritaires deviennent préoccupantes. Un capteur altéré par des micro-dépôts peut transmettre des informations erronées aux systèmes embarqués ou à l'équipage. Un moteur dont la dynamique est affectée par des résidus internes peut compromettre une manœuvre d'urgence ou répondre de manière imprévisible à une sollicitation rapide. Même en l'absence de panne franche, une dégradation mineure, si elle survient dans un contexte opérationnel tendu, peut accentuer les risques.

Pour limiter ces effets, les autorités de l'aviation civile et les constructeurs recommandent des mesures préventives spécifiques. Cela inclut des restrictions d'exploitation durant les épisodes de vent de sable, l'adaptation des itinéraires, ou encore l'application de protocoles de maintenance renforcés dans les zones à risque. Malgré ces efforts, les environnements désertiques demeurent des milieux exigeants pour l'aviation moderne, nécessitant une vigilance constante et des adaptations techniques durables.[33]

3.4 ÉTUDES DE CAS DE PERTURBATIONS REELLES :

- In Salah - 22 juin 2023 :

Dans la matinée du 22 juin, l'aéroport d'In Salah a connu un épisode de sable soufflé par le vent, réduisant fortement la visibilité. Les rapports METAR indiquaient une visibilité de seulement 3 kilomètres :

```
DAUI 160800Z 05020KT 3000 DRSA NSC 26/05 Q1015
```

Cette situation a duré près de huit heures, entraînant la suspension des vols et le déroutement de trois appareils vers d'autres aéroports du sud.

- Tamanrasset - 15 mars 2024 :

Tôt le matin, vers 4h15, une importante tempête de sable s'est abattue sur Tamanrasset. Les observations faisaient état d'une visibilité tombée à 150 mètres :

```
DAAT 150415Z 09025KT 0150 SS NSC 23/07 Q1018
```

Avec des vents soufflant à 25 nœuds et un ciel totalement obstrué par le sable, l'aéroport a été fermé jusqu'à 16h30. Tous les vols du matin ont été annulés ou reportés.

- Adrar - 9 avril 2024 :

Adrar a connu un épisode similaire quelques semaines plus tard. À 6h du matin, les conditions s'étaient déjà détériorées :

```
DAUA 090600Z 12030KT 0200 SS NSC 24/06 Q1015
```

Une visibilité de 200 mètres et des vents soutenus ont forcé les autorités à interrompre le trafic aérien pendant plus de dix heures. Deux vols ont été touchés, occasionnant de longs retards et une réorganisation logistique.

3.4.1 Bilan :

Ces trois événements ont en commun une baisse brutale de visibilité en quelques heures, due au soulèvement massif de sable. La réponse opérationnelle a été immédiate : suspension des vols, activation de plans

d'urgence, déroutements. Ces études de cas démontrent la fragilité des opérations aériennes face à ces phénomènes, et soulignent l'importance de systèmes de prévision fiables et d'une coordination efficace entre météorologie et services aéroportuaires.

3.5 MESURES D'ATTENUATION ET STRATEGIES AEROPORTUAIRES :

3.5.1 Gestion de crise en temps réel sur les aéroports sahariens :

Dès qu'un épisode de vent de sable est détecté ou anticipé, les aéroports du sud activent des procédures spécifiques prévues dans leurs plans d'urgence. Cela inclut la fermeture temporaire des pistes, sur décision du responsable d'aérodrome ou de la tour de contrôle. Un NOTAM (Notice to Airmen) est alors diffusé pour informer l'ensemble des opérateurs concernés. Lorsque la visibilité passe en dessous des minima requis pour le vol à vue (VMC), le trafic passe automatiquement sous régime IMC (conditions de vol aux instruments). Dans le cas où la visibilité descend en dessous même des seuils autorisés en IMC, les opérations sont suspendues.

3.5.2 Déroutement, annulation et maintien au sol des vols :

Selon la sévérité de l'événement, les vols prévus peuvent être soit déroutés vers des aéroports de repli (souvent Ghardaïa, Hassi Messaoud ou Alger), soit reportés ou même annulés. Les compagnies activent alors leurs cellules de gestion de crise pour assurer :

- La prise en charge des passagers (restauration, hébergement)
- Le réacheminement logistique vers la destination initiale
- La reprogrammation des équipages et avions

En parallèle, les autorités aéroportuaires surveillent en continu l'évolution de la situation à travers les bulletins METAR/SPECI, les observations au sol et les alertes météo régionales.

3.5.3 Adapter l'infrastructure aux défis du désert :

Malgré leur exposition régulière aux vents de sable, de nombreux aéroports du sud de l'Algérie restent sous-équipés pour faire face efficacement à ces épisodes.

Parmi les améliorations techniques envisageables :

- L'installation de capteurs RVR (Runway Visual Range) plus performants pour mieux estimer la visibilité réelle sur la piste.
- L'implémentation de radars météorologiques capables de détecter les particules solides (sable, poussière) et leur hauteur.
- L'équipement de certaines plateformes (comme Tamanrasset ou Adrar) en systèmes d'atterrissage aux instruments de catégorie II ou III, permettant les approches en très faible visibilité.

3.5.4 Mieux prévoir pour mieux anticiper :

L'un des points clés de l'atténuation des impacts reste la prévision météorologique. Aujourd'hui, cela repose sur une combinaison de données :

- Les observations de surface (stations SYNOP, METAR automatisés)
- L'imagerie satellitaire, notamment les produits Dust RGB issus de MSG/SEVIRI ou MODIS AOD (Aerosol Optical Depth)
- Les modèles numériques spécialisés, comme ARPEGE Dust, BSC-DREAM8b ou NAAPS, qui simulent la charge en particules, le transport et la dispersion du sable

Mais pour être réellement efficace, cette prévision doit être exploitée opérationnellement : interprétée par des prévisionnistes formés, diffusée en temps utile, et prise en compte dans les décisions aéronautiques.

3.5.5 Une coordination renforcée entre tous les acteurs :

Enfin, aucune mesure d'atténuation ne peut réussir sans une collaboration active entre :

- Les services météorologiques (ONM, Météo Algérie)

- Les gestionnaires d'aéroports (EGSA Sud, DSA)
- Les autorités aéronautiques (DGAC, ANAC)
- Et bien sûr, les compagnies aériennes et les contrôleurs aériens

La mise en place de protocoles de communication clairs et d'échanges rapides d'information (via AFTN, plateformes METWATCH, coordination des cellules de crise) est essentielle pour garantir la sécurité et limiter l'impact économique des vents de sable sur le trafic aérien.

CONCLUSION :

Les vents de sable ont un impact direct et significatif sur la sécurité des opérations aériennes, la régularité des vols et la gestion des infrastructures aéroportuaires. Cette analyse démontre la nécessité d'une meilleure anticipation des conditions de visibilité dégradée dans les régions sahariennes, condition préalable à une amélioration des dispositifs de prévention et d'alerte.

CHAPITRE 4 : VALIDATION
DE LA PREVISION DES
VISIBILITES EN CONDITIONS
DE VENT DE SABLE

INTRODUCTION :

La prévision météorologique dans les régions désertiques présente des défis spécifiques, en particulier lorsqu'il s'agit de phénomènes tels que le vent de sable, qui affecte directement la visibilité et, par conséquent, la sécurité des opérations aériennes. Dans ce contexte, il est essentiel de disposer d'outils numériques performants capables de simuler avec précision l'apparition et l'évolution de ces événements.

Ce chapitre présente le cadre général de la prévision météorologique appliquée aux régions sahariennes, avec un focus particulier sur le phénomène de vent de sable. Il décrit les modèles utilisés à l'Office National de la Météorologie (notamment ALADIN-Dust), les étapes d'une prévision opérationnelle, ainsi que les limites rencontrées en termes de qualité de simulation.

L'étude se concentre ensuite sur un ensemble de cas réels ayant affecté la visibilité dans le sud de l'Algérie. Après la présentation du contexte, de la zone d'étude et des données exploitées, une méthodologie d'amélioration de la visibilité simulée est proposée. Celle-ci repose sur une correction empirique intégrant la vitesse du vent.

