*REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE*

*MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR*

*ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

*Université de Blida « SAAD DAHALB »*

**Institut de L'Aéronautique et des Etudes Spatiales**

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**Pour L'Obtention d'un Diplôme Master en Aéronautique**

**Option : Opérations Aériennes**

**Thème :**

# « Prévision des Poussières Désertiques avec le Modèle AROME : Validation pour le sud de l'Algérie »

**Réalisé par :**

**ALOUANE Fadila**

**SAMEUT Kawther**

**Encadré par :**

**Mr REZOUG.T**

**Mr Ambar.A**

**L'année Universitaire 2016/2017**

# Remerciement

*Tout d'abord on remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de monsieur Amber Abd Nour , on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire*

*Nos remerciements s'adressent à monsieur Rezoug pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré la charge académique et professionnelle.*

*Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui ont nous aidés et soutenues de près ou de loin.*

*Fadila et kawther*

# Dédicaces

*A ma mère qui a sacrifié sa vie pour mon bonheur, aucune expression ne pourrait exprimer toute mon amour envers vous* ***ma maman***

*A l'Ames de mon* ***papa*** *et mon* ***frère*** *dieu les miséricordes,*

*A mes* ***frères*** *et mes* ***oncles*** *pour leurs soins et leur tendresse*

*A mes copines* ***ASMA, ZAHIA*** *que j'apprécie beaucoup*

*A* ***AISSA*** *pour son soutien moral, son aide et sa gentillesse*

*A tous ceux qui me connaissent de prés et de loin*

***Fadila***

# Dédicaces

*A mes parent qui n'ont pas cessé de m'encouragé et de prier pour moi.*

*A mon chère frère Abd Djalil pour sa patience, soutien et son sentiment d'amour aux moments les plus difficiles je te souhaite plein de succès, de joies et de bonheur que dieu te garde et illumine votre chemin.*

*A mes sœurs Asma Safa, Amira, Hiba et mon petit frère Fayçal*

*A mes grands-parents maternels et mes oncles*

*A mes amies Saida, Touta, Assia, Fadila, Wahiba,*

*A tous ceux qui me connaissent de prés et de loin*

*kawther*

# Dédicaces

# Résumé

Cette étude est dédiée à la prévision des poussières désertiques dans le modèle à échelle convective AROME (**A**pplication à la **R**echerche **O**pérationnel à **ME**so-échelle) couplé avec le modèle ALADIN (**A**ire **L**imitée **A**daptation dynamique **D**éveloppement **I**nter**n**ational) opérationnel à l'Office National de la Météorologie en Algérie.

Nous avons réalisé une étude d'impact des aérosols désertiques sur la navigation aérienne en consultant plusieurs ouvrage, rapport et articles de presse dans le but de faire une synthèse des effets du vent de sable sur les aéronefs. Par la suite, nous avons effectué des simulations ont en utilisant le modèle AROME à 3 km de résolution dans l'objectif de prospecter l'apport de la résolution du modèle sur la qualité de la prévision du cycle atmosphérique des poussières désertiques par rapport au modèle opérationnel ALADIN.

Les résultats obtenus ont montré que AROME simule mieux l'avènement des situations sévères de vent de sable ce qui permet aux prévisionnistes aéronautiques de lancer des messages d'alerte aux aérodromes.

Par la suite nous avons tenté d'améliorer les résultats des visibilités prévues en utilisant trois équations de conversion des concentrations en visibilités : Bayoko, Ben Mohamed et Ette.

**Mots clés :** poussières désertiques, échelle convective, AROME, ALADIN, navigation aérienne.

# ملخص

تتمحور الدراسة التي قمنا بها حول تنبؤ الغبار الصحراوي باستعمال النموذج التمثيلي (AROME) مدعوم بالنموذج التمثيلي (ALADIN) المعمول به على مستوى المكتب الوطني للأرصاد الجوية بالجزائر.

لقد قمنا بدراسة مدى تأثير الغبار الصحراوي على الملاحة الجوية بالاستعانة بالكتب، التقارير والمقالات الصحفية لمعرفة مدى تأثير العواصف الرملية على الطائرات. ثم وبالاستعانة بالمحاكاة باستعمال النموذج التمثيلي (AROME) بالمعالجة على مسافة 3 كلم بهدف البحث -وباستعمال المعالجة باستعمال النموذج السالف الذكر-عن تحسين نوعية التنبؤ الخاصة بالأغبرة الصحراوية على طول دورة الفصول المناخية وذلك مقارنة بالنموذج المعمول به من طرف المكتب الوطني للأرصاد الجوية.

توصلنا من خلال هذه الدراسة إلى أن النموذج AROMEأحسن محاكاة لتقدم الوضعيات الخطيرة للزوابع الرملية مما يسمح للمتنبئين في مجال الطيران ببعث رسائل التحذير للمطارات.

وفي الأخير حاولنا تطوير نتائج الرؤية المرجوة باستعمال ثلاث معادلات: بايوكو، بن محمد وآت.

# Abstract

Our study focus on the predictions of desert's dust using the model with a convective scale ( AROME) besides to the model (ALADIN) which is operational at national meteorological office of Algeria.

We studied the impact of desert's dust on the air navigation basing on books, reports and press articles in order to do synthesis of effects of sand's wind on aircrafts. We also made simulation using the model AROME with a resolution of 3 km to search for the contribution which this model can add on the quality of the prediction of desert's dust in all the atmospheric cycle compared with the model ALADIN.

The results proved that the model AROME can simulate better the progress of harsh situations of sand's wind which can help to send alert's messages for aerodromes.

Finally, we tried to improve the visibility results using three equations of Bayako, Ben Mohamed and Ette.

Introduction General……..01
**Chapitre I** : le Sahara et les aérosols
Introduction ……... 04
1. Présentation de la région d'étude : le sud de l'Algérie……..04
1.1 La situation géographique ……...04
1.2 L'analyse des composants de milieu naturel …… 05
1.2.1 La topographie…… 05
1.2.2 Le climat ……..... 05
2. Les aérosols et les poussières désertiques……... 07
2.1 Les aérosols …… 07
2.1.1 Définition …….. 07
2.1.2 Les caractéristiques physiques des aérosols…….. 08
2.1.2.1 La taille …… 08
2.1.2.2 La forme des particules des aérosols …… 09
2.1.2.3 Indice de réfraction …… 09
2.1.3 Les caractéristiques optiques des aérosols …… 10
2.1.3.1 Absorption …… 10
2.1.3.2 La diffusion …… 10
2.1.3.3 L'extinction ……10
2.1.3.4 L'épaisseur optique ……10
2.1.4 Les type des aérosols …… 11
3. Les aérosols désertiques …… 13
3.1 Le cycle atmosphérique du sable …… 13
3.1.1 La mobilisation le (soulèvement de zone source) …… 13
3.1.2 Transport …… 14
3.1.3 Dépôt de sable …… 14
Conclusion …… 15
**Chapitre II :** le vent de sable et son impact sur l'aéronautique et l'économie des Compagnies aériennes
Introduction …… .16
1. le vent …… 16
1.1 Définition du vent ……16
1.2 Régime d'écoulement de vent dans la couche limite …… 16
1.3 L'action de vent sur les aérosols désertique ……17
2 .vent de sable …… 18
2.1 Généralités …… 18
2.2 La dynamique de vent de sable …… 19
2.3 Les types de vent de sable …… 20
3. La visibilité …… 22
3.1 Définition de visibilité …… 22
3.1.1 La définition météorologique …… 22
3.1.2 La définition aéronautique …… 22

3.1.3 Visibilité dominante ……22
3.1.4 Portée visuelle de piste (RVR) ……22
3.1.5 Portée visuelle oblique (SVR) …… 23
3.1.6 Portée optique météorologique (POM) …… 23
3.2 Mesure de visibilité …… 23
3.2.1 Diffusion-mètres optique …… 23
3.2.2 Le transmission-mètre ……23
4. L'impact du vent de sable sur l'aéronautique ……24
4.1 Réacheminement dû à la visibilité pauvre …… 24
4.2 Perturbations dans des opérations sur les aéroports ……25
4.3 Problèmes mécaniques……25
4.3.1 Érosion …… 25
4.3.2 Corrosion ……26
4.3.3 Colmatage ou dommages de tube anémométrique ……..26
5. Impact des vents de sable sur l'activité économique des compagnies aériennes ……26
6. Les moyens pour minimiser les effets de poussières désertiques sur l'aviation ……. 27
Conclusion …… 27
**Chapitre III** : observation et modélisation du cycle de vie des aérosols désertiques
Introduction ……28
1. Moyens d'observation des aérosols désertiques ……28
1.1 Observation au sol ……28
1.1.1 Le réseau AERONET/photons……...28
1.1.2 TEOM ……29
1.2 Les observations spatiales ……...30
1.2.1 MODIS ……..30
1.2.2 SEVIRI ……..30
1.2.3 CALIOP ET ILR …… 31
2. Généralités sur les prévisions météorologiques …….. 31
2.1 Définition de la prévision numérique du temps…… 31
2.2 La chaîne de la prévision météorologique……..31
2.2.1 La collecte des données observées ……31
2.2.2. L'assimilation des observations …… 32
2.2.3 La simulation par un modèle numérique ……..32
2.2.4 L'analyse des simulations par le prévisionniste ……..33
3. Contexte opérationnel de la prévision des aérosols désertiques…….. 34
4. Aperçu sur le modèle à maille fine AROME …… 34
5. Modélisation des aérosols désertiques par AROME-Dust ……36
5. 1. Apport de la modélisation dans l'étude du cycle de vie de l'aérosol ……..36
5. 2. Traitement des poussières désertiques dans AROME-Dust ……37
5. 2. 1. SURFEX pour la gestion des émissions ……37
5.2.2 ORILAM pour la gestion du transport et du dépôt …… 38
5.2.2.1 Transport …… 38
5.2.2.2 Dépôt …… 38
5.2.2.2.1 Dépôt sec …… 38

5.2.2.2.2 Dépôt humide ……39
5.3 L'équation du cycle atmosphérique des aérosols désertiques ……40
5. 4. Les étapes d'une simulation AROME-Dust ……41
Conclusion ……..43
**Chapitre IIII :** Etude de l'épisode du 19 au22/02/2017 : analyse, comparaison et validation
Introduction …… .44
1. Description synoptique de la situation …… 46
2. Aperçu sur les images satellitaires de la situation…… 46
3. Simulation de la situation…… 49
3.1 Les épaisseurs optiques et les concentrations ……49
3.2 Les visibilités …… 53
4. Tests de sensibilité sur le calcul des visibilités …… 60
4.1 Formules de la relation aérosols désertiques/visibilité …… 61
Conclusion…… 64
Conclusion General…… 65

**Figure 1.1** : La Carte Géographique de l'Algérie…….05
**Figure 1.2** : Payesage de Lerg et Reg de Gauche à Droite Respectivement…… 06
**Figure 1.3**: Paysage de : à Gauche Hamada et à Droite Sebkha…… 06
**Figure 1.4** : Les Tailles des Particules d'Aérosols…… 08
**Figure 1.5** : Les Différentes Formes des Poussières Désertiques Observées Par Microscope…… 09
**Figure 1.6** : Processus Entraînant le Mouvement des Grains du Sol en Fonction de leur Diamètre……13
**Figure 1.7** : dépôt humide et sec du sable……15
**Figure 2.1** : l'Action de Vent sur les Aérosols Désertique……18
**Figure 2.2** : La Chasse Sable au Sahara……21
**Figure 2.3** : Le Dispositif de Diffusion-Mètre et Transmission-Mètre…….24 (Gauche, Droite Respectivement).
**Figure 3.1** : L'Instrument Sun – Photomètre Utilisé dans le Réseau AERONET……..29
**Figure 3.2** : Instrument TEOM…… 29
**Figure 3.3** : Les Etapes d'une Prévision Numérique du Temps PNT…….33
**Figure 3.4** : La Partie Physique et la Partie Dynamique du Modèle AROME…… 35
**Figure 3.5 :** Fractions des couvert «COVER004» et «COVER005» relatifs respectivement aux sols nus et rocailleux pour l'Afrique du nord……..…… 37
**Figure 3.6** : Schéma des Processus Physiques Relatifs aux Aérosols Désertiques Traités dans ALADIN/AROME…… 40
**Figure 3.7** : Schéma Représentatif de Chaine de Prévision AROME…….. 42**Figure 4.1** : Images Satellitaires MSG-SEVIRI Visible (19, 20, 21 et 22 Février 2017 à 12h UTC)…… 45
**Figure 4.2** : Image Satellite Pris le 19/02/2017 à 15h……...46
**Figure 4.3** : Image Satellite Pris le 20/02/2017 à 18h……...47
**Figure 4.4** : Image Satellite Pris le 22/02/2017 à 18h……...48
**Figure 4.5** : Les Epaisseurs Optiques Prévus par le Modèle AROME et ALADIN Respectivement pour la Situation de 19/02 à 15h ……49
**Figure 4.6** : Les Concentrations des Poussières Désertiques Prévues par le Modèle AROMR Et ALADIN Respectivement pour la Situation de 19/02 à 15h……50
**Figure 4.7 :** Les Epaisseurs Optiques Prévues par le Modèle AROME - Aladin Respectivement pour la Situation de 19/02 à 18h……50

**Figure 4.8** : les concentrations des poussières désertiques prévues par AROME – ALADIN respectivement pour la situation de 20/02 à 18h…… 51
**Figure 4.9 :** Les Epaisseurs Optiques Prévus par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement de la Situation de 21/02 à 12h…… 51
**Figure 4.10** : Les Concentrations Prévues par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement de la Journée de 21/02 à 12h…… 52
**Figure 4.11** : Les Epaisseurs Optiques Prévus par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement de la Situation de 22/02 à 15h…… 52
**Figure 4.12** : Les Concentrations des Poussières Désertiques Prévues par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement pour la Journée de 22/02 à 15h…… 53
**Figure 4.13** : Image Satellite pour la Journée De 19/02 à 18h …… 54
**Figure 4.14** : Les Champs de Visibilités Prévus par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement pour la Journée de 19/02 à 18h…… 54
**Figure 4.15**: la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Tindouf Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017…… 55
**Figure 4.16** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Djanet Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017……56
**Figure 4.17** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Tamanrasset Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017…… 57
**Figure 4.18** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Bechar Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017…… 58
**Figure 4.19** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Ghardaïa Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017……59
**Figure 4.20** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Adrar Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017…… 60
**Figure 4.21** : Les Visibilités Calculées avec Déférentes Equations sur la Station d'Adrar pour la Situation de 19/02 au 22/02/2017…… 61
**Figure 4.22** : Les Visibilités Calculées avec Déférentes Equations sur la Station de Bechar pour la Situation de 19/02 au 22/02/2017…… 62
**Figure 4.23** : Les Visibilités Calculées avec Déférentes Equations sur la Station de Timimoune pour la Situation de 19/02 au 22/02/2017…… 63

**Table 1.1** : La Production Journalière des Différents Aérosols en Milliers de Tonnes…12

**Tableau 3.1** : Caractéristiques et Coût de Calcul du Modèle « AROME »……36

| | |
|---|---|
| **AA** | agglutination anticyclonique |
| **AC** | Aérosol Chimique |
| **AERONET** | Aerosol Robotic NETwork |
| **ALADIN** | Air limitée, Adaptation dynamique, Développement International |
| **AMP** | Anticyclone Mobile Polaire |
| **AOD** | Aerosol Optique Depth |
| **AOT** | Aerosol Optique Thickness |
| **ARPEGE** | Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle |
| **AROME** | Application de la Recherche à l operational a Meso-Echelle |
| **AS** | Aerosol Statospherique |
| **CALIOP** | Cloud- Aerosol Lider with Orthogonal Polarisation |
| **CALIPSO** | Cloud Aerosol Lider and Infrared Pathfinder Satellite Observation |
| **CAT** | turbulence on air Claire |
| **CIE** | comution International de l' eclairage |
| **CNPM** | Centre National de Prevision Météorologique |
| **CV** | Cendre Volcanique |
| **DEAD** | Dust Entrainment And Deposition |
| **EMI** | Equation meteorologique incliné |
| **IFR** | instrument flying rules |
| **IIR** | Ifra-red Imager Radiometer |
| **Lat -lon** | latitude- longitude |
| **Loa** | Laboratoire d'Optique Atmosphérique |
| **Meso- NH** | Mesoscal Non Hydrostatique atmospheric model |
| **METAR** | METeorological Aerodrome Report |
| MMO | Organisation Météorologique Mondiale |
| **MODIS** | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer |
| **ONM** | office national de la météorologie |
| **Pc** | Produit de Combustion |
| **PM** | Particlul Matter |
| **PNT** | Prevision Numerique de Temps |

| | |
|---|---|
| **POM** | Porte Optique Meteorologique |
| **PVP** | Portée Visuelle de Piste |
| **SEVIRI** | Spinning Enhanced Visible and Infra Red Imager |
| **SOA** | aerosols organique secondaire |
| **SOP** | special observing period |
| **SVR** | Porté Visuelle Oblique |
| **Surfex** | SURFace Externalisée |
| **TEOM** | Tapered Element Oscillating Microbalance |
| **VIMET** | Visibilité Météorologique |
| **VFR** | Visual Flying Rules |
| **VMI** | Visibilite Meteorologique Instrumental |

Les aérosols désertiques sont des particules atmosphériques en suspension dans l'air, caractérisées principalement par leur origine saharienne et leur variation rapide dans l'espace et dans le temps. Ces particules représentent la première source mondiale d'aérosols dans l'atmosphère qui est de l'ordre de 1500 Tg par an, et représentent environ 40% des émissions globales en aérosols troposphériques (IPCC, 2001).

Chaque années à la même période entre janvier et juin, commence la saison des vents forts caractéristiques des régions arides et semi- arides sahariennes (le Sénégal, le sud de la Mauritanie, le sud de l'Algérie ….), c'est une période ou l'arrachage par le vent des sédiments fins du sol qui sont des particules connus sous le nom des **aérosols** ou **lithométéores** ainsi leurs suspension dans l'atmosphère.

Le vent de sable est un phénomène qui représente des effets multiples et complexes sur beaucoup de domaines, tel que le vent de sable pose un impact important et direct sur le climat en modifiant le bilan radiatif terrestre (diminution du flux solaire incident en surface et/ ou un réchauffement de l'atmosphère ainsi les poussières désertiques ont un effet sur l'économie des pays ( l'agriculture) et la santé de la population ( par la pollution de l'atmosphère )

Pour ce qui nous concerne tout au long de L'histoire, l'aviation est restée intimement liée à la météorologie. Il y a eu des avancées technologiques de toutes sortes, de meilleurs avions, des systèmes de navigation aérienne améliorés et un programme de formation des pilotes systématisé ; mais la météorologie continue d'être un élément de premier plan. Dans le monde de l'aviation, les mots conditions météorologiques ne désignent pas seulement ce qui est en train de se produire mais aussi ce qui va se produire durant le vol. Tout dépendant de l'information qu'il reçoit, le pilote choisira d'entreprendre ou d'annuler son vol. Tel que Les aérosols désertiques empêche la pratique seine et correcte de la navigation aérienne ou les fortes concentrations des particules de poussière désertiques suspendu dans l'atmosphère induisent des effets majeures en aéronautique sur tout en phases critiques de vols (décollage / atterrissage) comme la visibilité qui est un facteur important pour effectuer un vol en toute sécurité d'où la nécessité **des prévisions numériques du temps (PNT)** en terme de visibilités.

L'Algérie couvrant une superficie dépassant 2 millions $Km^2$ avec ¾ de nature désertique est parmi les pays les plus exposés au phénomène de vent de sable ainsi plus de dizaine d'aéroports se localisent sur le Sahara Algérien .Alors la modélisation des particules des aérosols au-dessus de cette région est important pour prévoir des visibilités sur ces aéroports.

Le centre de l'ONM office national de la météorologie utilise le model ALADIN-Dust de résolution 11 Km opérationnel depuis février 2014, pour modéliser le cycle de vie des aérosols dans l'atmosphère. Malheureusement ce model reste imparfait pour bien saisir l'étendu des panachés désertiques de ce fait notre étude est proposées dont l'objectif principal est d'attirer l'attention sur une série de problèmes potentiels lesquels pourrait être associé au vol des avions dans des secteurs chargés par des poussières désertiques , et validation de modèle de prévision AROME- Dust de résolution de 3 Km pour le sud de l'Algérie en analysant les résultats obtenus pour déterminer la fiabilité et la capacité de résolution de ce modèle .

Dans le but d'atteindre les objectifs assignés à travers cette étude, notre travail sera organisé comme suit :

**Le chapitre 1** : il est principalement consacré à la caractérisation de la région « sud de l'Algérie » et les particules atmosphériques en suspension ou aérosols, nous touchons d'autres facteurs importants tels que leurs propriétés physiques et optiques, le mécanisme de formation, puis leur cycle de vie dans l'atmosphère.

**Le chapitre 2** : ce chapitre constitue un complément au premier chapitre, concerne les vents de sables et leurs mécanismes de formation. A cela nous ajoutons une section sur l'impact du vent de sable sur l'aviation précisément sur l'aéronef et l'économie des compagnies aériennes. Nous concluons ce chapitre par des propositions de moyens pour minimiser les effets de vent de sable sur ce domaine.

**Le chapitre 3 :** ce chapitre est concentré sur la chaine de la prévision numérique du temps PNT et l'outil de de modélisation. Ensuite nous donnons un aperçus sur le modèle à maille fine AROME– Dust ainsi sur la modélisation des aérosols .Enfin nous concluons ce chapitre par les étapes des simulations de ces aérosols par ce model numérique.

**Le chapitre 4 :** pour la première étape du travail nous lançons des simulations des situations météorologiques sur cas d'étude de 19/02/2017 au 22/02/2017 avec le model AROME –Dust. Ensuite les sorties du model AROME en terme de concentrations des particules en ($mg.m^{-3}$) et d'AOD (Aerosol Optical Depth adimensionnel) représentés par des cartes météorologiques qui seront comparées avec les sortie de concentrations et d'AOD de model opérationnel ALADIN et les images satellitaires (observations). Après avoir validé le model AROME par apport aux model Aladin et les observations, les paramètres de concentrations et AOD seront convertis en visibilités qui seront également comparés aux visibilités calculées à partir des sorties de model Aladin et les observations issus des METAR (Meteorological Terminal Report) issues de 6 stations distribuées sur le sud Algérien (Djanet ; Tindouf, Bechar, Tamanrasset, Adrar, Ghardaïa). Enfin pour la deuxième étape nous effectuons des tests de sensibilité sur calcul de visibilité avec les équations de Boyoko, Ette, et Ben Mohamed dans le but d'améliorer les résultats.

On se termine par une conclusion générale

# Introduction :

Le Sahara Algérien est un environnement ou le paysage varie de terrain plateaux dunes de sable et des montagnes élevés due aux vents forts qui domine la région, sa situation géographique et les composants constituant le milieu qui permettent aux tour de produire les aérosols de type Saharien suspendus dans l'atmosphère . Alors c'est quoi ces aérosols et comment se forment –ils ?

# 1. Présentation de la région d'étude : le sud de l'Algérie

## 1.1 La situation géographique :

Le Sahara, le plus vaste écorégion désertique du monde s'étend sur de nombreux pays. L'Algérie en fait partie. Dans le Sahara Algérien, la plus importante région qui s'y trouve est Tidikelt. Elle est limitée par Touat, le Tassili n'Ajjer, le Tademaït et les plaines se trouvant aux pieds des monts du Mouvdir. Son étendue est estimée à 100 000 km². Le climat qui y règne est de type désertique marqué par une grave aridité. Il y a deux grandes villes dans cette partie de l'Algérie : Salah et Aoulef. Il y a aussi des sites touristiques à caractère préhistorique. C'est le cas du Gisement paléolithique. Le Sahara Algérien est relié entre le Haut Atlas marocain jusqu'à la frontière tunisienne en passant, d'Ouest en Est, par les massifs du Ksour, Djebel Amour, des Ouled-Naïl, des Ziban et les monts Hodna, qui rejoint la bande du Tell, et continue dans les Aurès culminant à plus de 2 300 m. Il est limité par plusieurs oasis constituant ce qui est souvent appelé *La porte du désert*.

Malgré les idées reçues, le Sahara est loin d'être un espace très sableux, il contient, bien au contraire, énormément de cailloux. Le Sahara algérien est caractérisée par une grande montagne culminant à 3000 mètres d'altitude, le Hoggar, un massif volcanique. Bien avant de devenir un Sahara, cet endroit était, il y a un bon moment déjà, une mer. (Figure 1.1) représente la carte géographique de la situation de l'Algérie et ces abords [22]

**Figure 1.1** : La Carte Géographique de l'Algérie

## 1.2 L'analyse des composants de milieu naturel :

### 1.2.1 La topographie :

La partie saharienne qui couvre plus de 80 % de la superficie de l'Algérie soit environ 2 millions de $km^2$, est constitué principalement de regs, d'ergs, d'oasis et de massif montagneux. Au nord du Sahara algérien, les grands ergs, occidental à l'ouest, et oriental à l'est, séparés par des plateaux rocheux telle que la région du Mzab et bordés au sud par le plateau de Tademaït, constituent d'immenses mers de sable ponctuées d'oasis donnant parfois vie à d'importantes palmerais. Au sud-ouest, s'étendent les ergs Iguidi et Chech, immensité de dunes sableuses linéaires largement espacées les unes des autres. Plus au sud, au cœur du Sahara, le massif du Hoggar, dont le point culminant est le plus haut sommet de l'Algérie avec 2 918 mètres au mont Tahat, est constitué de roches volcaniques formant des pics, des « aiguilles volcaniques » et de hauts plateaux désertiques. À l'est du Hoggar, le Tassili n'Ajjer, haut plateau aride perché à plus de 1 000 mètres d'altitude, dressent des formations rocheuses fortement érodées émergeant des dunes de sables, donnant parfois au relief le paysage lunaire [4]

***Les Regs*** : Plaines de graviers et de fragments rocheux. Au Sahara, ils occupent des surfaces démesurées

***Les accumulations sableuses*** : Le sable est un élément essentiel du paysage saharien. Cependant, les dunes sont loin de recouvrir la totalité du Sud ; mais se localisent généralement dans de vastes régions ensablées appelées les ergs

**Figure 1.2** : Payesage de Lerg et Reg de Gauche à Droite Respectivement.

**Les dépressions**

**Les daya** : Petites dépressions circulaires, résultant de la dissolution locale des dalles calcaires ou siliceuses qui constituent les Hamadas.

**Les Sebkha et les Chott** : Lorsque les eaux s'évaporent sous l'effet de la chaleur, des plaques de sels divers se déposent en surface formant suivant l'origine de leurs eaux (Phréatiques ou superficielles) les chotts et les sebkhas.

**Les lits d'Oueds**: C'est l'espace qui peut être occupé par des eaux d'un cours d'eau.

**Les Hamadas** : Plateaux rocheux à topographie très monotone, souvent plate à perte de vue.

**Figure 1.3**: Paysage de : à Gauche Hamada et à Droite Sebkha.

### 1.2.2 Le climat :

Le climat du sud, chaud, ensoleillé et aride, situé de part et d'autre d'un tropique. Il résulte de la subsidence de l'air sous l'effet des anticyclones permanents qui se produisent entre 25° et 35° de latitude nord. Les précipitations sont très rares et irrégulières ; la plupart des régions reçoivent en moyenne moins de 130 mm de pluie par an, et certaines, comme le Tanezrouft (Algérie), restent plusieurs années sans pluie. Les pluies peuvent survenir sous la forme d'averses très brutales, et l'eau ruisselle dans les oueds. L'insolation est de plus de trois mille heures par an. Les températures diurnes sont très élevées, pouvant dépasser 50 °C (jusqu'à 66 à In Salah), et l'amplitude thermique entre le jour et la nuit est souvent supérieure à 35° ou 40 °C ; l'amplitude annuelle peut atteindre 50 °C ; en hiver, il peut geler quelques jours à Tamanrasset en ajoutant des vents puissants qui peuvent souffler et créer des vents de sable. [4]

# 2 Les aérosols et les poussières désertiques :

## 2.1 Les aérosols :

### 2.1.1 Définition :

Les aérosols sont généralement décrits comme des particules solides ou liquides en suspension dans l'air, n'incluant pas les gouttelettes d'eau nuageuse ; les cristaux de glace et les brouillards. Ils comprennent en particulier la fumée, les poussières, les sulfates, les nitrates, les composés organiques et les particules de carbone. Leur taille peut varier entre 0.001 et 100 µm. Il est estimé qu'en moyenne globale plusieurs millions de tonnes d'aérosols sont émis chaque jour. On distingue deux origines principales d'aérosols : anthropique ou naturelle. Elles sont en suspension dans l'air car leur vitesse de chute est très faible (de l'ordre du cm/h) et c'est pourquoi leurs trajectoires suivent sensiblement l'écoulement de l'air. [5] Cette vitesse de chute se calcule avec l'équation suivant [6] :

$$V_{ch} = \frac{\rho D^2 g}{18 \eta}$$

Avec : $\mathbf{V_{ch}}$ : vitesse de chute (m/s), $\boldsymbol{\rho}$ : Masse volumique de la particule (kg/m$^2$), $\boldsymbol{\eta}$: viscosité dynamique de l'air (Pa. s), **D**: Diamètre de la particule (m), **g** : l'accélération de gravitation (m/s$^2$)

### 2.1.2 Les caractéristiques physiques des aérosols :

#### 2.1.2.1 La taille :

La taille des aérosols s'étend de $10^{-3}$ µm, .Pour bien comprendre l'étendue d'une telle distribution en taille ; il suffit de penser que la masse d'une particule de 10 µm de diamètre est équivalente à la masse d'un milliard de particules de 10 nm de diamètre. La définition de la taille des particules dépend de leur forme. Les particules dont l'échelle est nanométrique correspondent à un regroupement de molécules appelles grappes moléculaires. La taille typique des molécules diatomiques est de l'ordre de 0.3 à 0.6 nm. A l'autre bout de l'échelle, les particules de diamètre important (supérieur à 50 µm) ne restent pas longtemps dans l'atmosphère ; du fait du leur vitesse de chute non négligeable. Afin de limiter l'imprécision d'appellation des aérosols au sujet de leur taille ; il est usuel de diviser la population d'aérosols en particules fines dont les diamètres vont de $10^{-3}$ µm à 2µm et les grosses particules de 2 µm a100 µm. [7]

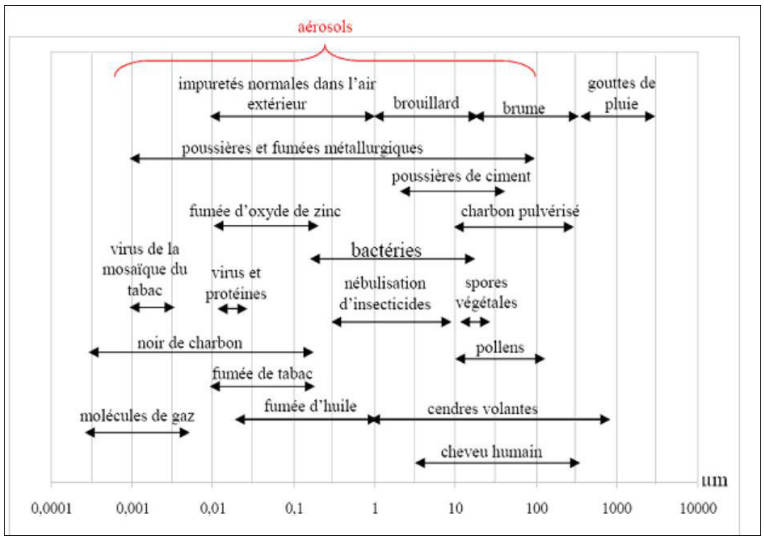


**Figure 1.4** : Les Tailles des Particules d'Aérosols. [7]

### 2.1.2.2 La forme des particules des aérosols :

La forme des particules des aérosols a pu être observée par microscope électronique et montre une variété et une complexité des formes très grandes. Ainsi pendant longtemps, les aérosols ont été considérés comme sphériques : c'est exact dans le cas des goulettes, mais une approximation parfois très éloignée de la réalité dans le cas des poussières désertiques par exemples. Les difficultés auxquelles on se heurte pour décrire la forme des aérosols est le manque de données, mais également la représentativité de telle ou telle forme théorique par apport à la population d'aérosols naturels. Il faudrait pour être rigoureux introduire des distributions de formes, couplées aux distributions de tailles [6]

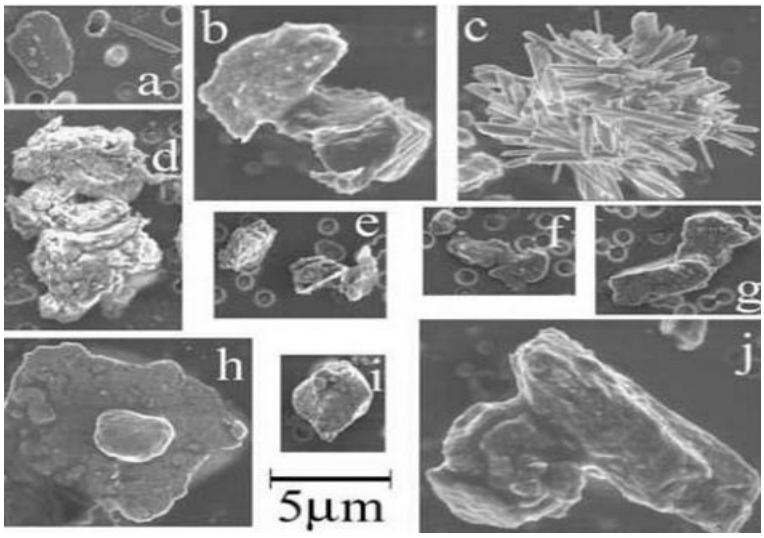


**Figure 1.5** : Les Différentes Formes des Poussières Désertiques Observées par Microscope

### 2.1.2.3 Indice de réfraction :

Pour simuler les propriétés d'absorption et de diffusion de la population d'aérosols, le paramètre le plus important à quantifier, en plus de la distribution en taille, est l'indice de réfraction complexe **η** de la particule **n –ik** , dont les parties réelle (**n**) et complexe (**k**) nous renseignent sur la capacité de l'espèce chimique à respectivement diffuser et absorber le rayonnement .Connaitre cet indice de réfraction complexe permet de résoudre les équations de Maxwell régissant l'interaction d'une particule avec un rayonnement électromagnétique et d'accéder aux propriétés optiques de l'aérosol telle que l'épaisseur optique.

**η**=1.33 pour les aérosols saturés, **η**=1.55 pour les aérosols minéraux [8]

### 2.1.3 Les caractéristiques optiques des aérosols :

#### 2.1.3.1 Absorption :

Absorption correspond à la transformation de rayonnement en d'autres formes d'énergie : chaleur, énergie de réaction chimique …et correspond aussi à la fin de la vie d'un photon. Pour les particules on exprime le coefficient d'absorption $\boldsymbol{\alpha_{abs}}$ en fonction de nombre d'aérosols $\mathbf{n_i}$, de type **i**, et de la section efficace d'absorption $\boldsymbol{\sigma_{abs(i)}}$ [8]

$$\alpha_{abs}\,(z,\,\lambda)=\sum_i n_i.\;\sigma_{abs}\,(\lambda)$$

#### 2.1.3.2 La diffusion :

La diffusion est définie comme le changement de direction des photons au cours de leur propagation. Voici son coefficient [8]:

$$\alpha_{diff}\,(z,\,\lambda)=\sum i\; ni\;.\;\sigma_{\,diff}\,(\lambda)$$

#### 2.1.3.3 L'extinction :

Le coefficient d'extinction des particules dépend de leur capacité de chacune d'elles a absorbées et /ou a diffusées le rayonnement. C'est donc la somme des coefficients [8] :

$$\alpha_{ext} = \alpha_{abs}\,(z,\,\lambda) + \alpha_{diff}\,(z,\,\lambda)$$

Tel que $\boldsymbol{\lambda}$ c'est la longueur d'onde et **z** la distance

#### 2.1.3.4 L'épaisseur optique :

L'épaisseur optique en aérosol (AOT) représente l'extinction du rayonnement par la couche d'aérosols intégré le long de la colonne atmosphérique. L'intensité du rayonnement solaire incident est atténuée par l'atmosphère d'un facteur $e^{-\tau_{ext}}$ Ou le $\boldsymbol{\tau_{ext}}$ c'est l'épaisseur optique d'extinction. L'épaisseur optique d'extinction (AOT) pour (aérosol Optical (thickness), $\tau_{ext}\,(\lambda)$, dépendant de la longueur d'onde est donnée par la relation [8]:

$$\boldsymbol{\tau_{ext} = \tau_{diff} + \tau_{abs}}$$

Ou $\tau_{diff}$ est le facteur du a la diffusion et $\tau_{abs}$ est le facteur du a l'absorption.

L'épaisseur optique d'extinction $\tau_{ext}$ s'exprime également par la relation [5]:

$$\tau_{ext} = \int_0^{\infty} \sigma_{ext}(Z, \lambda)\, dz$$

### 2.1.4 Les type des aérosols :

La variété des sources, qui peuvent être naturelles ou anthropiques, combinée à la variété des propriétés microphysiques des aérosols et des processus dynamiques, physiques et chimiques mis en jeu dans leur cycle de vie expliquent leur très grande variabilité spatio-temporelle. Une autre classification consiste à distinguer les aérosols troposphériques (jusqu'à quelques kilomètres d'altitudes) des aérosols stratosphériques (entre 12 et 30 kilomètres environ). [9]

- Les poussières minérales (PM) [particules d'origine terrigène à gros grain, produites mécaniquement]
- Les aérosols marins (AM) [particules d'origine marine à gros grain (essentiellement chlorure de sodium et eau), produites mécaniquement]
- Les suies ou résidus carbonés de combustion, que nous appellerons produits de combustions (PC) [particules à grain fin issues en grande partie des activités humaines; industrie, chauffage transports, mais aussi incendies de forêt, feux de brousse, etc...]
- Les aérosols optiquement non absorbants et hydrosolubles [aérosols chimiques (AC) ]
- conversion gaz-particule, nous les appellerons aérosols chimiques (AC).
- les cendres volcaniques (CV)
- les aérosols stratosphériques (AS) (composés à 75% d'acide sulfurique, constituant les aérosols stratosphériques en-dehors des périodes consécutives à d'importante éruptions volcaniques) [6]

| Variétés d'aérosols / source | localisation | origine | catégorie | prod |
|---|---|---|---|---|
| Poussières mobilisée par voie éolienne | T | A | PM | 1000 |
| Aérosols marins | T | N | AM | 3000 |
| Aérosols météoritiques | S | N | PM | 0.55 |
| Poussière volcanique | S, T | N | AS | 10 |
| Gaz volcanique | S, T | N | AS | 1 |
| Feux de brousse et incendies de forets | T | A, N | PC | 400 |
| Combustion et activité industriels | T | A | PC | 300 |
| Dérivées de l'activité végétale | T | N, A | AC | 3000 |
| Dérivées naturels du cycle de soufre | T | N | AC | 1000 |
| Sulfates anthropiques | T | A | AC | 300 |
| Dérivées naturels des oxydes d'azote | T | N | AC | 1000 |
| Nitrate anthropique | T | A | AC | 60 |
| Dérivées de cycle d'ammoniaque | T | N | AC | 700 |
| Sels d'ammonium anthropique | T | A | AC | 3 |

**Table 1.1** : La Production Journalière des Différents Aérosols en Milliers de Tonnes [9]

# 3. Les aérosols désertiques :

L'aérosol saharien constitue un système dont le cycle est déterminé par un ensemble de mécanismes en rapport avec l'environnement et le climat du Sahara et de ses bordures. II est caractérisé par des régions source qui semblent bien délimitées géographiquement, et par un transport à grande échelle qui peut se prolonger largement au-delà de l'aire saharienne d'origine. C'est ce système que nous allons décrire maintenant [10].

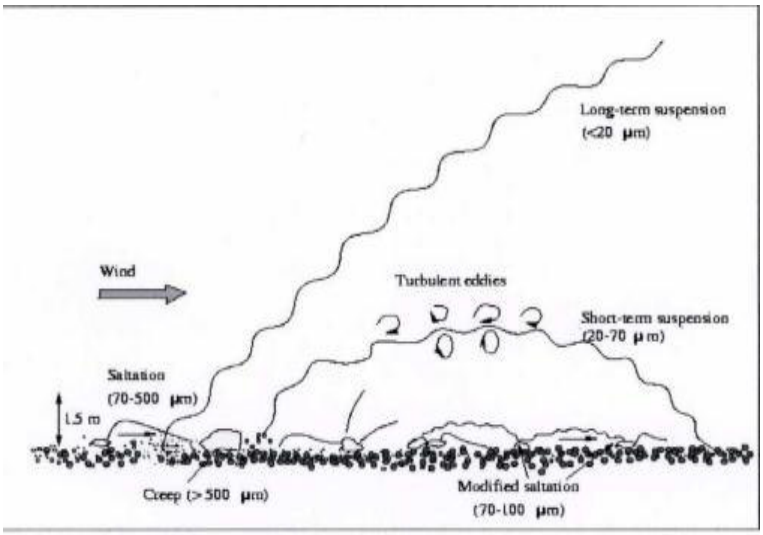


**Figure 1.6** : Processus Entraînant le Mouvement des Grains du Sol en Fonction de leur Diamètre [10]

## 3.1 Le cycle atmosphérique du sable :

Le cycle atmosphérique de sable se résume en trois phases essentielles [2] :

### 3.1.1 La mobilisation le (soulèvement de zone source) :

Ce phénomène ne peut se produire que sous certaines conditions :

- Absence d'obstacle en surface (par exemple un couvert végétal) contraignant le déplacement des particules de sable
- Présence en grande quantité de particules (générées par l'érosion éolienne ou hydrique et par les actions thermiques) susceptibles d'être mobilisées par le vent
- Un apport suffisant d'énergie d'origine éolienne à la surface pour vaincre les forces de cohésion

Le processus de mobilisation est comparable à celui des vagues qui déferlent sur la plage ou , sous l'effet de l'angle d'attaque de vent par apport au sol, les grosses particules de sables , de diamètre supérieur à 10µm , entrent en collision avec le sol et arrachent les fines particules qui sont ensuite libérées dans le sol et arrachant les fines particules qui sont ensuite libérées dans l'atmosphère . Les paramètres essentiels qui déterminent l'érosion du sol sont : la distribution spatiale de la textures du sol, le type de particules qui le constitue et l'intensité du vent (turbulence), car d'après M. DUBIEF toute cause augmentant l'amplitude de la turbulence d'une masse d'air en diminuant son échelle, favorisera en région désertiques la production des vents de sable. La connaissance des caractéristiques physiques des particules de sable, humidité du sol et le degré d'attachement de ces particules entre elles, est nécessaire pour déterminer la vitesse seuil de frottement pour laquelle la mobilisation de sable commence. De plus, le couvert végétal influe directement sur la quantité de sable soulevée, en modifiant le type de sol par apport d'humus et en augmentant l'humidité du sol. Les sols rocailleux de forte rugosité représentant une grande partie des zones désertiques, réduisent largement l'intensité de l'érosion en piégeant les particules de sables dans leurs cavités.

### 3.1.2 Transport :

Le sable soulevé se mélange dans l'atmosphère avec les autres substances présentes dans l'atmosphère, qui sont ensuite transportées par le vent soit à l'intérieur des régions sahariennes ou bien vers les autres régions. La direction et l'intensité du vent déterminent les régions qui seront affectées par le sable. Jusque-là ; trois direction ont été répertoriées : le nord (vers la méditerranée et l'Europe), l'ouest (vers l'océan atlantique) et le nord – est (vers la méditerranée orientale). Il est à signaler que la présence du relief perturbe largement l'advection de sable et limite son parcours. [2]

### 3.1.3 Dépôt de sable :

Le cycle de l'aérosol saharien s'achève par le dépôt des particules au niveau des continents ou des surfaces océaniques. On regroupe commodément l'extrême variété des modalités de cette étape finale en dépôts sec et humide, relatifs respectivement à des particules d'aérosol libres ou incluses aux précipitations. Cet aboutissement intervient après un temps de résidence dans l'atmosphère et une distance de transport extrêmement variables, en fonction [10] :

- de l'environnement atmosphérique et topographique : existence de reliefs, altitude et mouvement vertical des masses d'air, humidité, présence d'aérosols différents ou de particules nuageuses, etc....

- des caractéristiques des particules; essentiellement dimensions et nature physico-chimique; et en conséquence des mécanismes microphysiques intervenant pour modifier ces caractéristiques.

-Le dépôt intéresse une aire très vaste, et la localisation géographique de puits d'aérosol sur cette base apparaît problématique (au contraire du cas des sources). La localisation des puits doit plutôt être associée aux divers mécanismes de dépôt considérés séparément. On peut ainsi définir des régions de dépôt préférentiel : dépôt humide au Sud du FIT dans la zone de mousson, dépôt sec par gravitation dan: un certain voisinage des sources, par impaction sur les reliefs, etc… Voilà une figure (1.7) qui représente le dépôt humide et sec des particules.

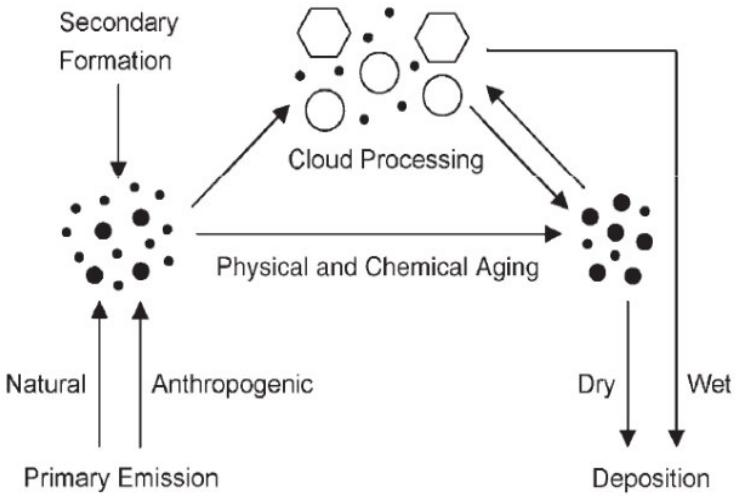


**Figure 1.7** : dépôt humide et sec du sable [10].

# Conclusion :

Nous venons de voir dans ce chapitre les différentes caractéristiques de Sahara algérien puis les généralités sur les aérosols et leurs caractéristiques physiques et optiques ; en s'intéressant sur les aérosols de type désertique. Ainsi nous avons décrit le cycle de vie de ces particules depuis la source et la formation jusqu'au dépôt. Dans le prochain chapitre on définira les catégories des vents de sable comme les tempêtes de sable et les chasses sable puis leurs impacts sur la pratique de l'aviation et l'économie des compagnies aériennes.

# Introduction :

Les aérosols Sahariens sont mobilisés par déflation des sols arides du Sahara et de ses abords entrainés par des vents ce qu'on appelle les vents de sables. Les vents de sables sont des phénomènes météorologiques qui gênent la pratique des activités aéronautiques .Et l'une des fonctions de la météorologie est d'assurer la sécurité de la navigation aérienne. De ce point de vue, la mesure de la visibilité au sol sur les sites d'aéroports constitue une observation importante qui détermine les conditions de sécurité dans lesquelles pourront se faire les opérations de décollage et d'atterrissage. En particulier ces opérations sont interdites lorsque la visibilité est inférieure à une certaine distance, en fonction de l'aéroport, type d'appareil et de compagnie aérienne. Ainsi dans le point de vue de l'économie de compagnies aériennes, tel que les tempêtes de sable augmentent les couts, les redevances et diminuent les revenues.

# 1. le vent :

## 1.1 Définition du vent :

Le vent est le mouvement au sein d'une atmosphère, masse de gaz située à la surface d'une planète. Les vents sont globalement provoqués par un réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète provenant du rayonnement stellaire (énergie solaire), et par la rotation de la planète. Sur Terre, ce déplacement est essentiel à l'explication de tous les phénomènes météorologiques. Le vent est mécaniquement décrit par les lois de la dynamique des fluides, comme les courants marins. Il existe une interdépendance entre ces deux circulations de fluides. Les vents sont généralement classifiés selon leur ampleur spatiale, leur vitesse (ex : échelle de beaufort), leur localisation géographique, le type de force qui les produit et leurs effets. La vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre mais peut être estimée par une manche à air, un drapeau, etc. [20]

## 1.2 Régime d'écoulement de vent dans la couche limite :

Il existe trois régimes d'écoulement [2]:

**Le vent moyen :**

Transport horizontal rapide (advection)

**Les ondes :**

-Pas de transport de chaleur, ni de matière (eau, polluants)

-Fort transport de mouvement et d'énergie

- Déclenché par topographie ou cisaillement de vent se propagent en altitude dans l'atmosphère libre et leurs déferlement provoque de la turbulence en air clair (CAT)

**La turbulence :**

**-**Structure tourbillonnaire

- Déclenché par le cisaillement de vent ou instabilité thermique.

-C'est un processus dissipatif qui dégénère si il n'y a plus de source, elle ne se propage pas mais se diffuse suivant la verticale

-Fort transport vertical de scalaires (matière ; chaleur ; polluants), aussi bien que de l'énergie et du mouvement, donc très efficace pour le transport

## 1.3 L'action de vent sur les aérosols désertique :

Le sable ou la poussière se déplacent de trois manières [23]:

- Par **reptation**, le vent déplace de proche en proche les grains les plus gros en un mouvement graduel et sans perte de contact avec la masse sous-jacente ;
- Par **saltation**, les particules moins lourdes sont soulevées par le vent à une certaine hauteur et retombent sous l'effet de leur propre poids, en rebondissant et en éjectant d'autres particules par impact. Ce soulèvement est de l'ordre de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres ;
- Par **diffusion/suspension** turbulente, les grains très légers peuvent être pris dans une turbulence mécano-thermique par les vents qui les transportent à une grande distance en les soulevant jusqu'à plusieurs dizaines ou centaines de mètres de hauteur

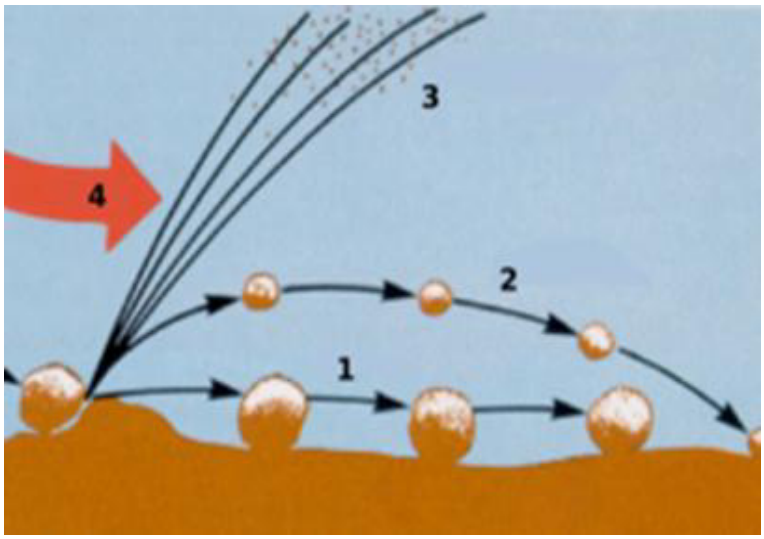


**Figure 2.1** : l'Action de Vent sur les Aérosols Désertique [23]

1- Reptation
2- Saltation
3- Diffusion/suspension
4- Sens du vent

# 2 .vent de sable :

## 2.1 Généralités :

Durant ces dernières années, les régions subsahariennes et sahéliennes ont été le siège d'une recrudescence sans précédent des fréquences des vents de sable. Cette nouvelle tendance climatique est conséquente d'un bouleversement écologique qui caractérise toute la région et qui fait de ces phénomènes un élément primordial du climat saharien et sahélien. Le vent de sable est un vent qui draine dans son sillage et sur toute une épaisseur de l'atmosphère (variable en fonction des conditions atmosphériques) un matériel de dimensions hétérogènes. C'est donc un phénomène dont l'apparition est conditionnée par deux facteurs majeurs, un facteur météorologique ainsi un facteur lithologique et pédologique [25]

**Le facteur météorologique :** le premier maillon de la chaîne dans la formation des vents de sable est sans conteste la situation météorologique qui génère l'accélération des flux d'air nécessaires à la prise en charge du matériel fin. La situation la plus propice est générée par une hausse du champ de pression sur l'Afrique du Nord. La turbulence de l'atmosphère et les systèmes perturbés favorisent aussi le soulèvement des particules à différentes échelles spatiales (ascendance localisée au passage des fronts froids isolés, instabilité liée au passage des dépressions cycloniques, instabilité liée au passage des lignes de grains et aux fluctuations de l'Equateur Météorologique Inclinée –EMI-).

**Le facteur lithologique** : l'intensité des processus initiaux (gélifraction, thermoclastie, haloclastie) élucide la production de la fraction fine mobilisable par le vent dans les régions sources. L'action éolienne est différentielle sur le substrat pédologique. Elle est fonction de la taille de la particule libre, de la structure et de la stabilité d'un sol. Elle est aussi liée à la force du vent nécessaire pour prendre en charge les éléments fins. Le spectre granulométrique éolien est ainsi varié, il oscille entre les argiles, les limons et les sables, auxquels s'associent des éléments de nature organique (débris végétaux, pollens, micro-organismes divers

## 2.2 La dynamique de vent de sable :

L'une des situations les plus typiques qui génère l'apparition des vents de sable sur toute l'Afrique de l'Ouest subsaharienne et le centre du Sahara, est liée à l'augmentation de la pression sur le Maghreb (Afrique du Nord). Cette configuration crée les conditions propices au resserrement du gradient de pression et à une accélération du flux d'est (Irifi), la trajectoire éolienne (nord –est / sud –ouest ou est / ouest) s'effectue dans ces conditions vers l'Atlantique et l'Afrique de l'Ouest. Le renforcement de la pression qui s'opère sur l'Afrique du Nord est consécutif au déferlement des cellules anticycloniques « anticyclone mobiles polaires, AMP » de trajectoire atlantique et européenne. Le contact des premiers systèmes avec le continent et les obstacles orographiques engendre leur étalement et leur ralentissement. La succession des écoulements se traduit par l'emboîtement des cellules et la formation des agglutinations anticycloniques « AA ». L'agglutination méditerrano-saharienne ou saharienne représente ainsi la clé de voûte du système qui enclenche l'apparition des nuages de poussières qui persistent plusieurs jours sur le centre du Sahara et l'Afrique de l'Ouest. La deuxième configuration type est liée à l'ouverture d'un champ dépressionnaire à l'avant des anticyclones qui abordent le continent africain par l'ouest.

L'écoulement de l'air polaire vers le sud, entraîne une advection d'air chaud tropical. Un large couloir dépressionnaire axé nord-est / sud-ouest se met en place et progresse vers l'Afrique orientale. Un flux de sud apparaît alors sur le Sahara central tandis que sur le Sahel, en relation avec cette configuration, et sous l'effet d'un resserrement du champ de pression, l'Irifi s'intensifie et provoque les conditions favorables à l'apparition des phénomènes associés au soulèvement et au transport des sables et des poussières. Les trajectoires éoliennes s'orientent vers le nord de l'Afrique du Nord (flux de sud sur le Maghreb) et à une latitude plus méridionale vers l'ouest en direction de l'Atlantique (flux d'est à nord – est sur le Sahel). Cette configuration isobarique provoque un resserrement du gradient de pression sur la partie occidentale de la Mauritanie et du Sénégal, l'accélération du vent qui accompagne cette situation particulière entraîne l'apparition de lithométéore. Un régime d'est dominant s'établit sur toute la région avec des vitesses des vents plus importantes sur la partie ouest. Sur le centre du Sahara, en relation avec le centre dépressionnaire, la circulation est dirigée par un flux de sud à sud – ouest qui génère un grand soulèvement de poussière. Une autre configuration en relation avec la cyclogenèse qui intéresse le Sahara peut aboutir à une véritable situation qui favorise la mise en place de vents de sable sur les régions saharienne. [25]

## 2.3 Les types de vent de sable :

Les vents de sable et de poussière constituent un paramètre essentiel du climat saharien et sahélien. Les distinctions essentielles entre les types de vent de sable sont basées sur paramètres de la vitesse des vents, de degré de la réduction de la visibilité et de la présence de dépôts de poussières au sol. Ils nous permettent de distinguer les chasses - sable d'accélération, les tempêtes de sables, les brumes sèches et les brume de poussières (caractérisé par un dépôt de poussières au sol).[21]

- **Brume de poussière** :

Poussières en suspension dans l'air d'une manière généralisée, non soulevées par le vent au point d'observation ou à ses alentours au moment de l'observation
La brume de poussière est mentionnée par l'observateur lorsqu'un dépôt de poussière éolienne est visible au sol [4]

❖ **Brume sèche :**

La brume sèche possède cependant les mêmes caractéristiques que la brume de poussière, mais en est déférente par l'absence de dépôt de poussière au sol. [4]

❖ **Chasse -sable :**

Poussière ou sable soulevés par le vent au point d'observation ou à ses alentours au moment d'observation, mais absence de tourbillon et pas de tempête de poussière ou de sable observée [3]

**Figure 2.2** : La Chasse Sable au Sahara.

❖ **Tempête de sable :**

C'est un phénomène météorologique qui se manifeste par des vents violents provoquant la déflation et le transport des particules de sable dans l'atmosphère, par le processus de saltation, voir par suspension pour les sables fins. Et on distingue deux types (Tempêtes synoptiques, tempêtes de méso-échelle). [3]

# 3. La visibilité :

En météorologie, la visibilité est la distance à laquelle il est possible de distinguer un objet, quelle que soit l'heur. On peut mesurer la visibilité horizontale et verticale, souvent différentes l'une de l'autre. Par exemple la visibilité horizontale peut être mauvaise dans un banc de brouillard mais relativement bonne à la verticale-ci est mince.

## 3.1 Définition de visibilité :

### 3.1.1 La définition météorologique :

La visibilité météorologique (VIMET) correspond à la visibilité horizontale déterminée visuellement à partir d'objets sélectionnés selon leurs caractéristiques géométriques et photométriques et dont la distance au point d'observation est connue. En 1957, l'OMM a recommandé d'utiliser la POM comme mesure de l'état optique de l'atmosphère [3]

### 3.1.2 La définition aéronautique :

La visibilité correspond à la plus grande des deux valeurs suivantes :
-La plus grande distance à laquelle on peut voir et reconnaitre un objet noir de dimensions appropriées situé près du sol lorsqu'il est observé sur un fond Lumineux.
-La plus grande distance à laquelle on peut voir et identifier des feux d'une intensité voisine de 1000 candelas lorsqu'ils sont observés sur un fond non éclairé. [1]

### 3.1.3 Visibilité dominante :

La valeur de la visibilité la plus grande, observée conformément à la définition de « visibilité », qui est atteinte dans au moins la moitié de cercle d'horizon ou de l'aérodrome. Ces zones peuvent comprendre des secteurs contigus ou non contigus.[1]

### 3.1.4 Portée visuelle de piste (RVR) :

Distance jusqu'à laquelle le pilote d'un aéronef placé sur l'axe de la piste peut voir les marques ou les feux qui délimitent la piste ou qui balisent son axe.[1]

### 3.1.5 Portée visuelle oblique (SVR) :

Portée visuelle d'un objet ou d'un feu donné le long d'une ligne de visée qui feux au sol vus d'un aéronef qui se trouve en approche. [1]

### 3.1.6 Portée optique météorologique (POM) :

Longueur du trajet que doit effectuer dans l'atmosphère un faisceau de rayons lumineux parallèles , émanant d'une lampe à incandescence, à une températures de couleur de 2700K , pour que l'intensité du flux lumineux soit réduite à 0.05 fois sa valeur originale , le flux étant évalué au moyen de la fonction de luminosité photométrique de la commission internationale de l'éclairage (CIE)( mètre ou kilomètre) [1]

## 3.2 Mesure de visibilité :

### 3.2.1 Diffusion-mètres optique :

Les premiers diffusion-mètres ont été installés en 1996. Les diffusion-mètres estiment la visibilité au sens de la POM sur la totalité de la plate-forme. Elle se nomme Visibilité Météorologique Instrumentale (VMI) sur les aérodromes réalisant des approches à vue VFR (Visual Flying Rules). Ce sont des capteurs permettant une mesure fiable de la POM grâce au coefficient d'extinction de l'atmosphère. Bien que n'utilisant qu'un petit volume de mesure (quelques $dm^3$), ils permettent de réaliser des mesures objectives et répétitives de la POM, en enlevant l'incertitude d'estimation de l'observateur. L'étendue de mesure de la distance de visibilité avec un diffusion-mètre est plus large, de 10 mètres à 10 kilomètres sur un aéroport. [24]

### 3.2.2 Le transmission-mètre :

Un transmission-mètre est le deuxième instrument de mesure de visibilité. Il délivre la valeur du Pouvoir Transmissif de l'Atmosphère (PTA). En combinant ce paramètre à l'intensité lumineuse de l'atmosphère et à l'intensité des lampes de balisage (pour l'éclairage des pistes), le transmission-mètre permet de calculer la Portée Visuelle de Piste (RVR). Il s'agit d'un équipement nécessaire à l'homologation des pistes réalisant des approches de précision IFR (Instrument Flying Rules) de catégorie I à III. [24]

**Figure 2.3** : Le Dispositif de Diffusion-Mètre et Transmission-Mètre (Gauche, Droite Respectivement).

# 4. L'impact du vent de sable sur l'aéronautique :

Les activités des tempêtes de sables ont comme conséquences les visibilités réduites qui ont un impact délicat pour la pratique des activités aéronautiques et le bon déroulement des vols sur tout pour les phases critiques (décollage et atterrissage). On outre les poussières désertiques ont des effets directs sur les organes de l'aéronef tel que l'ingestion des particules dans les moteurs, ces composants et les systèmes anémométriques pose énormément de problèmes techniques. Enfin tous ces effets entrainent des retards ou annulation de vols et parfois la fermeture des aéroports lorsqu'il s'agit des tempêtes de sable sévères qui reviens par des défaillances pour les compagnies aériennes.

## 4.1 Réacheminement dû à la visibilité pauvre :

Le Réacheminement due à la visibilité pauvre due au temps défavorable provoqué par les tempêtes de poussières en soulevant le sable et les différents aérosols précisément sur les régions sahariennes ; est un problème particulièrement aigu quand les aéroports fonctionnent près de la pleine capacité. Des retards sont composés [14]

## 4.2 Perturbations dans des opérations sur les aéroports :

Les retards subis à cause des tempêtes de sable ont des conséquences des perturbations de différentes opérations qui s'effectuent sur les aéroports tel que les taches de travail deviens importantes pour : les contrôleurs afin de suivre les décollages et les atterrissages et guider le flux de trafic sur les airs de mouvement , les agents d'opérations pour saisir et effectuer les opérations au sol sur les airs de trafics de (avitaillement et reprise du carburant ,entretien et les opérations au tour des aéronefs en escale ;embarquement et débarquement de passagers chargement ou le déchargement du fret ) .[14]

## 4.3 Problèmes mécaniques:

Il existe divers types de problèmes mécaniques qui peuvent se produire de l'ingestion des poussières désertiques sur les organes d'un moteur d'un avion, Le contacte de ces derniers avec le moteur provoque des érosions, des corrosion, des dommages et colmatages des tubes anémométriques et des flammes du moteur en vol. [11]

### 4.3.1 Érosion :

Laisser la poussière et les particules des aérosols rebondissent sur des secteurs froids du moteur (des pales de ventilateur ou d'hélices) causant l'augmentation de dommages extérieurs, la détérioration d'écoulement et la perte progressive d'exécution du moteur. Le problème est plus grave dans cas des aérosols de forme irrégulière avec les bords pointus. D'après le chercheur Italie Gian Paolo Gobbin de climat du l'Institut des sciences atmosphériques le sable du Sahara serait plus dangereux pour les avions que les cendres du volcan,( Source : LE FIGARO.fr) [12]

«La concentration en altitude des poussières provenant du Sahara est trois fois plus élevée que celle mesurée après l'éruption d'un volcan. Les poussières du Sahara sont en fait du petit sable transporté au-dessus de l'Atlantique. Leur composition est assez comparable à celle des cendres volcaniques tel que le sable est essentiellement constitué de petites particules de quartz très anguleuses, alors que les cendres ressemblent plus à de petites échardes avec une paroi de bulles vitreuses .Ainsi selon la composition chimique des cendres ou du sable , la température de fusion varie du sable a cendre .L'impact n'est pas le même: plus la température de fusion est basse, plus les effets seront dramatiques sur un réacteur d'avion ». Déclare-il.

### 4.3.2 Corrosion :

Si les particules de poussière contactent les surfaces chaudes du turboréacteur (murs de chambre de combustion, lames de turbine …) elles formeront un dépôt en verre avec la surface approximative qui peut mener à une perte rapide de l'exécution (risque potentiel pendant le décollage ou les opérations terrestres) en touchant au champ d'écoulement. Ce dépôt peut également mener à la corrosion thermique d'un composant du moteur ou des legs électroniques en bloquant les trous de refroidissement. [13]

### 4.3.3 Colmatage ou dommages de tube anémométrique :

Les particules de poussière désertiques mènent à la lecture fausse de vitesse de vol en bloquant les tubes anémométriques. Ceci peut être extrêmement dangereux particulièrement dans le vol de bas niveau comme pendant les procédures de décollage ou d'atterrissage. [13]

## 5. Impact des vents de sable sur l'activité économique des compagnies aériennes :

La baisse de visibilité qui accompagne généralement les vents de sable est à l'origine d'importantes perturbations de la navigation aérienne. Les vols lors de ces épisodes subissent boucoups de retards et d'annulations et parfois sont détournés sur des aéroports qui se trouvent loin de la destination prévue. A l'Algérie, une moyenne de plus **de 200 jours** avec visibilité réduite par les poussières et les sables, est comptabilisée chaque année. Inutile de préciser que les perturbations aériennes sont bien plus qu'occasionnelles sur les aéroports du sud de l'Algérie. La compagnie Air Algérie a dû subir lors de la tempête de sable **du 19 février jusqu'aux 22 février 2017** une situation aérienne inhabituelle. Plusieurs vols nationaux et internationaux ont été annulés (comme le vol Adrar- Ghardaïa **DAUA-DAAG 20/02/2017**; Adrar – Ouargla **DAUA-DAUU 21/02//2017**). Le coût économique de telles perturbations est considérable pour les compagnies aériennes qui doivent à chaque fois prendre en charge tous les frais occasionnés par de telles défaillances parmi ces couts on cite les redevances aéronautiques (d'atterrissage, stationnement, balisage, passager).[air Algérie]

## 6. Les moyens pour minimiser les effets de poussières désertiques sur l'aviation :

- ✓ Elaborer des procédures opérationnelles qui doivent tenir compte des prévisions des poussières désertiques le longs des itinéraires et particulièrement dans des vols de basse altitude
- ✓ Réévaluer les trajectoires et la gestion des vols dans les environnements sableux
- ✓ Définir la tolérance des moteurs par apport aux particules de sable et si c'est possible quelques modifications de la conception et matériaux de moteur
- ✓ illuminer les aéroports et les pistes est de sorte que le système de l'illumination doit pouvoir pénétrer les aérosols, tel que la visibilité soit prolongée en conditions atmosphériques défavorables.
- ✓ Protéger les aéroports par des clôtures

## Conclusion :

Dans ce chapitre on a défini le vent et sa réaction sur les aérosols désertiques ainsi on a décrit la dynamique du vent de sable, puis on a défini les effets et l'impact des tempêtes de sables sur le domaine aéronautique (la réduction de visibilité et l'augmentation des couts et les redevances et diminution de revenues…), on a conclue par quelques moyens pour minimiser les effets des tempêtes de sables sur l'aviation. On entamera le chapitre de prévision numérique.

# Introduction :

La modélisation offre une vision tridimensionnelle de l'atmosphère et permet d'évaluer le rôle individuel de chaque paramètre impliqué dans le cycle de vie de l'aérosol désertique. En effet, les aérosols constituent une partie intégrante de l'atmosphère et interagissent avec ses différentes composantes et l'évaluation des rétroactions aérosols-dynamique ne peut se faire que via la modélisation numérique .Pour cela plusieurs modèles sont mis en évidence en citant le model a maille fine « AROME-Dust » à 3 km de résolution.

# 1. Moyens d'observation des aérosols désertiques :

Pour prévoir le temps qu'il fera demain, il faut déjà connaître le temps qu'il fait aujourd'hui. Plus on veut aller loin dans le temps, plus la zone sur laquelle il faut caractériser le temps qu'il fait doit être étendue. L'observation constitue ainsi la première étape d'une prévision

Différentes techniques de mesures existent afin de sonder et d'évaluer l'état de la composition de l'atmosphère. Malgré les incertitudes associées aux instruments et aux techniques de mesure les informations qu'elles apportent sont d'un intérêt primordial car elles contiennent la signature de la réalité atmosphérique. Les instruments de mesure sont embarqués sur différents types de supports, à savoir : station au sol, plate-forme aéroportées et satellitaires. Chaque support possède ses avantages et ses inconvénients en matière d'échantillonnage spatial et temporel.

## 1.1 Observation au sol :

### 1.1.1 Le réseau AERONET/photons

Le réseau AERONET/photons, fourni une base de donne robuste des épaisseurs optique des aérosols. Ce réseau est équipe de photomètre solaire appartenons au service d'observation PHOTON. Le photomètre solaire est un instrument permettant la restitution des propriétés optiques et microphysiques des aérosols, intégrées verticalement sur la colonne atmosphérique .Les mesures photométriques ne sont possible que de jour lorsque le soleil est visible et en absence de nuages. [3]

**Figure 3.1** : L'Instrument Sun – Photomètre Utilisé dans le Réseau AERONET

### 1.1.2 TEOM :

TEOM (**Tapered Element Oscillating Microbalance)**, est compose d'une microbalance utilise un élément conique oscillant à sa fréquence naturelle et d'un microprocesseur. Les particules aspire au moyen d'une pompe de prélèvement sont dispose sur le filtre, en haut du conne, et en augmentant la masse du système elle produise une décroissance de la fréquence naturelle de vibration. Cette vibration de de fréquence est enregistrée et convertie en vibration de masse par le microprocesseur. Cet appareil permet la mesure des concentrations des particules ayant un diamètre inférieur à 10 µm. [3]

**Figure 3.2** : Instrument TEOM

## 1.2 Les observations spatiales :

Les produits satellitaires offrent aujourd'hui de nouveaux outils pour étudier la variabilité spatiale et temporelle des émissions. Ces produits assurent une vision horizontale en 2D des panaches de poussière et offrant une couverture spatiale maximale. Sont décrit ci-dessous les principaux produits satellitaires permettant l'observation des poussières désertiques. [27]

### 1.2.1 MODIS :

L'instrument MODIS (moderate résolution Imaging spectro-radiometer) a été lancé en 1999 à bord de deux satellites, Terra et Aqua (premier satellites de l'Aqua-Train), utilisé pour une large gamme de mesure spectrale (0.51-2.1µm) pour séparer les composante anthropique des aérosols (mode fin) de celle des aérosols naturels (mode grossier). L'information additionnelle dans le moyen d'infrarouge permet d'estimer les contributions respectives des modes fin et grossier à l'épaisseur optique totale. L'algorithme développé pour instrument MODUS fournie principalement l'épaisseur optique spectrale et rayon effectif des particules. [27]

### 1.2.2 SEVIRI :

Le capteur SIVIRI (spinning enhanced visible and infra red imager) est un radiomètre à balayage embarqué sur le satellite géostationnaire de seconde génération (MSG 1et 2) depuis 2002.ce radiomètre fonctionne dans le visible et l'infrarouge sur les longueurs d'onde report sur 12 canaux (04 dans le visible et 8 dans l'infrarouge) il fournit une meilleure résolution spatiale et temporelle (à 1Km sol et des images toutes les 15 min). Les températures de brillance issues de canaux 8.7, 10.8 et 12µm de SEVIRI sont utilisées en complément des températures de brillance de l'infra –red Imager radiomètre(ILR) afin d'obtenir une caractérisation des aérosols désertique dans l'infrarouge en utilisant les différences de température de brillance entre les défilants canaux. Les aérosols désertiques sont détectés par MSG-SEVIRI jour et nuit par imagerie IR. Ces observations offrent l'avantage d'une bonne couverture spatiale de l'Afrique. [27]

### 1.2.3 CALIOP ET ILR :

L'ensemble des instruments abord du satellite de CALIPSO (Cloud Aérosol Lidar and infrared pathfinder satellite observation) mesure les distributions verticales des aérosols dans l'atmosphère ainsi que les propriétés optiques et des physiques des aérosols et des nuages, le satellite CALIPSO, embarque une charge utile composé d'un Lidar à rétrodiffusion, instrument principal équipé d'un télescope de 1 m, une caméra visible et de l'IIR.Le lidar a rétrodiffusion CALIOP (cloud –aerosol lidar whith orthogonal polarization) fournit des profils verticaux de réflectivité atmosphérique (à 532nm et 1064 nm) cette information et utilisée pour déterminer la distribution optique radiatif des aérosols. [27]

# 2. Généralités sur les prévisions météorologiques :

## 2.1 Définition de la prévision numérique du temps:

La prévision numérique du temps (PNT) est une application de la météorologie et de l'informatique. Elle repose sur le choix d'équations mathématiques offrant une proche approximation du comportement de l'atmosphère réelle. Ces équations sont ensuite résolues, à l'aide d'un ordinateur, pour obtenir une simulation accélérée des états futurs de l'atmosphère. Le logiciel mettant en œuvre cette simulation est appelé un *modèle de prévision numérique du temps*. La PNT peut servir, en recherche, à faire des études de cas en « vase clos », pour étudier une facette ou un comportement particulier de l'atmosphère ou tester des améliorations au modèle en fonction de cas théoriques ou pratiques dont on connaît d'avance les résultats. Le modèle de PNT devient ainsi un laboratoire virtuel pour l'étude de l'atmosphère et l'amélioration des prévisions. [26]

## 2.2 La chaîne de la prévision météorologique:

### 2.2.1 La collecte des données observées :

L'observation est le point de départ de toute prévision météorologique. Il s'agit d'une description qualitative du ciel ou mesures de paramètres physiques de l'atmosphère, toutes les observations doivent être méticuleusement définies. Les données d'observation partout

sur le globe, mais aussi en orbite, sont transmises toutes les 6 heures à l'Organisation météorologique mondiale, qui les redirige vers les centres de prévision opérationnels. La quantité de données est considérable, environ $10^7$ observations individuelles toutes les 6h. Il s'agit d'observations au sol (station météo), de sondages par ballon (radiosondages), de mesures sur avion et bateau, de mesures de profileurs comme les radars. Depuis la fin des années 1970 se sont ajoutées les observations satellitaires, dont le nombre a considérablement crû pour atteindre plus de 90 % des données effectivement utilisées (plus de 99 % des données reçues). Cela a notamment permis une meilleure couverture du globe, et en particulier de l'hémisphère Sud (davantage couvert par les océans). Ces données doivent être traitées et filtrées en temps réel. En effet, certaines sont redondantes ou fortement corrélées, d'autres aberrantes, ou encore la défaillance d'un instrument doit être diagnostiquée. [19]

### 2.2.2. L'assimilation des observations :

Toutes ces observations sont ensuite traitées pour en extraire les informations "utiles" au modèle de prévision : on parle d'assimilation des données. Environ 22 millions de données d'observations sont utilisées chaque jour par les modèles à l'issue de l'étape d'assimilation. Les données issues des observations sont combinées à d'autres informations, comme des prévisions très récentes, pour établir un état initial de l'atmosphère que le modèle saura utiliser. Les observations sont également utilisées par les prévisionnistes, d'une part pour le suivi de la situation en cours, d'autre part pour la détection et la correction d'éventuelles erreurs de prévision. [19]

### 2.2.3 La simulation par un modèle numérique :

C'est l'étape de la prévision numérique par les modèles météorologiques. Ces modèles reposent sur les lois physiques qui gouvernent l'évolution atmosphérique. Les principales sont celles de la mécanique des fluides. Elles sont complétées par celles d'autres processus présents dans l'atmosphère : des changements d'état (l'eau se condense ou s'évapore), beaucoup de turbulences et de nombreuses interactions avec la surface et même l'espace.A partir d'un état initial construit sur la base des observations et des prévisions récentes, le modèle numérique du temps effectue une discrétisation en trois dimensions des variables de la météorologie dans l'espace réel. C'est-à-dire que l'on réalise un maillage du domaine d'étude (l'atmosphère). Une variable de température,

pression, etc., est attachée à chaque point de grille de ce maillage. Ce dernier définit la résolution du modèle (la taille de la maille) et donc la puissance de calcul requise pour effectuer l'intégration numérique des variables. On peut dire que le développement des performances des supercalculateurs permet d'accroître la résolution des modèles.[19]

### 2.2.4 L'analyse des simulations par le prévisionniste :

Les prévisions du modèle sont ensuite soumises à l'expérience du prévisionniste. L'expertise des prévisionnistes est indispensable pour analyser les résultats complexes, détecter une anomalie dans la prévision, et le cas échéant la corriger avant diffusion aux clients, dont le grand public et les médias. Les prévisions sont ensuite communiquées soit sous forme de bulletins professionnels (messages codés) destinés aux aérodromes, soit sous forme vulgarisée destinée au grand public (média, internet, etc.,), soit sous forme spécifique produite à la demande de clients (agriculture, assurances, etc.,) [19]

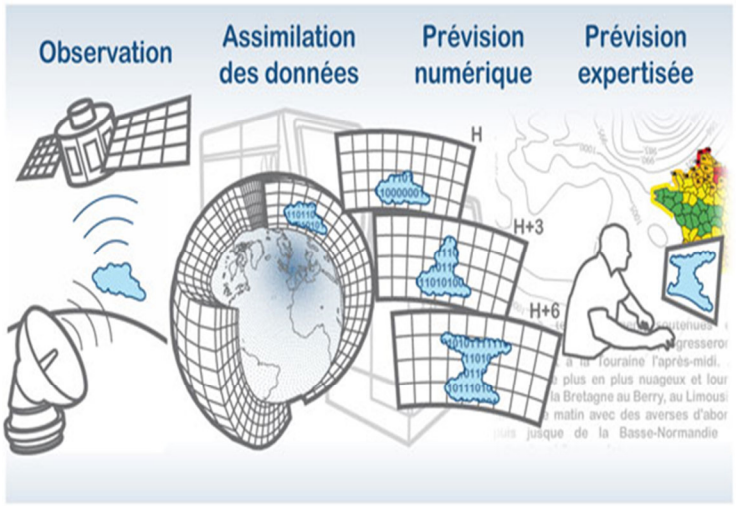


**Figure 3.3** : Les Etapes d'une Prévision Numérique du Temps PNT.

# 3 .Contexte opérationnel de la prévision des aérosolsdésertiques:

L'intérêt porté à la modélisation du cycle des aérosols désertiques, en Algérie, est important du fait que le désert couvre plus de 75% de la superficie du pays. Cet intérêt est renforcé par le fait que les poussières désertiques représentent un phénomène très dangereux pour l'aviation et ont un impact direct sur l'économie. Actuellement, la prévision des aérosols désertiques au centre nationale de prévision météorologique (CNPM) est établie en utilisant le modèle ALADIN-Dust (Aire Limitée Adaptation dynamique Développment International). Ce modèle a été développé par M, Mokhtari dans le cadre de sa thèse de doctorat soutenue en 2012. Il est opérationnel depuis 2014 sur le supercalculateur de l'ONM, avec une résolution horizontale de 11km, et une échéance de prévision qui va jusqu'à 72 heures. Il utilise les sorties du modèle globale ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) pour les conditions aux bords et l'état initiale. Les sorties de ALADIN-Dust sont affichées sous forme de cartes des concentrations de sable, des visibilités et des épaisseurs optiques. D'après les prévisionnistes, ce modèle constitue un outil d'aide précieux pour les prévisions des épisodes de soulèvements de sables sur les différents aérodromes au sud de l'Algérie. Cependant, les scores des résultats obtenus restent insuffisants car plusieurs événements n'ont pas été bien prévus par le modèle.

# 4 Aperçu sur le modèle à maille fine AROME :

Le modèle AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) tourne en opérationnel sur le supercalculateur du centre national de prévisions météorologiques (CNPM) en Algérie en deux réseaux par jour (00h et 12h) sur la partie Nord du pays, avec une résolution de 3km. Il aide ainsi à mieux y prévoir les phénomènes météorologiques de la journée et du lendemain (ses échéances de prévisions allant jusqu'à 48h). Il est très utile dans les épisodes à forts enjeux tels que les épisodes convectifs intenses.Le modèle AROME a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux tels que les fortes pluies méditerranéennes, les orages violents, le brouillard ou les îlots de chaleur urbains en période de canicule. Il a été développé grâce à d'étroites collaborations, nationales et internationales, afin de tenir compte des dernières avancées en modélisation atmosphérique.

Ce modèle bénéficie d'une base de données orographique récente et fine, qui contribue à une représentation très réaliste des zones de relief. La nature du sol influence directement les conditions météorologiques locales. Par exemple, en forêt, le vent est moins fort qu'au milieu d'une prairie. En ville, le béton accumule la chaleur le jour et la restitue la nuit (phénomène d'îlot de chaleur). Afin de mieux modéliser ces échanges entre l'atmosphère et les surfaces, chaque maille d'Arome est caractérisée par un type de surface.

Les para-métrisations physiques du modèle sont en majeure partie héritées du modèle de recherche Méso-NH (Non Hydrostatique) alors que la partie dynamique est une adaptation pour la fine échelle du noyau dynamique d'ALADIN (Figure 3.4).

L'atout principal du modèle AROME c'est qu'il tient compte des mouvements verticaux violents de petite échelle associés au développement des cumulonimbus, les nuages d'orages. Un modèle à maille plus large, comme ALADIN, ne "voit" pas ces mouvements verticaux locaux. Avec sa maille de 3 km, Arome est capable de les modéliser ainsi que le cycle de vie des systèmes nuageux qui produisent des précipitations. Il peut alors mieux simuler les phénomènes "convectifs", les systèmes pluvio-orageux et les mouvements ascendants très localisés [15]

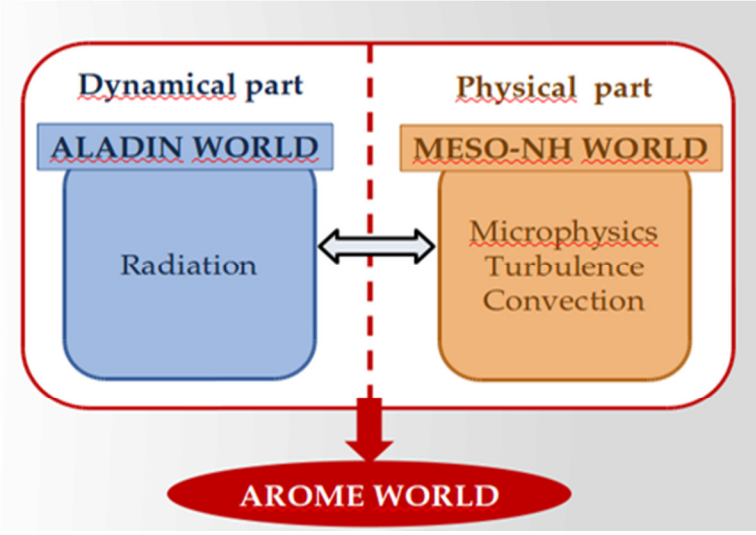


**Figure 3.4** : La Partie Physique et la Partie Dynamique du Modèle AROME.

| | | |
|---|---|---|
| Cycle | | 40 |
| Résolution | | 3km |
| Les niveaux | | 60 |
| La grille | | 1024 x 972 |
| Région | Latitude | 18 ° N - 42 ° N |
| | Longitude | 10 ° W-13 ° E |
| Conditions initiales | | ALADIN (8 km) |
| Heure de départ | | 00h |
| Intervalle de cycle | | 01h |
| Temps de vérification | | 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h et 21h |
| Nombre de processeurs (NPROC) | | 16 x 16 |
| Coûts informatiques | Avec poussière | 7260 secs |
| | Sans poussière | 4740 secs |

**Tableau 3.1** : Caractéristiques et Coût de Calcul du Modèle « AROME » [source, ONM]

# 5. Modélisation des aérosols désertiques par AROME-Dust

## 5. 1. Apport de la modélisation dans l'étude du cycle de vie de l'aérosol :

La modélisation offre une vision tridimensionnelle de l'atmosphère et permet d'évaluer le rôle individuel de chaque paramètre impliqué dans le cycle de vie de l'aérosol désertique. Le cycle de vie des aérosols comprend trois étapes essentielles : l'émission, le transport et le dépôt, modéliser ce cycle revient ainsi à représenter numériquement chacune de ces étapes. En effet, les aérosols constituent une partie intégrante de l'atmosphère et interagissent avec ses différentes composantes et l'évaluation des rétroactions aérosols-dynamique ne peut se faire que via la modélisation numérique qui permet entre autre la

séparation entre les différentes composantes atmosphériques. Ceci nécessite, en retour, une bonne représentation physique du cycle des aérosols dans les modèles numériques ainsi qu'une résolution spatiale et temporelle suffisamment fine pour tenir compte à la fois des émissions sporadiques des zones sources localisées et celles issues des événements ponctuels fréquents. Sont décrites par la suite les différentes caractéristiques du modèle AROME utilisées dans ce travail pour modéliser le cycle atmosphérique de l'aérosol désertique. [16]

## 5. 2. Traitement des poussières désertiques dans AROME-Dust :

### 5. 2. 1. SURFEX pour la gestion des émissions :

Ce schéma regroupe les principaux développements du CNRM en matière de paramétrisation de surface. Les émissions sont calculées dans le schéma de surface ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere) (Noilhan and Mahfouf, 1996) utilisé par SURFEX à travers le module DEAD (Dust Entrainment And Deposition) (Zender et al. 2003). Ce module est basé sur le schéma physique des émissions de Marticorena et Bergametti (1995). DEAD est appelé dans le code SURFEX pour les deux types de couverts COVER004 et COVER005 (Figure 3.5) relatifs aux fractions des sols nus et rocailleux, respectivement, issues de la base de données ECOCLIMAP. La modélisation de l'émission représente un challenge pour les scientifiques et les modélisateurs. En effet, elle nécessite des connaissances suffisantes sur les états du sol et les caractéristiques de la surface, telles que la texture du sol, la rugosité et les types de sol, pour déterminer les seuils d'érosion. [17]

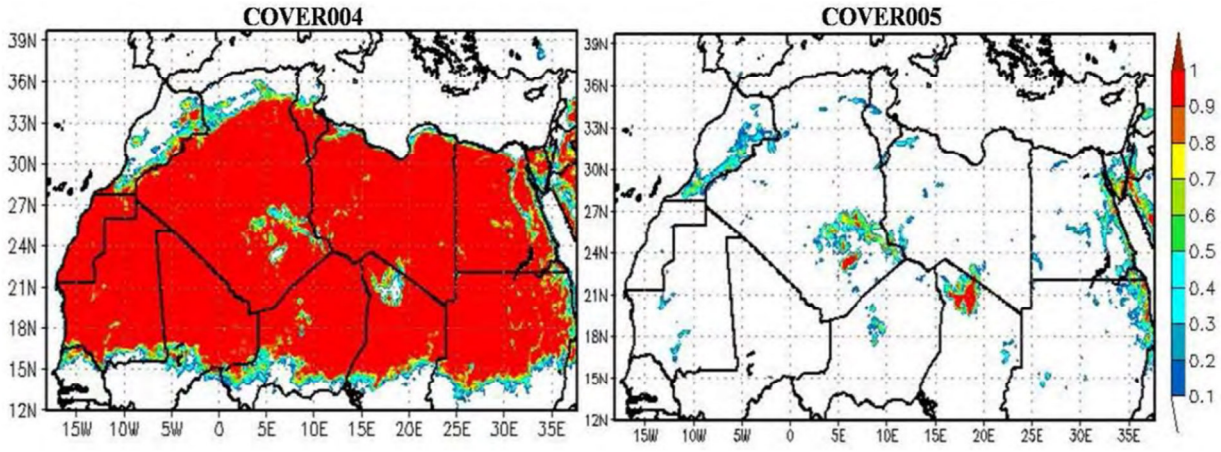


**Figure 3.5 :** Fractions des couvert «COVER004» et «COVER005» relatifs, respectivement Aux,sols nus et rocailleux pour l'afrique du nord

### 5.2.2 ORILAM pour la gestion du transport et du dépôt :

Le transport, la sédimentation et le dépôt (humide et sec) des poussières désertiques sont gérés par le module ORILAM adapté à l'environnement AROME. Ce module, initialement développé pour MesoNH (Mesoscale Non-Hydrostatic atmospheric model), est basé sur la théorie lognormale tri-modale.

#### 5.2.2.1 Transport :

Une fois soulevés par SURFEX, les aérosols désertiques sont injectés dans le schéma ORILAM. Ce schéma développé par Tulet et al (2005) et étendu par Tulet et al (2006) aux aérosols organiques secondaires (SOA) est couplé à Méso-NH, et est basé sur l'ensemble des lois physiques généralement utilisées pour décrire les aérosols. Le schéma ORILAM est basé sur une approche modale, et chaque mode est ainsi représenté par une fonction lognormale. ORILAM simule ainsi l'évolution dans le temps et dans l'espace de la distribution lognormale des aérosols dans l'atmosphère. Pour chaque mode, les moments d'ordre 0, 3, 6 sont intégrés comme variables pronostiques. La combinaison de ces moments permet le calcul de la concentration en nombre, du rayon médian, et de la déviation standard de la distribution en taille des aérosols. [18]

#### 5.2.2.2 Dépôt :

Les processus de perte des aérosols atmosphériques se fait soit par le dépôt sec, soit par le dépôt humide (lessivage). Ces deux processus de dépôt sont également pris en compte dans ORILAM.