Enfin, une comparaison avec les observations METAR et une analyse statistique des résultats permettent de valider la pertinence de l'approche développée dans le cadre de ce travail.

4.1 DEFINITION DE LA PREVISION EN AEROLOGIE DESERTIQUE :

La prévision en aérologie désertique désigne l'ensemble des approches employées pour anticiper les phénomènes atmosphériques propres aux milieux arides et semi-arides, en particulier ceux liés aux poussières et particules sableuses en suspension. Ces régions, à la différence des zones tempérées, se caractérisent par une dynamique météorologique particulière, marquée notamment par une variabilité accrue des vents, des températures extrêmes, une humidité très faible, ainsi que des phénomènes éoliens violents tels que les soulèvements de poussière et les tempêtes de sable.

Dans ce type d'environnement, la prévision ne se limite pas à l'analyse des variables classiques telles que le vent ou la température. Elle inclut

également l'évaluation du transport des particules, la modélisation de leur concentration dans l'atmosphère, ainsi que leurs effets sur la visibilité, la qualité de l'air et la sécurité aérienne. Cette approche intégrée permet de mieux anticiper les perturbations susceptibles d'affecter les opérations dans les aéroports exposés, comme ceux du sud algérien, où ces phénomènes sont fréquents.

Dans ce cadre, la prévision aérologique devient un outil stratégique pour assurer la continuité et la sécurité des vols. Elle repose sur la collecte de données issues de sources multiples, telles que les stations météorologiques, l'imagerie satellitaire, les modèles numériques de prévision ou les systèmes d'assimilation de données, afin de produire des résultats fiables. L'objectif est de fournir aux acteurs de l'aviation des informations précises, en temps utile, pour faciliter la prise de décision et optimiser la gestion des opérations en contexte désertique.[20]

4.2 LES PRINCIPAUX MODELES UTILISEES A L'OFFICE NATIONAL DE LA METEO :

4.2.1 ALADIN :

Le modèle ALADIN (*Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement InterNational*) est un modèle atmosphérique régional conçu pour la prévision numérique du temps à moyenne et fine échelle. Il permet de simuler avec précision les champs météorologiques tels que la température, la pression, le vent et l'humidité, en tenant compte des interactions entre les différents niveaux de l'atmosphère.

En plus de son utilisation en prévision opérationnelle, ALADIN est également utilisé depuis 1997 au CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques, France) comme modèle régional de climat, notamment dans le cadre des études de modélisation climatique à haute résolution.

La version opérationnelle ALADIN-Algérie s'étend sur l'ensemble du territoire national. Elle fonctionne avec une résolution horizontale de 8 km × 8 km, ce qui permet de capter les phénomènes météorologiques à méso-échelle. Sur le plan vertical, le modèle comprend 70 niveaux, allant de 17 mètres au-

dessus du sol jusqu'à environ 65 kilomètres d'altitude, couvrant ainsi toute la troposphère et une partie de la stratosphère.[10]

4.2.2 ALADIN-DUST :

Le modèle ALADIN-Dust (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement InterNational – Dust) est une version spécialisée du modèle atmosphérique régional ALADIN, développée pour simuler les concentrations de poussière dans l'atmosphère, notamment en milieu désertique. Il est utilisé pour prévoir les épisodes de soulèvement de sable, leur transport, leur dispersion ainsi que leur dépôt, en tenant compte des conditions météorologiques locales et des caractéristiques du sol.

Ce modèle est couplé au schéma de surface SURFEX, qui permet d'intégrer des paramètres essentiels à l'émission de poussière tels que la texture du sol, la végétation, l'humidité ou encore la rugosité de surface. Grâce à cette prise en compte détaillée des conditions en surface, ALADIN-Dust peut modéliser de manière réaliste l'émission initiale des particules. Une fois émises, ces dernières sont soumises à différents processus physiques, notamment la turbulence atmosphérique, la sédimentation, ainsi que les dépôts secs et humides, qui conditionnent leur transport et leur évolution dans l'atmosphère.

Le modèle fonctionne avec une résolution horizontale de 8 km × 8 km, offrant ainsi une représentation fine des phénomènes à méso-échelle. Il comporte 70 niveaux verticaux, s'étendant de 17 mètres au-dessus du sol jusqu'à environ 65 kilomètres d'altitude, ce qui lui permet de couvrir l'ensemble de la troposphère et une partie de la stratosphère, et de mieux capturer les interactions entre la surface terrestre et l'atmosphère.[10]

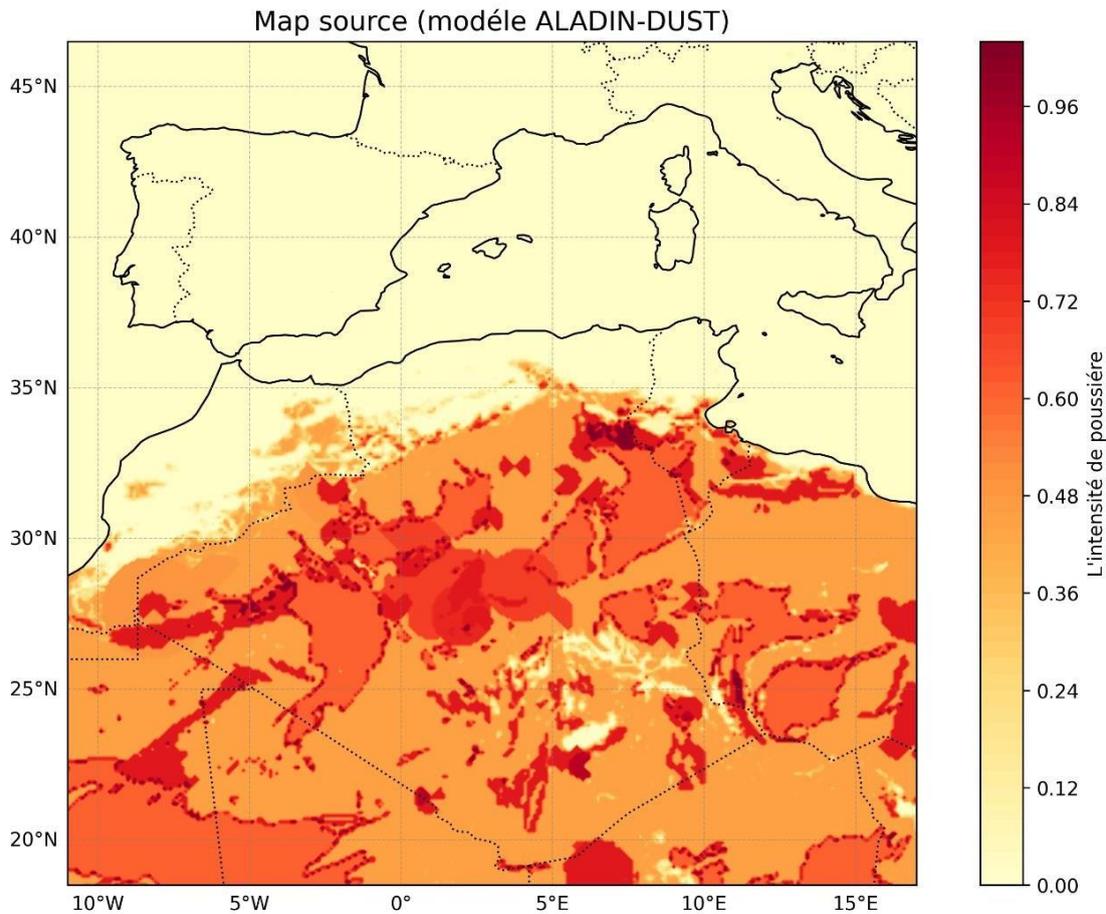


Figure 4.1: carte source du model ALADIN-DUST

4.2.3 AROME :

Le modèle AROME (*Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Meso-Échelle*) est un modèle météorologique non hydrostatique à haute résolution, destiné à la prévision du temps à très courte échéance et à la représentation fine des phénomènes atmosphériques locaux. Il est particulièrement adapté à la simulation des phénomènes convectifs intenses, des brouillards, des précipitations localisées et des rafales de vent.