##### 5.2.2.2.1 Dépôt sec :

Le dépôt sec des poussières désertiques est calculé dans le système couplé AROME-SURFEX en suivant le principe de la diffusion Brownienne:

$$D_P = \left(\frac{kT}{6V\rho_{air}r_p}\right) \qquad [18]$$

Et la vitesse gravitationnelle $V_g = \left(\frac{2g}{9v}\left(\frac{\rho_{pi}}{\rho_{air}}\right)r_p^2\right)C_c$ [18]

Avec k est la constante de Boltzmann, T la température ambiante, v la vitesse cinétique de l'air, $\rho_{air}$ la densité de l'air $\rho_{p\,i}$ la densité de particule de mode i. Avec

$$C_c = 1 + 1.246 \frac{\lambda_{air}}{r_p} \qquad [18]$$

est le coefficient de glissement « gliding coefficient », $\lambda_{air}$ est le parcours moyen libre (mean free path.

Le dépôt sec est évalué en deux étapes distinctes : le dépôt sec à la surface est traité dans le modèle de surface SURFEX, et le dépôt sec dans l'atmosphère ou la sédimentation est calculé dans le modèle AROME.

#### 5.2.2.2.2 Dépôt humide :

Le schéma de dépôt humide des aérosols désertiques développé pour le modèle Méso-NH par le CNRM et le laboratoire d'Aérologie de Toulouse a été adopté pour le modèle ALADIN (Mokhtari, 2009) puis pour AROME (Mokhtari et Ambar, 2016). Ce schéma est bien détaillé dans le papier de H. Tost et al. 2006. Quatre processus physiques relatifs au dépôt humide ont été traité par ce schéma, à savoir : la collection des aérosols désertiques par les hydrométéores (nuages et les gouttelettes d'eau) sous l'effet d'impaction, interception et diffusion brownienne, la collection des aérosols désertiques par les gouttelettes d'eau précipitées (sédimentation humide), l'auto-conversion des nuages en précipitation ce qui permet l'augmentation des concentration des aérosols désertiques dans les précipitations et en contrepartie leur diminution dans les nuages et l'évaporation des précipitation, ce qui relâche les aérosols désertiques dans l'atmosphères à l'état sec. Ces processus sont schématisés dans la (figure 3.6). [18]

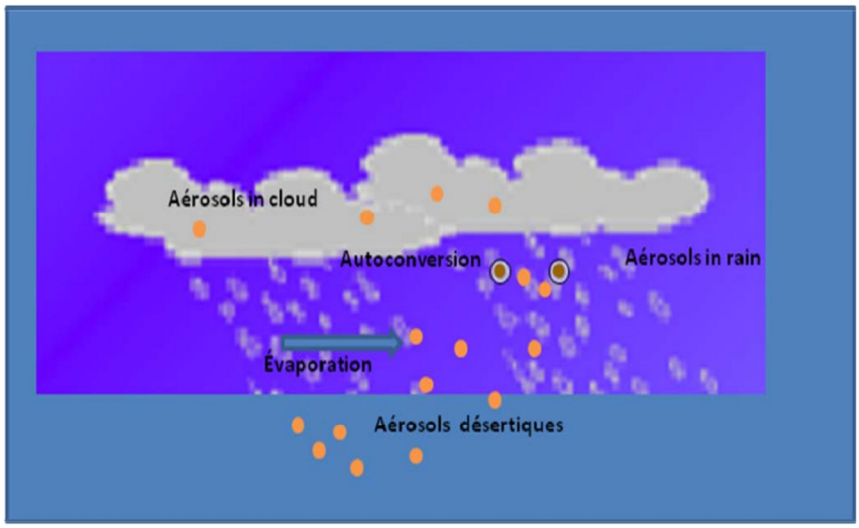


**Figure 3.6** : Schéma des Processus Physiques Relatifs aux Aérosols Désertiques Traités dans ALADIN/AROME [16]

## 5.3 L'équation du cycle atmosphérique des aérosols désertiques :

L'intégration du calcul des processus liés aux aérosols désertiques dans le modèle AROME consiste à introduire la représentation du cycle de vie de ces aérosols dans la partie physique du modèle. L'équation représentant le cycle de vie des aérosols désertiques avec ses trois phases fondamentales dans l'atmosphère savoir le soulèvement, le transport et le dépôt s'écrit sous la forme suivante [source ONM]:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = -u\frac{\partial C_k}{\partial x} - v\frac{\partial C_k}{\partial y} - (w - v_{gk})\frac{\partial C_k}{\partial z} - \nabla(K_H \nabla c_K) - \frac{\partial}{\partial z}\left[K_z \frac{\partial C_k}{\partial z}\right] - \left[\frac{\partial C_k}{\partial t}\right]source - \left[\frac{\partial C_k}{\partial t}\right]SINK$$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Advection horizontale | Advection verticale et configuration gravitationnelle | Diffusion | Dispersion | Emission du sable | Dépôt sec et humide |

Avec :

**x, y, z, t :** coordonnées d'espace et de temps.

**$C_k$ :** la concentration de sable selon la taille des particules (kg $m^{-3}$)

**u et v :** Composants de vitesse horizontale (m $s^{-1}$).

**W :** Vitesse verticale ($m\,s^{-1}$).

**$v_{gk}$ :** Vitesse de réglage gravitationnel ($m\,s^{-1}$).

$\nabla$**:** Opérateur horizontal nabla (adimensionnel).

**$K_H$ :** Coefficient de diffusion latérale ($m^2s^{-1}$)

**$K_Z$ :** Coefficient d'échange de turbulence ($m^2s^{-1}$)

$\left[\frac{\partial C_k}{\partial t}\right]_{SOURCE}$: cadence de fabrication de la poussière au-dessus du secteur de source de la poussière ($kg\,m^{-3}.s^{-1}$)

$\left[\frac{\partial C_k}{\partial t}\right]_{SINK}$: est la limite d'évier, qui inclut les deux fractions sèches-et-humides de dépôt ($kg\,m^{-3}.s^{-}$)

## 5. 4. Les étapes d'une simulation AROME-Dust :

Le modèle AROME-Dust doit être alimenté par un modèle de plus

**Couplage avec un modèle plus grand (E927) :** Cette étape consiste à créer les fichiers coupleurs pour le modèle AROME-Dust à partir d'un modèle plus grand (ARPEGE, ALADIN) pour en extraire les conditions aux limites du modèle AROME-Dust. Pour la configuration AROME en Algérie, ce couplage s'effectue avec le modèle ALADIN opérationnel au centre nationale de prévision météorologiques.

**Création des fichiers de surface (prep_pgd) :** Le but de cette étape est de créer un fichier contenant les données physiographiques de surface (orographie, couverture de surface..) obtenues à partir des bases de données telles que : FAO et HWSD, GTOPO30, ECOCLIMAP.

**Intégration et prévision (E001) :** Il s'agit de l'étape la plus coûteuse en termes de temps de calcul (CPU). Elle consiste à effectuer les calculs des champs en sorties pour fournir la prévision des différents variables présélectionnées, y compris celles liées aux poussières désertiques.

**Projection des sorties vers une grille LAT-LON (Fullpos) :** Cette étape permet de convertir les fichiers en sortie obtenus de l'étape précédente de la projection Lambert vers une grille régulière LAT-LON

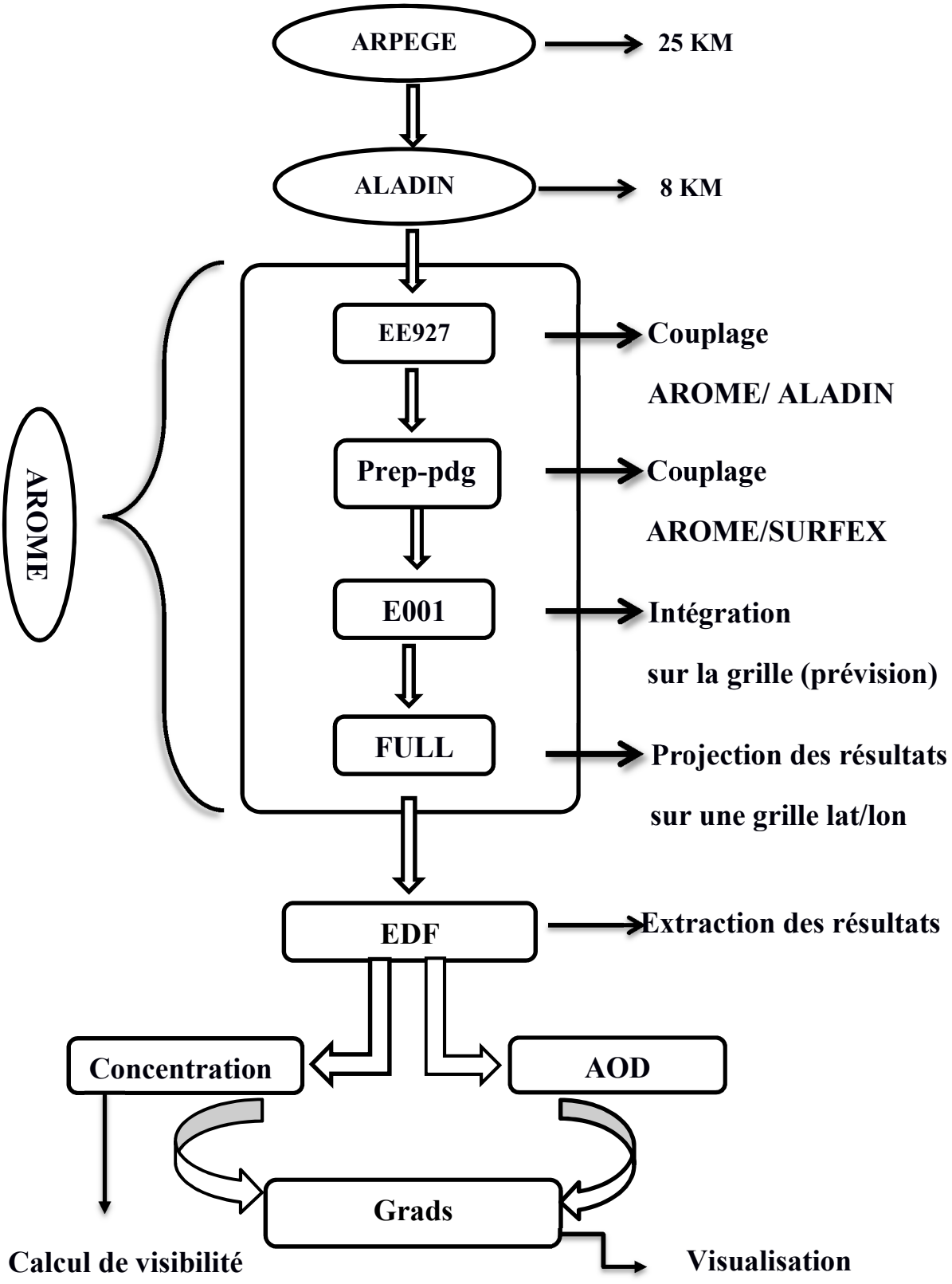


**Figure 3.7** : Schéma Représentatif de Chaine de Prévision AROME.

## Conclusion :

L'élaboration de ce chapitre nous a permet tout d'abord de faire une illustration générale les différentes techniques d'observation existantes afin d'évaluer l'état de l'atmosphère ainsi , nous avons donné un bref aperçu sur le modèle numérique AROME-Dust les étapes de modélisation de cycle de vie des aérosols avec le model AROME –Dust .Maintenant on entamera la partie pratique de notre étude qui est consacré à la validation du model AROME –Dust pour le sud de l'Algérie on effectuera plusieurs simulations des situations météorologique de vent de sable choisi dans la période de 19 au 22 février 2017..

# Introduction :

La modélisation offre une vision tridimensionnelle de l'atmosphère et permet d'évaluer le rôle individuel de chaque paramètre impliqué dans le cycle de vie de l'aérosol désertique. En effet, les aérosols constituent une partie intégrante de l'atmosphère et interagissent avec ses différentes composantes et l'évaluation des rétroactions aérosols-dynamique ne peut se faire que via la modélisation numérique .Pour cela plusieurs modèles sont mis en évidence en citant le model a maille fine « AROME-Dust » à 3 km de résolution.

# 1. Moyens d'observation des aérosols désertiques :

Pour prévoir le temps qu'il fera demain, il faut déjà connaître le temps qu'il fait aujourd'hui. Plus on veut aller loin dans le temps, plus la zone sur laquelle il faut caractériser le temps qu'il fait doit être étendue. L'observation constitue ainsi la première étape d'une prévision

Différentes techniques de mesures existent afin de sonder et d'évaluer l'état de la composition de l'atmosphère. Malgré les incertitudes associées aux instruments et aux techniques de mesure les informations qu'elles apportent sont d'un intérêt primordial car elles contiennent la signature de la réalité atmosphérique. Les instruments de mesure sont embarqués sur différents types de supports, à savoir : station au sol, plate-forme aéroportées et satellitaires. Chaque support possède ses avantages et ses inconvénients en matière d'échantillonnage spatial et temporel.

## 1.1 Observation au sol :

### 1.1.1 Le réseau AERONET/photons

Le réseau AERONET/photons, fourni une base de donne robuste des épaisseurs optique des aérosols. Ce réseau est équipe de photomètre solaire appartenons au service d'observation PHOTON. Le photomètre solaire est un instrument permettant la restitution des propriétés optiques et microphysiques des aérosols, intégrées verticalement sur la colonne atmosphérique .Les mesures photométriques ne sont possible que de jour lorsque le soleil est visible et en absence de nuages. [3]

**Figure 3.1** : L'Instrument Sun – Photomètre Utilisé dans le Réseau AERONET

### 1.1.2 TEOM :

TEOM (**Tapered Element Oscillating Microbalance)**, est compose d'une microbalance utilise un élément conique oscillant à sa fréquence naturelle et d'un microprocesseur. Les particules aspire au moyen d'une pompe de prélèvement sont dispose sur le filtre, en haut du conne, et en augmentant la masse du système elle produise une décroissance de la fréquence naturelle de vibration. Cette vibration de de fréquence est enregistrée et convertie en vibration de masse par le microprocesseur. Cet appareil permet la mesure des concentrations des particules ayant un diamètre inférieur à 10 µm. [3]

**Figure 3.2** : Instrument TEOM

## 1.2 Les observations spatiales :

Les produits satellitaires offrent aujourd'hui de nouveaux outils pour étudier la variabilité spatiale et temporelle des émissions. Ces produits assurent une vision horizontale en 2D des panaches de poussière et offrant une couverture spatiale maximale. Sont décrit ci-dessous les principaux produits satellitaires permettant l'observation des poussières désertiques. [27]

### 1.2.1 MODIS :

L'instrument MODIS (moderate résolution Imaging spectro-radiometer) a été lancé en 1999 à bord de deux satellites, Terra et Aqua (premier satellites de l'Aqua-Train), utilisé pour une large gamme de mesure spectrale (0.51-2.1µm) pour séparer les composante anthropique des aérosols (mode fin) de celle des aérosols naturels (mode grossier). L'information additionnelle dans le moyen d'infrarouge permet d'estimer les contributions respectives des modes fin et grossier à l'épaisseur optique totale. L'algorithme développé pour instrument MODUS fournie principalement l'épaisseur optique spectrale et rayon effectif des particules. [27]

### 1.2.2 SEVIRI :

Le capteur SIVIRI (spinning enhanced visible and infra red imager) est un radiomètre à balayage embarqué sur le satellite géostationnaire de seconde génération (MSG 1et 2) depuis 2002.ce radiomètre fonctionne dans le visible et l'infrarouge sur les longueurs d'onde report sur 12 canaux (04 dans le visible et 8 dans l'infrarouge) il fournit une meilleure résolution spatiale et temporelle (à 1Km sol et des images toutes les 15 min). Les températures de brillance issues de canaux 8.7, 10.8 et 12µm de SEVIRI sont utilisées en complément des températures de brillance de l'infra –red Imager radiomètre(ILR) afin d'obtenir une caractérisation des aérosols désertique dans l'infrarouge en utilisant les différences de température de brillance entre les défilants canaux. Les aérosols désertiques sont détectés par MSG-SEVIRI jour et nuit par imagerie IR. Ces observations offrent l'avantage d'une bonne couverture spatiale de l'Afrique. [27]

### 1.2.3 CALIOP ET ILR :

L'ensemble des instruments abord du satellite de CALIPSO (Cloud Aérosol Lidar and infrared pathfinder satellite observation) mesure les distributions verticales des aérosols dans l'atmosphère ainsi que les propriétés optiques et des physiques des aérosols et des nuages, le satellite CALIPSO, embarque une charge utile composé d'un Lidar à rétrodiffusion, instrument principal équipé d'un télescope de 1 m, une caméra visible et de l'IIR.Le lidar a rétrodiffusion CALIOP (cloud –aerosol lidar whith orthogonal polarization) fournit des profils verticaux de réflectivité atmosphérique (à 532nm et 1064 nm) cette information et utilisée pour déterminer la distribution optique radiatif des aérosols. [27]

# 2. Généralités sur les prévisions météorologiques :

## 2.1 Définition de la prévision numérique du temps:

La prévision numérique du temps (PNT) est une application de la météorologie et de l'informatique. Elle repose sur le choix d'équations mathématiques offrant une proche approximation du comportement de l'atmosphère réelle. Ces équations sont ensuite résolues, à l'aide d'un ordinateur, pour obtenir une simulation accélérée des états futurs de l'atmosphère. Le logiciel mettant en œuvre cette simulation est appelé un *modèle de prévision numérique du temps*. La PNT peut servir, en recherche, à faire des études de cas en « vase clos », pour étudier une facette ou un comportement particulier de l'atmosphère ou tester des améliorations au modèle en fonction de cas théoriques ou pratiques dont on connaît d'avance les résultats. Le modèle de PNT devient ainsi un laboratoire virtuel pour l'étude de l'atmosphère et l'amélioration des prévisions. [26]

## 2.2 La chaîne de la prévision météorologique:

### 2.2.1 La collecte des données observées :

L'observation est le point de départ de toute prévision météorologique. Il s'agit d'une description qualitative du ciel ou mesures de paramètres physiques de l'atmosphère, toutes les observations doivent être méticuleusement définies. Les données d'observation partout

sur le globe, mais aussi en orbite, sont transmises toutes les 6 heures à l'Organisation météorologique mondiale, qui les redirige vers les centres de prévision opérationnels. La quantité de données est considérable, environ $10^7$ observations individuelles toutes les 6h. Il s'agit d'observations au sol (station météo), de sondages par ballon (radiosondages), de mesures sur avion et bateau, de mesures de profileurs comme les radars. Depuis la fin des années 1970 se sont ajoutées les observations satellitaires, dont le nombre a considérablement crû pour atteindre plus de 90 % des données effectivement utilisées (plus de 99 % des données reçues). Cela a notamment permis une meilleure couverture du globe, et en particulier de l'hémisphère Sud (davantage couvert par les océans). Ces données doivent être traitées et filtrées en temps réel. En effet, certaines sont redondantes ou fortement corrélées, d'autres aberrantes, ou encore la défaillance d'un instrument doit être diagnostiquée. [19]

### 2.2.2. L'assimilation des observations :

Toutes ces observations sont ensuite traitées pour en extraire les informations "utiles" au modèle de prévision : on parle d'assimilation des données. Environ 22 millions de données d'observations sont utilisées chaque jour par les modèles à l'issue de l'étape d'assimilation. Les données issues des observations sont combinées à d'autres informations, comme des prévisions très récentes, pour établir un état initial de l'atmosphère que le modèle saura utiliser. Les observations sont également utilisées par les prévisionnistes, d'une part pour le suivi de la situation en cours, d'autre part pour la détection et la correction d'éventuelles erreurs de prévision. [19]

### 2.2.3 La simulation par un modèle numérique :

C'est l'étape de la prévision numérique par les modèles météorologiques. Ces modèles reposent sur les lois physiques qui gouvernent l'évolution atmosphérique. Les principales sont celles de la mécanique des fluides. Elles sont complétées par celles d'autres processus présents dans l'atmosphère : des changements d'état (l'eau se condense ou s'évapore), beaucoup de turbulences et de nombreuses interactions avec la surface et même l'espace.A partir d'un état initial construit sur la base des observations et des prévisions récentes, le modèle numérique du temps effectue une discrétisation en trois dimensions des variables de la météorologie dans l'espace réel. C'est-à-dire que l'on réalise un maillage du domaine d'étude (l'atmosphère). Une variable de température,

pression, etc., est attachée à chaque point de grille de ce maillage. Ce dernier définit la résolution du modèle (la taille de la maille) et donc la puissance de calcul requise pour effectuer l'intégration numérique des variables. On peut dire que le développement des performances des supercalculateurs permet d'accroître la résolution des modèles.[19]

### 2.2.4 L'analyse des simulations par le prévisionniste :

Les prévisions du modèle sont ensuite soumises à l'expérience du prévisionniste. L'expertise des prévisionnistes est indispensable pour analyser les résultats complexes, détecter une anomalie dans la prévision, et le cas échéant la corriger avant diffusion aux clients, dont le grand public et les médias. Les prévisions sont ensuite communiquées soit sous forme de bulletins professionnels (messages codés) destinés aux aérodromes, soit sous forme vulgarisée destinée au grand public (média, internet, etc.,), soit sous forme spécifique produite à la demande de clients (agriculture, assurances, etc.,) [19]

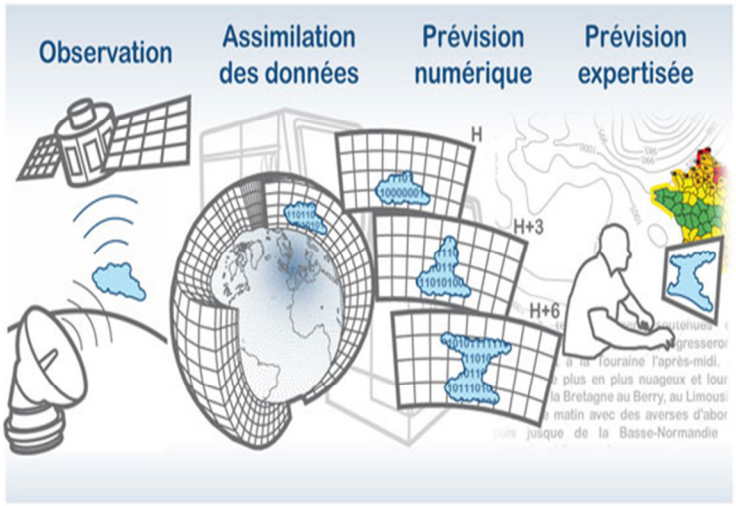


**Figure 3.3** : Les Etapes d'une Prévision Numérique du Temps PNT.

# 3 .Contexte opérationnel de la prévision des aérosolsdésertiques:

L'intérêt porté à la modélisation du cycle des aérosols désertiques, en Algérie, est important du fait que le désert couvre plus de 75% de la superficie du pays. Cet intérêt est renforcé par le fait que les poussières désertiques représentent un phénomène très dangereux pour l'aviation et ont un impact direct sur l'économie. Actuellement, la prévision des aérosols désertiques au centre nationale de prévision météorologique (CNPM) est établie en utilisant le modèle ALADIN-Dust (Aire Limitée Adaptation dynamique Développment International). Ce modèle a été développé par M, Mokhtari dans le cadre de sa thèse de doctorat soutenue en 2012. Il est opérationnel depuis 2014 sur le supercalculateur de l'ONM, avec une résolution horizontale de 11km, et une échéance de prévision qui va jusqu'à 72 heures. Il utilise les sorties du modèle globale ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) pour les conditions aux bords et l'état initiale. Les sorties de ALADIN-Dust sont affichées sous forme de cartes des concentrations de sable, des visibilités et des épaisseurs optiques. D'après les prévisionnistes, ce modèle constitue un outil d'aide précieux pour les prévisions des épisodes de soulèvements de sables sur les différents aérodromes au sud de l'Algérie. Cependant, les scores des résultats obtenus restent insuffisants car plusieurs événements n'ont pas été bien prévus par le modèle.

# 4 Aperçu sur le modèle à maille fine AROME :

Le modèle AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) tourne en opérationnel sur le supercalculateur du centre national de prévisions météorologiques (CNPM) en Algérie en deux réseaux par jour (00h et 12h) sur la partie Nord du pays, avec une résolution de 3km. Il aide ainsi à mieux y prévoir les phénomènes météorologiques de la journée et du lendemain (ses échéances de prévisions allant jusqu'à 48h). Il est très utile dans les épisodes à forts enjeux tels que les épisodes convectifs intenses.Le modèle AROME a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux tels que les fortes pluies méditerranéennes, les orages violents, le brouillard ou les îlots de chaleur urbains en période de canicule. Il a été développé grâce à d'étroites collaborations, nationales et internationales, afin de tenir compte des dernières avancées en modélisation atmosphérique.

Ce modèle bénéficie d'une base de données orographique récente et fine, qui contribue à une représentation très réaliste des zones de relief. La nature du sol influence directement les conditions météorologiques locales. Par exemple, en forêt, le vent est moins fort qu'au milieu d'une prairie. En ville, le béton accumule la chaleur le jour et la restitue la nuit (phénomène d'îlot de chaleur). Afin de mieux modéliser ces échanges entre l'atmosphère et les surfaces, chaque maille d'Arome est caractérisée par un type de surface.

Les para-métrisations physiques du modèle sont en majeure partie héritées du modèle de recherche Méso-NH (Non Hydrostatique) alors que la partie dynamique est une adaptation pour la fine échelle du noyau dynamique d'ALADIN (Figure 3.4).

L'atout principal du modèle AROME c'est qu'il tient compte des mouvements verticaux violents de petite échelle associés au développement des cumulonimbus, les nuages d'orages. Un modèle à maille plus large, comme ALADIN, ne "voit" pas ces mouvements verticaux locaux. Avec sa maille de 3 km, Arome est capable de les modéliser ainsi que le cycle de vie des systèmes nuageux qui produisent des précipitations. Il peut alors mieux simuler les phénomènes "convectifs", les systèmes pluvio-orageux et les mouvements ascendants très localisés [15]

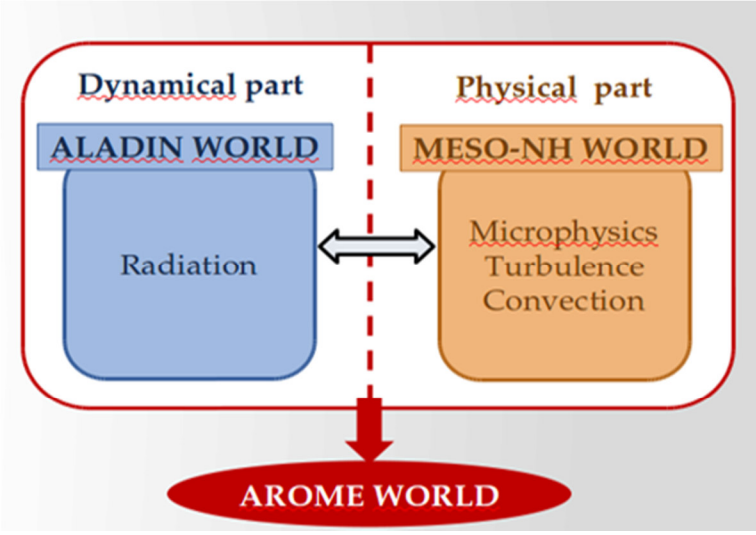


**Figure 3.4** : La Partie Physique et la Partie Dynamique du Modèle AROME.

| | | |
|---|---|---|
| Cycle | | 40 |
| Résolution | | 3km |
| Les niveaux | | 60 |
| La grille | | 1024 x 972 |
| Région | Latitude | 18 ° N - 42 ° N |
| | Longitude | 10 ° W-13 ° E |
| Conditions initiales | | ALADIN (8 km) |
| Heure de départ | | 00h |
| Intervalle de cycle | | 01h |
| Temps de vérification | | 00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h et 21h |
| Nombre de processeurs (NPROC) | | 16 x 16 |
| Coûts informatiques | Avec poussière | 7260 secs |
| | Sans poussière | 4740 secs |

**Tableau 3.1** : Caractéristiques et Coût de Calcul du Modèle « AROME » [source, ONM]

# 5. Modélisation des aérosols désertiques par AROME-Dust

## 5. 1. Apport de la modélisation dans l'étude du cycle de vie de l'aérosol :

La modélisation offre une vision tridimensionnelle de l'atmosphère et permet d'évaluer le rôle individuel de chaque paramètre impliqué dans le cycle de vie de l'aérosol désertique. Le cycle de vie des aérosols comprend trois étapes essentielles : l'émission, le transport et le dépôt, modéliser ce cycle revient ainsi à représenter numériquement chacune de ces étapes. En effet, les aérosols constituent une partie intégrante de l'atmosphère et interagissent avec ses différentes composantes et l'évaluation des rétroactions aérosols-dynamique ne peut se faire que via la modélisation numérique qui permet entre autre la

séparation entre les différentes composantes atmosphériques. Ceci nécessite, en retour, une bonne représentation physique du cycle des aérosols dans les modèles numériques ainsi qu'une résolution spatiale et temporelle suffisamment fine pour tenir compte à la fois des émissions sporadiques des zones sources localisées et celles issues des événements ponctuels fréquents. Sont décrites par la suite les différentes caractéristiques du modèle AROME utilisées dans ce travail pour modéliser le cycle atmosphérique de l'aérosol désertique. [16]

## 5. 2. Traitement des poussières désertiques dans AROME-Dust :

### 5. 2. 1. SURFEX pour la gestion des émissions :

Ce schéma regroupe les principaux développements du CNRM en matière de paramétrisation de surface. Les émissions sont calculées dans le schéma de surface ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere) (Noilhan and Mahfouf, 1996) utilisé par SURFEX à travers le module DEAD (Dust Entrainment And Deposition) (Zender et al. 2003). Ce module est basé sur le schéma physique des émissions de Marticorena et Bergametti (1995). DEAD est appelé dans le code SURFEX pour les deux types de couverts COVER004 et COVER005 (Figure 3.5) relatifs aux fractions des sols nus et rocailleux, respectivement, issues de la base de données ECOCLIMAP. La modélisation de l'émission représente un challenge pour les scientifiques et les modélisateurs. En effet, elle nécessite des connaissances suffisantes sur les états du sol et les caractéristiques de la surface, telles que la texture du sol, la rugosité et les types de sol, pour déterminer les seuils d'érosion. [17]

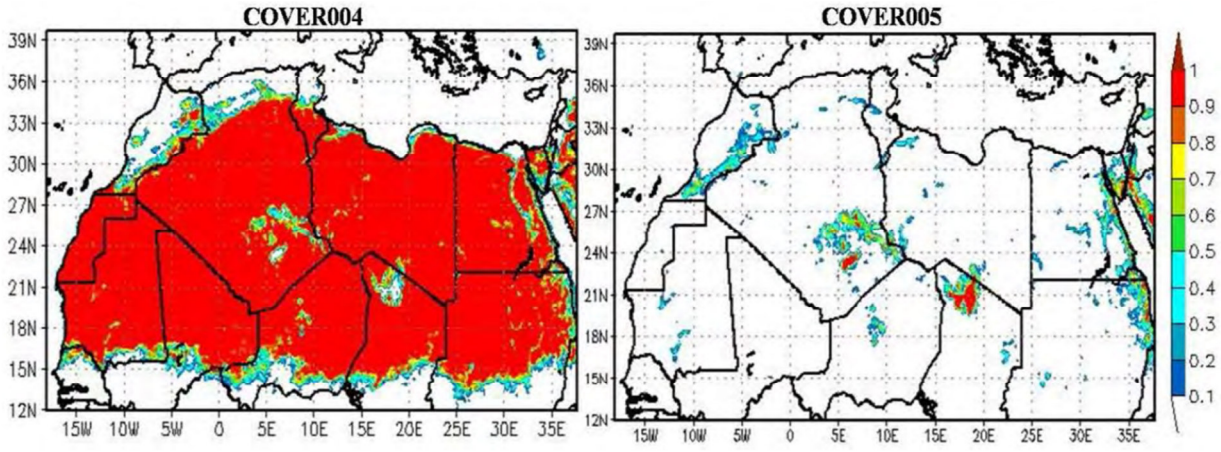


**Figure 3.5 :** Fractions des couvert «COVER004» et «COVER005» relatifs, respectivement Aux,sols nus et rocailleux pour l'afrique du nord

### 5.2.2 ORILAM pour la gestion du transport et du dépôt :

Le transport, la sédimentation et le dépôt (humide et sec) des poussières désertiques sont gérés par le module ORILAM adapté à l'environnement AROME. Ce module, initialement développé pour MesoNH (Mesoscale Non-Hydrostatic atmospheric model), est basé sur la théorie lognormale tri-modale.

#### 5.2.2.1 Transport :

Une fois soulevés par SURFEX, les aérosols désertiques sont injectés dans le schéma ORILAM. Ce schéma développé par Tulet et al (2005) et étendu par Tulet et al (2006) aux aérosols organiques secondaires (SOA) est couplé à Méso-NH, et est basé sur l'ensemble des lois physiques généralement utilisées pour décrire les aérosols. Le schéma ORILAM est basé sur une approche modale, et chaque mode est ainsi représenté par une fonction lognormale. ORILAM simule ainsi l'évolution dans le temps et dans l'espace de la distribution lognormale des aérosols dans l'atmosphère. Pour chaque mode, les moments d'ordre 0, 3, 6 sont intégrés comme variables pronostiques. La combinaison de ces moments permet le calcul de la concentration en nombre, du rayon médian, et de la déviation standard de la distribution en taille des aérosols. [18]

#### 5.2.2.2 Dépôt :

Les processus de perte des aérosols atmosphériques se fait soit par le dépôt sec, soit par le dépôt humide (lessivage). Ces deux processus de dépôt sont également pris en compte dans ORILAM.

##### 5.2.2.2.1 Dépôt sec :

Le dépôt sec des poussières désertiques est calculé dans le système couplé AROME-SURFEX en suivant le principe de la diffusion Brownienne:

$$D_P = \left(\frac{kT}{6V\rho_{air}r_p}\right) \qquad [18]$$

Et la vitesse gravitationnelle $V_g = \left(\frac{2g}{9v}\left(\frac{\rho_{pi}}{\rho_{air}}\right)r_p^2\right)C_c$ [18]

Avec k est la constante de Boltzmann, T la température ambiante, v la vitesse cinétique de l'air, $\rho_{air}$ la densité de l'air $\rho_{p\,i}$ la densité de particule de mode i. Avec

$$C_c = 1 + 1.246 \frac{\lambda_{air}}{r_p} \qquad [18]$$

est le coefficient de glissement « gliding coefficient », $\lambda_{air}$ est le parcours moyen libre (mean free path.

Le dépôt sec est évalué en deux étapes distinctes : le dépôt sec à la surface est traité dans le modèle de surface SURFEX, et le dépôt sec dans l'atmosphère ou la sédimentation est calculé dans le modèle AROME.

#### 5.2.2.2.2 Dépôt humide :

Le schéma de dépôt humide des aérosols désertiques développé pour le modèle Méso-NH par le CNRM et le laboratoire d'Aérologie de Toulouse a été adopté pour le modèle ALADIN (Mokhtari, 2009) puis pour AROME (Mokhtari et Ambar, 2016). Ce schéma est bien détaillé dans le papier de H. Tost et al. 2006. Quatre processus physiques relatifs au dépôt humide ont été traité par ce schéma, à savoir : la collection des aérosols désertiques par les hydrométéores (nuages et les gouttelettes d'eau) sous l'effet d'impaction, interception et diffusion brownienne, la collection des aérosols désertiques par les gouttelettes d'eau précipitées (sédimentation humide), l'auto-conversion des nuages en précipitation ce qui permet l'augmentation des concentration des aérosols désertiques dans les précipitations et en contrepartie leur diminution dans les nuages et l'évaporation des précipitation, ce qui relâche les aérosols désertiques dans l'atmosphères à l'état sec. Ces processus sont schématisés dans la (figure 3.6). [18]

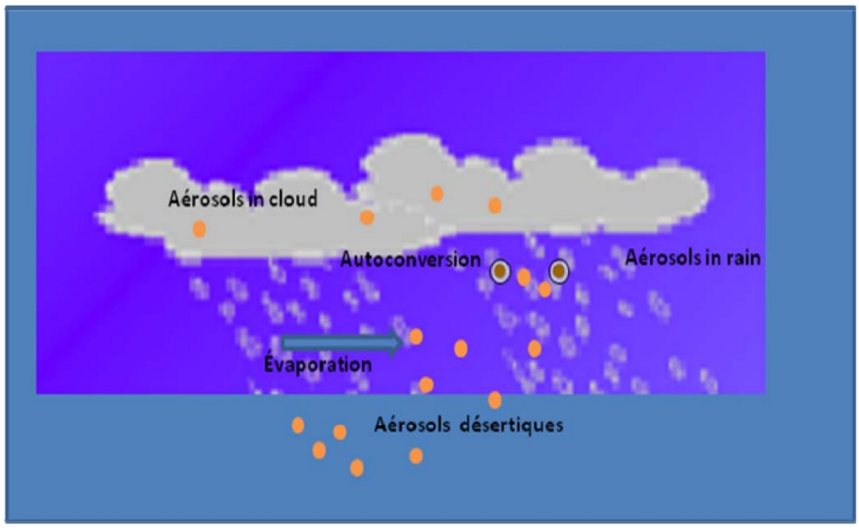


**Figure 3.6** : Schéma des Processus Physiques Relatifs aux Aérosols Désertiques Traités dans ALADIN/AROME [16]

## 5.3 L'équation du cycle atmosphérique des aérosols désertiques :

L'intégration du calcul des processus liés aux aérosols désertiques dans le modèle AROME consiste à introduire la représentation du cycle de vie de ces aérosols dans la partie physique du modèle. L'équation représentant le cycle de vie des aérosols désertiques avec ses trois phases fondamentales dans l'atmosphère savoir le soulèvement, le transport et le dépôt s'écrit sous la forme suivante [source ONM]:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = -u\frac{\partial C_k}{\partial x} - v\frac{\partial C_k}{\partial y} - (w - v_{gk})\frac{\partial C_k}{\partial z} - \nabla(K_H \nabla c_K) - \frac{\partial}{\partial z}\left[K_z \frac{\partial C_k}{\partial z}\right] - \left[\frac{\partial C_k}{\partial t}\right]source - \left[\frac{\partial C_k}{\partial t}\right]SINK$$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Advection horizontale | Advection verticale et configuration gravitationnelle | Diffusion | Dispersion | Emission du sable | Dépôt sec et humide |

Avec :

**x, y, z, t :** coordonnées d'espace et de temps.

**$C_k$ :** la concentration de sable selon la taille des particules (kg $m^{-3}$)

**u et v :** Composants de vitesse horizontale (m $s^{-1}$).

**W :** Vitesse verticale ($m\,s^{-1}$).

**$v_{gk}$ :** Vitesse de réglage gravitationnel ($m\,s^{-1}$).

$\nabla$**:** Opérateur horizontal nabla (adimensionnel).

**$K_H$ :** Coefficient de diffusion latérale ($m^2s^{-1}$)

**$K_Z$ :** Coefficient d'échange de turbulence ($m^2s^{-1}$)

$\left[\frac{\partial C_k}{\partial t}\right]_{SOURCE}$: cadence de fabrication de la poussière au-dessus du secteur de source de la poussière ($kg\,m^{-3}.s^{-1}$)

$\left[\frac{\partial C_k}{\partial t}\right]_{SINK}$: est la limite d'évier, qui inclut les deux fractions sèches-et-humides de dépôt ($kg\,m^{-3}.s^{-}$)

## 5. 4. Les étapes d'une simulation AROME-Dust :

Le modèle AROME-Dust doit être alimenté par un modèle de plus

**Couplage avec un modèle plus grand (E927) :** Cette étape consiste à créer les fichiers coupleurs pour le modèle AROME-Dust à partir d'un modèle plus grand (ARPEGE, ALADIN) pour en extraire les conditions aux limites du modèle AROME-Dust. Pour la configuration AROME en Algérie, ce couplage s'effectue avec le modèle ALADIN opérationnel au centre nationale de prévision météorologiques.

**Création des fichiers de surface (prep_pgd) :** Le but de cette étape est de créer un fichier contenant les données physiographiques de surface (orographie, couverture de surface..) obtenues à partir des bases de données telles que : FAO et HWSD, GTOPO30, ECOCLIMAP.

**Intégration et prévision (E001) :** Il s'agit de l'étape la plus coûteuse en termes de temps de calcul (CPU). Elle consiste à effectuer les calculs des champs en sorties pour fournir la prévision des différents variables présélectionnées, y compris celles liées aux poussières désertiques.

**Projection des sorties vers une grille LAT-LON (Fullpos) :** Cette étape permet de convertir les fichiers en sortie obtenus de l'étape précédente de la projection Lambert vers une grille régulière LAT-LON

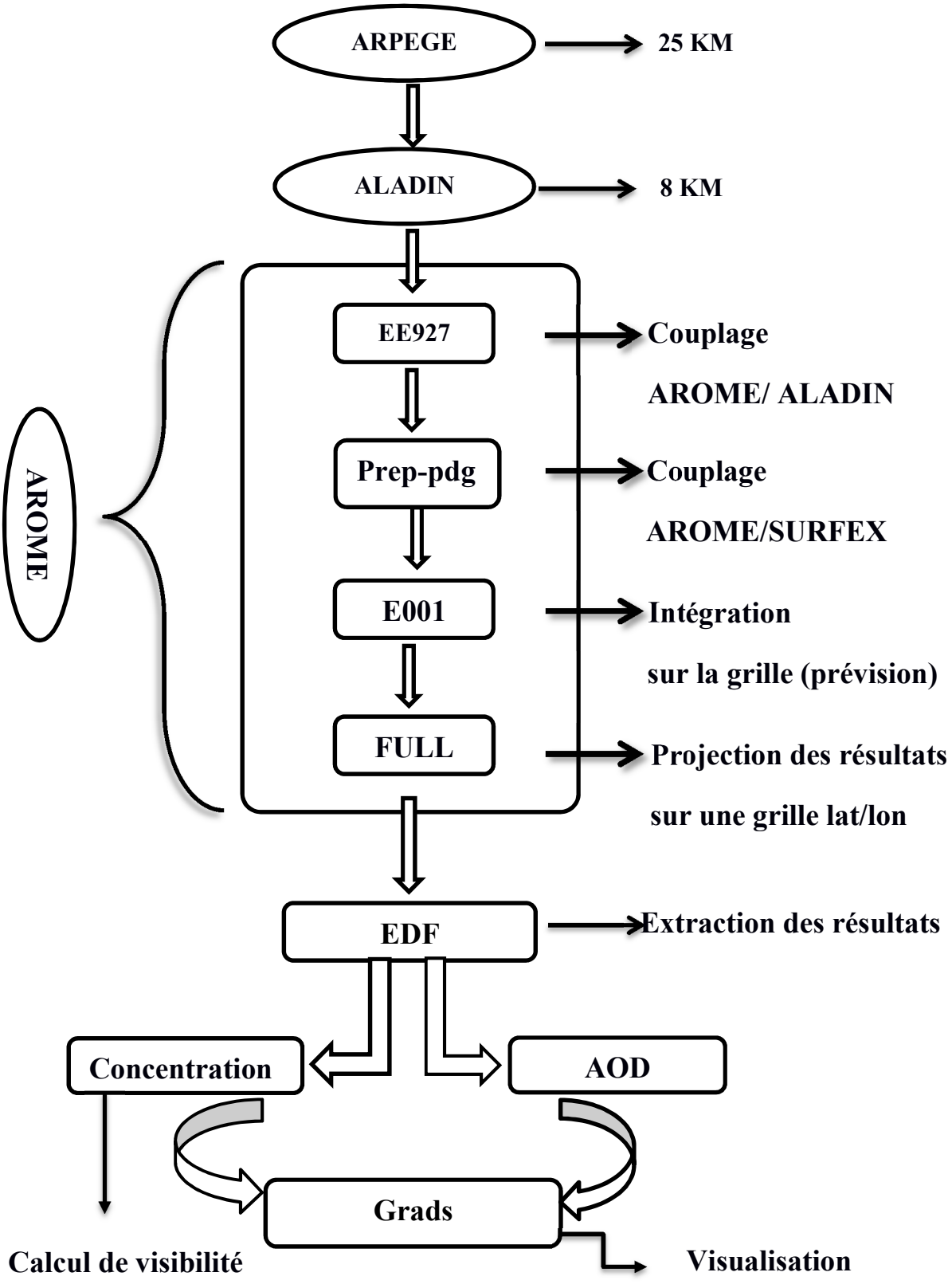


**Figure 3.7** : Schéma Représentatif de Chaine de Prévision AROME.

## Conclusion :

L'élaboration de ce chapitre nous a permet tout d'abord de faire une illustration générale les différentes techniques d'observation existantes afin d'évaluer l'état de l'atmosphère ainsi , nous avons donné un bref aperçu sur le modèle numérique AROME-Dust les étapes de modélisation de cycle de vie des aérosols avec le model AROME –Dust .Maintenant on entamera la partie pratique de notre étude qui est consacré à la validation du model AROME –Dust pour le sud de l'Algérie on effectuera plusieurs simulations des situations météorologique de vent de sable choisi dans la période de 19 au 22 février 2017..

# Introduction :

Nous allons étudier un cas réel de tempête de sable qui a touché le Sahara Algérien. Nous avons choisi soigneusement cette situation, de façon qu'elle soit vraiment extrême, dans le but de bien montrer l'apport de la nouvelle configuration AROME-Dust à la prévision du cycle de vie des poussières désertiques par rapport à la version opérationnelle ALADIN-Dust. Les résultats seront validés par rapport aux imageries satellitaires pour les concentrations et les épaisseurs optiques, et par rapport aux METAR (METeorological Aerodrome Report) pour les visibilités.

# 1. Description synoptique de la situation :

Nous allons étudier les conditions météorologiques à l'origine de cet épisode intense. Pour ce faire, nous allons analyser particulièrement les images satellitaires issues du canal visible du satellite MSG-SEVIRI dans le but de décrire la situation à l'échelle synoptique et de montrer que les conditions propices au soulèvement de sable dans le Sahara Algérien.

L'image satellitaire de la journée du 19 (figure4.1) montre l'arrivée d'un système orageux en provenance de l'atlantique Nord vers l'Ouest du pays et le Sahara centrale. Le passage de cette perturbation est accompagné par des vents très forts à violents, ce qui a provoqué une activité importante de soulèvement de sable. Cette situation a persisté durant toute la suite de l'épisode (20, 21 et 22 Février), en évoluant progressivement d'Ouest en Est. Plusieurs tempêtes de sable ont été observé en allant de Bechar jusqu'à Timimoune durant le début de l'épisode, puis sur l'axe Tamanrasset, Illizi jusqu'à El Oued et Biskra. Ceci peut se confirmé par le biais des messages météorologiques METAR (Météorologiques Aérodrome Report) transmis depuis les différentes stations concernées par cet épisode. En effet, plusieurs METAR indiquant la réduction de la visibilité en présence de phénomènes liés aux poussières désertiques tels que les tempêtes de sable (SS), les tempêtes de poussières (DS), les chasses sables élevées (BLSA) et les chasses sables basse (DRSA)

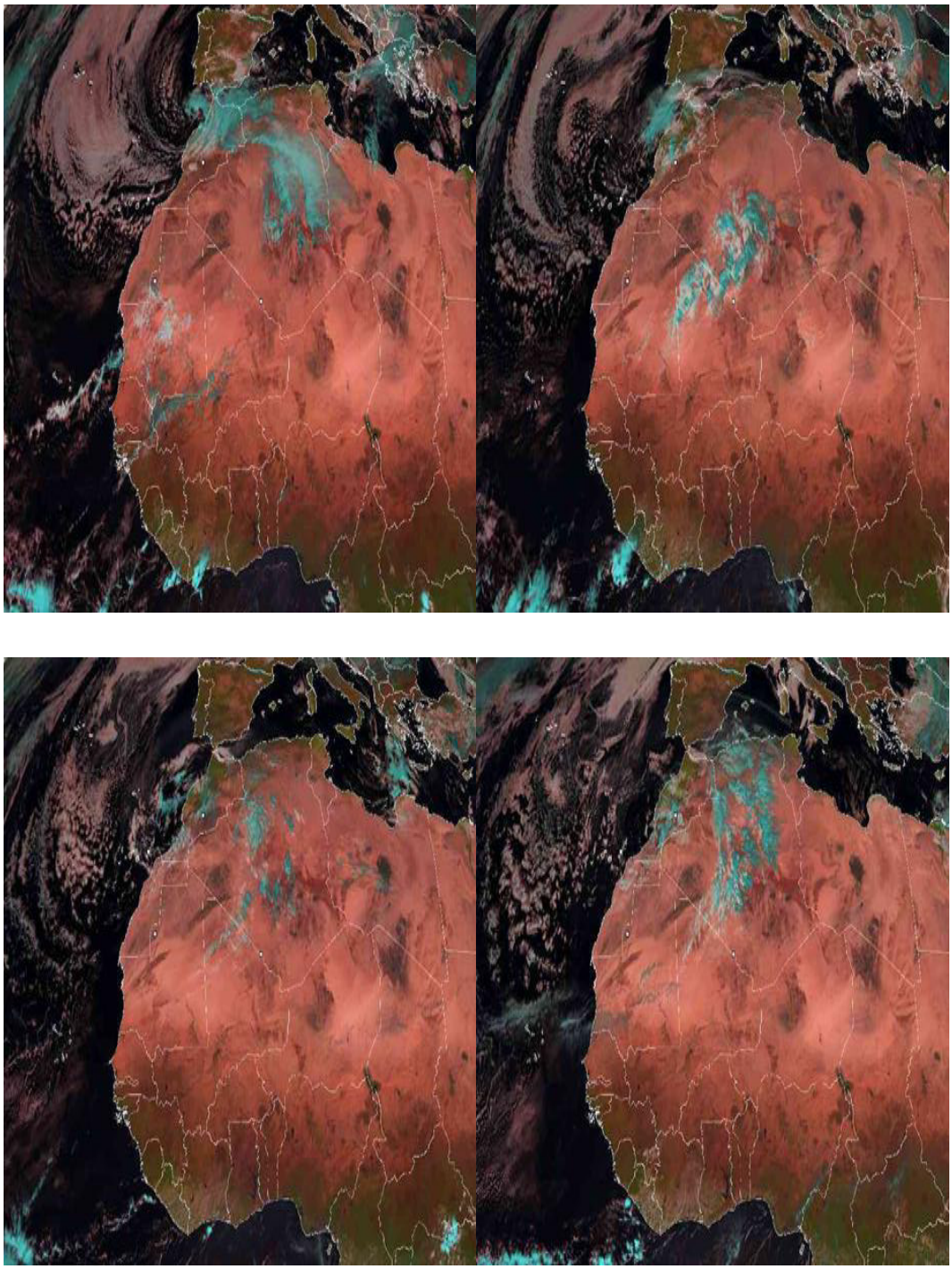

**Figure 4.1** : Images Satellitaires MSG-SEVIRI Visible (19, 20, 21 et 22 Février 2017 à 12h UTC).

## 2. Aperçu sur les images satellitaires de la situation:

Les images satellitaires montrent le début d'un épisode important de soulèvement de poussière désertique durant la matinée du 19/02 sur la région de Bechar et la Saoura. Ce soulèvement s'aperçoit plus nettement à midi puis s'accentue durant cette journée à partir de 15h (Figure 4.2) et prend une forme de panaché de poussière (en couleur rose sur les images satellitaires) qui s'étend sur la région d'Ain Salah et le Sahara centrale, pour toucher la région d'El Oued et de Biskra vers minuit.

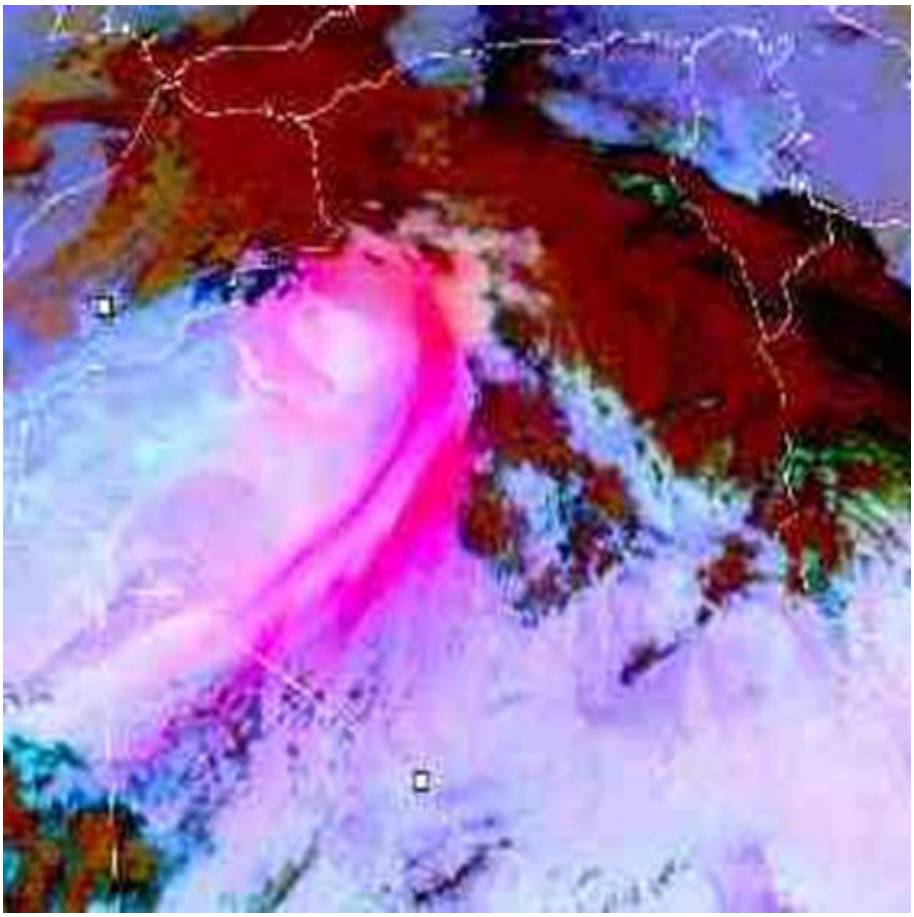

**Figure 4.2** : Image Satellite Pris le 19/02/2017 à 15h

Durant la journée du 20/02, la situation persiste sur cette région avec une réactivation des tempêtes de sable sur la région de Ghardaïa et le Sahara centrale (Figure 4.3). A noté que la présence de couverture nuageuse (en marron foncé sur les images satellitaires) ne permet pas de bien visualiser les panaché de poussière désertique.

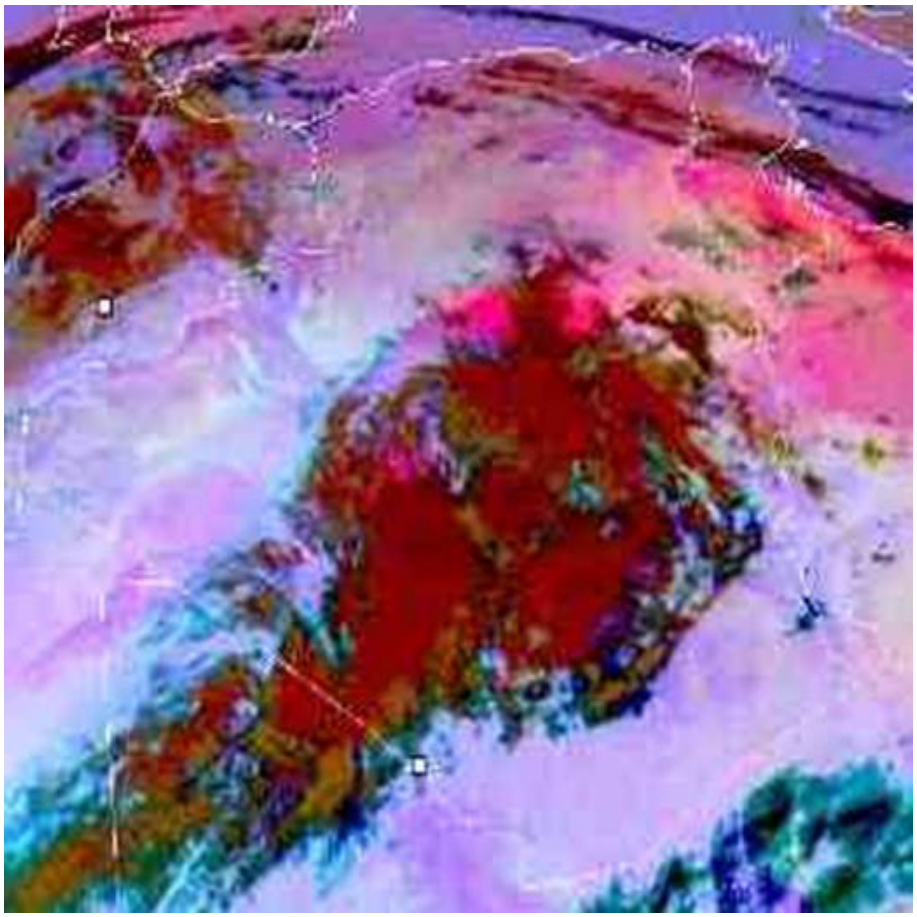

**Figure 4.3** : Image Satellite Pris le 20/02/2017 à 18h

La situation s'atténue un peu durant la journée du 21/02 jusqu'à 18h, où l'on remarque des soulèvements importants de sable sur l'axe de Bordj Badji Mokhtar, Timimoune jusqu'à El-Bayadh. En fin de soirée, les images satellitaires montrent que le panaché de sable se déplace progressivement vers le Nord-ouest, en passant par la région de Mechria et de Naâma. Ce déplacement se voit nettement durant la journée du 22/02, où il atteint les côtes Ouest du pays et traverse même ma méditerranée pour atteindre l'Espagne en fin de validité (Figure 4.4).

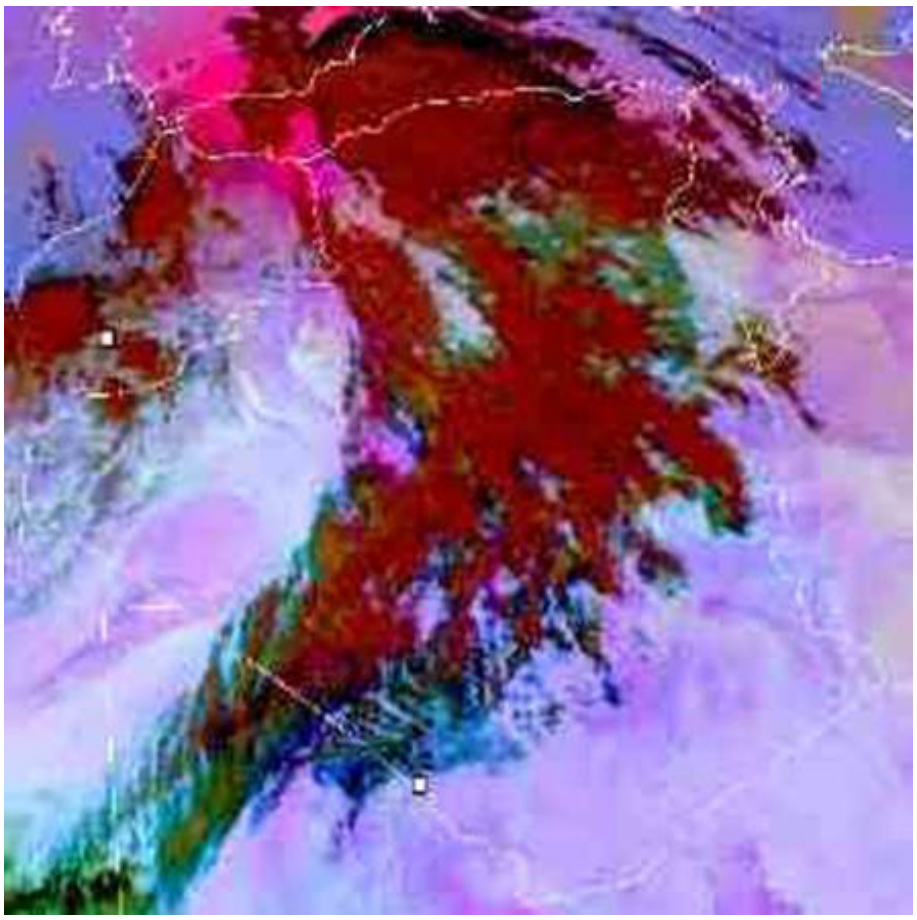

**Figure 4.4** : Image Satellite Pris le 22/02/2017 à 18h

# 3. Simulation de la situation:

## 3.1 Les épaisseurs optiques et les concentrations :

Les sorties obtenues par les simulations ALADIN-Dust et AROME-Dust montrent en générale des résultats très satisfaisants, en particuliers concernant la distribution spatio-temporelle des tempêtes de sable. Nous allons interpréter les sorties des échéances où on a observé le maximum d'activité de chaque journée de l'épisode. Le reste des sorties seront analyser superficiellement et figureront dans la partie annexe.

Le début de l'épisode a été bien prévu par les deux modèles pour le 19/02, avec une aggravation à partir de 15h . Cependant, la comparaison entre les deux modèles révèle des remarques très intéressantes, en particuliers pour les champs de concentrations de poussières. En effet, la prévision des zones de fort soulèvement observées sur les images satellitaires a été partiellement ratée par le modèle opérationnelle ALADIN-Dust, précisément sur la région de Timimoune et Adrar. Par contre, la nouvelle configuration AROME_Dust a bien prévue des soulèvements intenses tout au long de l'axe Bordj Badji Mokhtar - Timimoune (Figure 4.5.et figure 4.6). Ce comportement des deux modèles se confirme dans la suite des échéances de cette journée, avec une meilleure prise en compte des valeurs extrêmes par le modèle AROME-Dust (consulter l'annexe)

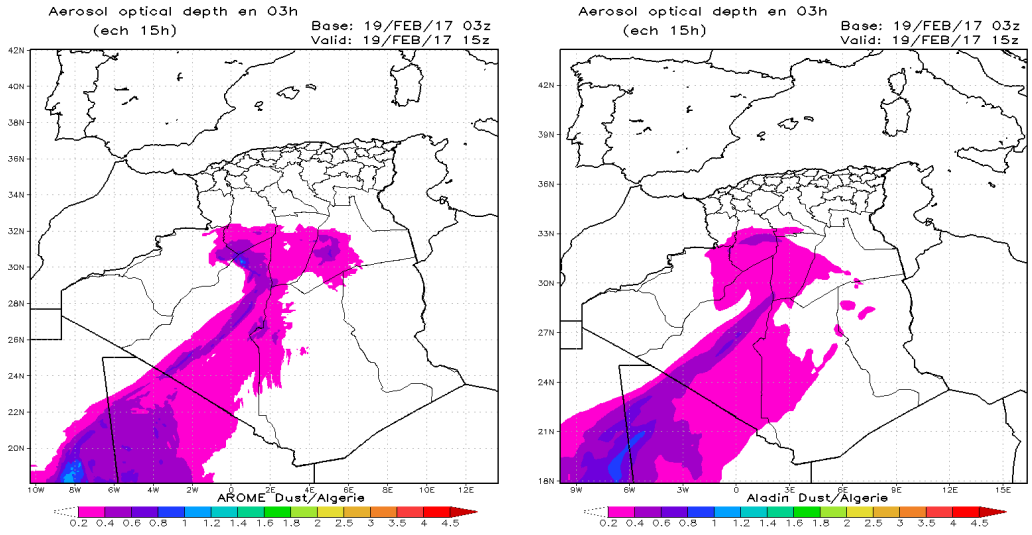


**Figure 4.5** : Les Epaisseurs Optiques Prévus par le Modèle AROME et ALADIN Respectivement pour la Situation de 19/02 à 15h

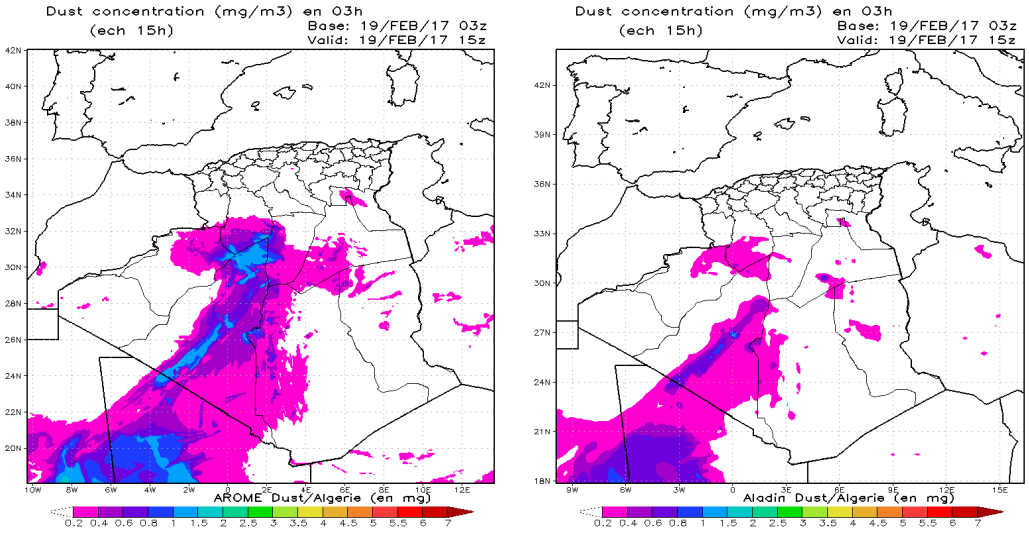


**Figure 4.6** : Les Concentrations des Poussières Désertiques Prévues par le Modèle AROMR Et ALADIN Respectivement pour la Situation de 19/02 à 15h

Durant la journée du 20/02, nous remarquons que les tempêtes de sable persistent sur le Sahara Algérien, mais elle intéressera beaucoup plus la partie centrale et la région des Oasis. Cette journée connaîtra le maximum d'activité vers 18h, particulièrement sur l'axe de Bordj Badji Mokhtar, El Menia et Hassi Messaoud. Cette tendance a été bien prévue par les deux modèles, mais nous pouvons facilement remarquer la précision du modèle AROME-Dust par rapport à ALADIN-Dust (Figure 4.7). En effet, le nouveau modèle nous permet de mieux localiser les zones de fort soulèvement de sable.

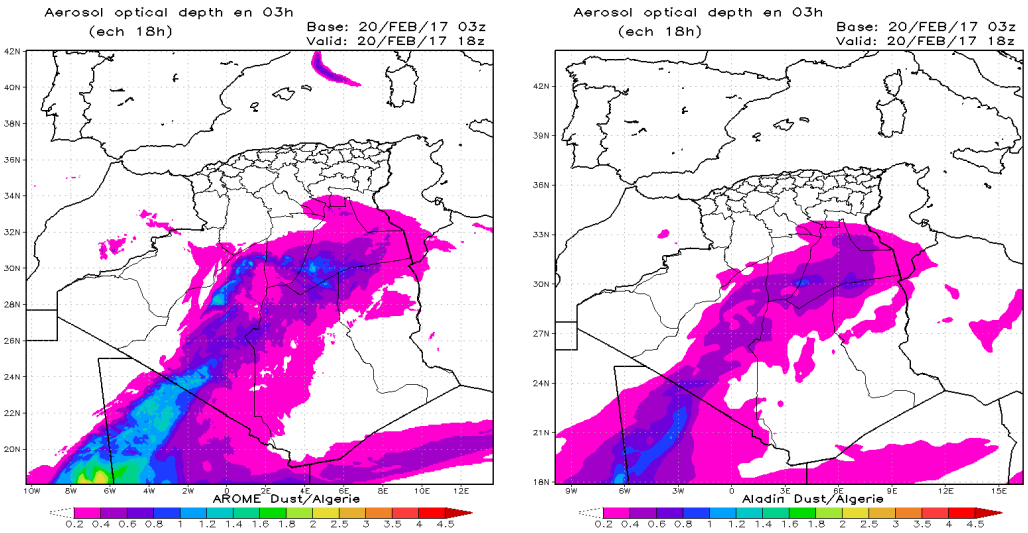


**Figure 4.7 :** Les Epaisseurs Optiques Prévues par le Modèle AROME - Aladin Respectivement pour la Situation de 19/02 à 18h

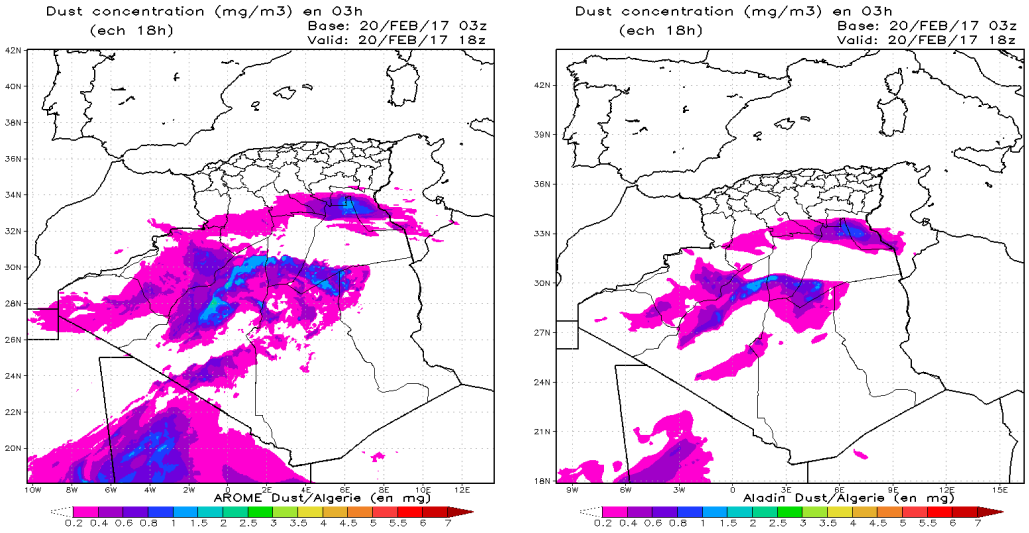


**Figure 4.8** : les concentrations des poussières désertiques prévues par AROME - ALADIN respectivement pour la situation de 20/02 à 18h.

L'analyse des sorties de la situation durant la journée du 21/02 confirme la convergence des deux modèle concernant la distribution des poussières désertiques en suspension (Figure 4.9). Ainsi, nous remarquons aussi l'apport appréciable du modèle à haute résolution AROME-Dust sur la prévision des soulèvements de sable par rapport au modèle opérationnel ALADIN-Dust. Les valeurs maximales sont mieux présentées et mieux localisées par AROME-Dust. Le voile traversant les hauts plateaux jusqu'au Nord du pays que nous avons observé sur les images satellitaires a été très bien reproduit la nouvelle configuration AROME-Dust.

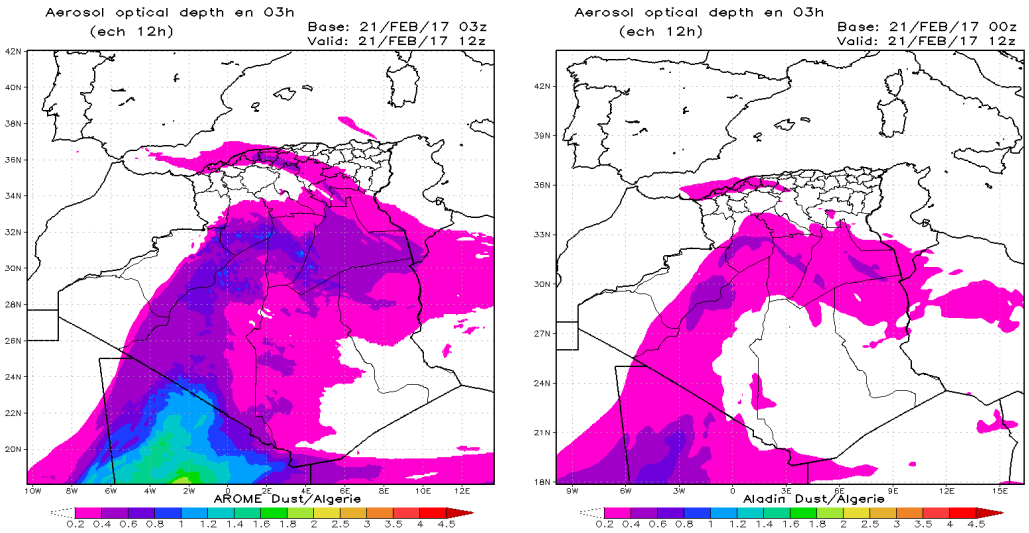


**Figure 4.9 :** Les Epaisseurs Optiques Prévus par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement de la Situation de 21/02 à 12h

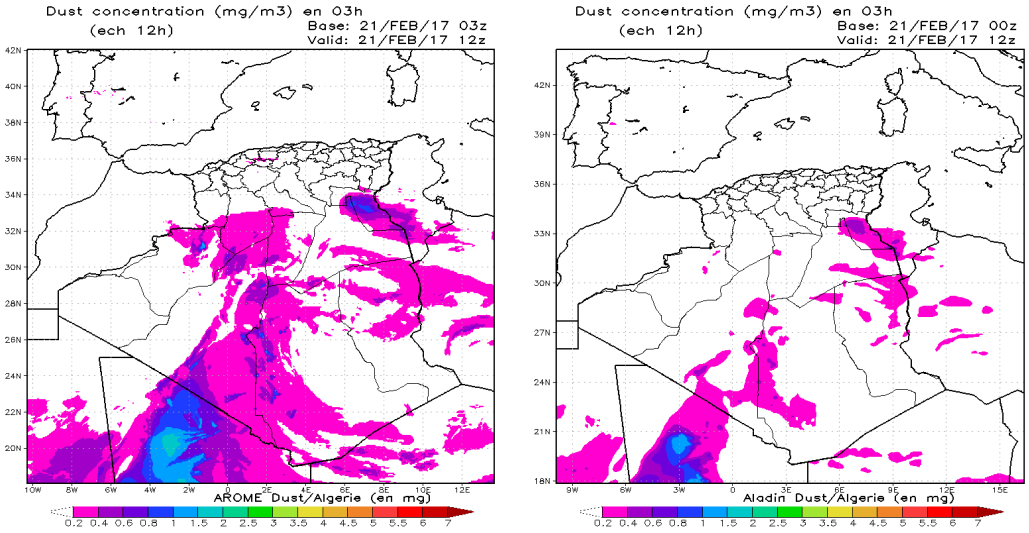


**Figure 4.10** : Les Concentrations Prévues par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement de la Journée de 21/02 à 12h

La situation durant la journée du 22/02 été très intense sur la région d'Adrar, avec un déplacement progressive du panaché désertique en altitude vers le Nord-ouest du pays. Cette allure avait été bien reproduite par le nouveau modèle AROME-Dust pour l'échéance 15h par exemple (figure 4.11 et figure 4.12). Cependant, nous remarquons que le transport des poussières désertiques vers le Nord-ouest du pays n'a pas été prévu par les deux modèles parce que ce déplacement est effectué aux niveaux supérieurs de l'atmosphère.

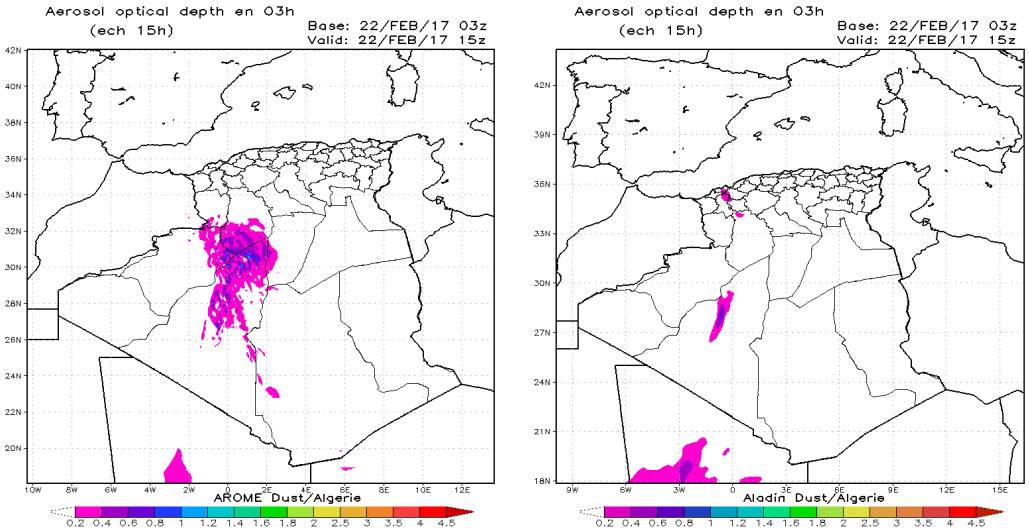


**Figure 4.11** : Les Epaisseurs Optiques Prévus par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement de la Situation de 22/02 à 15h

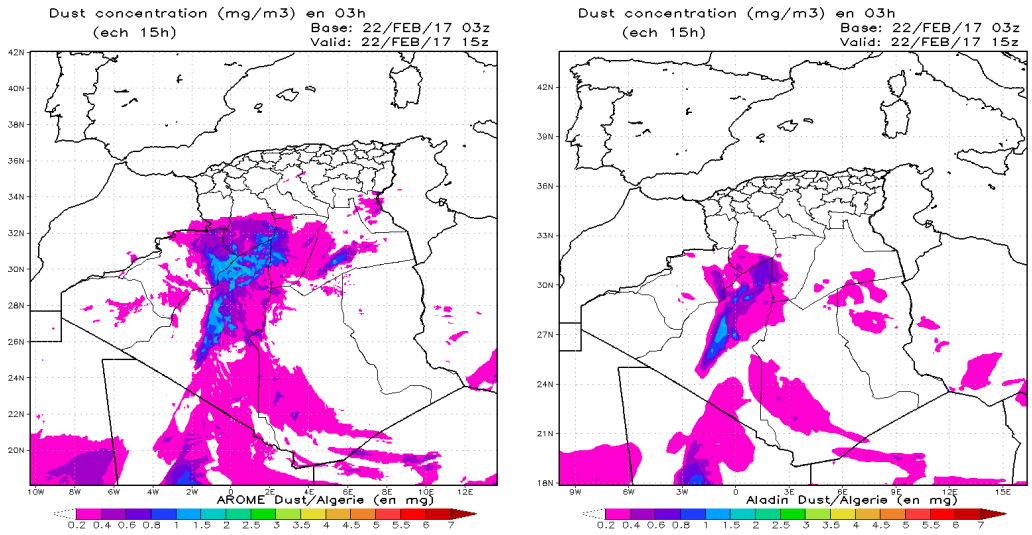


**Figure 4.12** : Les Concentrations des Poussières Désertiques Prévues par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement pour la Journée de 22/02 à 15h

## 3.2 Les visibilités :

La visibilité dans les régions désertiques est réduite en présence de phénomène dangereux liées aux poussières de sable, tels que les tempêtes de sable, les chasses sable, les brumes de sables, etc... Nous avons calculé les visibilités à l'aide d'une formule de conversion qui lie les concentrations de sable à la visibilité. Il s'agit de la formule de Bertrand (Bertrand et al, 1976), utilisée en opérationnel au centre national de prévisions météorologiques en Algérie. Elle suppose que :

$$VV = \left(\frac{1897}{C}\right)^{1/0,91}$$

Tel que :

VV : visibilité exprimée en mètres.

C : concentrations des poussières désertiques exprimées en microgrammes par mètres cube

Nous avons tracé les cartes des champs de visibilités sous formes d'iso-lignes à partir des simulations ALADIN-Dust et AROME-Dust. Les Figures 4.13 et 4.14. Représentent respectivement l'image satellitaire, les champs de visibilité simulés par AROME-Dust et les champs de visibilité simulés par ALADIN-Dust pour la journée du 19/02 à 15h (les autres journées figureront dans l'annexe).

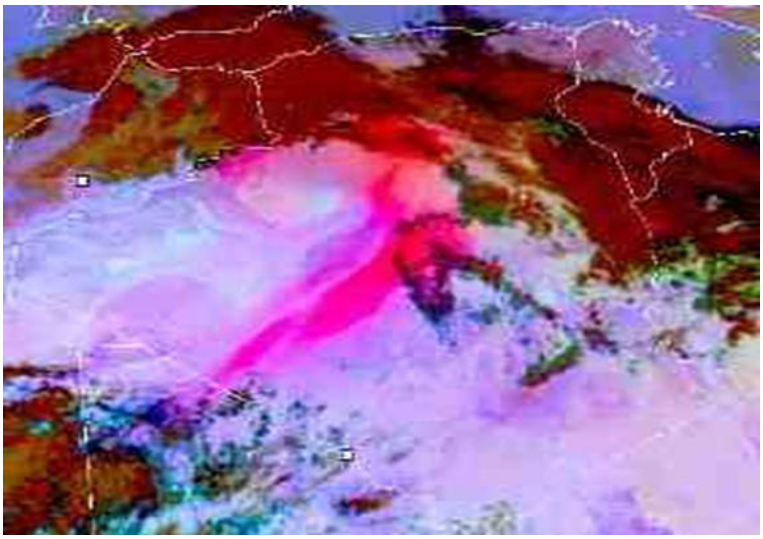

**Figure 4.13** : Image Satellite pour la Journée De 19/02 à 18h

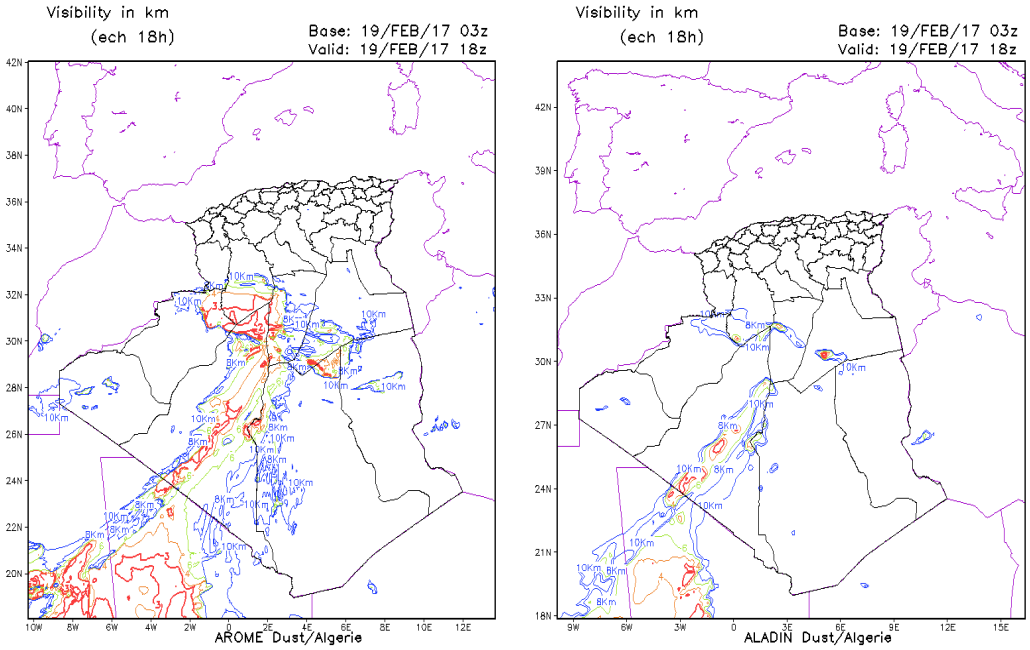


**Figure 4.14** : Les Champs de Visibilités Prévus par le Modèle AROME - ALADIN Respectivement pour la Journée de 19/02 à 18h

Ce types de cartes offrent un outil précieux pour les prévisionnistes au niveau de l'ONM, car elles donnent un aperçu bien localisé des zones concernées par les tempêtes de sable, ce qui leurs permettra par la suite de rédiger leurs messages de prévision d'aérodrome TAF (Terminal Aerodrome Forecast) avec une meilleur précision pour les aérodromes du Sud. Cependant, la prévision issue du modèle ALADIN-Dust a montré ses limites, en particuliers lorsqu'il s'agit d'une situation sévère.

Dans la partie suivante, nous allons utiliser les visibilités observées sur divers stations météorologiques (généralement aux niveaux des aérodromes) pour les comparer avec les visibilités simulées par ALADIN-Dust et AROME-Dust. Pour ce faire, nous avons sélectionné 6 stations : Tindouf, Djanet, Tamanrasset, Bechar, Ghardaïa et Adrar. A noter que la prévision des visibilités réduites en présence d'aérosols désertiques est vraiment complexe, mais le fait d'avoir des tendances vers la baisse offre un outil aux prévisionnistes pour alerter les aérodromes concernés.

- **La station de Tindouf :**

Les visibilités observées sur la région de Tindouf durant l'épisode du 19 au 22 février 2017 affichent des valeurs supérieures à 6000m (la figure 4.15) pour la journée du 20.

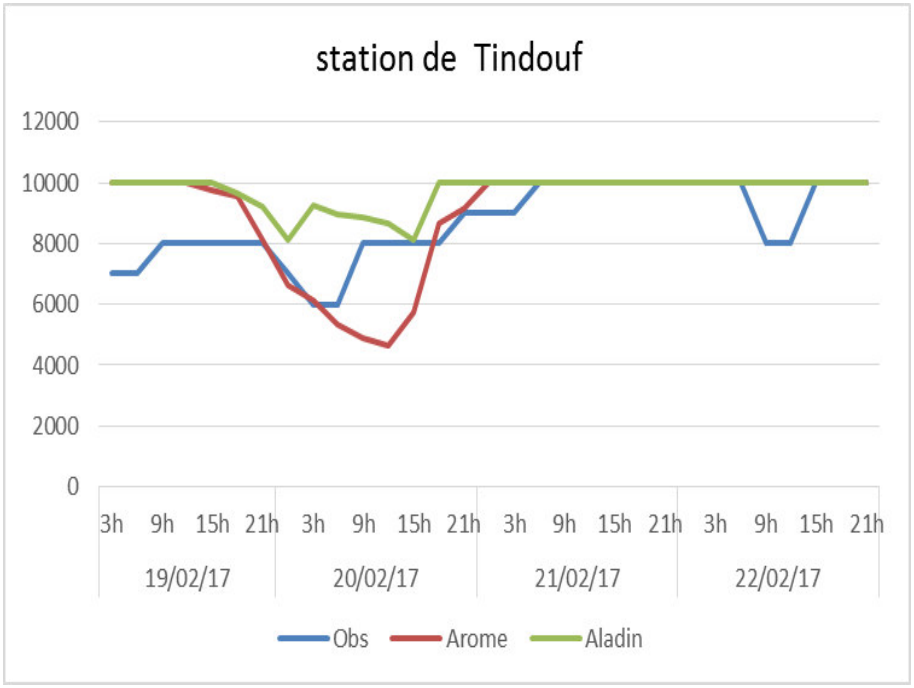


**Figure 4.15**: la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Tindouf Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017

Les simulations effectuées pour cette situation montrent que le modèle opérationnel ALADIN prévoit une visibilité minimale de 8000. Cependant le model AROME prévoit une visibilité minimale de 4000m durant la même journée. On remarque que le model ALADIN simule des visibilités supérieure à celles observées, tandis que le modèle

AROME simule des visibilités inférieures à celles observées ce qui est plus acceptable en prévisions météorologiques. Des valeurs plus faibles que prévues permettront aux prévisionnistes de lancer leurs messages d'alerte afin de sécuriser le décollage/atterrissage du trafic aérien.

- **La station de Djanet** :

Les observations de visibilité sur la région de Djanet montrent que la situation commençaient de s'aggraver à partir du 20/02 à 9h jusqu'à la fin de l'épisode, avec des valeurs qui ont atteint 6000m durant du 21 à 15h au 22 à 12h.

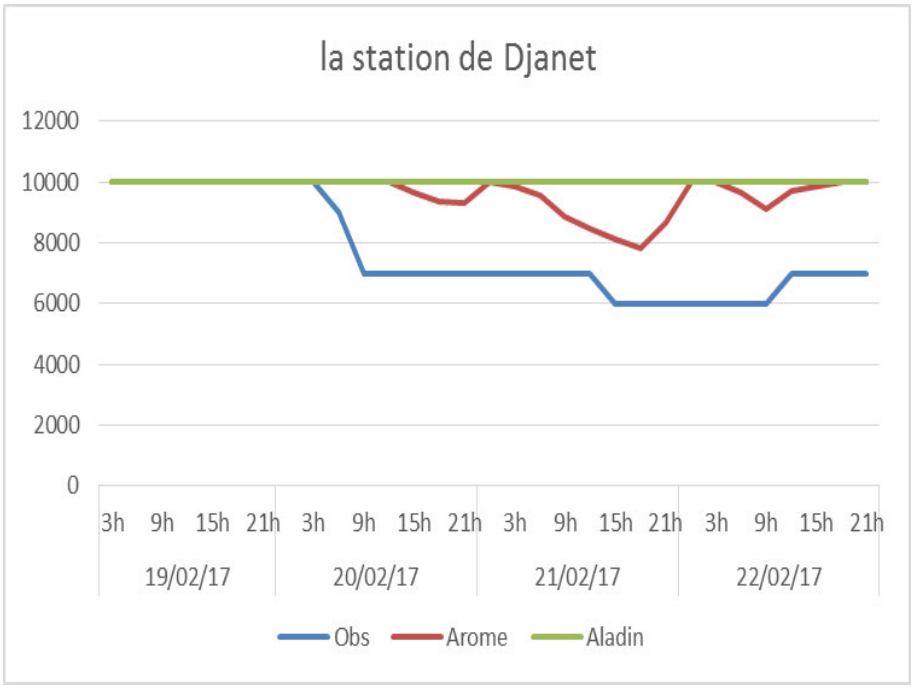


**Figure 4.16** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Djanet Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017

Selon les simulations du modèle ALADIN, les visibilités minimales resteront supérieures à 10km et donc aucune alerte ne sera signalée par les prévisionnistes. D'autre part, le modèle AROME arrivait à simuler une légère tendance vers la baisse et suit plus ou moins les observations, avec des visibilités minimales qui affichent des valeurs minimales de 8000m pour la journée du 21/02. Les simulations AROME réduit l'erreur entre les valeurs simulées et les valeurs observées, et permet donc d'attirer l'attention des prévisionnistes et de les informer sur la présence de vent de sable sur la région de Djanet.