La version opérationnelle d'AROME utilisée par l'Office National de la Météorologie couvre principalement la partie nord de l'Algérie. Elle fonctionne avec une résolution horizontale de 3 km × 3 km, permettant une modélisation précise des processus à méso-échelle. Sur le plan vertical, le modèle comporte 41 niveaux, s'étendant de 17 mètres au-dessus du sol jusqu'à environ 45 kilomètres d'altitude, englobant ainsi l'ensemble de la troposphère et une partie de la stratosphère.[10]

4.3 LES ETAPES D'UNE PREVISION METEOROLOGIQUE :

La prévision météorologique repose sur quatre étapes essentielles. Elle débute par la phase d'observation, au cours de laquelle sont recueillies des données provenant de diverses sources. Ces informations sont ensuite assimilées afin d'établir une image fidèle de l'état actuel de l'atmosphère. Vient ensuite la simulation de son évolution à l'aide de modèles numériques sophistiqués. Enfin, les résultats obtenus sont interprétés et analysés par les prévisionnistes pour produire une prévision fiable.

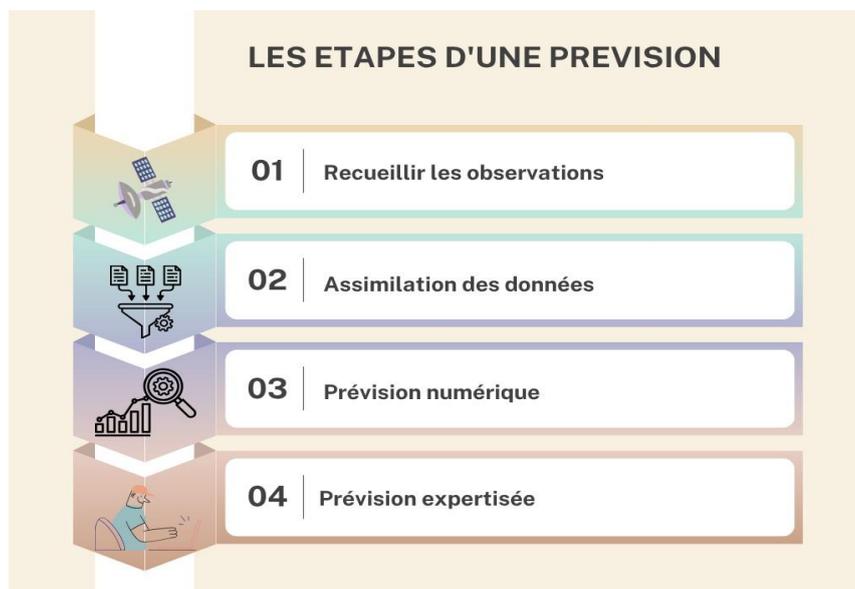


Figure 4.2: Les étapes d'une prévision météorologique

4.3.1 Recueillir les observations et assimiler les données :

La première étape d'une prévision consiste à collecter un ensemble aussi complet que possible de données atmosphériques. Ces observations proviennent de différentes sources : stations météorologiques au sol, capteurs embarqués sur des ballons radiosondés, données satellitaires (comme celles issues de Meteosat ou Sentinel-5P), radars et capteurs au sol. Ces données permettent d'observer en temps réel les paramètres clés de l'atmosphère tels que la température, la pression, l'humidité, le vent, ou encore la concentration en particules désertiques.

Une fois collectées, ces observations sont intégrées dans les modèles via un processus appelé assimilation des données. Cette phase permet d'ajuster l'état initial de l'atmosphère dans le modèle de simulation afin qu'il reflète le plus fidèlement possible les conditions réelles. L'efficacité de cette étape est

déterminante pour la fiabilité des prévisions, en particulier dans des environnements complexes comme les régions sahariennes, où les données sont parfois rares et hétérogènes.

4.3.2 Simuler le comportement de l'atmosphère en trois dimensions :

À partir des données assimilées, les centres de prévision lancent des modèles numériques de prévision du temps. Ces modèles résolvent un ensemble d'équations physiques décrivant les mouvements de l'air, le transfert d'énergie, les échanges d'humidité ou encore la dynamique des aérosols. Ils simulent l'évolution de l'atmosphère dans le temps et dans l'espace (horizontal et vertical), souvent sur plusieurs jours à l'avance.

Dans le cas du vent de sable, des modules spécifiques intégrés à certains modèles (comme ALADIN Dust) permettent de modéliser le soulèvement, le transport et le dépôt des particules désertiques. Ces simulations produisent des sorties brutes, sous forme de champs de vent, de température, de concentration en poussières, à différentes altitudes et échelles temporelles.

4.3.3 L'analyse des simulations par les prévisionnistes :

Les résultats des modèles ne constituent pas en eux-mêmes des prévisions utilisables directement. Il revient aux prévisionnistes météorologiques d'interpréter ces sorties brutes à la lumière de leur expertise, des conditions locales et des connaissances climatologiques spécifiques à la région concernée. Ils doivent notamment identifier les situations à risque, ajuster les scénarios en fonction des incertitudes, et formuler des bulletins adaptés aux besoins des usagers.

Dans les zones sahariennes, cette étape revêt une importance particulière : les prévisionnistes doivent être capables de détecter les situations propices à la formation de tempêtes de sable, d'anticiper leur trajectoire et leur intensité, et de communiquer l'information de manière claire aux secteurs sensibles, notamment l'aviation, la santé publique ou encore la logistique.[41]

4.4 LA QUALITE DES PREVISIONS :

La fiabilité des prévisions météorologiques repose principalement sur la qualité de la représentation de l'état initial de l'atmosphère, obtenue grâce à

l'assimilation de données provenant de multiples sources telles que les stations au sol, les satellites ou les radiosondages. Plus ces données sont précises et bien intégrées, plus la prévision est susceptible d'être fiable. À cela s'ajoute la performance du modèle utilisé, déterminée par sa résolution spatiale, la rigueur de ses équations physiques et sa capacité à simuler des phénomènes de petite échelle. Néanmoins, cette qualité varie selon les paramètres : la température ou le vent sont généralement mieux anticipés que les précipitations ou le brouillard, qui dépendent de dynamiques locales complexes à modéliser. Pour mieux gérer cette incertitude, les prévisions d'ensemble, basées sur plusieurs simulations légèrement différentes, sont aujourd'hui largement adoptées, permettant ainsi de fournir une vision probabiliste plutôt qu'un scénario unique. Ces avancées ont contribué à une nette amélioration de la précision des prévisions au fil des années.[42]

4.5 CONTEXTE DU SUJET ET BUTS POURSUIVIS :

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de validation d'une étude sur la tendance du modèle ALADIN-DUST à prévoir ce phénomène qui a été réalisée par une coopération entre l'ONM et IAB. Cette étude est basée sur une relation empirique permettant de convertir la concentration de sable en visibilité, et la comparée avec la visibilité pris du modèle.

L'objectif de ce travail est :

- Mieux prévoir les visibilités réduites causées par les vents de sable dans le sud de l'Algérie.
- Généraliser l'étude effectuée dans le PFE à d'autres aérodomes.