- **La station de Tamanrasset :**

Les visibilités observées sur la station de Tamanrasset montrent que la situation s'est dégradée progressivement pour atteindre des visibilités minimales de 4200m durant la journée du 22/02 à 09h.

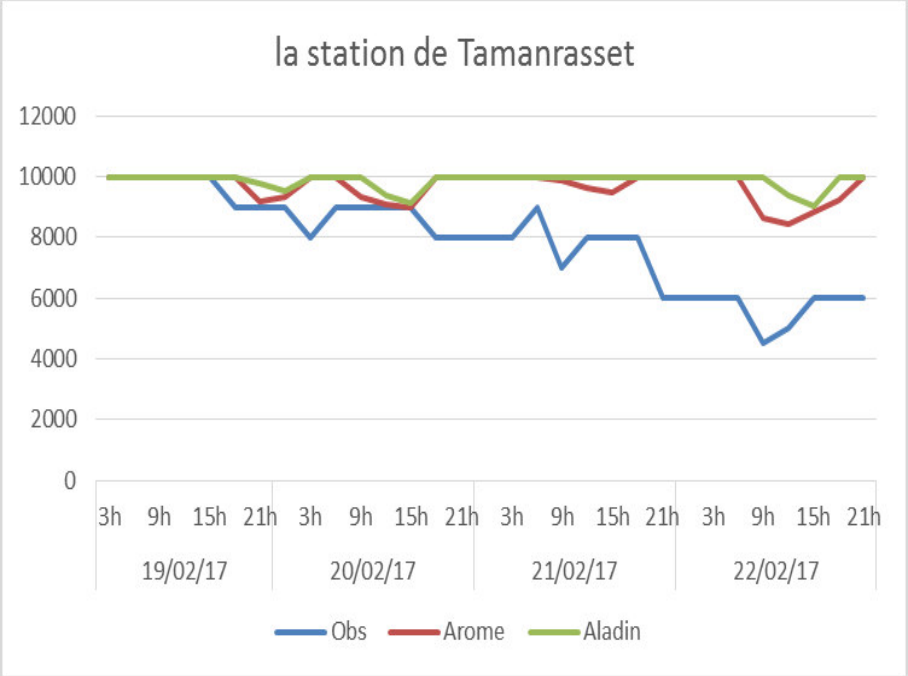


**Figure 4.17** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Tamanrasset Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017

Les simulations effectuées par les deux modèles montrent qu'ils se sont comportés de la même façon, en suivant la même allure que celles des observations, mais avec un biais d'erreur considérable. En effet, la région de Tamanrasset demeure une région où la prévision des soulèvements des aérosols désertiques est très compliquée. Ceci est due au type du sol de la région qui est de nature rocheuse donc ne contient pas de sable, mais elle est entourée de plusieurs zones sources d'aérosols désertiques qui peuvent être déposé puis réactivé par l'effet de vent.

Malgré cette difficulté, mais les résultats montre que le modèle AROME se comporte mieux que le modèle opérationnel ALADIN en réduisant l'écart entre les visibilités observées et prévues.

- **La station de Bechar :**

Les visibilités observées ont sensiblement diminué durant cet épisode dans la région de Bechar, avec des valeurs de 2000m en début d'épisode (le 19 à 15h) qui descendent jusqu'à 1000m en fin d'épisode (le 22 à 9h).

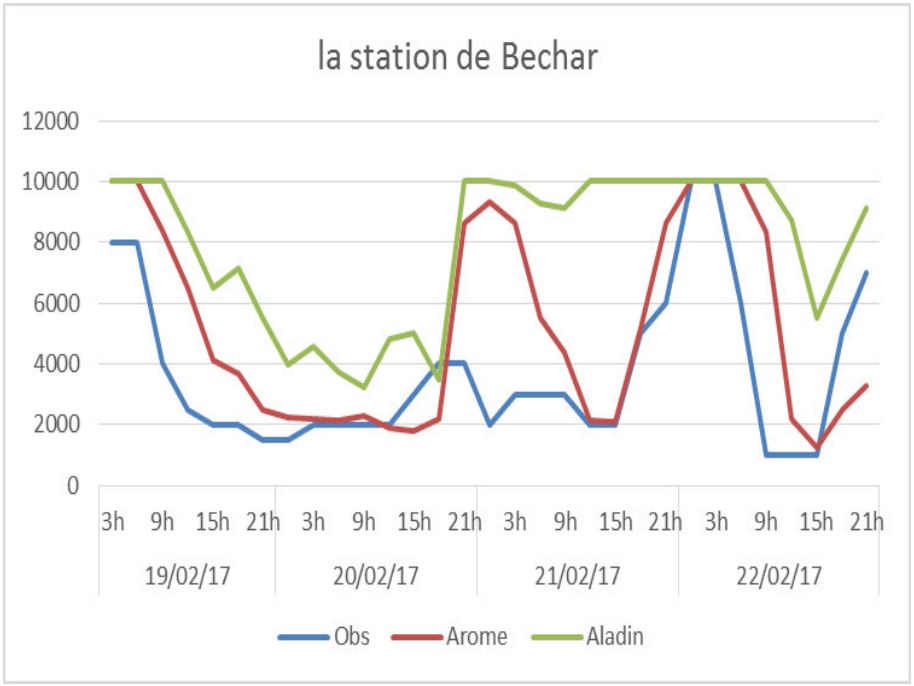


**Figure 4.18** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Bechar Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017

Les visibilités simulées par le model ALADIN offrent aux prévisionnistes une aide précieuse en indiquant la réduction de visibilité durant le 19 et le 20, mais à partir du 21 le modèle diverge un peu et prévoit des visibilités de 8000 à 10000 m alors qu'on observait des visibilités de 2000m. Par contre, le modèle AROME suit exactement la même allure que les observations avec des valeurs proches à l'observation, notamment pour le 20, 21 et 22 où le modèle indiquait les chutes sensibles de visibilités ce qui permettra aux prévisionnistes de lancer des messages d'alertes pour les aérodromes concernés.

- **La station de Ghardaïa :**

La situation commençait de s'aggraver au niveau de la région de Ghardaïa le 19 à 18h, avec des visibilités qui diminuent progressivement de 8000m pour atteindre 3000m (le 21 à 18h).

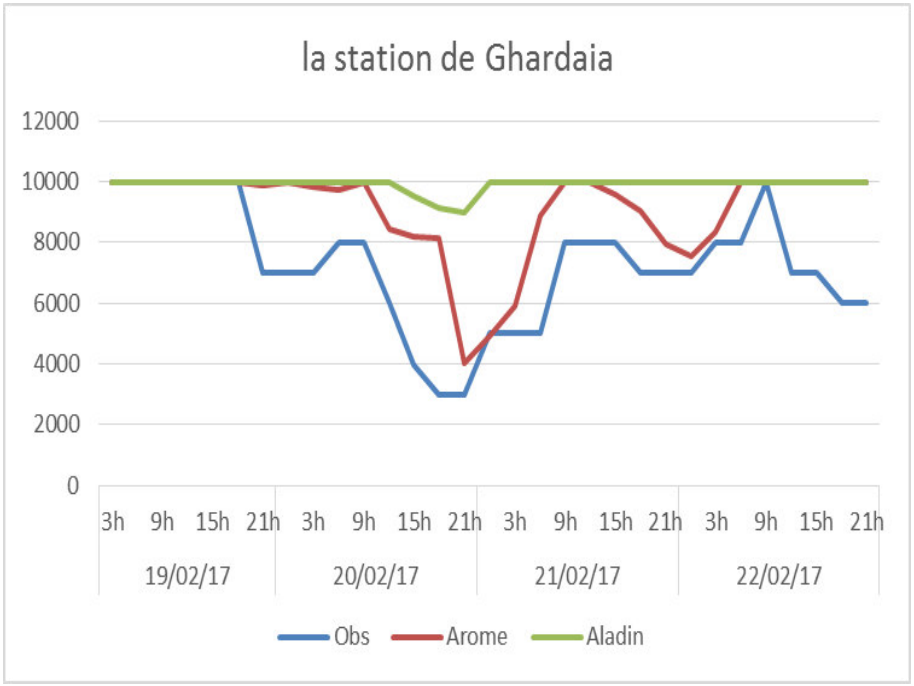


**Figure 4.19** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Ghardaïa Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017

Pour les visibilités prévues Nous remarquons que donnent un signe de chute de visibilités pour la journée du 20, mais avec une meilleur indication par le modèle AROME qui permet ainsi d'avoir une idée sur la tendance des visibilités, particulièrement le 20 à 18h et le 21 à 18h.

- **La station d'Adrar :**

La région d'Arar a était touché par les vents de sable durant tout l'épisode (du 19 au 22). Les visibilités ont franchi le seuil d'alerte rouge avec des valeurs de 50m pour le 20 à 12h, le 21 à 15h et 18h et le 22 à 15h (visibilité presque nul) ce qui représente un grand danger pour le trafic aérien.

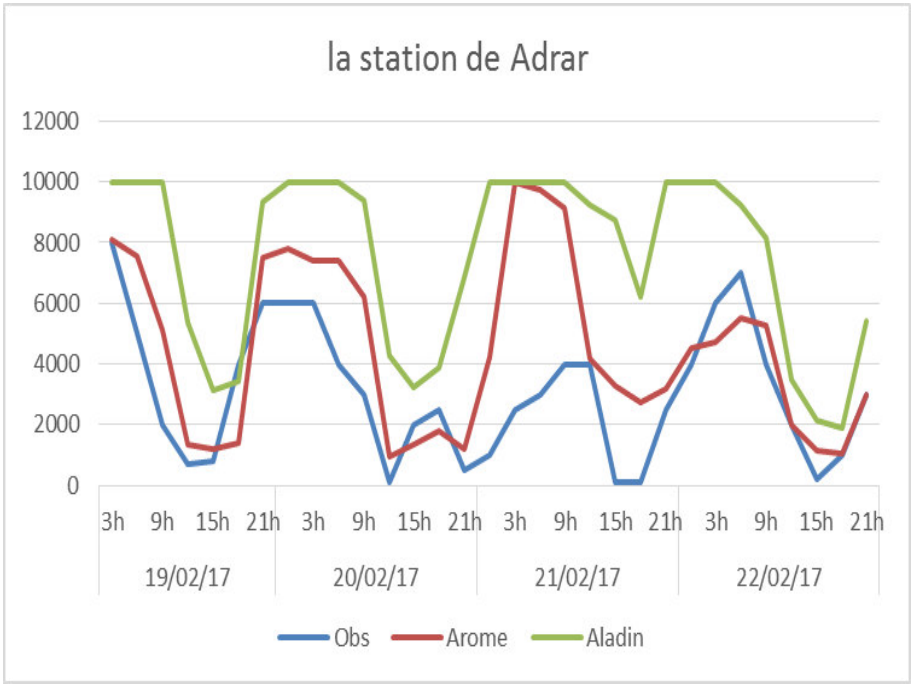


**Figure 4.20** : la Variation des Visibilités Observées et Prévues avec AROME et ALADIN pour la Station de Adrar Durant la Période de 19/02 au 22/02//2017

Les simulations ALADIN montrent le bon comportement du modèle en suivant la même allure que les observations. Ce modèle prévoit certainement la tendance des visibilités vers la baisse mais avec des valeurs de 2000m au moment où les observations ont enregistré des visibilités de 50m (le 22 à 15h). Par contre, le modèle AROME arrive à prévoir des valeurs de 800m (le 20 à 12h) et de 900m (le 22 à 18h).

## 4. Tests de sensibilité sur le calcul des visibilités :

Dans le but d'améliorer les résultats des visibilités, nous avons effectués recherches bibliographiques grâce à laquelle nous avons pu collecter trois formules expérimentales reliant la présence des aérosols désertiques et la réduction de visibilité.

## 3.1 Formules de la relation aérosols désertiques/visibilité :

Voici les formules de calcul des visibilités en fonction de concentration des poussières désertiques [28]

De Ette *:* $C= 1600\ VV^{-0.62}$

De Boyoko *:* $C=1500\ VV^{-1}$

De Ben Mohammed ; $C= 1339.84\ VV^{-067}$

Nous avons sélectionné trois stations pour effectuer des tests de sensibilité sur les visibilités. En utilisant les trois formules citées au-dessus, nous avons calculé les visibilités dans les stations suivantes : Adrar, Bechar et Timimoune. Les graphes de la partie suivante représentent les résultats obtenues par les trois méthodes, les résultats de la méthode utilisée en opérationnelle (Bertrand) et les observations.

- Station d'Adrar :

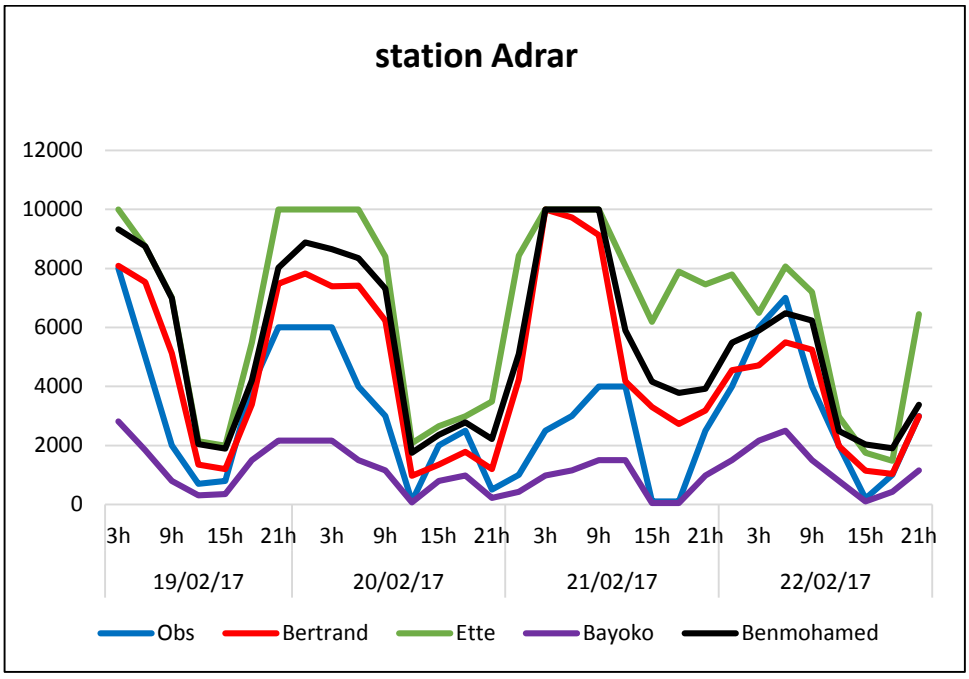


**Figure 4.21** : Les Visibilités Calculées avec Déférentes Equations sur la Station d'Adrar pour la Situation de 19/02 au 22/02/2017

Les graphes des visibilités calculées par les quatre équations (Bertrand, Ette, Bayoko, Benmohamed) montrent en général que les visibilités calculées par les quatre formules suivent la tendance des observations, avec un meilleur résultat pour les équations de Bertrand et Bayoko qui sont plus proches des visibilités observées par apport aux visibilités calculées par les équations d'Ette et Benmohamed. L'analyse des résultats permet de voir que les visibilités calculées par la relation de Bertrand sont bien prévues pour les situations qui ne sont pas trop sévères (visibilités supérieures à 4000m), par contre les visibilités calculées par la relation de Bayoko sont bien prévues pour les situations les plus sévères (Inférieures à 4000m). Ceci suggère l'existence d'une relation intermédiaire entre les deux formules (Bertrand et Bayoko) qui tient compte des seuils d'alerte.

- Station de Bechar :

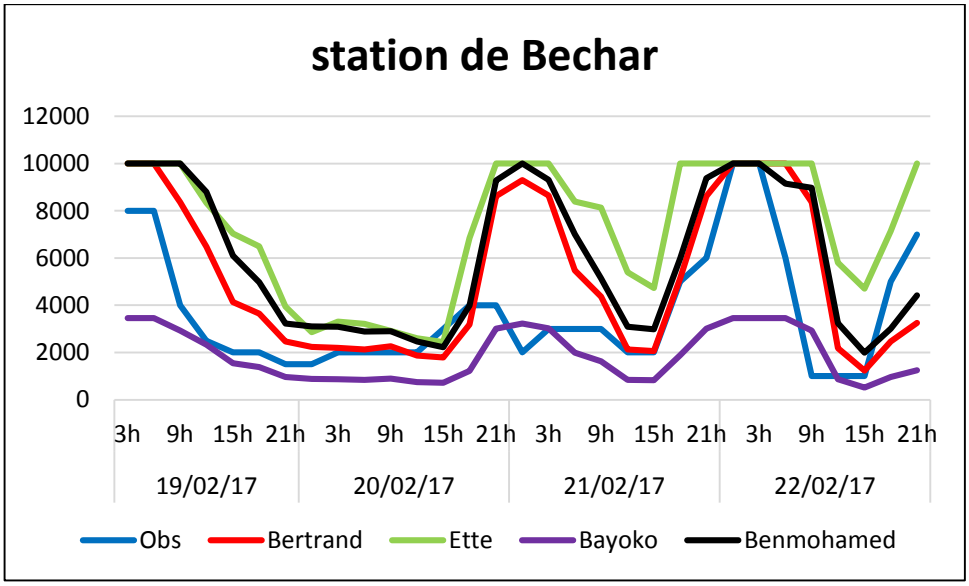


**Figure 4.22** : Les Visibilités Calculées avec Déférentes Equations sur la Station de Bechar pour la Situation de 19/02 au 22/02/2017

Les résultats obtenus pour la station de Bechar révèlent aussi le bon comportement des quatre équations par rapport aux observations. Nous remarquons aussi que les formules de Bertrand et de Bayoko donnent les meilleures prévisions. La relation utilisée en opérationnelle (Bertrand) montre finalement qu'elle n'est pas forcément le bon choix parce qu'elle a montré ses limites lorsqu'il s'agit de faibles valeurs. La formule de Bayoko peut améliorer les résultats pour les situations les plus sévères (valeurs <4000m), mais elle reste aussi limité et risque de fournir des fausses alertes puisque l'amélioration des visibilités n'est pas trop ressentie.

- Station de Timimoune :

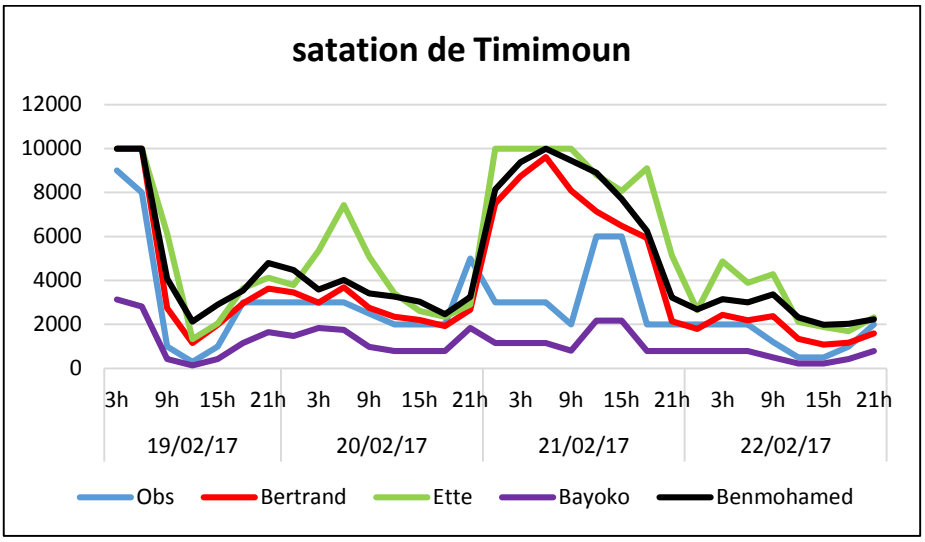


**Figure 4.23** : Les Visibilités Calculées avec Déférentes Equations sur la Station de Timimoune pour la Situation de 19/02 au 22/02/2017

Le graphe de la station de Timimoune permet de confirmer les résultats obtenus pour les deux stations précédentes (Adrar et Bechar). Les visibilités calculées par la formule de Bertrand se concorde mieux avec les observations que celles calculées par la méthode de Bayoko, mais nous remarquons toujours que lorsque la situation s'aggrave (visibilités faibles) les observations sont plus proches aux visibilités calculées par la formule de Bayoko.

**Conclusion :**

La comparaison entre les résultats de model AROME et ALADIN a montré que soit les deux model prévoient bien la distribution spatiale de panache des poussières désertiques à l'exclusion de Tamanrasset à cause de la nature des sols de la région. Cependant, le modèle AROME donne de meilleurs résultats en réduisant l'écart entre les observations et les prévisions, en particulier pour les valeurs faibles, ce qui permet de lancer des messages d'alertes suffisamment à l'avance.

Ce travail est une contribution qui vise à améliorer la prévision et la représentation des distributions verticale des aérosols désertiques sur le sud de Sahara et d'attirer l'attention sur une série de problèmes potentiels lesquels pourrait être associé au vol des avions dans des secteurs chargés par des poussières désertiques.

Pour la première partie de ce travail pratique, après avoir lancé les simulations avec le model AROME –Dust de 3 km de résolution, les résultats d'épaisseurs optiques AOD et concentrations sont convertis en visibilités. Ces résultats sont validés par apport aux sorties de ALADIN –Dust et les images satellitaires (pour les concentrations et les épaisseurs optiques) et aux METAR (Météorologiques Aerodrome Report) pour les visibilités. La comparaison entre les résultats de modèle AROME et ALADIN a montré que soit les deux modèles prévoient bien la distribution spatiale des panaches de poussières désertiques à l'exclusion de Tamanrasset à cause de la nature des sols de la région. Cependant le modèle AROME donne de meilleurs résultats en réduisant l'écart entre les observations et les prévisions en particulier pour les valeurs faibles ce qui permet de lancer des messages d'alertes suffisamment à l'avance.

Pour la deuxième partie : dans le but d'améliorer les résultats des visibilités, nous avons effectué des recherches bibliographiques grâce à laquelle nous avons pu collecter trois formules expérimentales reliant la présence des aérosols désertiques et la réduction de visibilité. Apres avoir testé les formules de calcul de visibilité nous avons démontré que les visibilités calculées par la formule de **Bertrand** se concorde mieux avec les observations que celles calculées par les autres méthodes, mais nous remarquons toujours que lorsque la situation s'aggrave (visibilités faibles) les observations sont plus proches aux visibilités calculées par la formule de **boyoko**.

## Perspectives :

- ✓ Amélioration des prévisions de visibilités en particulier sur la région de Tamanrasset (test de sensibilité sur les seuils d'érosion)
- ✓ Amélioration des prévisions de visibilités sur toute la région du Sahara Algérien par application de nouvelles formules de conversions des concentrations en visibilités (une équation intermédiaire entre l'équation opérationnel Bertrand et l'équation et Boyoko