4.6 ZONE D'ETUDE :

Dans ce travail, l'analyse se concentre sur le sud de l'Algérie, une région vaste, désertique, et régulièrement touchée par les vents de sable. Ce choix n'est pas un hasard. Le climat y est extrêmement sec, les sols sont nus et exposés, et les vents soufflent souvent fort, surtout au printemps et en été. Toutes les conditions sont réunies pour que le sable soit facilement soulevé dans l'atmosphère. Des wilayas comme Tamanrasset, Adrar, In Salah ou encore Illizi reviennent très souvent dans les bulletins météorologiques lorsqu'il s'agit de tempêtes de sable. Ce sont aussi des points importants pour le trafic

aérien national, car elles abritent plusieurs aéroports civils ou mixtes. En se concentrant sur cette zone, on cherche à mieux comprendre les effets directs du vent de sable sur l'aviation, mais aussi à identifier ce qui pourrait être amélioré en matière de prévision, de sécurité et d'organisation. Le sud algérien est donc un terrain d'étude à la fois stratégique et représentatif de ce que vivent de nombreuses régions désertiques



Figure 4.3: La zone d'étude

4.7 LES DONNEES DE L'ETUDE :

Cette partie présente les types de données exploitées pour mener l'étude : d'une part les données issues des modèles numériques fournis par l'ONM, et d'autre part les données d'observation réelles (METAR) servant de référence pour l'évaluation. Ces données permettent de diagnostiquer la visibilité réduite par le vent de sable et de valider la performance des prévisions.

4.7.1 Données de concentration et de vent :

Les données exploitées sont issues du modèle numérique ALADIN- Dust, spécialisé dans la prévision des aérosols désertiques. Elles comprennent :

- Les composantes du vent : U (zonal, est-ouest) et V (méridien, nord-sud), exprimées en m/s,
- La concentration massique de poussière (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$), représentant la quantité de particules en suspension dans l'air au voisinage de la surface.

Ces données sont disponibles à des pas de temps réguliers (toutes les 3 heures ou à des horaires fixes selon le modèle), et sont géoréférencées sur une grille couvrant le sud de l'Algérie. Elles constituent l'entrée principale pour le calcul de la visibilité par méthode empirique. Un traitement est nécessaire pour les exploiter efficacement au niveau des aéroports ou des zones de coordination.

4.7.2 Données METAR et visibilité observée :

Les données METAR sont des rapports d'observation météorologique diffusés par les stations aéronautiques situées sur les aérodromes. Ces messages sont standardisés selon les normes de l'OACI et contiennent notamment :

- La visibilité horizontale observée (en mètres ou kilomètres),
- Les phénomènes présents (ex. : BLDU = soulèvement de poussière, DS = tempête de sable),
- Les conditions de vent, température, pression, etc.

Les METAR servent ici comme référence d'observation pour comparer les visibilités simulées (initiales et corrigées). Leur fiabilité et leur fréquence en font des données précieuses pour la validation du modèle. Les observations sont extraites aux mêmes pas de temps que les simulations, sur les mêmes zones géographiques.

4.8 METHODOLOGIE :

Le principe de la méthode consiste à traiter les données issues du modèle ALADIN-Dust, à calculer les visibilités, à appliquer une correction empirique, et à comparer les résultats aux observations METAR. L'objectif est d'améliorer la correspondance entre les visibilités simulées et celles

réellement observées lors d'épisodes de vent de sable, notamment dans les aéroports du sud de l'Algérie.

4.8.1 Calcul de la visibilité brute :

Le modèle ALADIN-Dust fournit des données de concentration massique de poussière (exprimée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour chaque point de sa grille. À partir de ces concentrations, nous avons estimé la visibilité horizontale en appliquant une relation empirique utilisée dans plusieurs travaux antérieurs sur les milieux désertiques. La formule adoptée est la suivante :

$$VV = \left(\frac{1897}{C} \right)^{0.91}$$

Où:

- **VV** est la visibilité (en kilomètres),
- **C** est la concentration de poussière (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Cette relation inverse traduit la décroissance de la visibilité avec l'augmentation de la concentration particulaire dans l'air. Les visibilités ainsi obtenues sont qualifiées de « visibilités brutes », car elles sont directement déduites des sorties du modèle sans ajustement externe.

4.8.2 Calcul de la vitesse du vent :

Les données issues du modèle fournissent les composantes horizontales du vent :

- **U** : composante zonale (est-ouest),
- **V** : composante méridienne (nord-sud).

La vitesse du vent est ensuite déterminée à partir de ces deux composantes selon la formule vectorielle classique :

$$w = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Cette vitesse, exprimée en m/s, constitue un paramètre essentiel pour l'analyse du soulèvement et du transport des particules de sable. Le calcul est réalisé au niveau des points situés à proximité des aéroports concernés, afin de refléter au mieux les conditions locales.

4.8.3 Application de la correction empirique :

Dans de nombreux cas, la visibilité estimée par la relation brute ne correspondait pas aux observations réelles METAR, en particulier lorsque la dynamique du vent jouait un rôle important dans le soulèvement des poussières. Pour corriger cette limitation, une formule empirique a été introduite afin de recalculer une concentration ajustée en fonction de la vitesse du vent.

La concentration corrigée est déterminée par la relation suivante :

$$C_{\text{corrigée}} = C + K \times (V - V_0)^2$$

Où :

- **C_{corrigée}** est la concentration finale ajustée, exprimée également en $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- **C** désigne la concentration de poussière simulée par le modèle (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$),
- **V** est la vitesse du vent (m/s),
- **V₀** est une vitesse seuil, au-dessous de laquelle le vent n'a pas suffisamment d'énergie pour soulever les particules,
- **K** est un coefficient d'ajustement empirique, dépendant des conditions locales (type de sol, humidité, rugosité). Pour les zones désertiques du sud algérien, la valeur de **K** varie généralement entre 30 et 50 $\mu\text{g}\cdot\text{s}^2/\text{m}^5$.

Cette formulation n'est appliquée que dans les cas où le vent atteint ou dépasse le seuil critique **V₀**, et dans les zones où la concentration initiale demeure inférieure à un certain niveau limite (par exemple, 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), afin d'éviter une surestimation dans des situations déjà fortement chargées en particules.

Sur le plan physique, cette approche repose sur le constat que l'émission de particules dans les zones arides n'apparaît que lorsque le vent atteint une intensité suffisante. Une fois ce seuil franchi, le phénomène s'intensifie rapidement, ce qui justifie le recours à un terme quadratique (**V-V₀**). Cette forme traduit l'augmentation non linéaire de l'énergie disponible pour arracher les particules à la surface du sol et les mettre en suspension.

L'intégration de cette correction permet ainsi d'obtenir une estimation plus réaliste de la concentration de poussière dans l'atmosphère, et améliore, en conséquence, la qualité des prévisions de visibilité, particulièrement dans les situations à forte composante éolienne.

4.8.4 Calcul de la visibilité corrigée :

Une fois la concentration ajustée selon la méthode décrite précédemment, une nouvelle estimation de la visibilité est calculée à l'aide de la même relation empirique appliquée dans la première étape du traitement. Cette relation lie la concentration de poussière à la visibilité horizontale selon une loi inverse non linéaire :

$$VV_{\text{corrigée}} = \left(\frac{1897}{C_{\text{corrigée}}} \right)^{0.91}$$

Dans ce cas, la concentration utilisée correspond à la valeur corrigée, intégrant l'effet du vent lorsque les conditions locales le justifient. Ce recalcul permet de générer une prévision de visibilité plus représentative des conditions atmosphériques réelles, notamment lors d'épisodes venteux propices au soulèvement de particules désertiques.

Les résultats issus de cette méthode sont ensuite confrontés aux observations issues des messages METAR, afin de vérifier l'efficacité de l'ajustement et d'évaluer la qualité de la prévision améliorée.

4.9 COMPARAISON AVEC LES OBSERVATIONS :

Cette section vise à évaluer la performance du modèle corrigé en le comparant aux données réelles rapportées par les messages METAR. La visibilité mesurée au niveau des aéroports constitue un indicateur de référence essentiel pour apprécier la qualité des simulations produites et mesurer les améliorations apportées par la méthode de correction. La démarche s'appuie sur la sélection de cas réels d'événements sableux ayant provoqué des perturbations aéronautiques, puis sur une comparaison visuelle et statistique des résultats.

4.9.1 Sélection des cas d'étude :

Pour illustrer la méthodologie de comparaison, quatre épisodes significatifs de vents de sable ayant affecté le sud de l'Algérie ont été sélectionnés. Ces

événements ont provoqué des perturbations aériennes (retards ou annulations de vols) observées sur plusieurs plateformes aéroportuaires. Les dates ont été choisies en fonction des bulletins METAR disponibles, des retours opérationnels de l'ONM, ainsi que de la présence d'un signal poussiéreux identifiable sur les images satellitaires.

Pour chaque cas, une image satellitaire fournie par EUMETSAT est utilisée pour visualiser la couverture nuageuse et la présence de poussières en suspension au-dessus des régions affectées.

➤ **Cas n°1 : 18 juin 2023 - Aéroport de Mecheria**

Le 18 juin 2023, un épisode de vent de sable a touché la région de Mécheria, où le vol AH6276, reliant Alger à Mécheria, était programmé avec un départ prévu à 10h05 et une arrivée estimée à 11h25. Les données METAR ont rapporté une visibilité réduite à 1500 mètres, accompagnée d'un vent d'est soufflant à environ 12 m/s

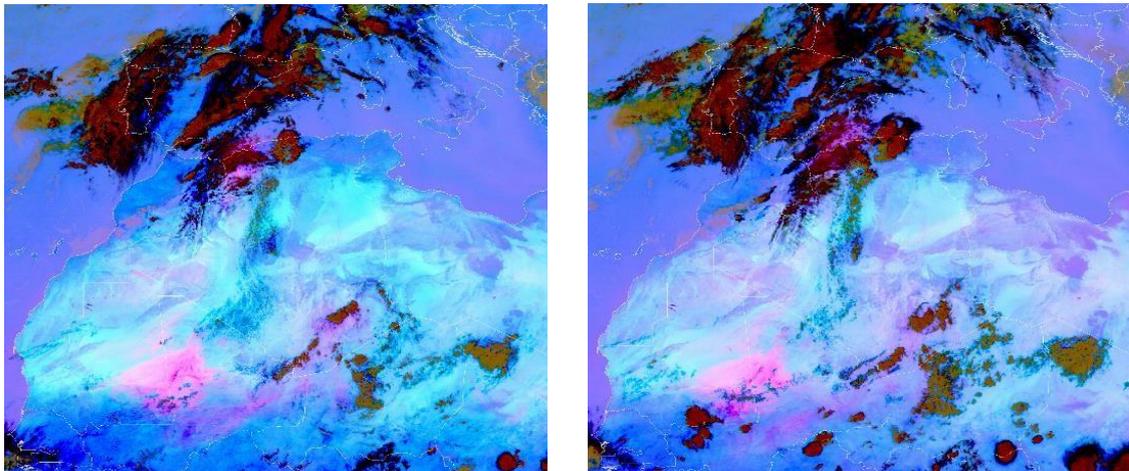


Figure 4.4: Image satellitaire du 18 juin 2023 de 09h à 12h

➤ **Cas n°2 : 26 mars 2024 - Aéroport de Ouargla**

Le 26 mars 2024, des conditions météorologiques défavorables liées au vent de sable ont été signalées dans la région de Ouargla, affectant le vol AH6480 en provenance de Ouargla. Prévu entre 14h03 et 16h00, ce vol a été exposé à une visibilité réduite atteignant 1500 mètres, avec un vent soufflant à environ 9 m/s

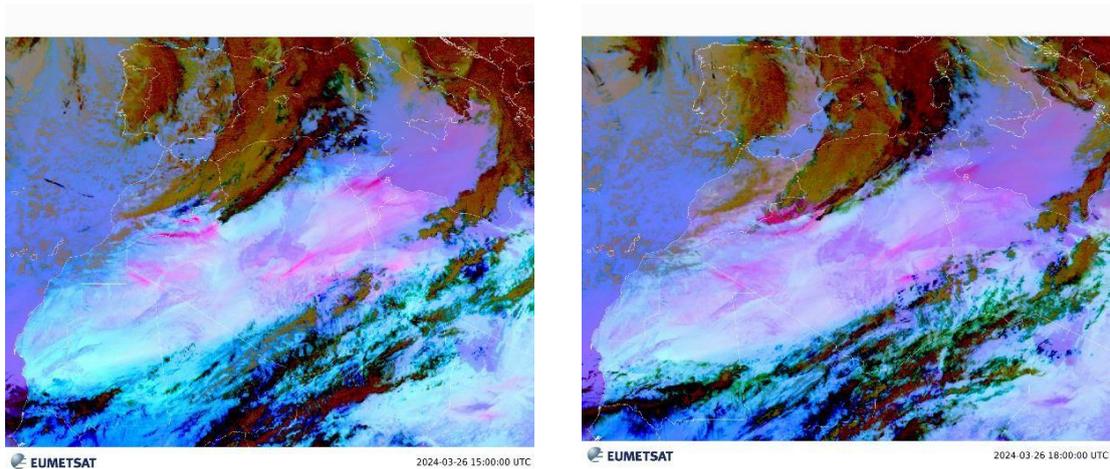


Figure 4.5: Image satellitaire du 26 mars 2024 de 15h à 18h

➤ **Cas n°3 : 04 avril 2024 - Aéroport de Ouargla**

Le vol AH6216, prévu le 04 mars 2024 entre Alger et Ouargla (départ à 15h20, arrivée à 16h32), s'est déroulé dans un contexte météorologique marqué par un soulèvement de poussière dans la région de Ouargla. Les observations ont signalé une visibilité réduite à 500 mètres, associée à un vent soufflant à 16 m/s. L'analyse satellitaire du jour montre un développement bien visible du panache sableux dans cette zone.

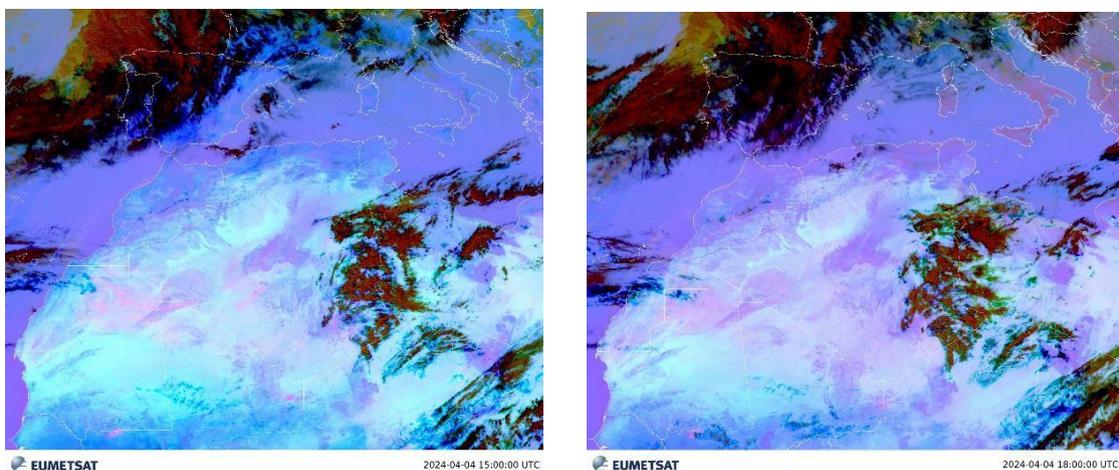


Figure 4.6: Image satellitaire du 04 avril 2024 de 15h à 18h

➤ **Cas n°4 : 28 avril 2024 - Aéroport de Béchar**

Le 28 avril 2024, alors que le vol 6136 devait relier Alger à Béchar (horaire prévu : 19h34 – 21h50), la région de Béchar a été touchée par un épisode de vent de sable. Les conditions météorologiques observées indiquaient une visibilité fortement réduite, atteignant 800 mètres, et un vent soutenu avec des pointes autour de 13 m/s. L'image satellitaire capturée ce jour-là confirme la présence d'un important panache de poussière affectant l'environnement aéronautique local.