# ANEXE

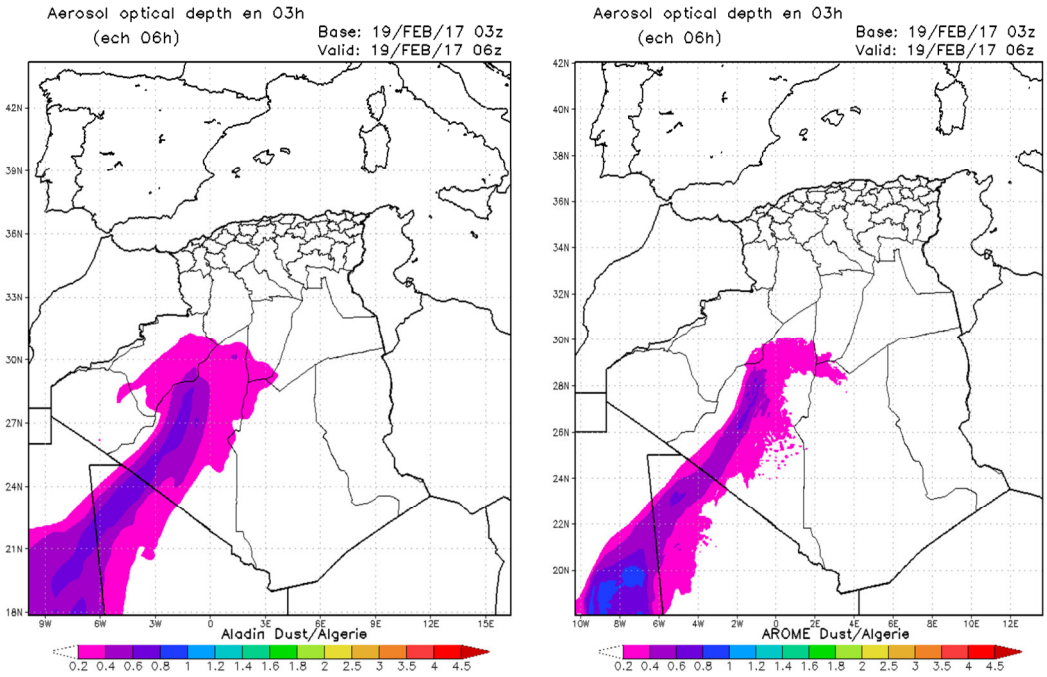


**Figure01** : AOD prévu à 6h le19/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

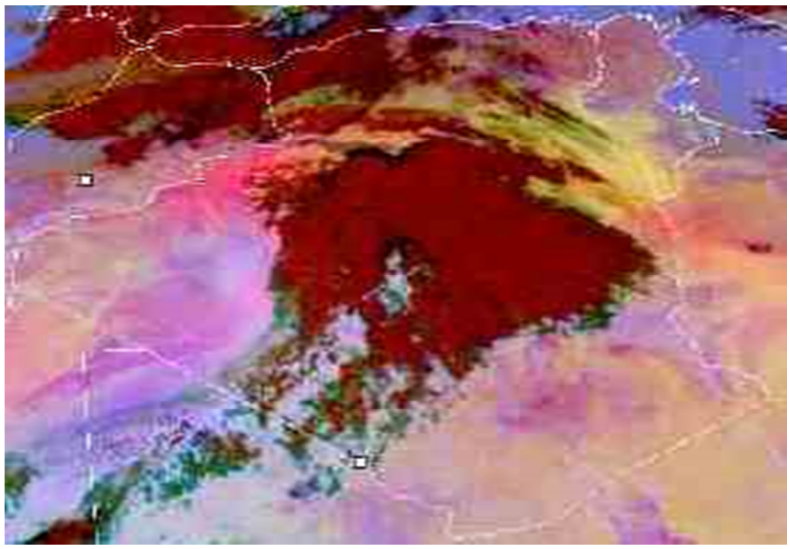

**Figure 2 :** image satellite pris le 19/02/2017a 06h

# ANEXE

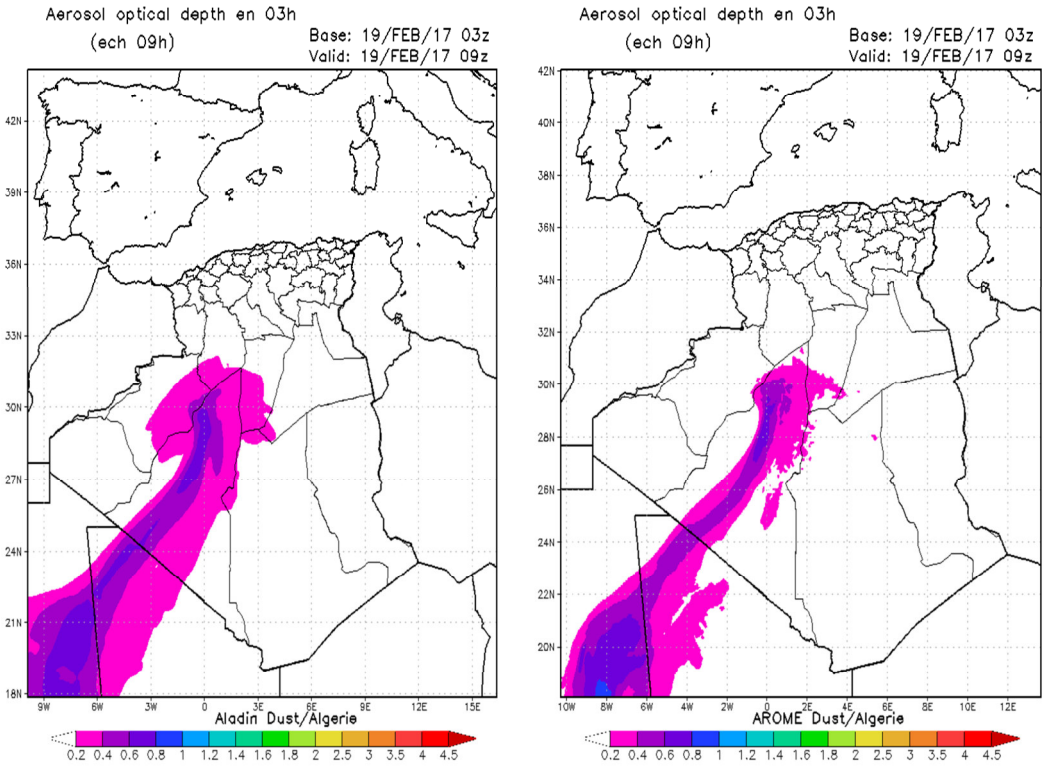


**Figure 03** : AOD prévu à 9h le19/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

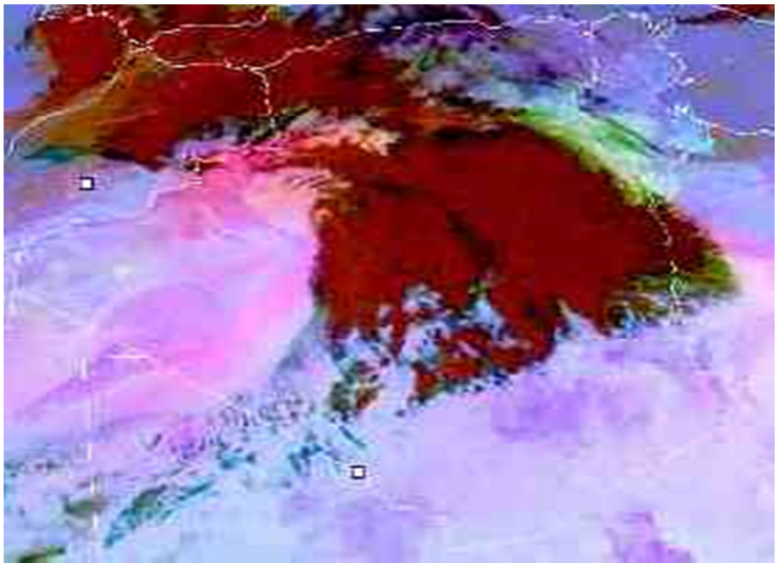

**Figure04** : image satellite pris le 19/02/2017a 06h

# ANEXE

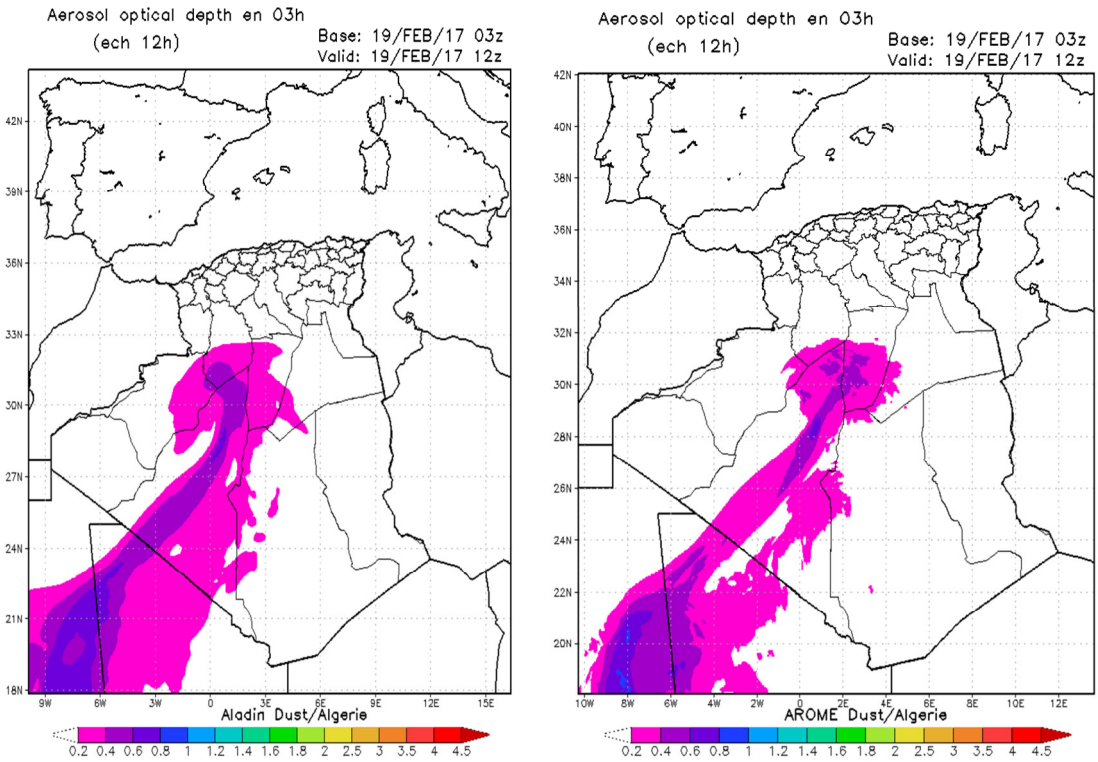


**Figure5** : AOD prévu à 12h le19/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

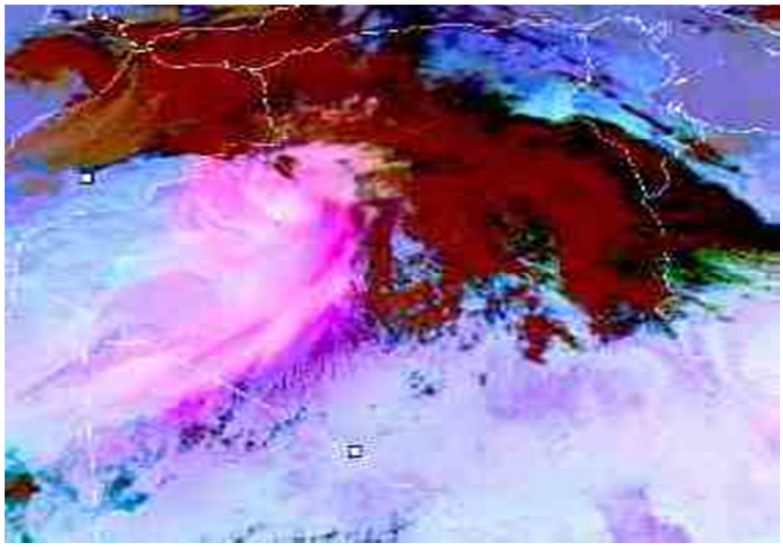

**Figure 06** : image satellite pris le 19/02/2017a 12h

# ANEXE

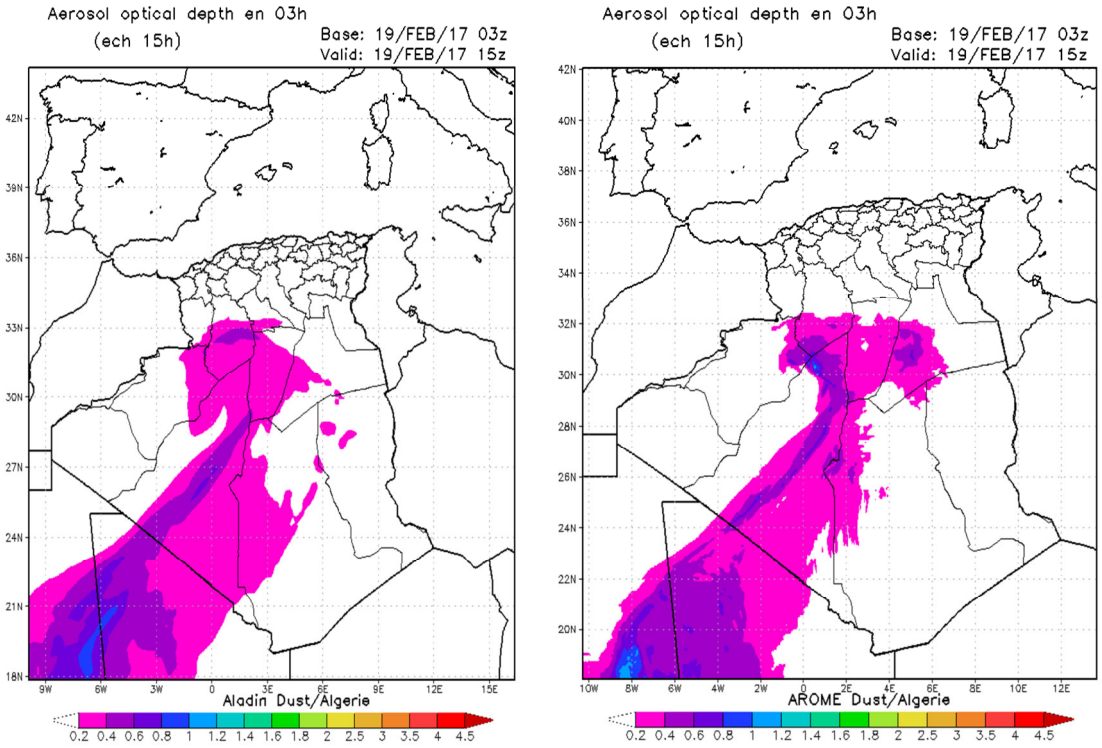


**Figure07** : AOD prévu à 15h le19/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

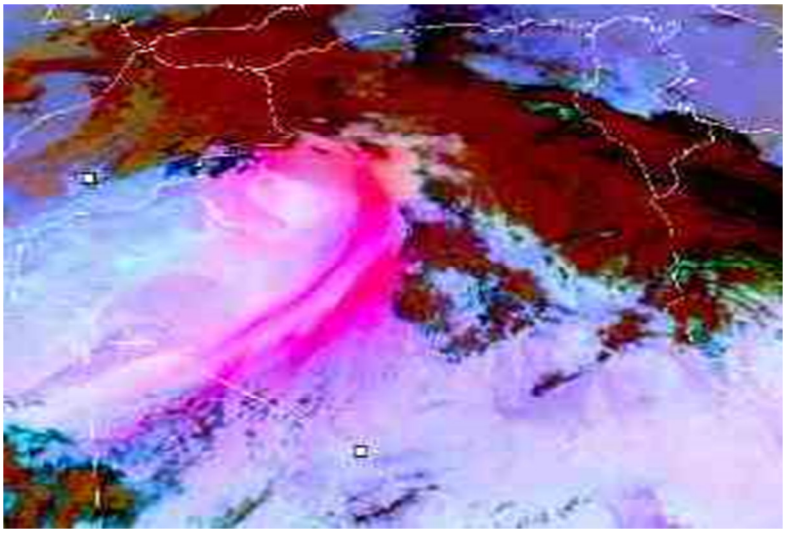

**Figure08**: image satellite pris le 19/02/2017a 15h

# ANEXE

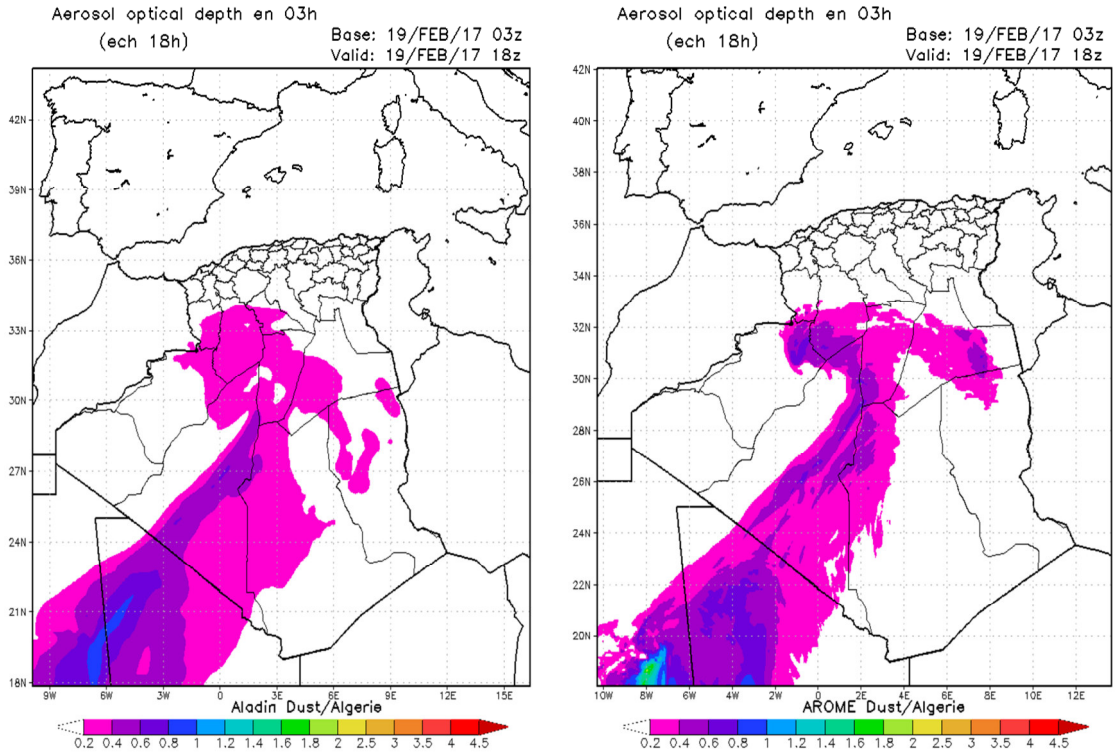


**Figure09** : AOD prévu à 18h le19/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

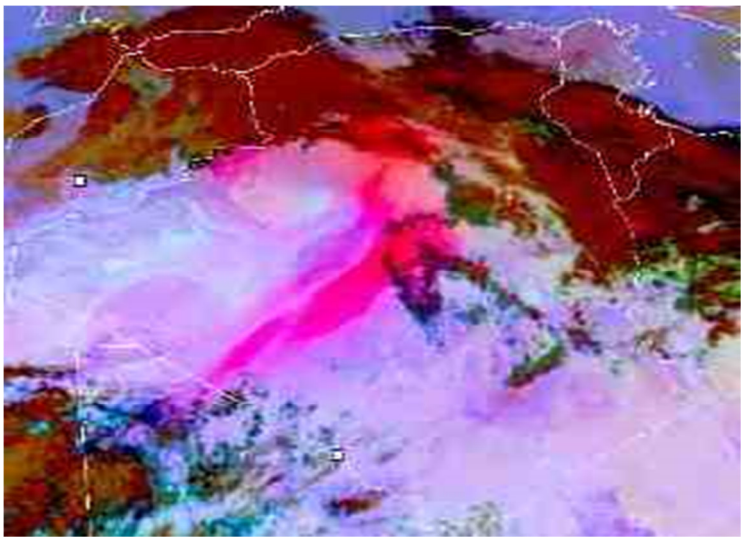

**Figure010** : image satellite pris le 19/02/2017a 18h

# ANEXE

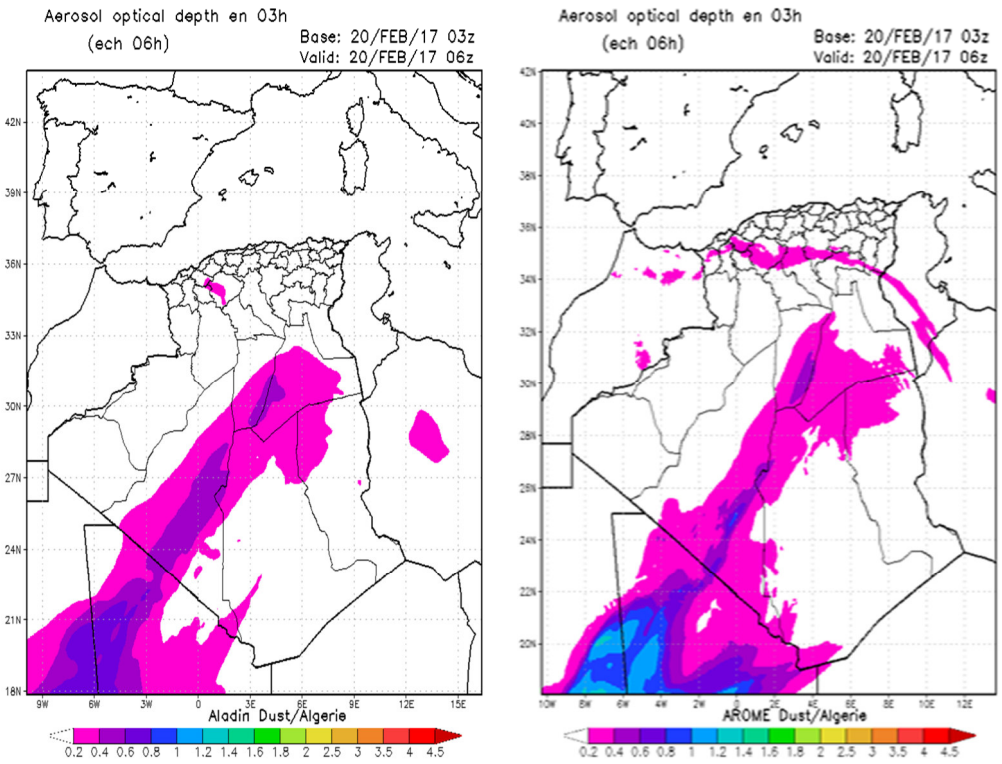


**Figure11** : AOD prévu à 06h le20/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

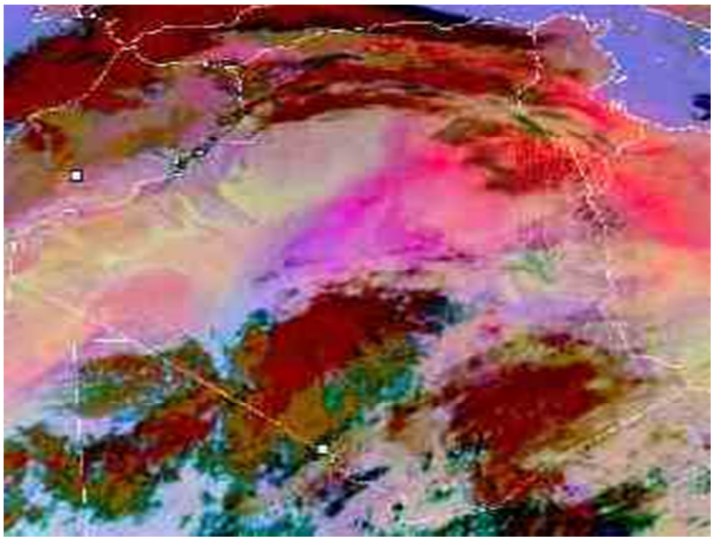

**Figure12**: image satellite pris le 20/02/2017a 6h

# ANEXE

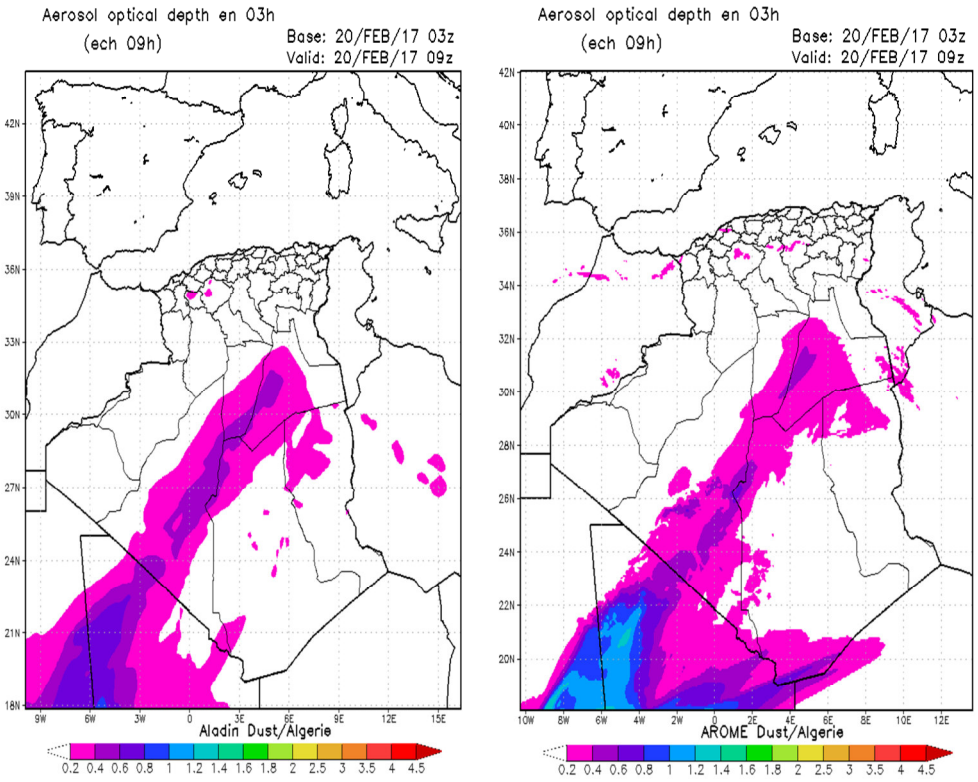


**Figure13** : AOD prévu à 09h le20/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

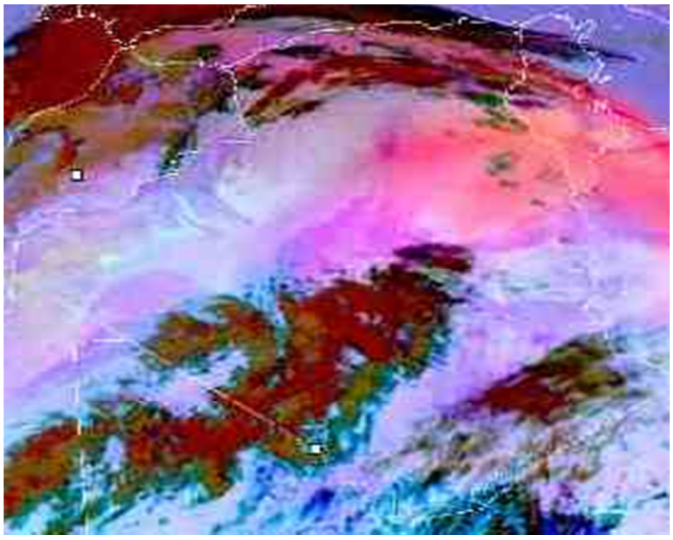

**Figure 14**: image satellite pris le 20/02/2017a 9h

# ANEXE

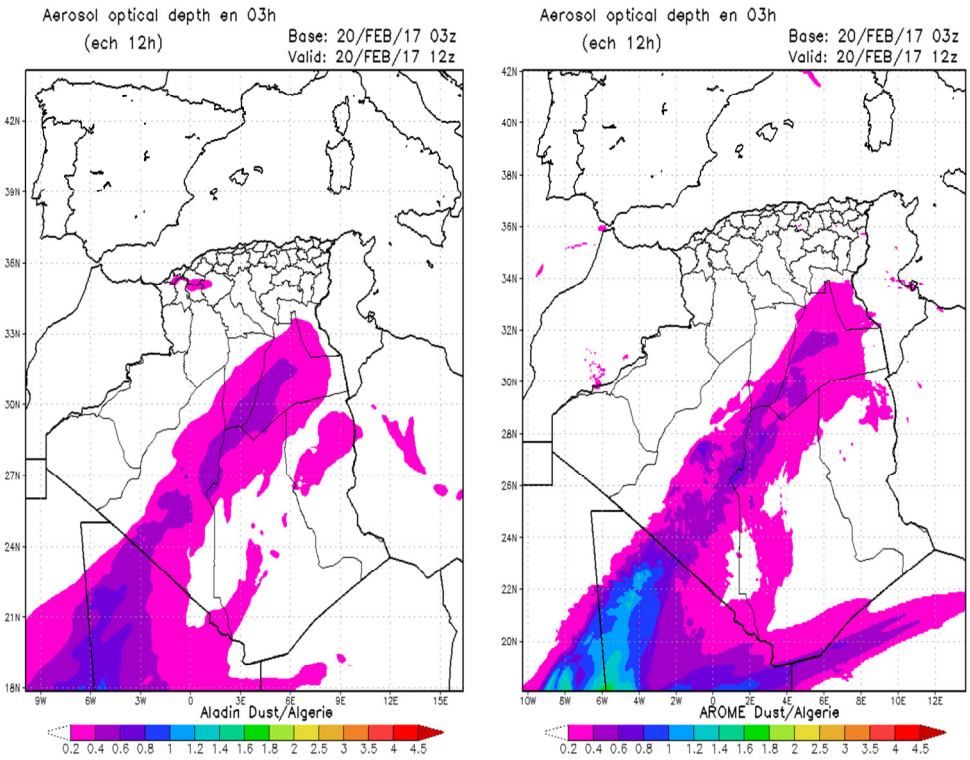


**Figure15** : AOD prévu à 12h le20/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

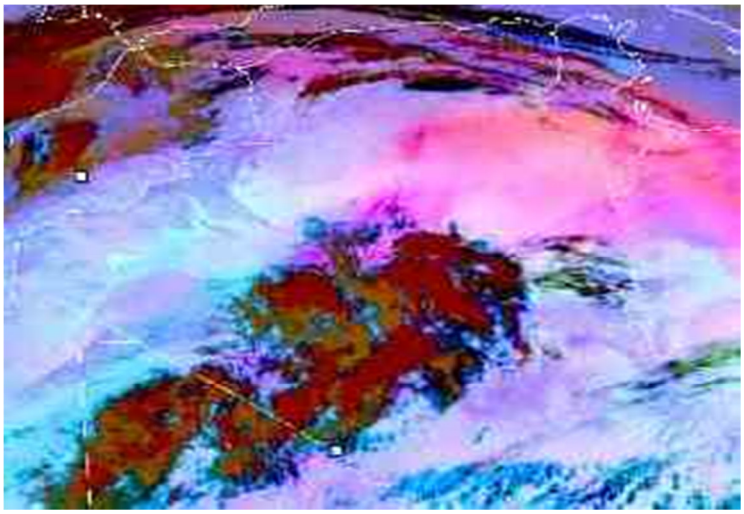

**Figure16** : image satellite pris le 20/02/2017a 12h

# ANEXE

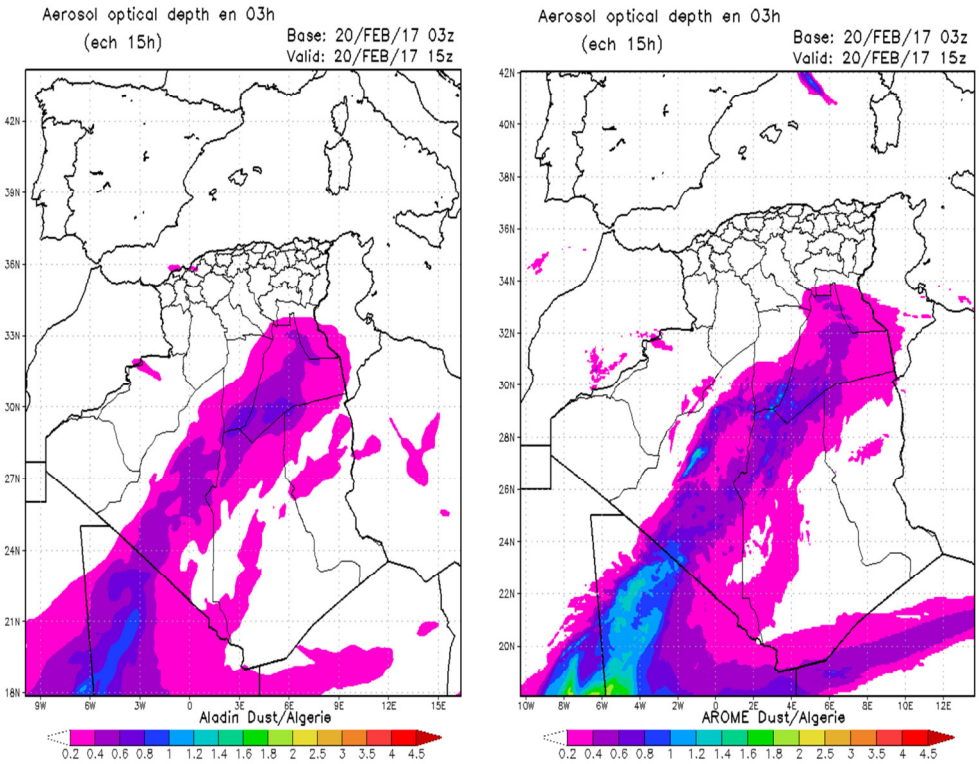


**Figure17 :** AOD prévu à 15h le20/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

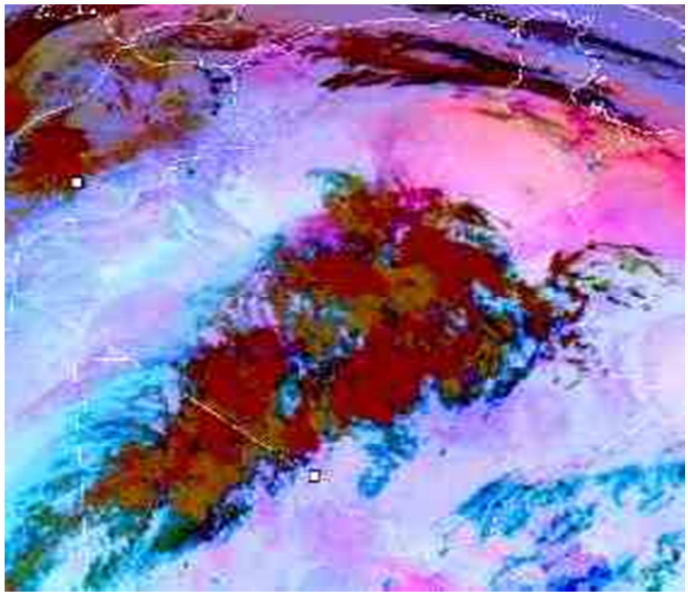

**Figure18** : image satellite pris le 20/02/2017a 15h

# ANEXE

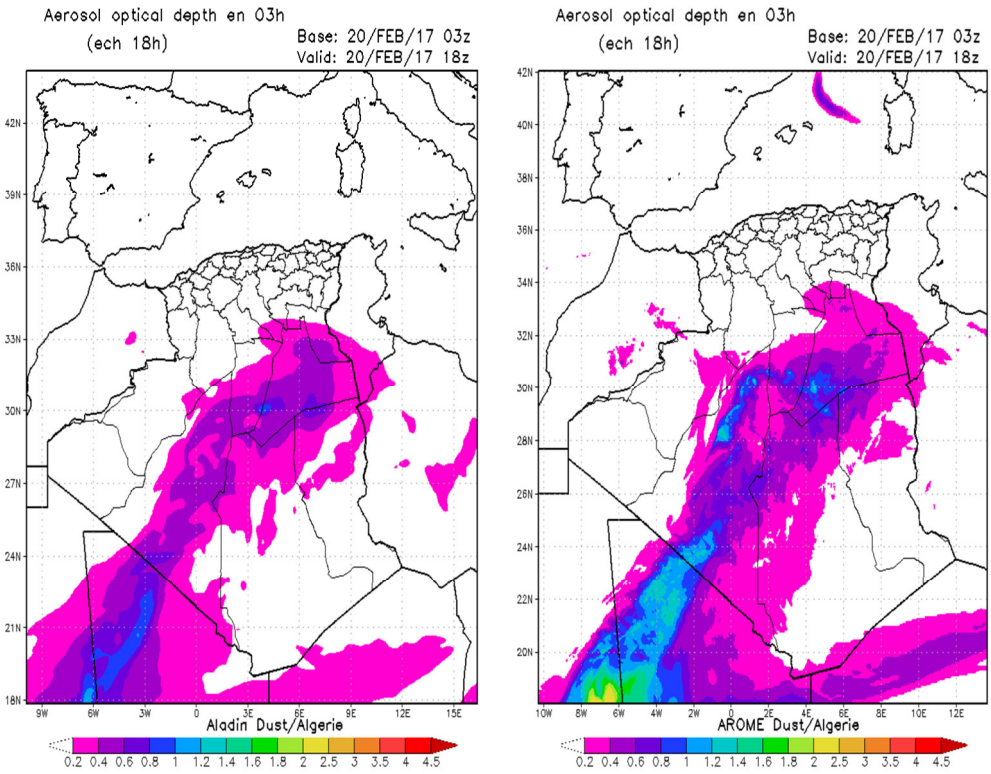


Figure19 : AOD prévu à 18h le20/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

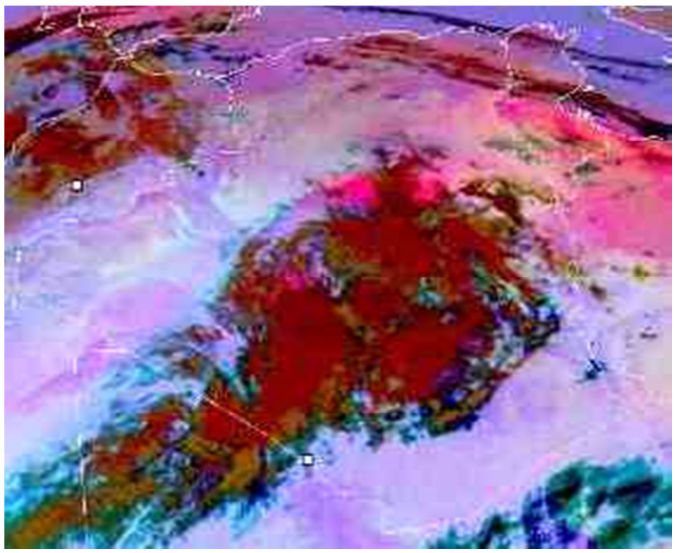

**Figure19** : image satellite pris le 20/02/2017a 18h

# ANEXE

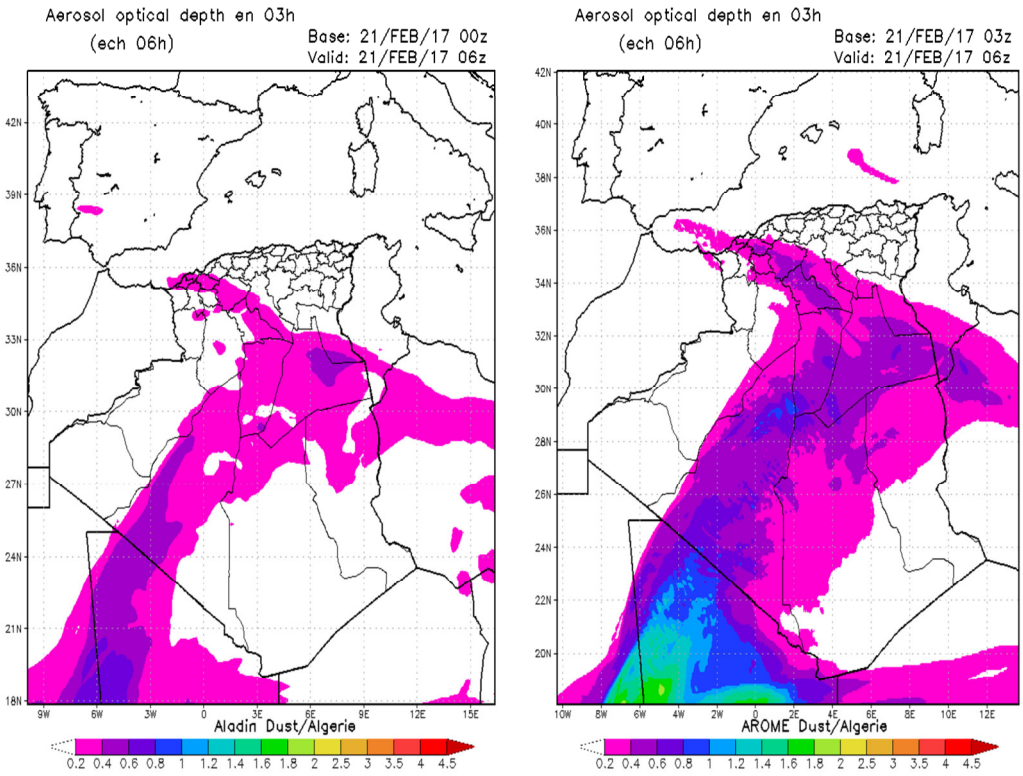


**Figure20** : AOD prévu à 6h le21/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

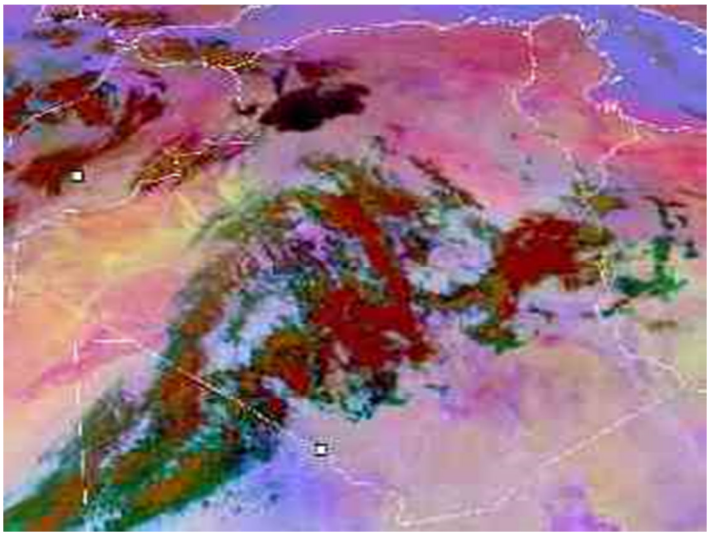

**Figure 21** : image satellite pris le 21/02/2017a 6h

# ANEXE

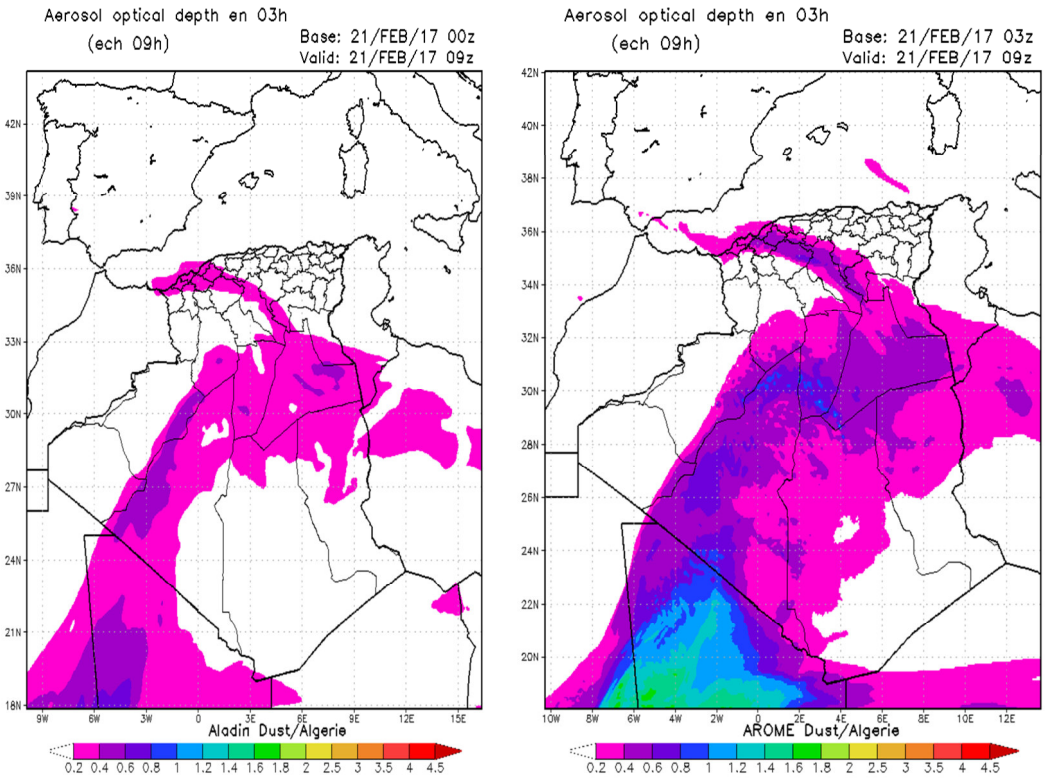


**Figure22**: AOD prévu à 9h le21/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

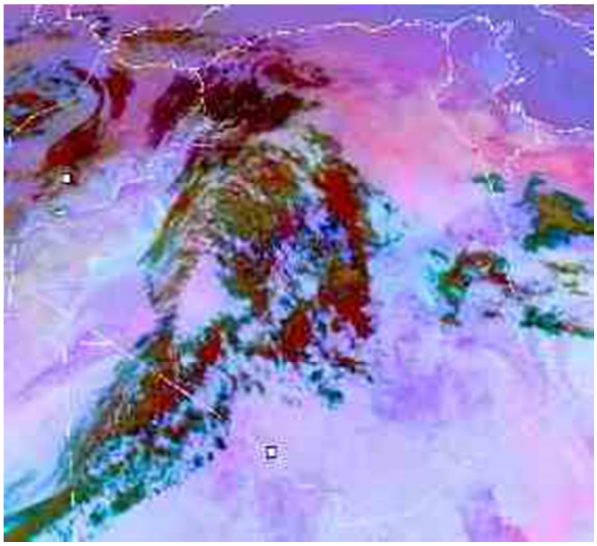

**Figure 23** : image satellite pris le 21/02/2017a 9h

# ANEXE

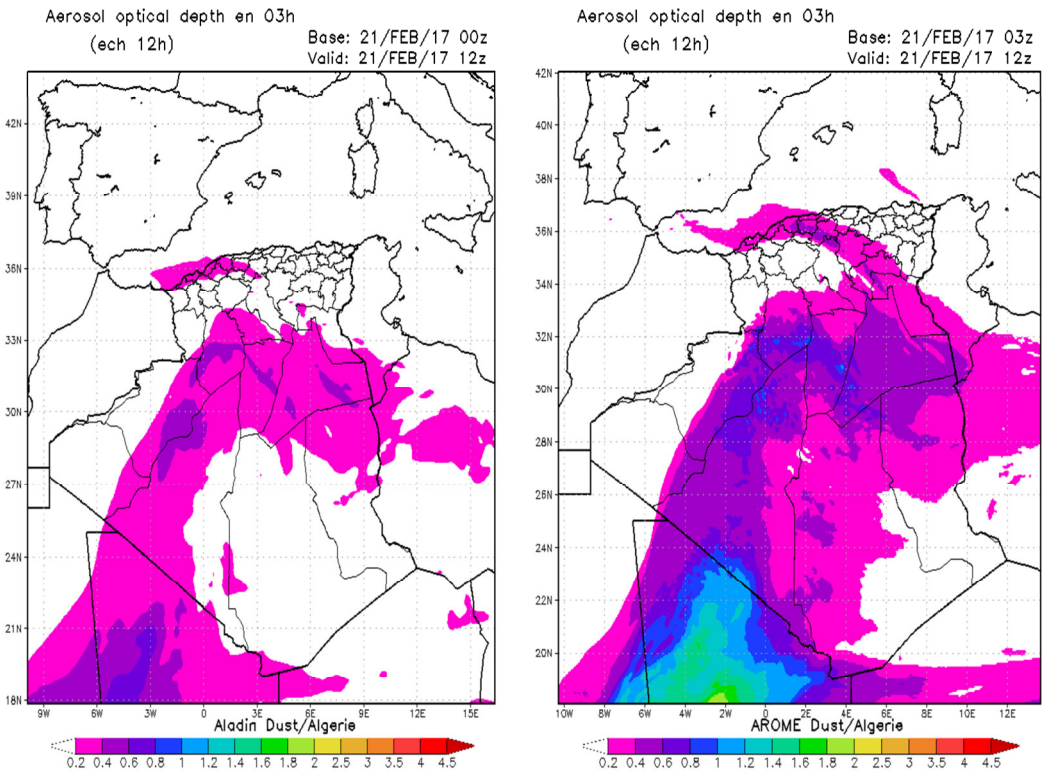


Figure24 : AOD prévu à 12h le21/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