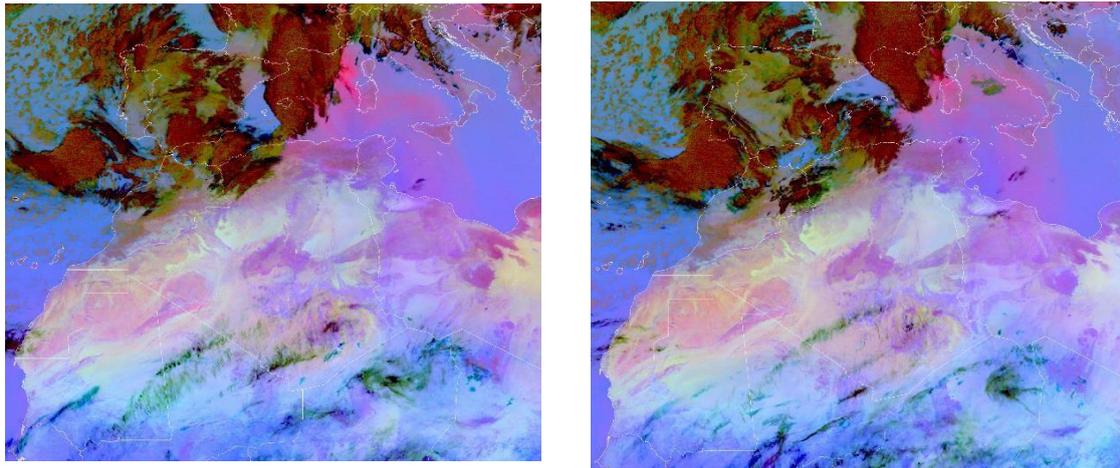


Figure 4.7: Image satellitaire du 28 avril 2024 de 18h à 21h

4.9.2 Comparaison des visibilités simulées et observées :

L'analyse repose sur une série de courbes comparant la visibilité observée (METAR) avec deux niveaux de simulation :

- La visibilité brute, estimée à partir des concentrations fournies par le modèle ALADIN-Dust ;
- La visibilité corrigée, obtenue après application de la méthode empirique tenant compte de la vitesse du vent.

Pour chaque cas étudié, les résultats sont représentés sous forme de courbes temporelles, permettant d'apprécier visuellement les écarts entre la prévision et les observations. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure la correction appliquée permet de rapprocher les simulations numériques des conditions réellement observées

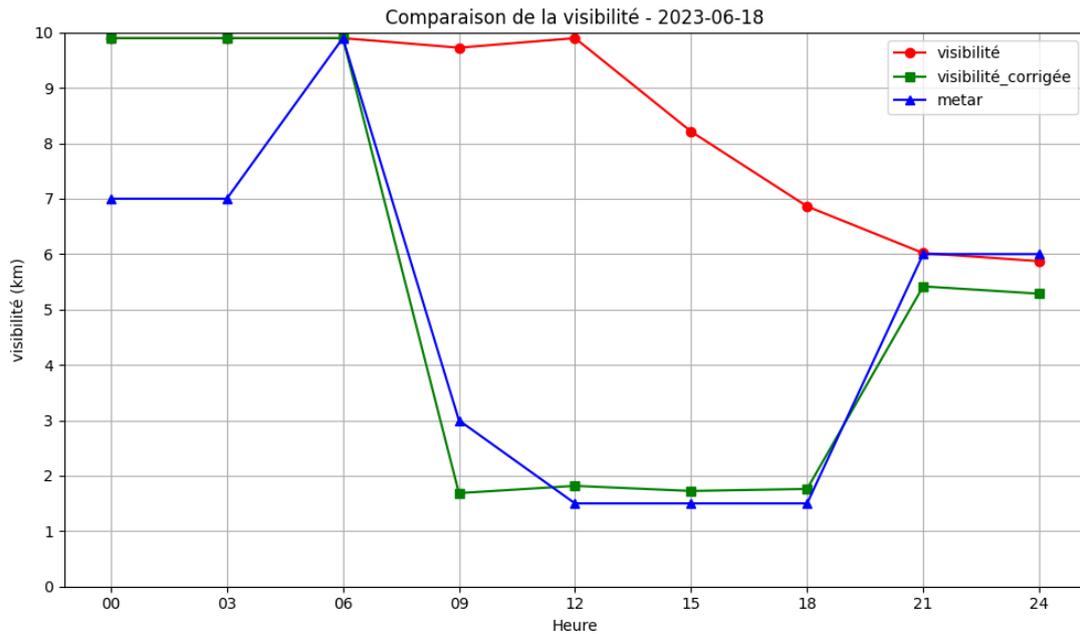


Figure 4.8: Évolution comparée des visibilités simulées et observées à Mécheria

La figure montre l'évolution de la visibilité simulée (brute et corrigée) en comparaison avec les données METAR tout au long de la journée du 18 juin 2023. On observe que la visibilité corrigée se rapproche significativement des valeurs observées à partir de 09h UTC, notamment pendant la phase de dégradation rapide entre 09h et 12h. En revanche, aux heures de 00h et 03h UTC, bien que les valeurs de visibilité dans les METAR soient modérées (~7 km), aucun phénomène sableux n'a été signalé, ce qui explique pourquoi aucune correction n'a été appliquée à ces heures-là. Cela montre que la méthode respecte les conditions de déclenchement du soulèvement de poussière, évitant des corrections injustifiées en dehors des épisodes identifiés.

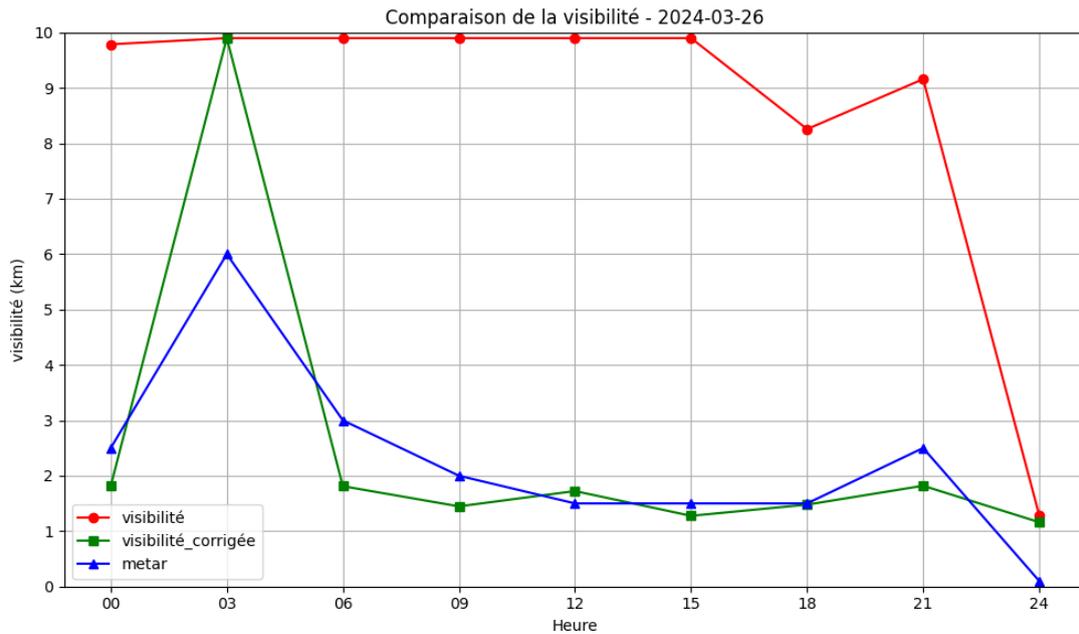


Figure 4.9: Comparaison des visibilités issues de l'observation et du modèle à Ouargla

La visibilité corrigée suit globalement mieux les observations METAR que la visibilité brute, notamment entre 06h et 21h UTC, où la tendance des courbes est similaire. À 03h UTC, aucune correction n'a été appliquée en raison d'une vitesse du vent inférieure au seuil V_0 , et de l'absence de phénomène de sable dans les METAR. À 24h UTC, bien que la visibilité observée soit très faible, la correction n'a pas été activée en raison d'une concentration initiale inférieure à $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces deux cas illustrent les conditions de non-déclenchement de la correction, prévues par la méthodologie afin d'éviter toute surévaluation artificielle de la concentration.