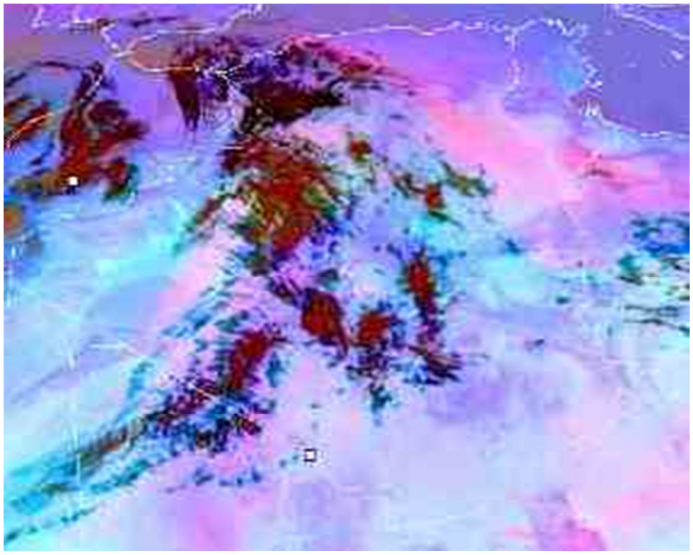

**Figure 25** : image satellite pris le 21/02/2017a 12h

# ANEXE

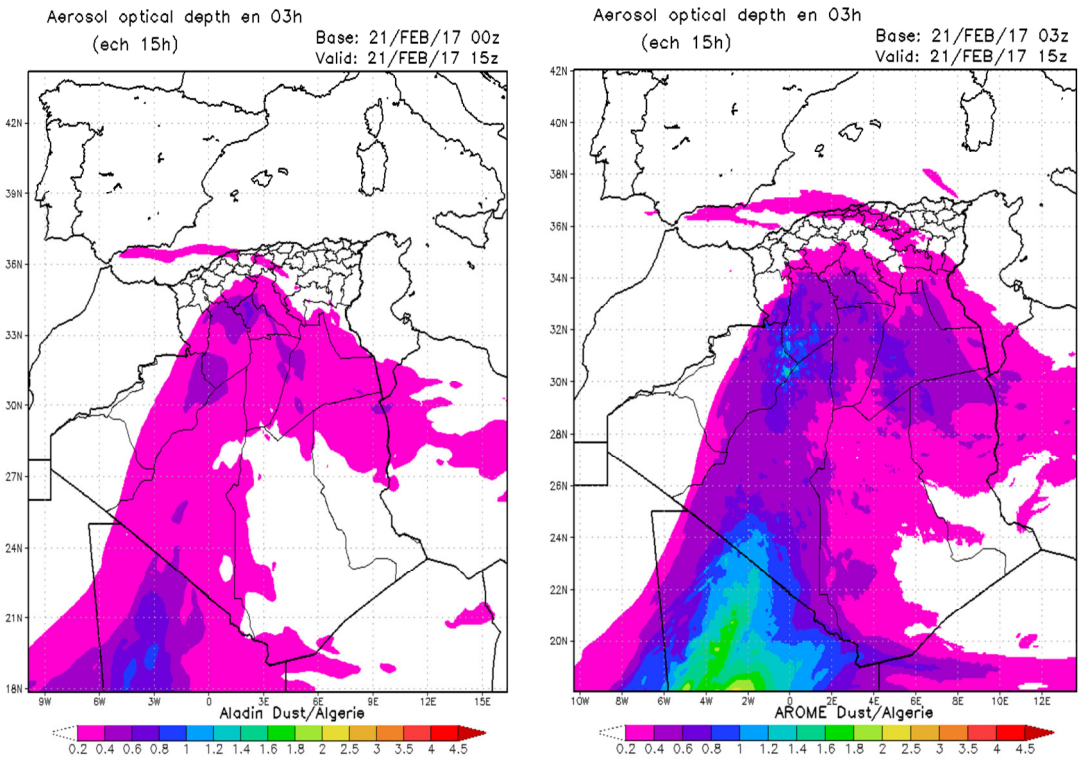


**Figure26** : AOD prévu à 15h le21/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

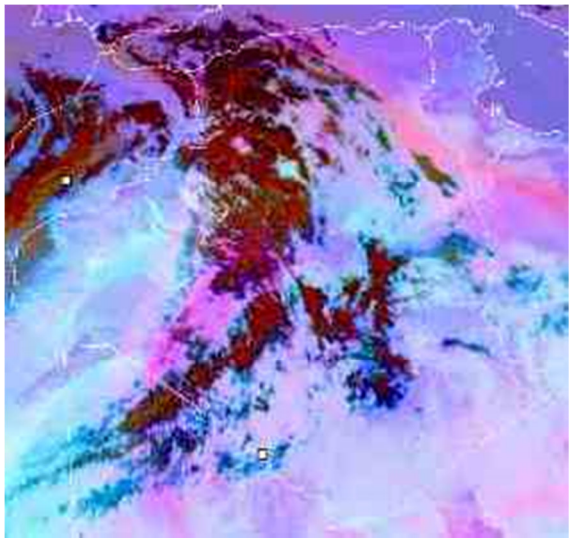

**Figure27** : image satellite pris le 21/02/2017a 15h

# ANEXE

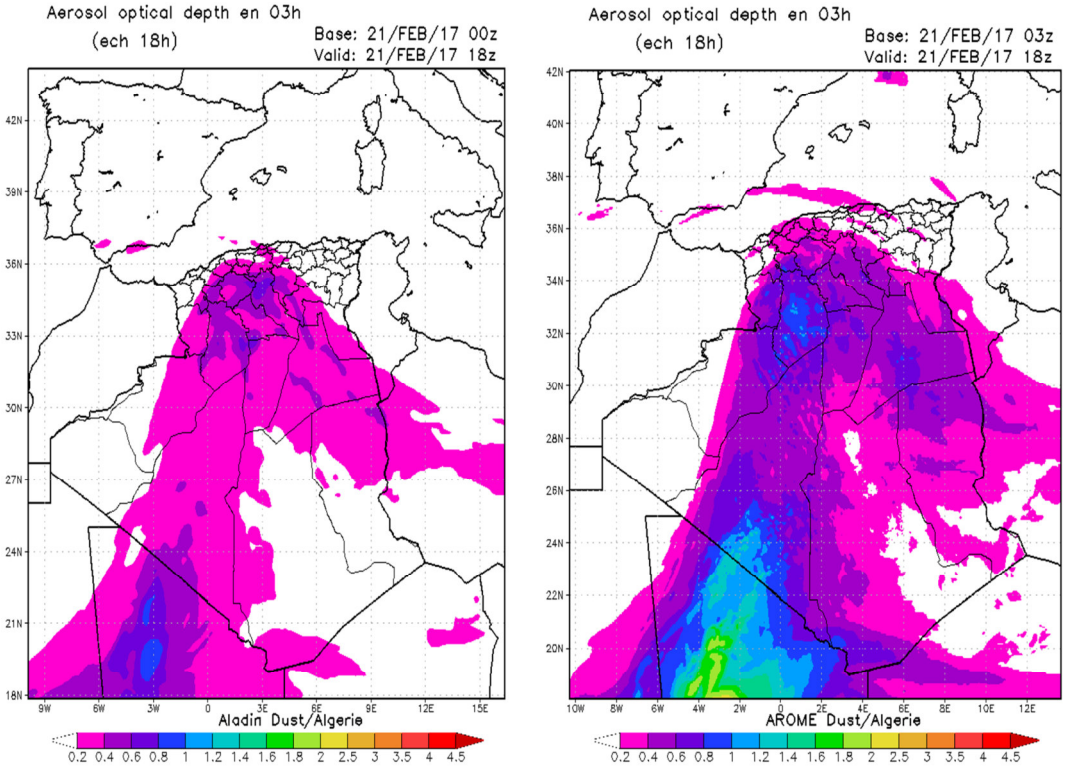


**Figure28** : AOD prévu à 18h le21/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

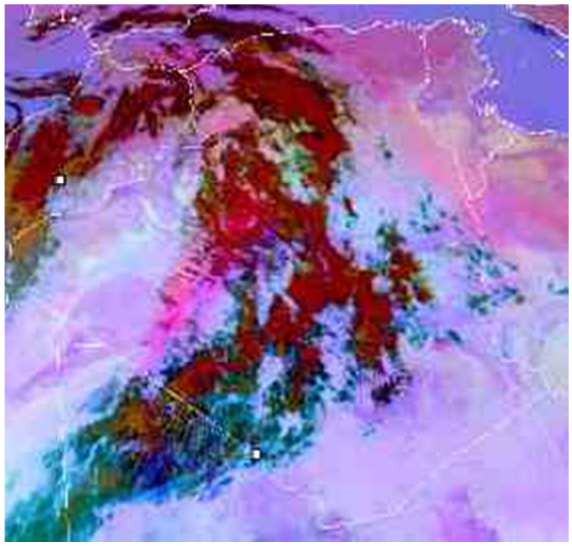

**Figure 29** : image satellite pris le 21/02/2017a 18h.

# ANEXE

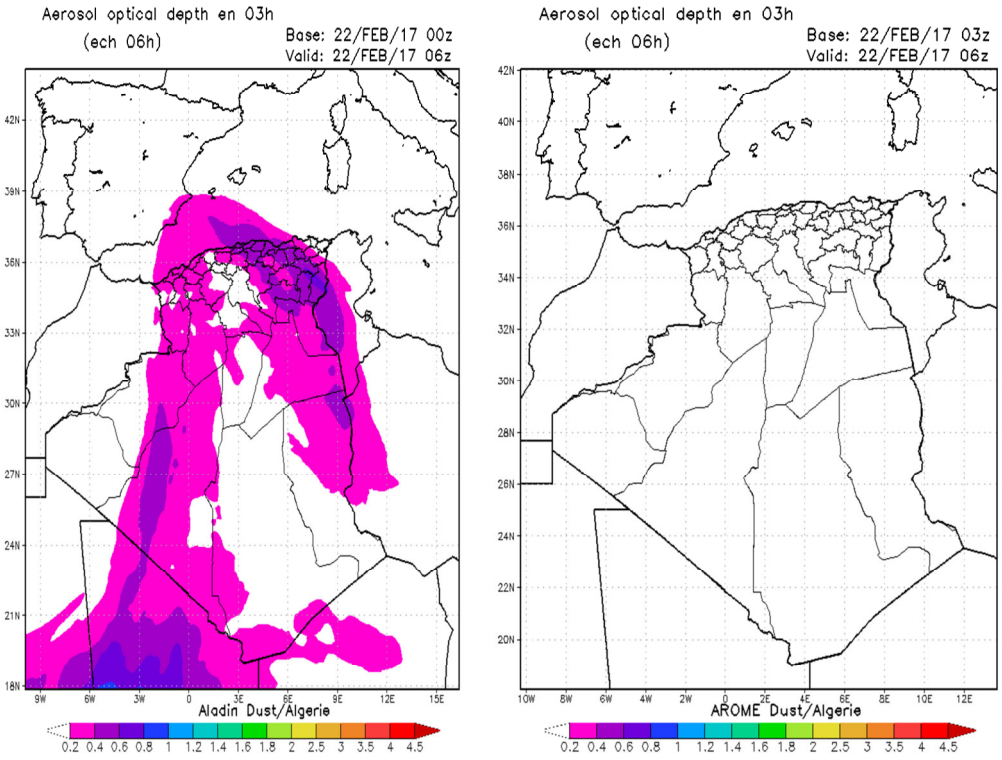


**Figure 30** : AOD prévu à 06h le22/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

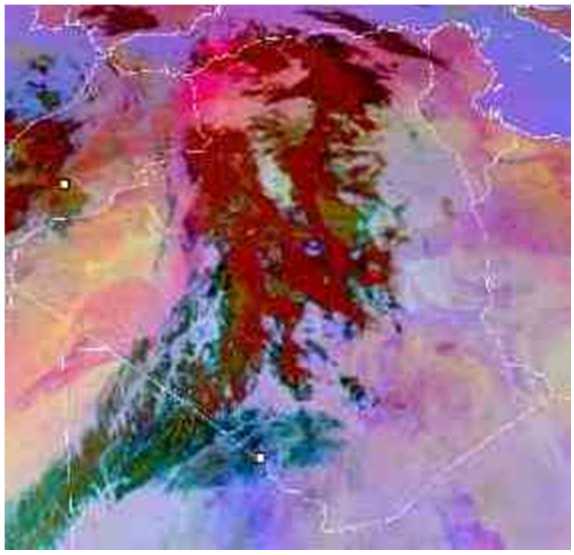

**Figure 31** : image satellite pris le 22/02/2017a 06h.

# ANEXE

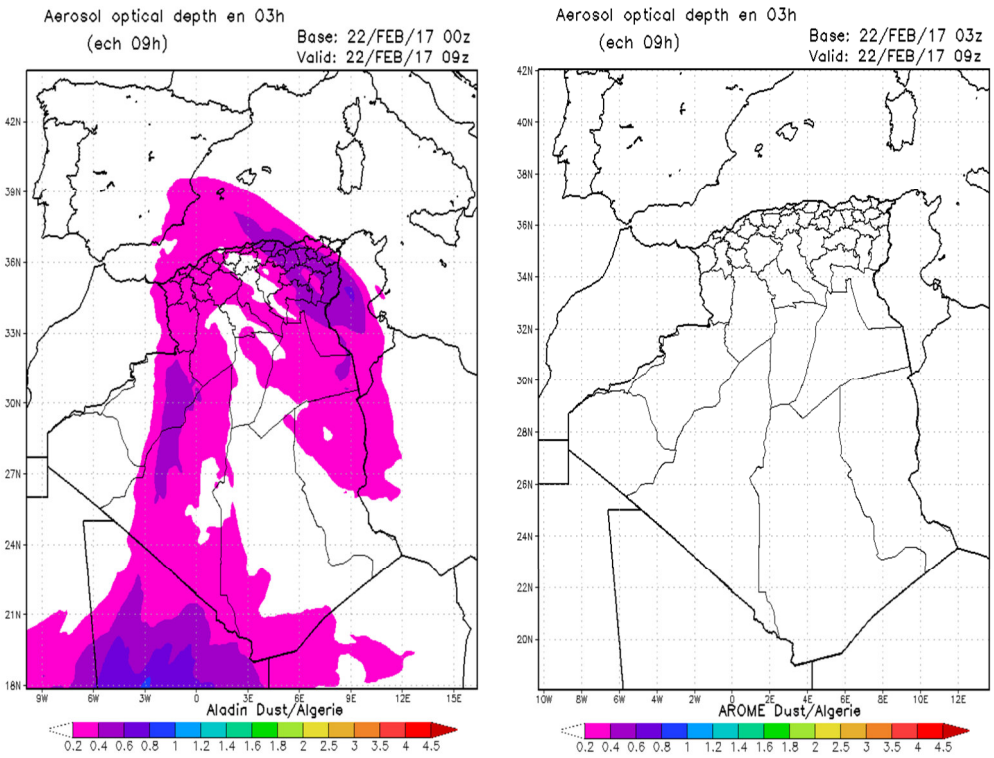


**Figure32** : AOD prévu à 09 le22/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement

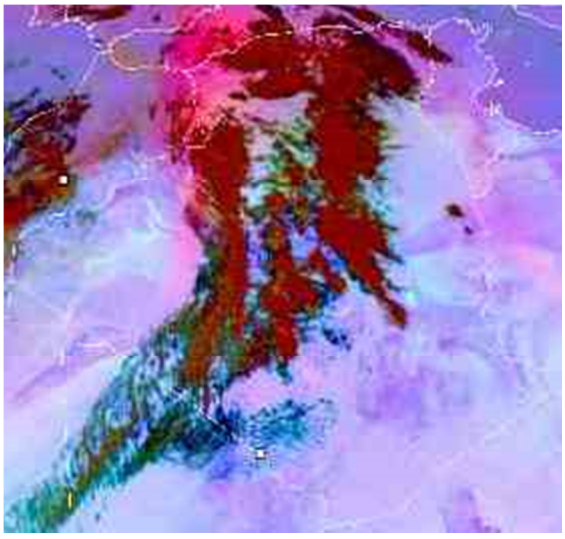

**Figure33** : image satellite pris le 22/02/2017a 09h

# ANEXE

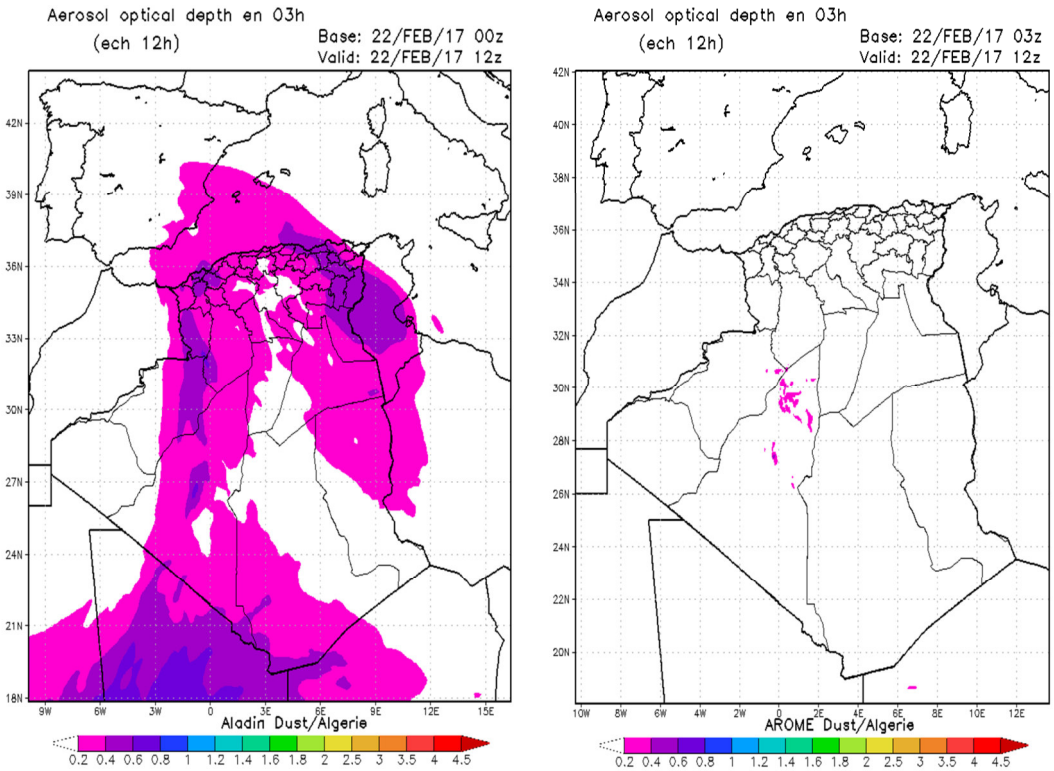


**Figure34** : AOD prévu à 12h le22/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement.

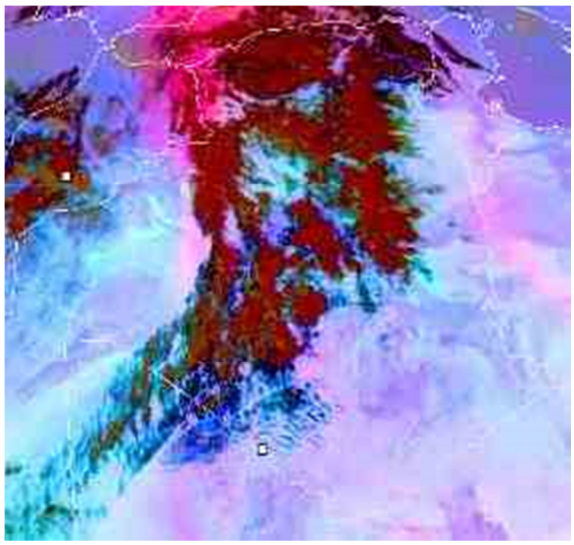

**Figure35** : image satellite pris le 22/02/2017a 12h

# ANEXE

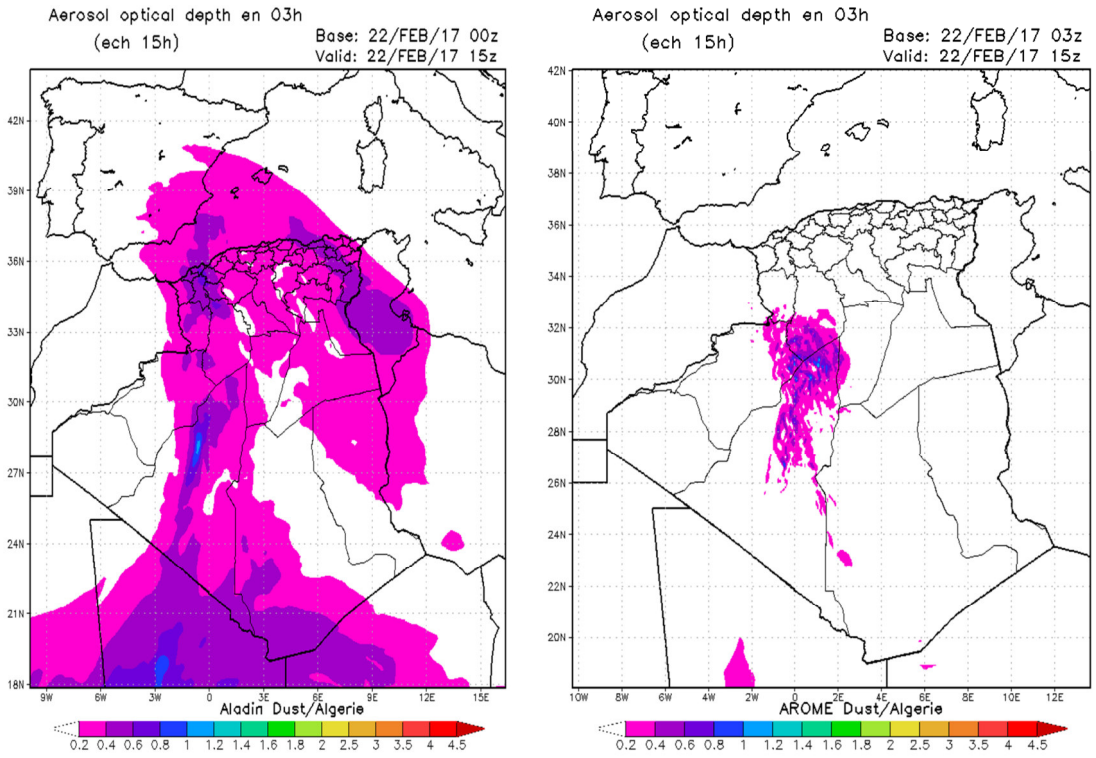


**Figure36** : AOD prévu à 15h le22/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement.

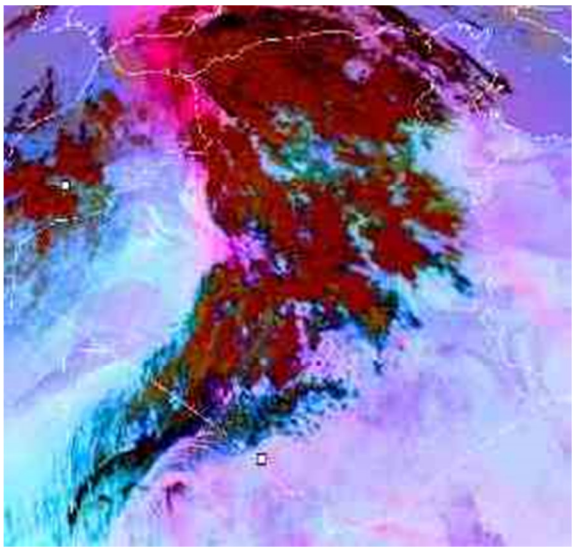

**Figure37** : image satellite pris le 22/02/2017a 15h

# ANEXE

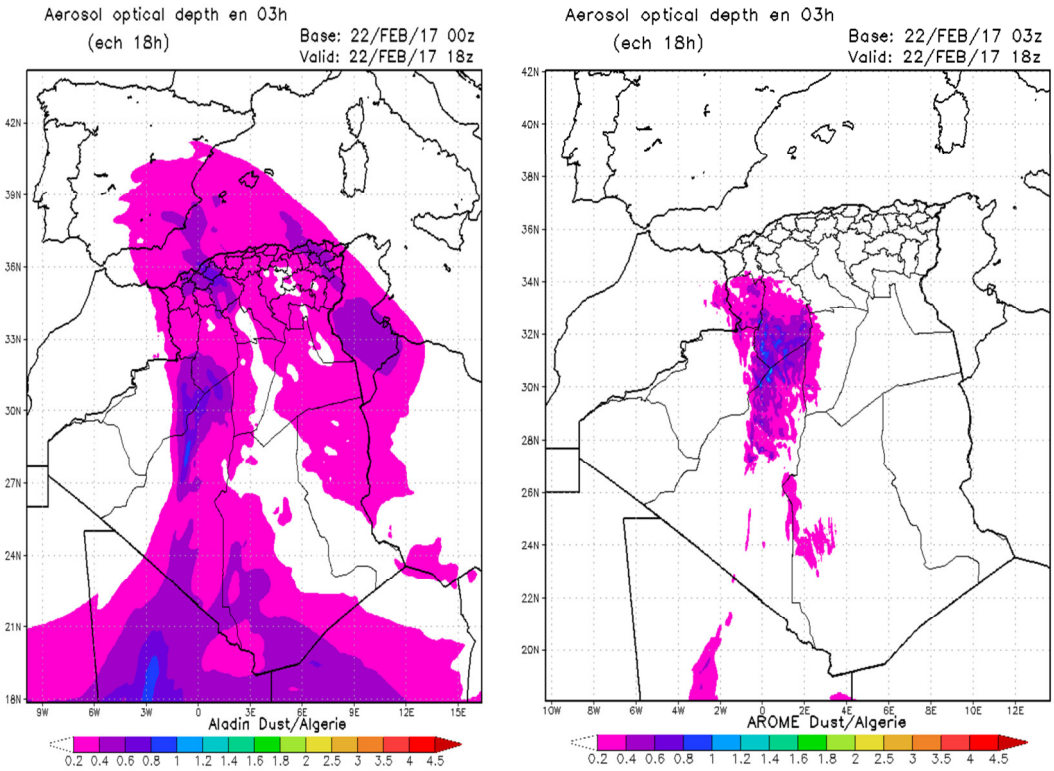


**Figure38** : AOD prévu à 15h le22/02/2017 par les modèles ALADIN- AROME respectivement.

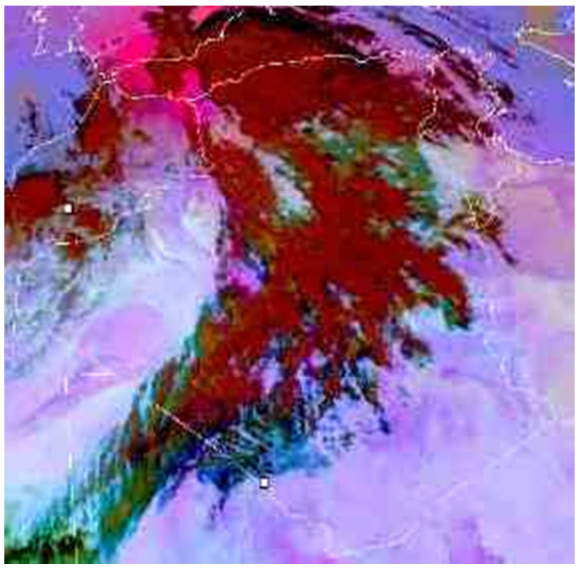

**Figure 39** : image satellite pris le 22/02/2017a 18h

# ANEXE

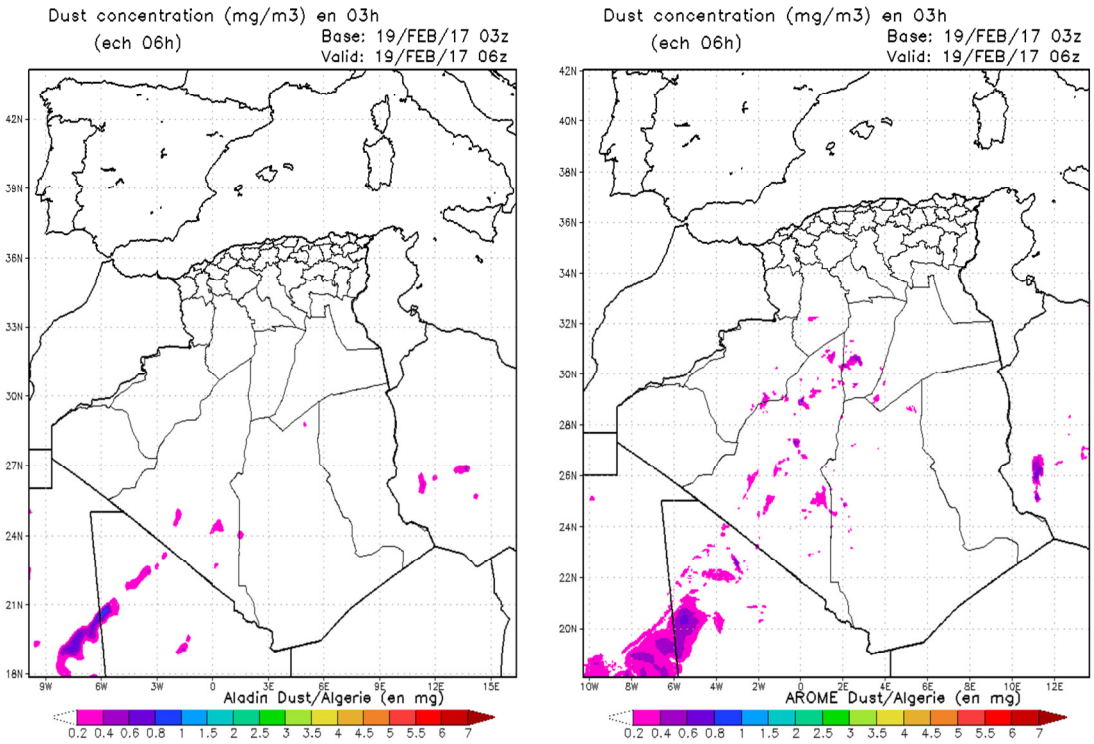


**Figure40** : concentration des poussières désertique prévue 19/02/2017 à06h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

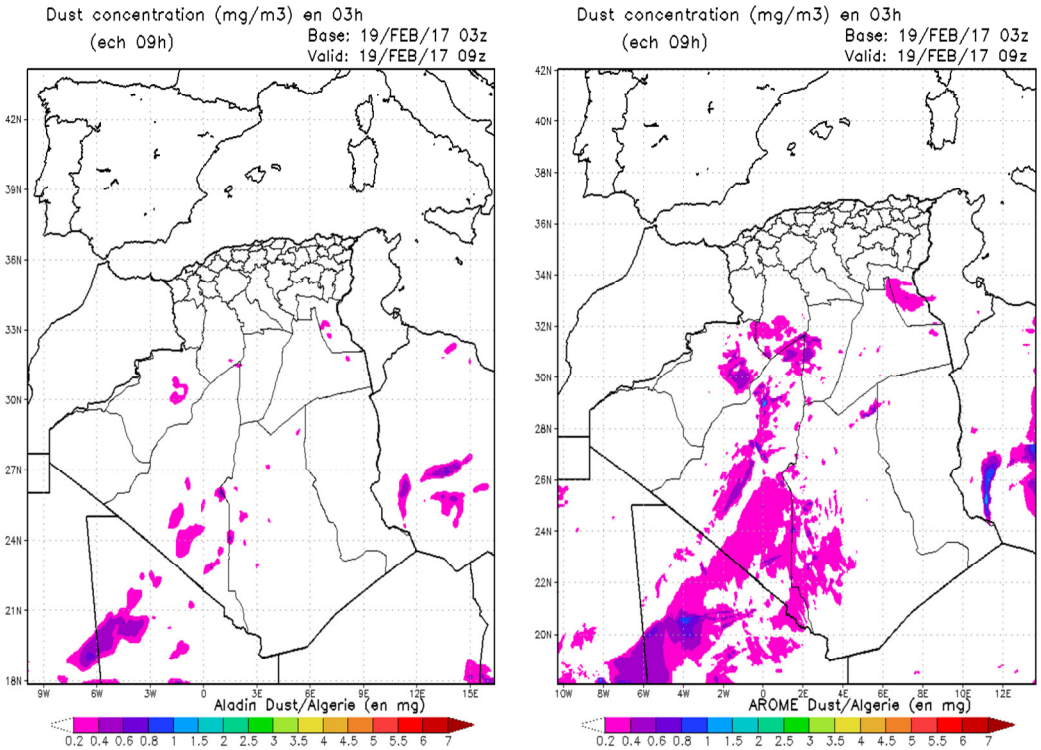


**Figure 41** : concentration des poussières désertique prévue 19/02/2017 à09h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

# ANEXE

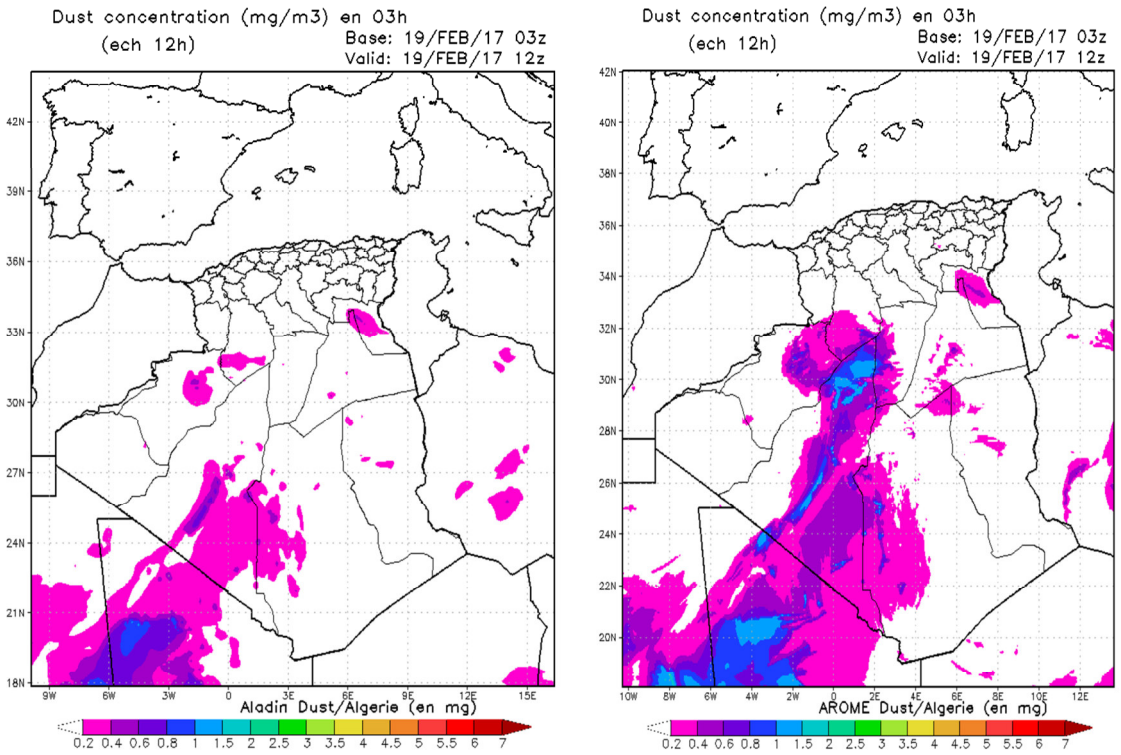


**Figure 42**: concentration des poussières désertique prévue 19/02/2017 à 12h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

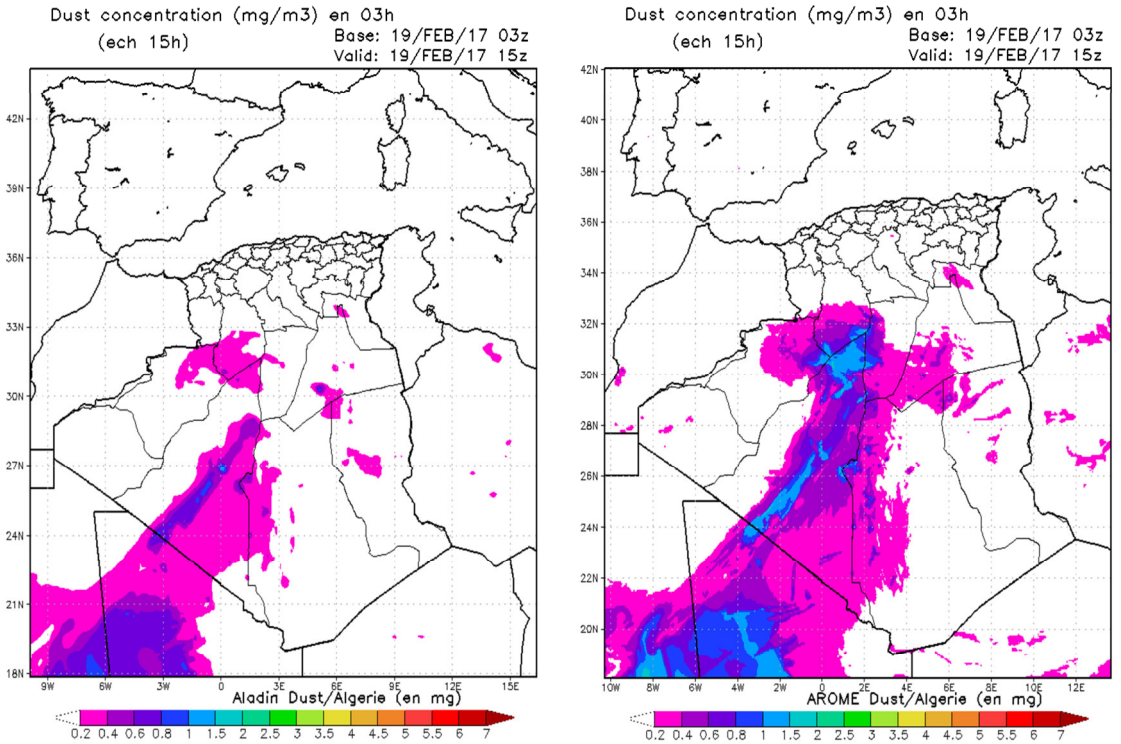


**Figure 43**: concentration des poussière désertique prévue 19/02/2017 à 15h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

# ANEXE

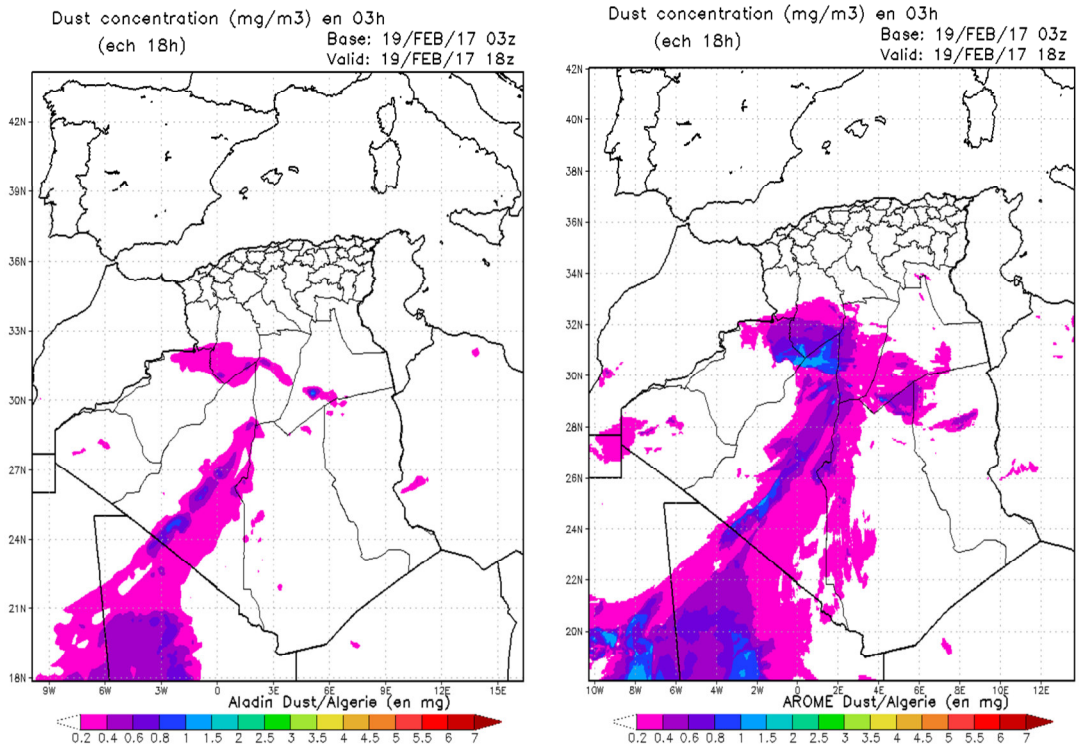


**Figure 43** : concentration des poussières désertique prévue 19/02/2017 à 18h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

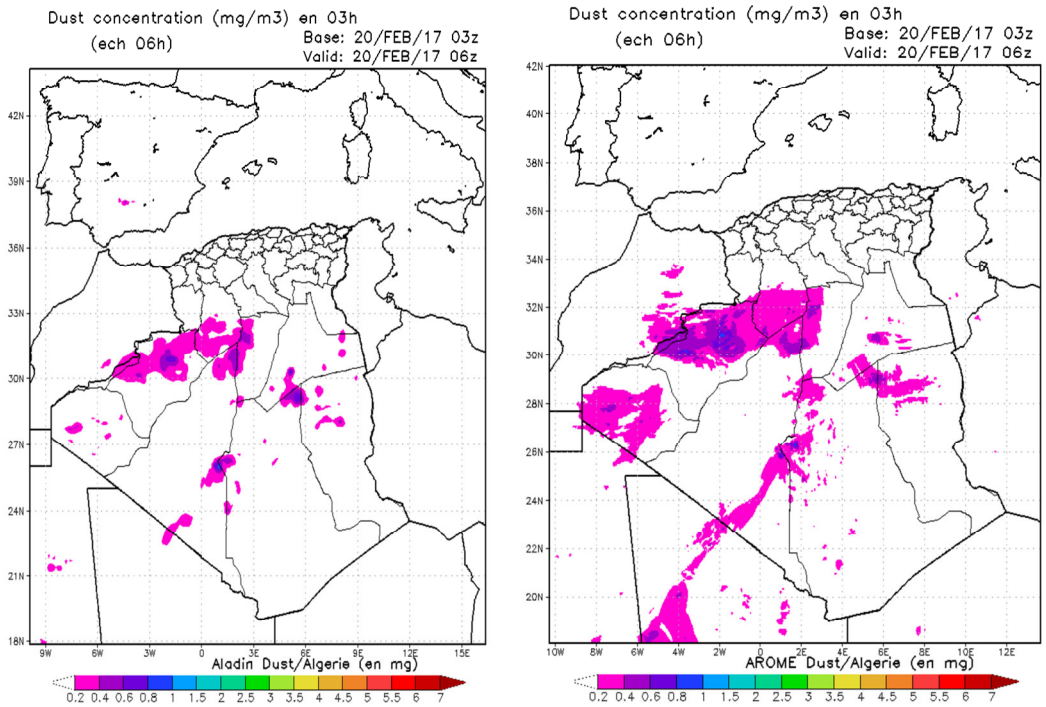


**Figure 44** : concentration des poussières désertique prévue 20/02/2017 à 06h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

# ANEXE

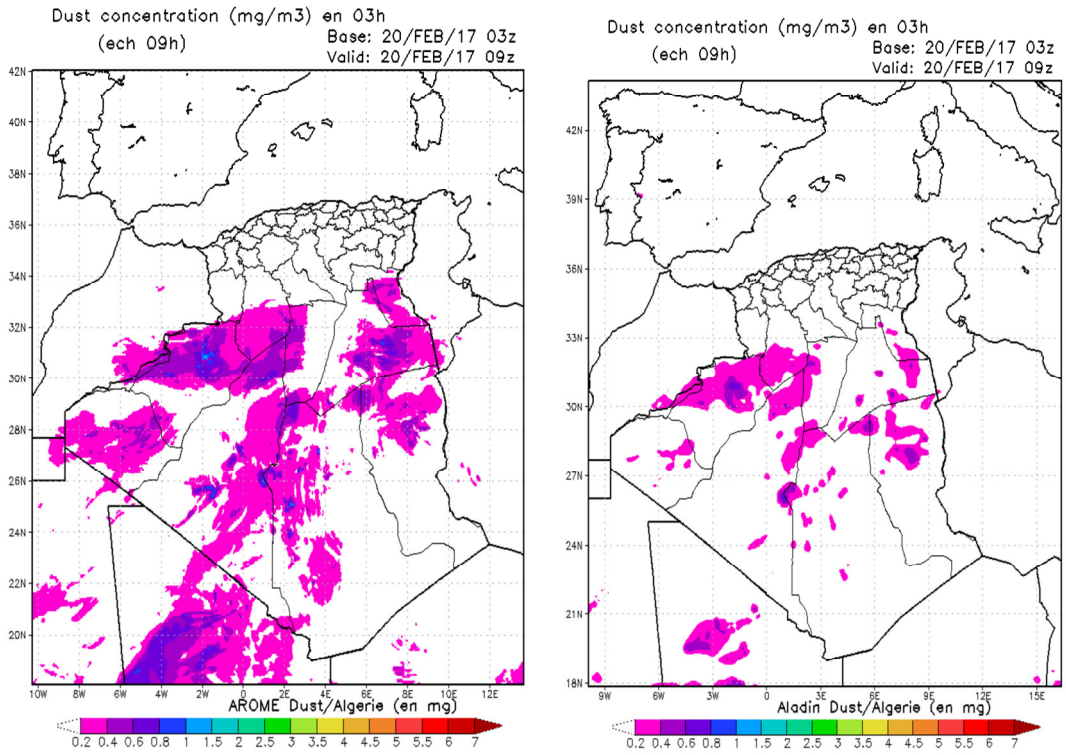


**Figure 45** : concentration des poussières désertique prévue 20/02/2017 à 09h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

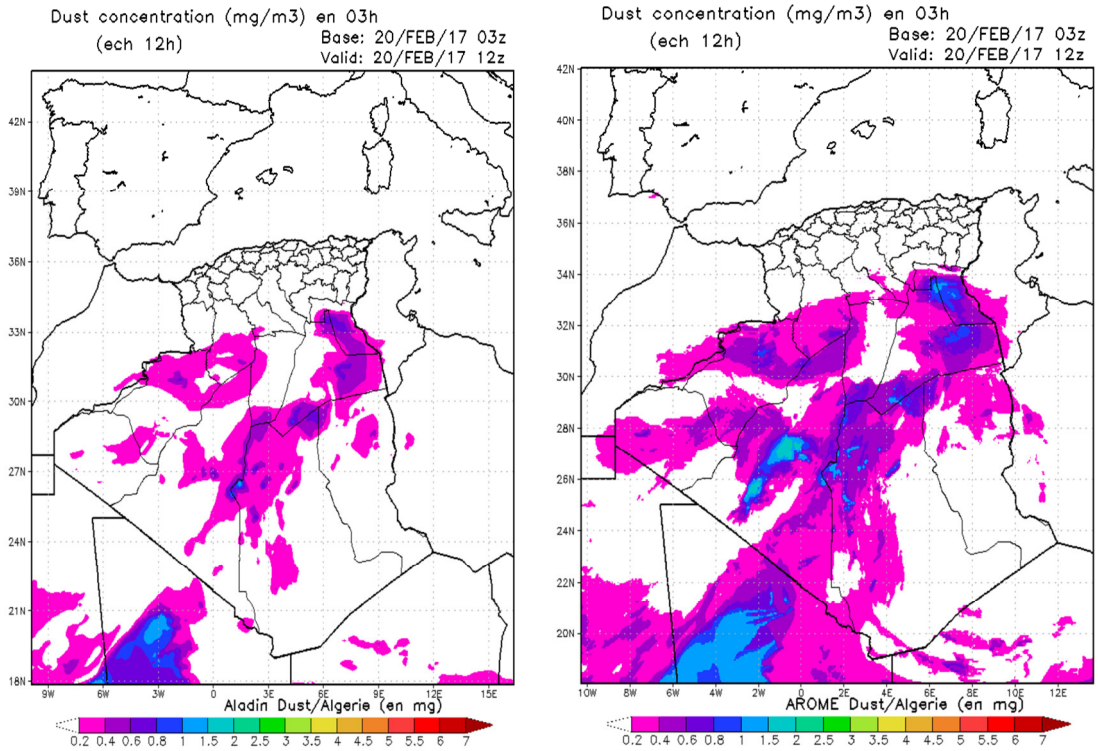


**Figure 46** : concentration des poussières désertique prévue 20/02/2017 à 12h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

# ANEXE

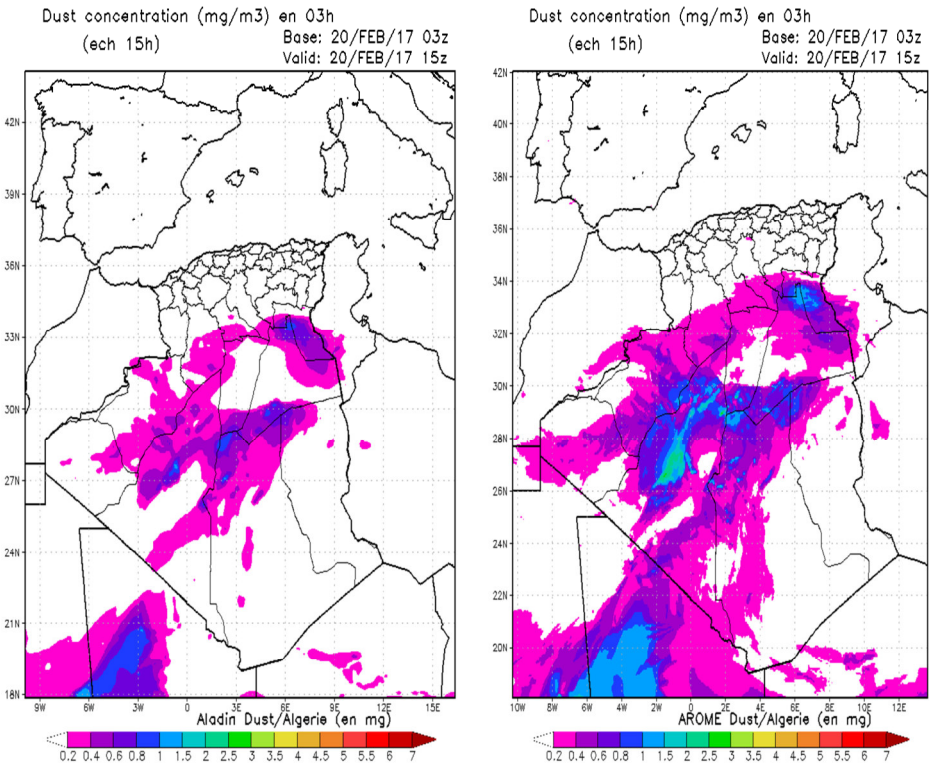


**Figure 47** : concentration des poussières désertique prévue 20/02/2017 à 15h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

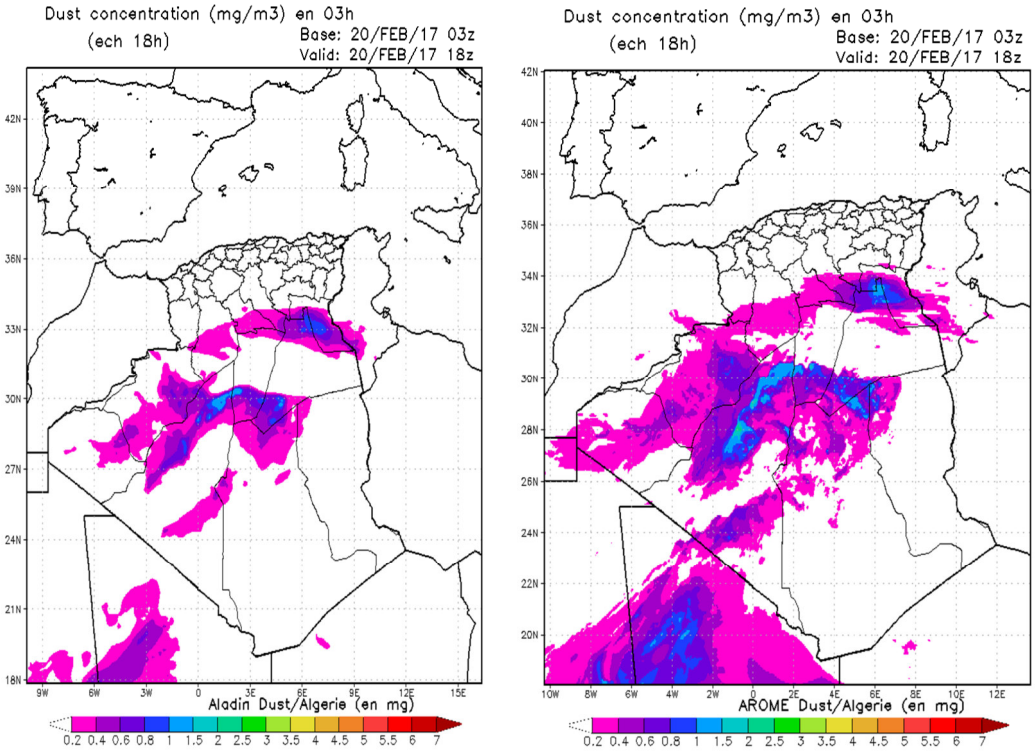


**Figure 48** : concentration des poussières désertique prévue 20/02/2017 à 18h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

# ANEXE

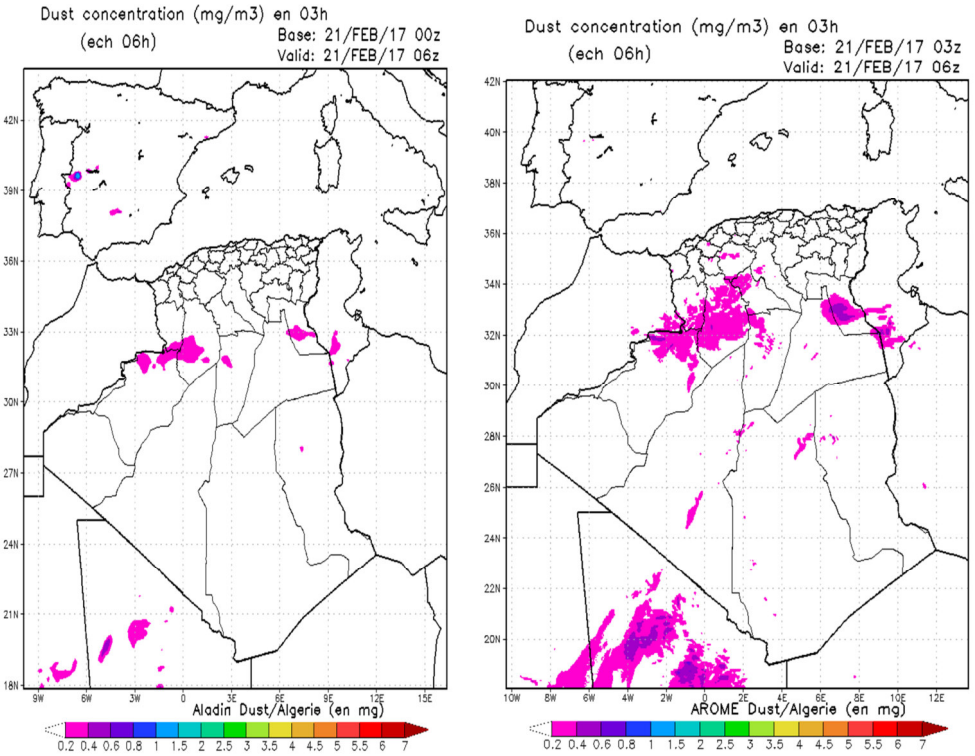


**Figure 49** : concentration des poussières désertique prévue 21/02/2017 à 06h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

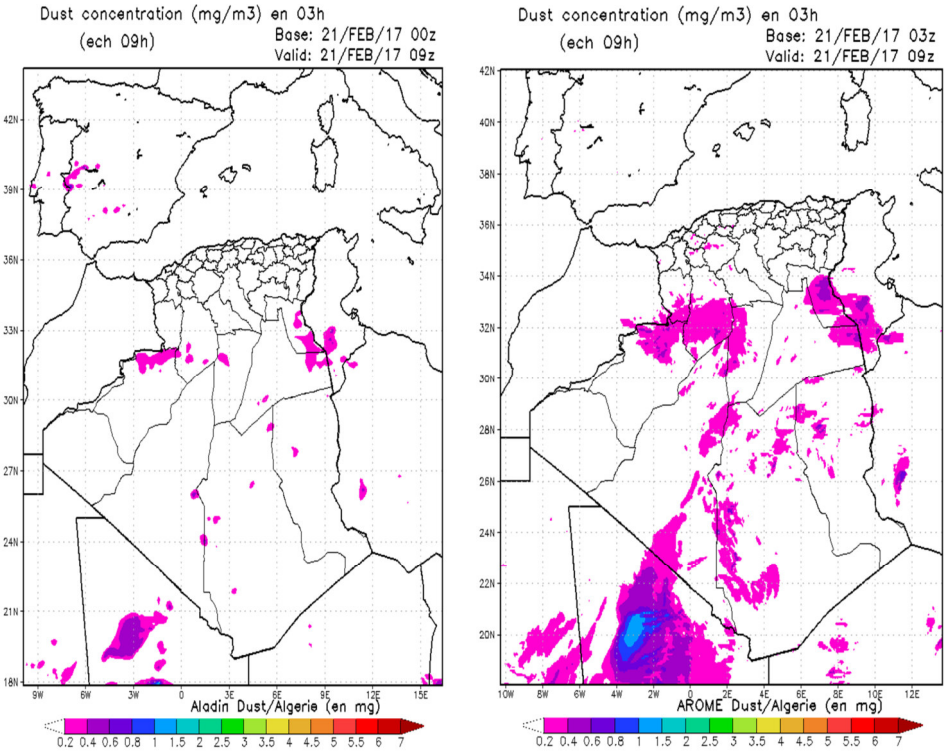


**Figure 50** : concentration des poussières désertique prévue 21/02/2017 à 09h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

# ANEXE

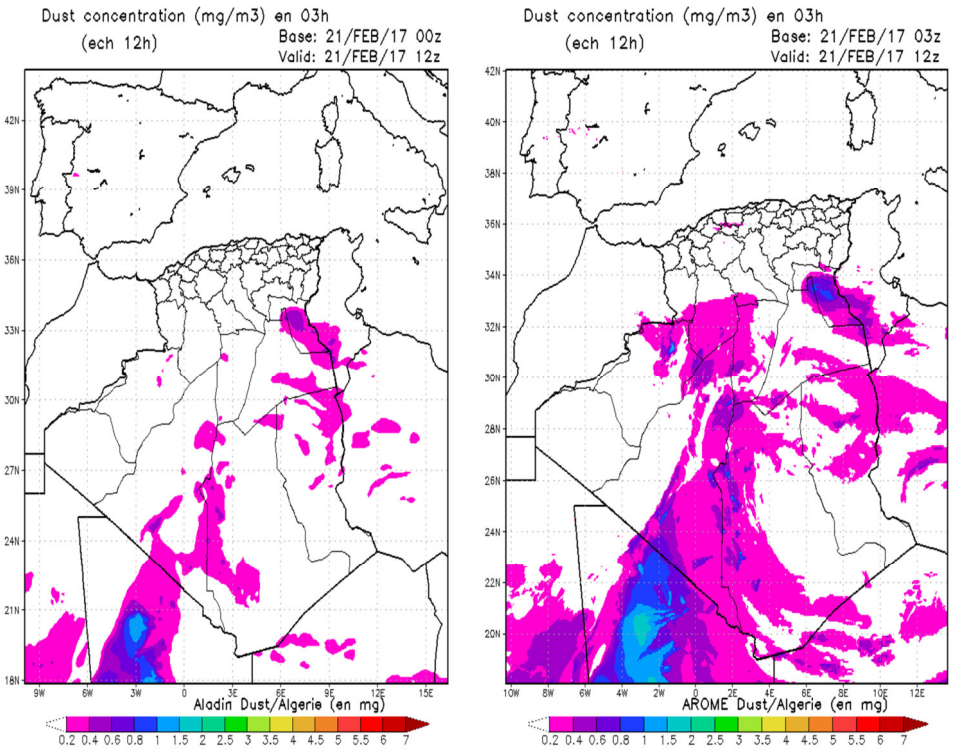


**Figure 51** : concentration des poussières désertique prévue 21/02/2017 à 12h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