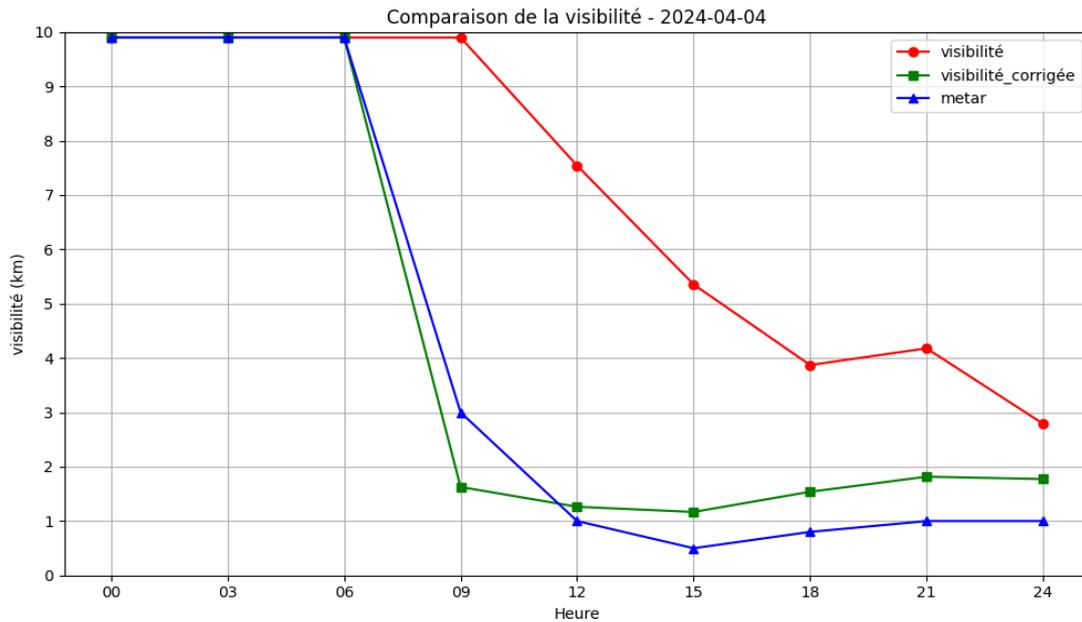


Figure 4.10: Courbes de visibilité : observation et simulation corrigée à Ouargla

L'évolution des courbes met en évidence une baisse marquée de la visibilité à partir de 09h UTC, bien reflétée à la fois par les données METAR et par la visibilité corrigée. À l'inverse, la visibilité brute demeure largement surestimée tout au long de la période de dégradation, en particulier entre 12h et 21h UTC. La courbe corrigée épouse de manière plus fidèle la tendance observée, notamment entre 12h et 18h, où la visibilité reste faible, ce qui souligne l'intérêt de la méthode empirique appliquée. Par ailleurs, une superposition satisfaisante des trois courbes est observée entre 00h et 06h UTC, période durant laquelle aucune activité poussiéreuse notable n'est signalée.

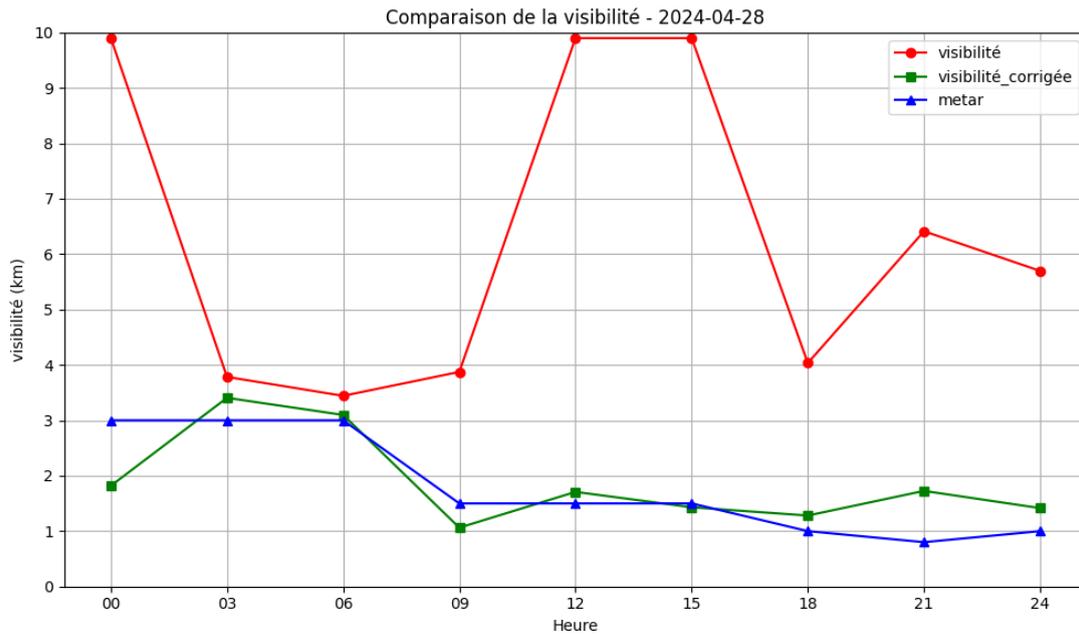


Figure 4.11: Évolution comparée des visibilités simulées et observées à Béchar

L'analyse du graphique du 28 avril 2024 montre que la visibilité brute surestime systématiquement les conditions réelles observées. En revanche, la visibilité corrigée suit une évolution beaucoup plus proche des observations METAR, en particulier entre 03h et 06h UTC, ainsi qu'à partir de 12h jusqu'à 24h. Cette meilleure concordance indique que la méthode de correction appliquée améliore significativement la précision des estimations de visibilité, en réduisant les écarts avec les données d'observation officielles. Cela est particulièrement notable lors des périodes de faible visibilité, où la visibilité brute reste exagérément élevée.

4.10 ANALYSE STATISTIQUE GLOBALE DES RESULTATS :

Cette section présente une synthèse des performances de la méthode de correction appliquée à la visibilité simulée. Après avoir étudié et interprété les courbes de comparaison dans la section précédente, il convient ici de tirer les conclusions générales sur l'efficacité de la correction apportée, en s'appuyant sur les tendances observées dans l'ensemble des cas analysés.

4.10.1 Évaluation graphique (résumé des cas étudiés) :

L'évaluation graphique a été effectuée dans la section précédente à travers plusieurs cas représentatifs. Ces courbes ont permis d'observer le comportement de la visibilité simulée, corrigée et observée sur différentes

situations météorologiques liées au vent de sable.

De manière générale, les résultats montrent que la visibilité corrigée s'aligne mieux avec les données METAR que la visibilité brute, notamment durant les épisodes de forte dégradation. Les ajustements effectués en fonction de la vitesse du vent ont permis d'atténuer les écarts systématiques observés avec le modèle brut.

4.10.2 Résultats :

L'analyse des résultats met en évidence une amélioration notable dans la représentation de la visibilité lors des épisodes de vent de sable. L'application de la correction empirique, basée sur la vitesse du vent, a permis de réduire les écarts entre les visibilités simulées par le modèle ALADIN-Dust et les observations issues des messages METAR.

Ce travail a ainsi permis de valider la qualité du modèle ALADIN-Dust dans la représentation des épisodes de réduction de visibilité liés aux particules désertiques, tout en soulignant l'intérêt d'intégrer des ajustements dynamiques pour mieux capter les effets du vent.

La simulation des cas réels a montré que les principales erreurs de prévision étaient souvent liées à la sous-estimation de l'influence du vent sur le soulèvement des poussières, ou à des limites dans la résolution spatiale du modèle par rapport aux observations locales. Toutefois, la méthode proposée a démontré sa capacité à améliorer la prévision dans des contextes opérationnels, notamment dans les zones aéroportuaires du sud algérien.

CONCLUSION :

L'analyse menée dans ce chapitre a permis de développer et d'évaluer une méthode d'amélioration de la prévision de la visibilité réduite par le vent de sable dans le sud de l'Algérie. En s'appuyant sur les données issues du modèle ALADIN-Dust et sur les observations réelles METAR, une correction empirique a été appliquée aux concentrations de poussière simulées, en intégrant la dynamique du vent à travers un seuil de déclenchement et un facteur d'ajustement.

Les comparaisons graphiques et l'analyse statistique globale ont montré que cette approche améliore sensiblement la cohérence des prévisions avec les

conditions observées, en particulier lors des épisodes de forte réduction de visibilité. La visibilité corrigée se rapproche davantage des observations que la version brute du modèle, tout en évitant les surestimations en l'absence de phénomène sableux.

Ces résultats confirment l'intérêt d'introduire des paramètres dynamiques dans les modèles de prévision pour renforcer leur fiabilité dans les zones sahariennes. La méthode développée dans ce travail peut ainsi constituer une base d'amélioration opérationnelle pour la prévision des phénomènes à impact sur l'aviation, en particulier dans les aéroports du sud algérien.

CONCLUSION GENERALE

Dans les régions sahariennes, les vents de sable constituent un phénomène météorologique récurrent dont l'impact sur la visibilité est particulièrement préoccupant, notamment pour le secteur aérien. La réduction brutale de la visibilité causée par ces épisodes sableux perturbe fortement les opérations aéroportuaires, remet en cause la sécurité des vols, et engendre des pertes économiques importantes. Ce constat met en évidence le besoin croissant de disposer de prévisions météorologiques précises et adaptées à ces conditions extrêmes.

Ce travail s'inscrit dans cette problématique en proposant une approche visant à améliorer la qualité de la prévision de la visibilité en conditions de vent de sable, en se basant sur les sorties du modèle ALADIN-Dust. L'étude a permis de développer une méthode de correction empirique de la visibilité, prenant en compte la dynamique du vent et la concentration particulaire, et d'en évaluer la pertinence en la confrontant aux observations METAR collectées dans plusieurs aéroports du sud de l'Algérie.

Le mémoire a d'abord présenté les fondements théoriques de la météorologie, les caractéristiques des vents de sable, et leur influence directe sur la navigation aérienne. Une analyse des modèles numériques utilisés à l'Office National de la Météorologie a ensuite permis d'identifier les limites actuelles, tout en mettant en évidence le potentiel de ces outils lorsqu'ils sont associés à une méthodologie d'ajustement adaptée. L'étude de cas menée sur plusieurs événements sableux a montré une nette amélioration des résultats après application de la correction proposée, avec une meilleure correspondance entre les visibilités simulées et observées.

Cette étude constitue ainsi une contribution utile à l'amélioration des prévisions opérationnelles dans les zones désertiques. Elle ouvre également la voie à de futures recherches qui pourraient intégrer d'autres variables météorologiques, affiner la représentation des sources d'émission de sable, ou encore coupler les données de modèles avec l'imagerie satellitaire pour une détection en temps réel plus efficace.

En définitive, ce mémoire représente un premier pas vers une meilleure anticipation des risques liés aux vents de sable, au service des prévisionnistes, des exploitants aéroportuaires et de la sécurité aérienne en Algérie saharienne.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Météo-France, "La météorologie, qu'est-ce que c'est ?", meteofrance.com.
- [2] F. Lott, Introduction à la météorologie dynamique, Université Paris-Saclay, 2015.
<https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00372709/document>
- [3] StudySmarter FR. (n.d.). Atmosphère terrestre: Composition & couches.
<https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/aviation/atmosphere-terrestre/>
- [4] CNES - Centre National d'Études Spatiales
- [5] Météo-France, "L'atmosphère et ses différentes couches",
meteofrance.com. <https://meteofrance.com/comprendre-la-meteo/atmosphere>.
- [6] National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA
- [7] OMM (2018). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8), 2018 Edition. Organisation météorologique mondiale.
- [8] ICAO (2022). Annex 3 - Meteorological Service for International Air Navigation.
- [9] Office National de la Météorologie (ONM).
- [10] OMM Cloud Atlas
- [11] UNDRR – Terminology united nations office for disaster risk reduction
<https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/mh0017>
- [12] Goudie & Middleton, 2006 - Dust Storms in the Middle East and North Africa
- [13] Washington & Todd, 2005 - Atmospheric controls on dust storm frequency
- [14] Prospero et al., 2002 - Sources and transport of mineral dust
- [15] Claquin et al., 1999 – Radiative properties of mineral dust: A review of measurements and modelling [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00047-4)

[16] Source: Alfaro & Gomes, 2001 - Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distributions in source areas <https://doi.org/10.1029/2000JD900339>

[17] Balkanski et al., 2007 - Modeling the radiative properties of mineral aerosols <https://doi.org/10.1029/2006JD008079>

[18] Mahowald et al., 2010 - Observed 20th century desert dust variability: Impact on climate and biogeochemistry Lien : <https://doi.org/10.1002/jgrd.50344>

[19] Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). Desert dust in the global system. Springer.

[20] Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the TOMS absorbing aerosol product.

[21] Organisation Météorologique Mondiale (OMM). (2014). Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI). (2010).

[22] King, M. D., Kaufman, Y. J., Menzel, W. P., & Tanré, D. (2003). Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from MODIS.

[23] Météo-France, & Office National de la Météorologie (ONM). (2019). Implémentation du modèle ALADIN_Dust pour la prévision des poussières en Algérie.

[24] Martet, M., Peuch, V.-H., Laurent, B., Chatenet, B., & Boucher, O. (2009). Evaluation of long-range transport and deposition of desert dust with the CTM MOCAGE.

[25] Grell, G. A., & Baklanov, A. (2011). Integrated modeling for forecasting weather and air quality: A call for fully coupled approaches.

[26] Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI). (2020). Annexe 2 Règlement de l'air. 10^e édition.

[27] N. J. Middleton, "Desert dust hazards: A global review," *Aeolian Research*, vol. 24, pp. 53-63, 2017.

- [28] Manual of All-Weather Operations (Doc 9365), 5^e édition. International Civil Aviation Organization ICAO (2024).
- [29] FAA. (2023). Weather-Related Accidents Annual Report 2023. Federal Aviation Administration. <https://www.faa.gov/data-research/safety/weather>, IATA. (2022). Safety Report 2021. International Air Transport Association. <https://www.iata.org/en/publications/safety-report>.
- [30] Bojdo, N., Filippone, A., Parkes, B., & Clarkson, R. (2020). Aircraft engine dust ingestion following sandstorms. *Aerospace Science and Technology*, 106, 106060.
- [31] Ryder, C. L., Bézier, C., et al. (2024). Aircraft Engine Dust Ingestion at Global Airports. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 2263-2281.
- [32] Rotherham, D., Bojdo, N., Filippone, A., & Parkes, B. (2022). Terminal Manoeuvre Area Effects on Aircraft Engine Dust Ingestion. *Engineering Proceedings*, 28(1).
- [33] WMO, 2018 - Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (CIMO)
https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12407
- [34] Abdi et al., 2021 - Challenges of Meteorological Monitoring in the Algerian Sahara, Université de Ghardaïa
- [35] ICAO, 2016 - Annex 3 - Meteorological Service for International Air Navigation <https://www.icao.int/safety/meteorology/Pages/Annex-3.aspx>
- [36] Kaufman et al., 2005 – Dust transport and detection from satellites, *Remote Sensing of Environment* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.018>
- [37] Ashpole & Washington, 2012 - Dust emission mechanisms in satellite data over the Sahara <https://doi.org/10.1002/jgrd.50122>
- [38] Ginoux et al., 2012 - The global distribution of mineral dust, *Atmospheric Chemistry and Physics* <https://doi.org/10.5194/acp-12-751-2012>
- [39] <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article125>
- [41]. Météo-France, *Comment fait-on une prévision ?* Toulouse, 2021.

[42]. Codron, F. (2019). *Introduction à la prévision météorologique*.

Encyclopédie de l'Environnement.

<https://www.encyclopedieenvironnement.org/air/introduction-a-prevision-meteorologique>