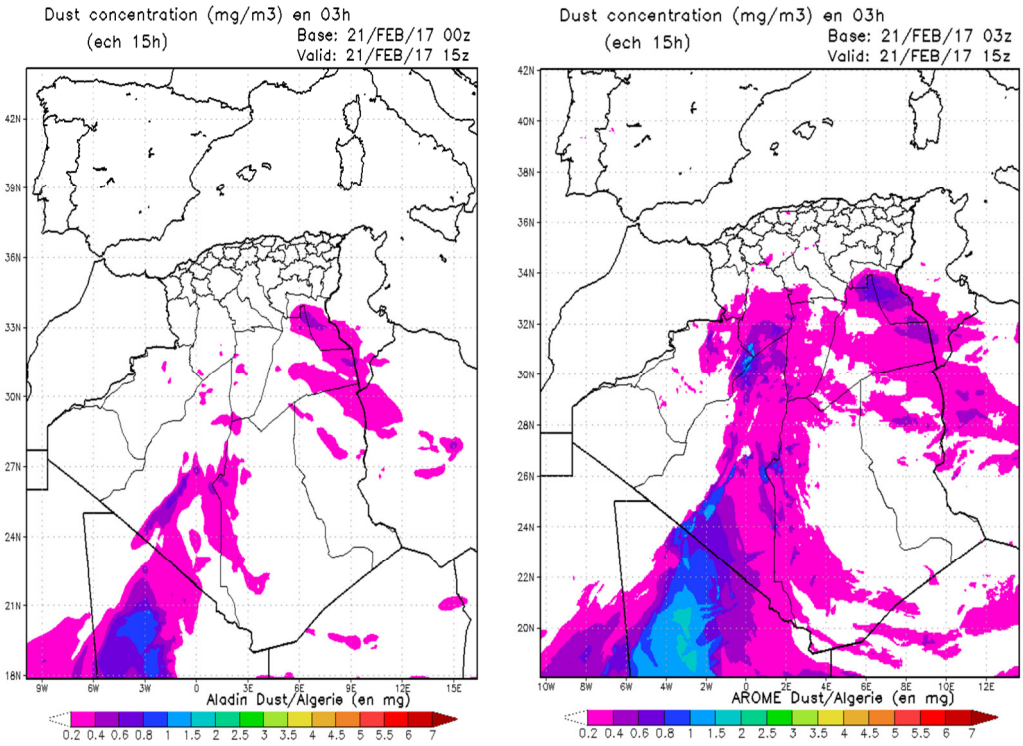


**Figure 52** : concentration des poussières désertique prévue 21/02/2017 à 15h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

# ANEXE

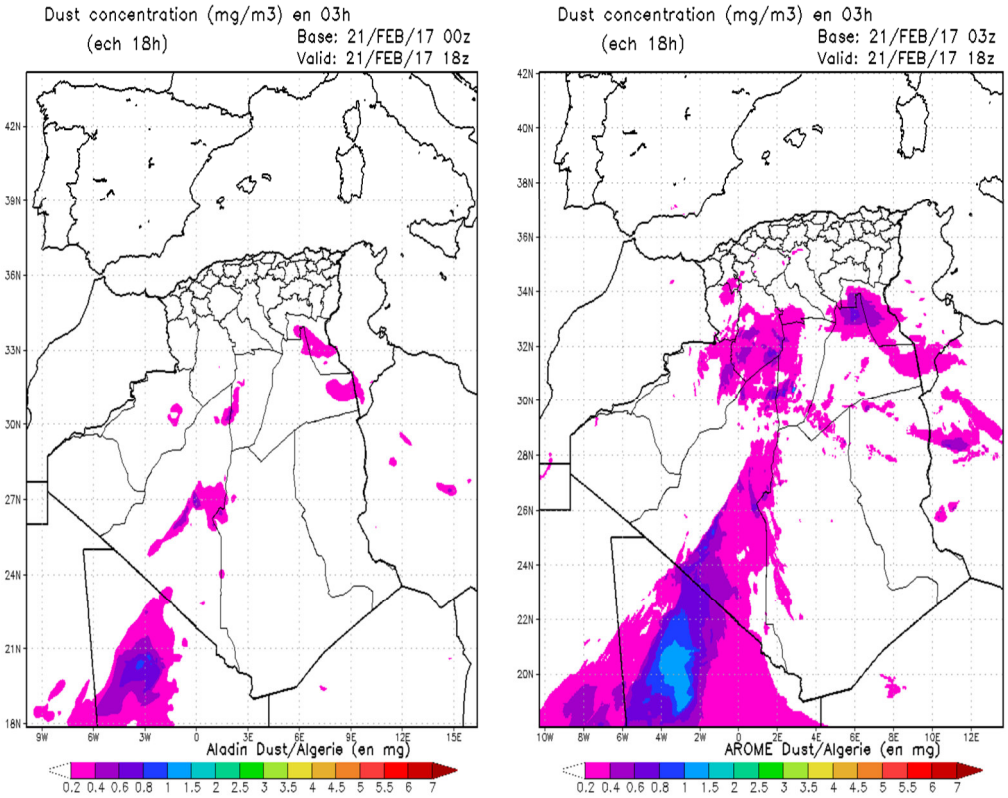


**Figure 53** : concentration des poussières désertique prévue 21/02/2017 à 18h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

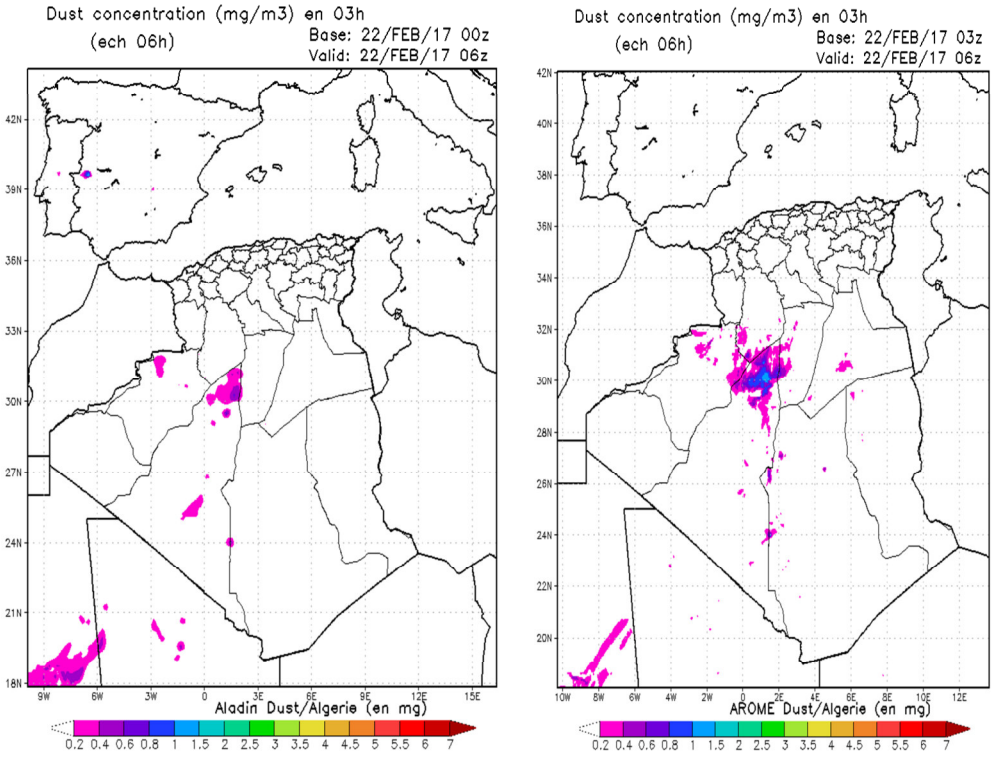


**Figure 54** : concentration des poussières désertique prévue 22/02/2017 à 06h par les modèles ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

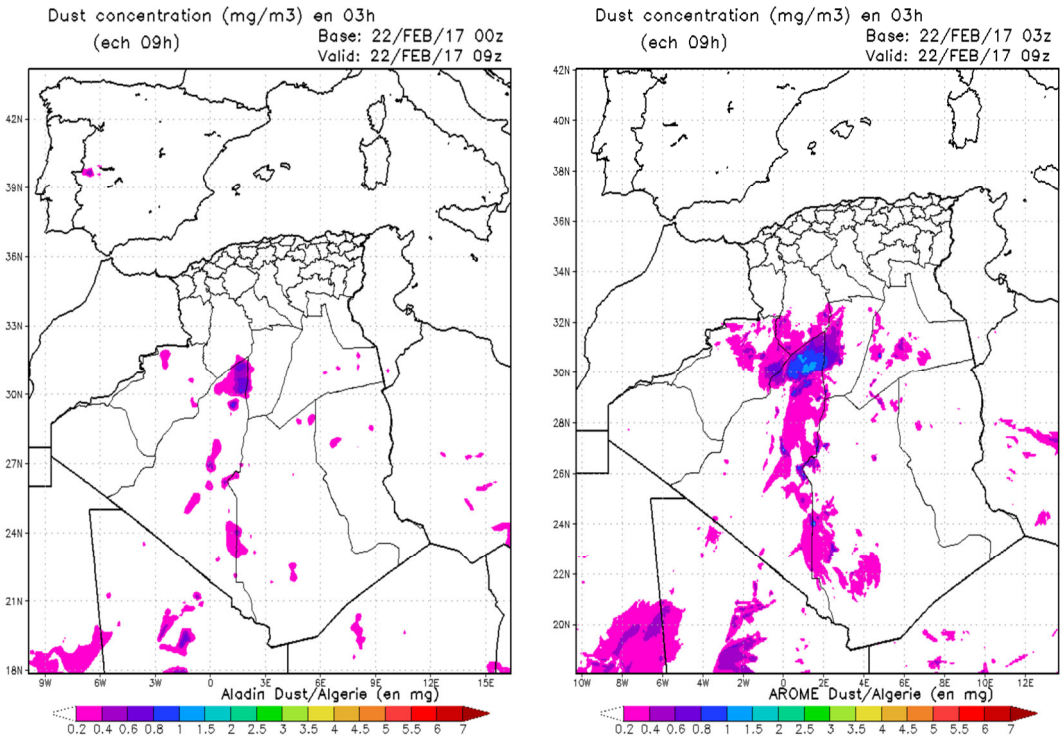


**Figure55** : concentration des poussières désertique prévue 22/02/2017 à 09h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

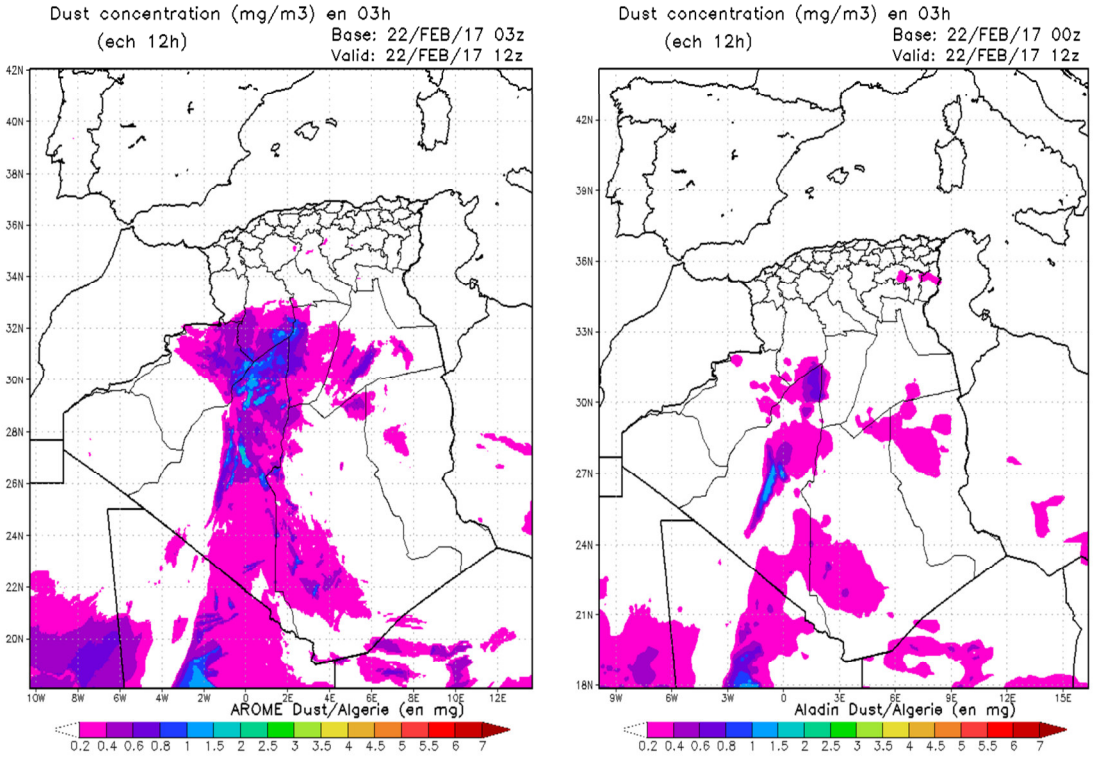


**Figure 56**: concentration des poussières désertique prévue 22/02/2017 à 12h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

# ANEXE

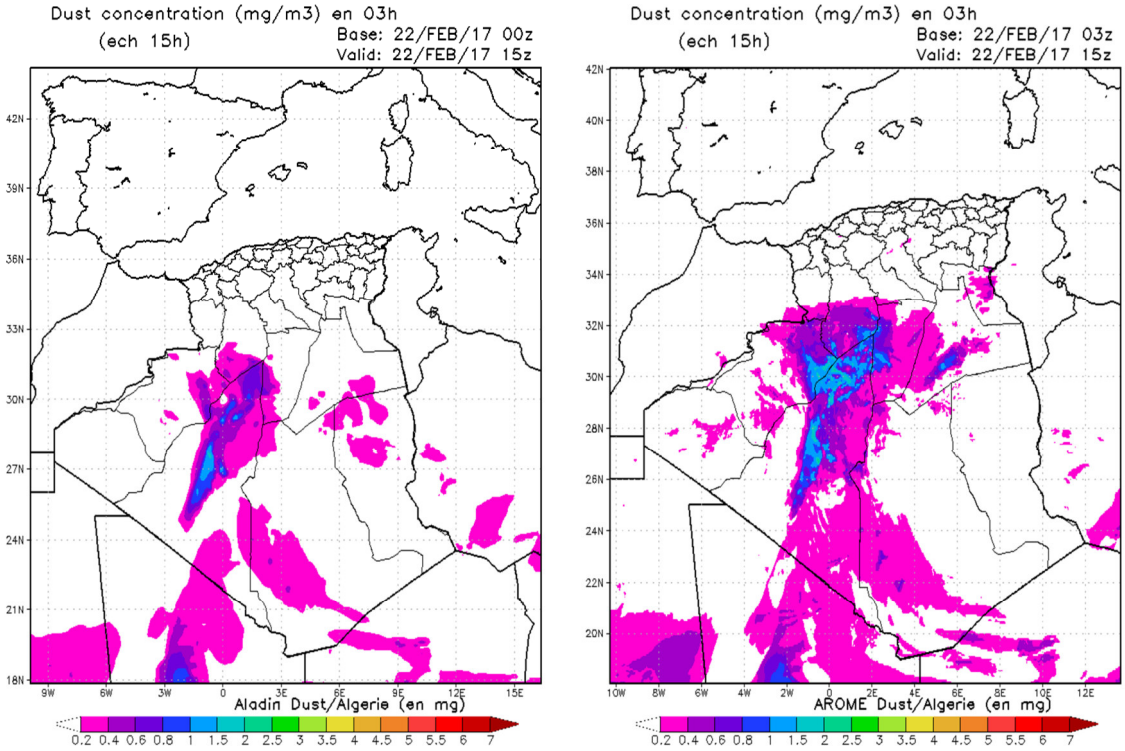


**Figure 57** : concentration des poussières désertique prévue 22/02/2017 à 15h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

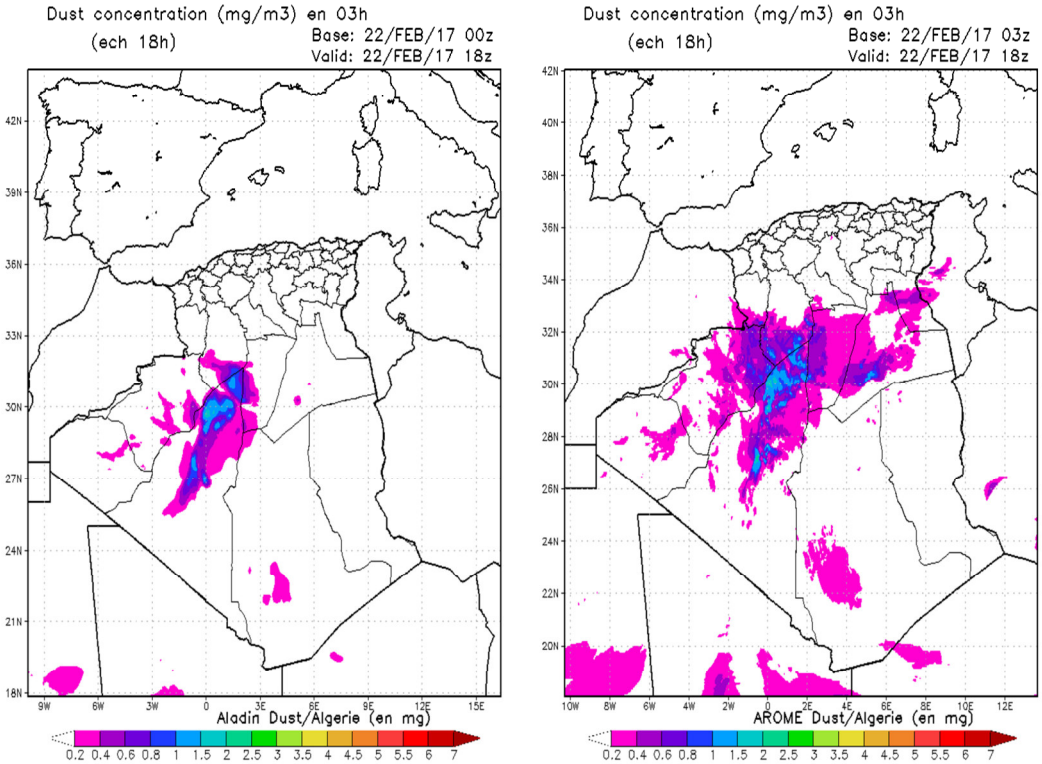


**Figure 58** : concentration des poussières désertique prévue 22/02/2017 à 18h par les modèles ALADIN-AROME respectivement.

# ANEXE

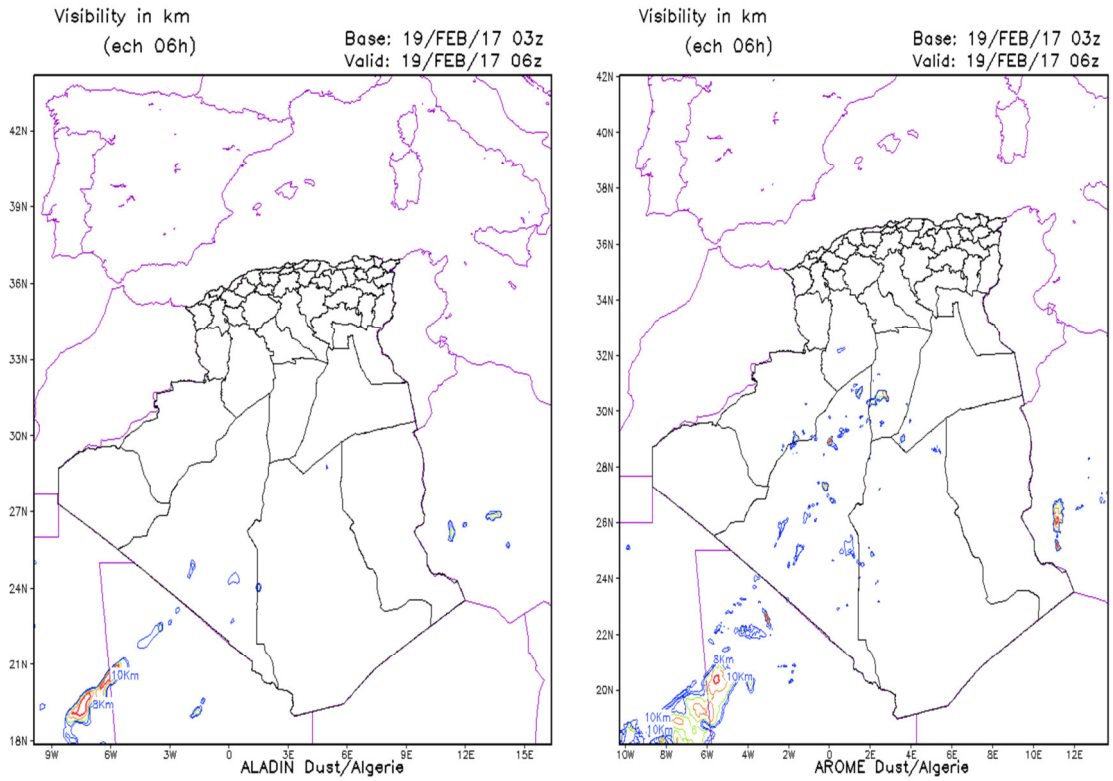


**Figure59** : visibilité prévu le 19/02/2017 à 06h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

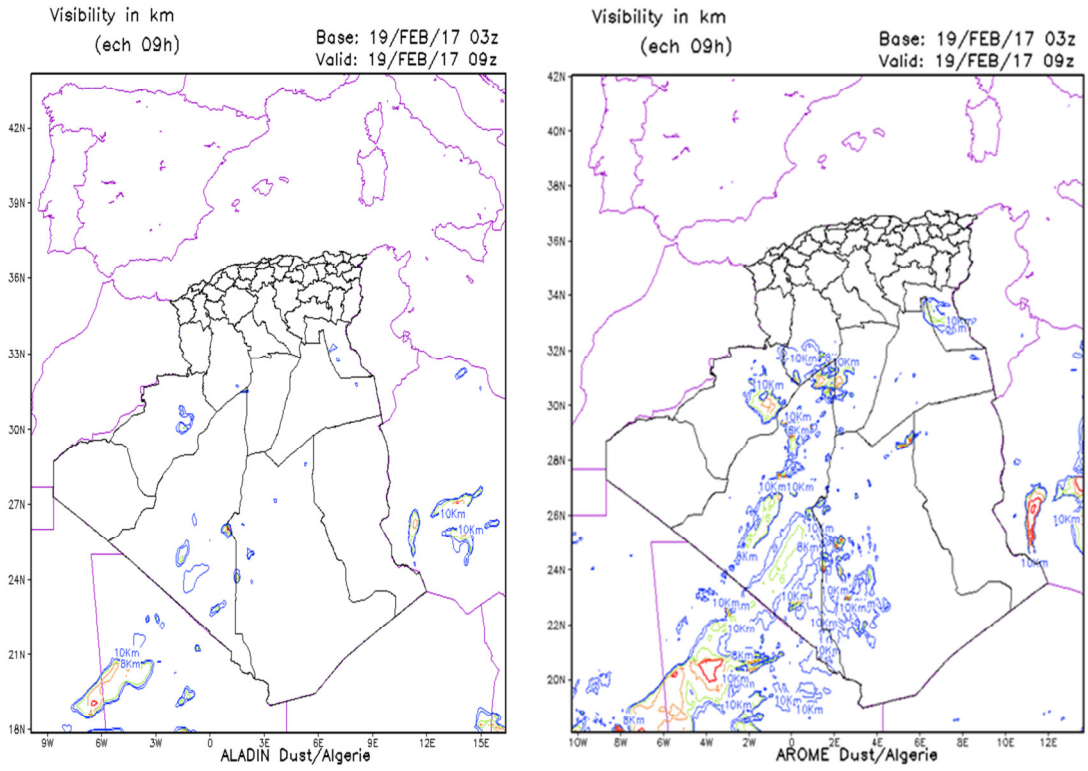


**Figure60** : visibilité prévu le 19/02/2017 à 09h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

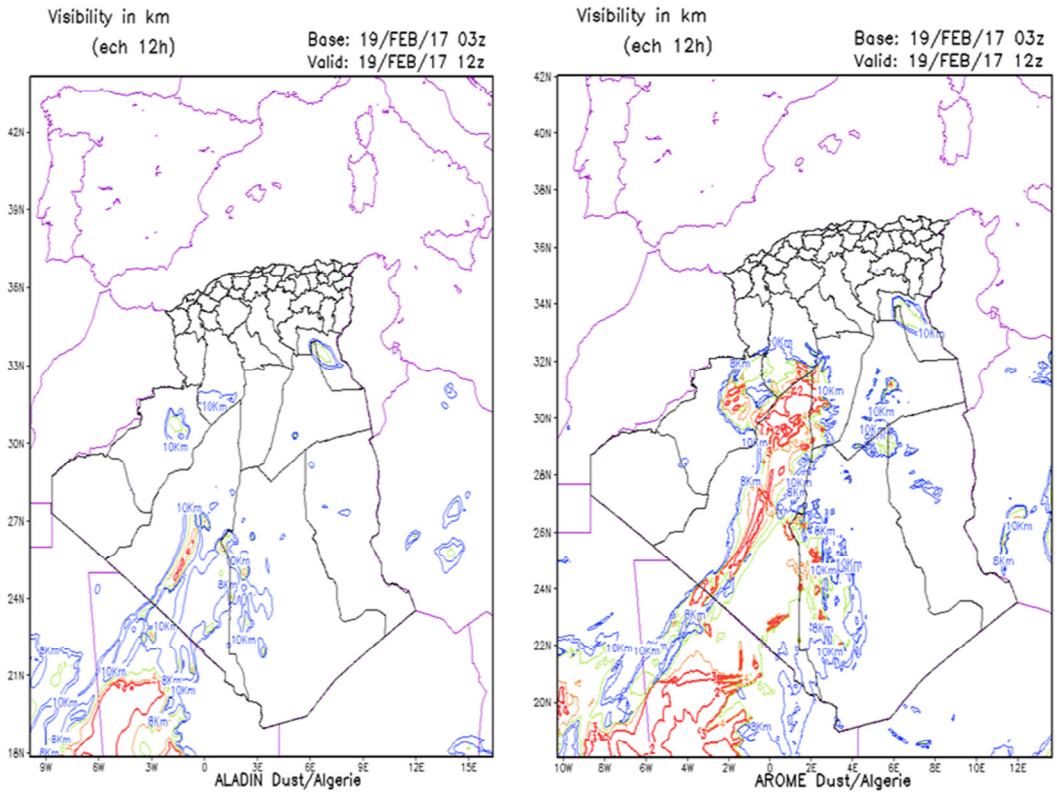


**Figure61** : visibilité prévu le 19/02/2017 à 12h par les modèles ALADIN-AROME respectivement

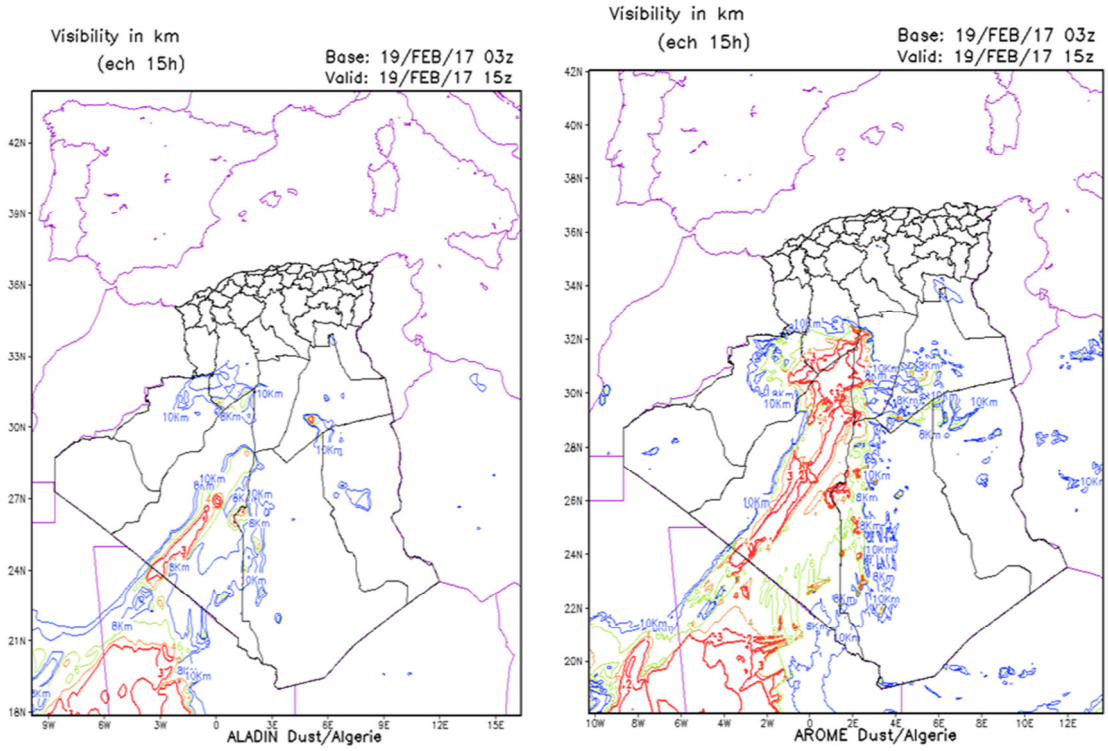


**Figure62** : visibilité prévu le 19/02/2017 à 15h par les modèles ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

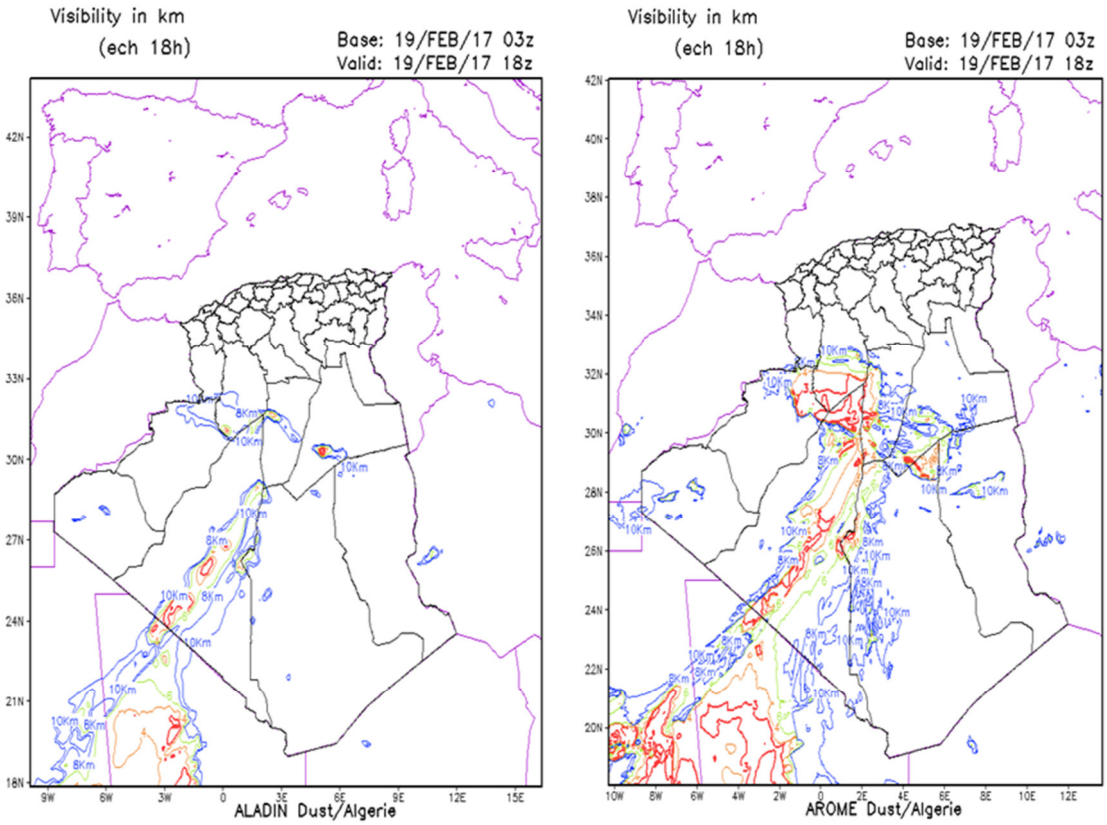


**Figure63** : visibilité prévu le 19/02/2017 à 18h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

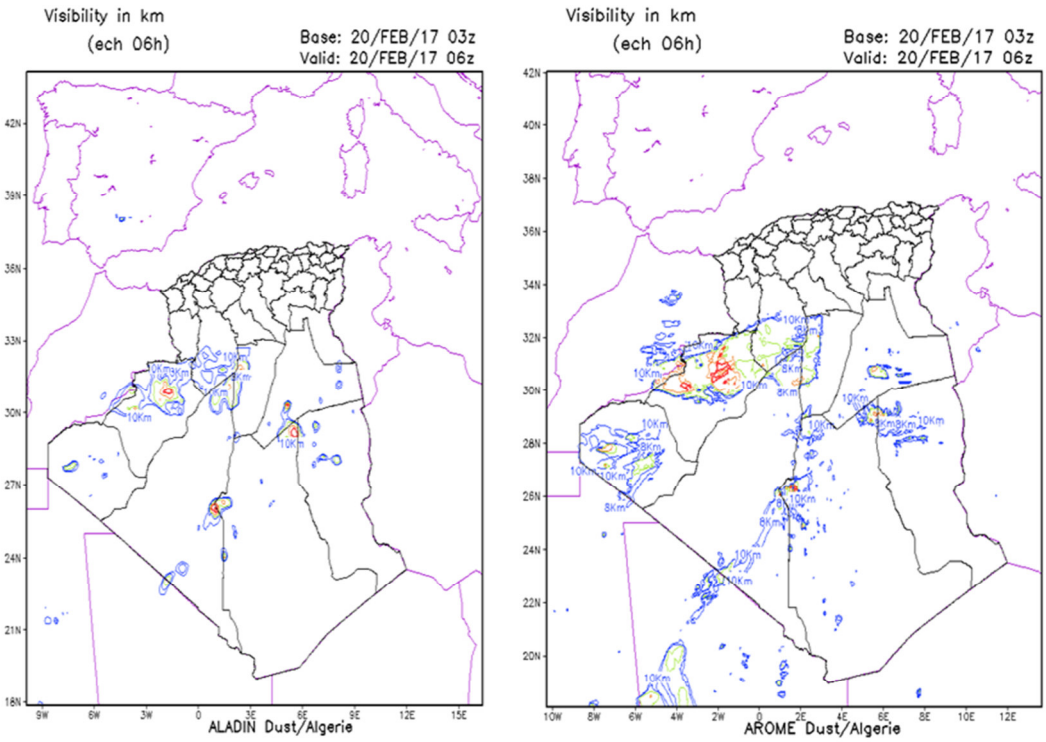


**Figure64** : visibilité prévu le 20/02/2017 à 06h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

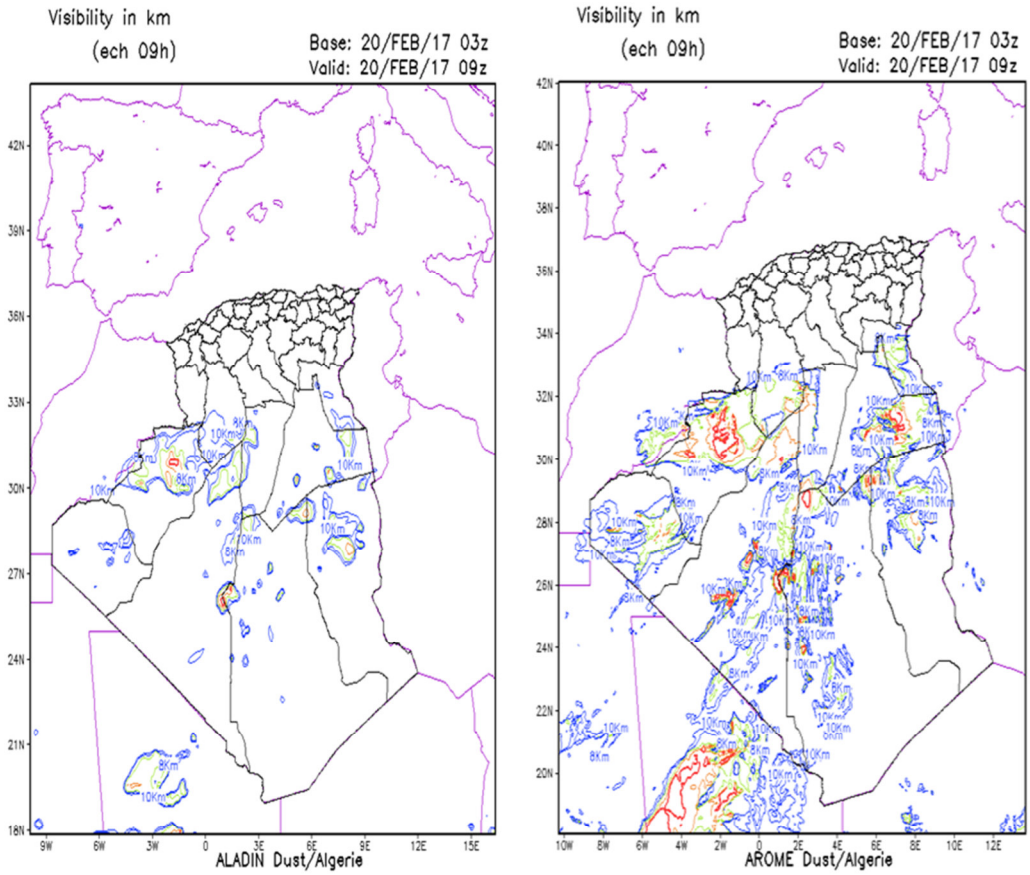


**Figure65**: visibilité prévu le 20/02/2017 à 09h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

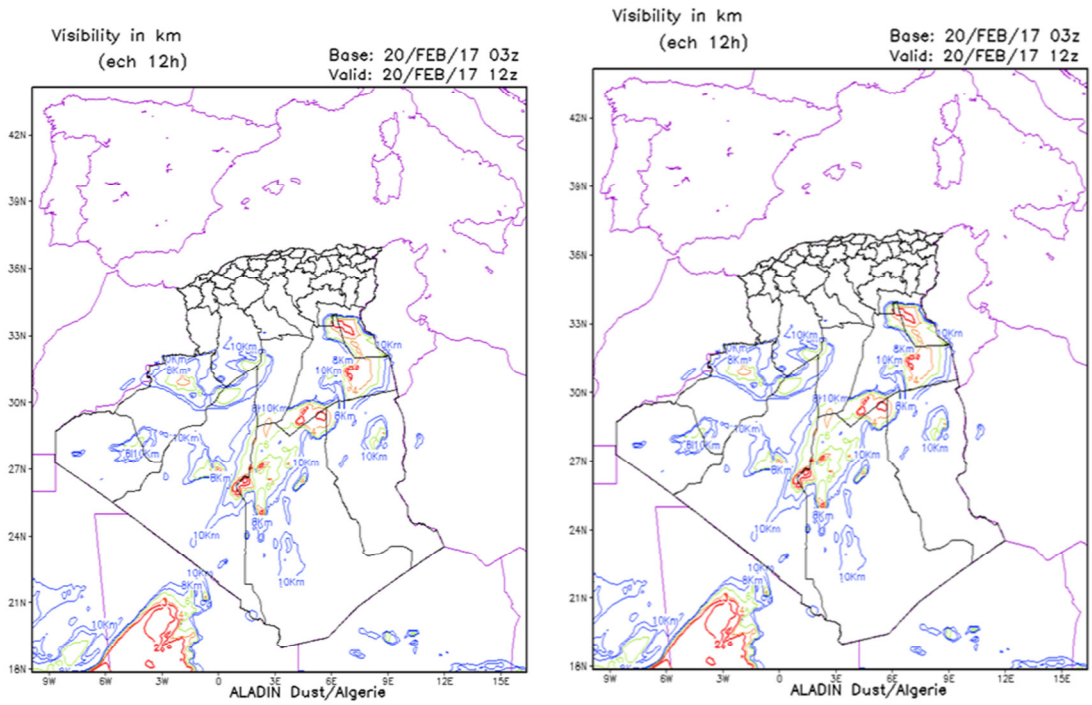


**Figure66**: visibilité prévu le 20/02/2017 à 12h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

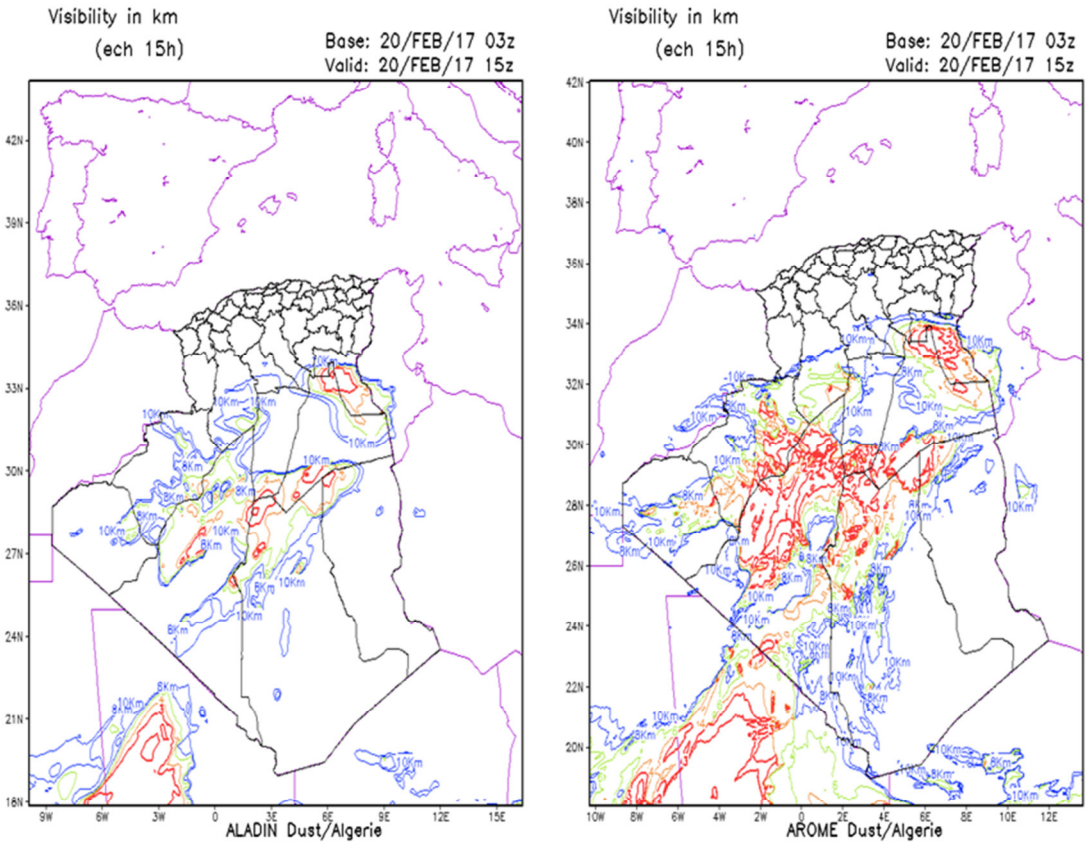


**Figure67**: visibilité prévu le 20/02/2017 à 15h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

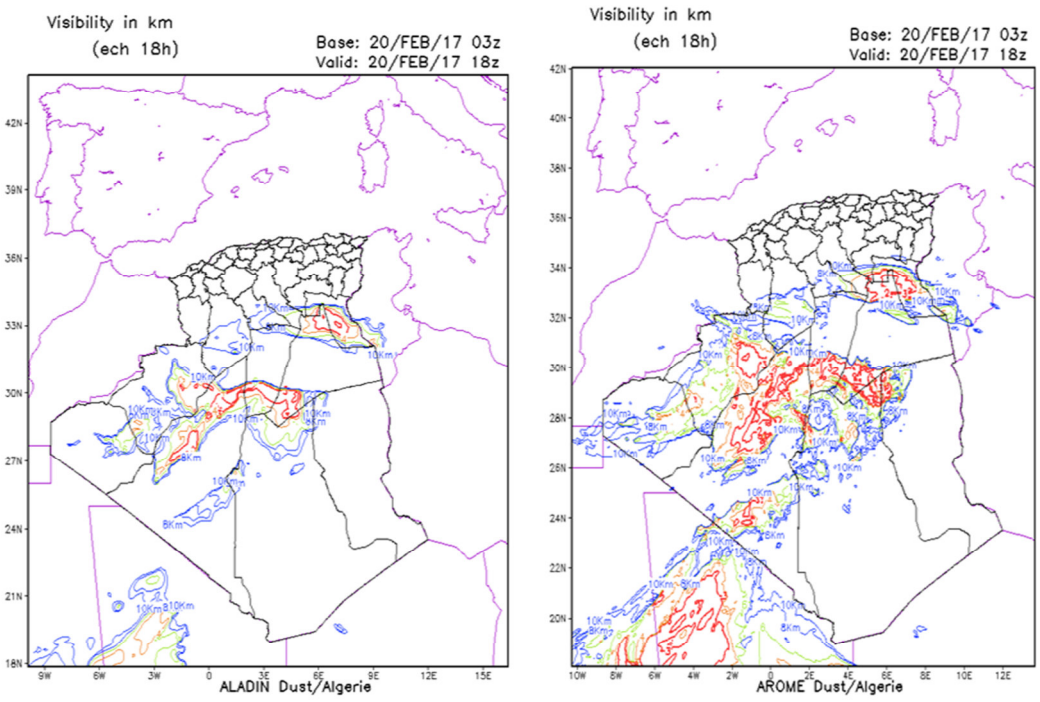


**Figure68**: visibilité prévu le 20/02/2017 à 18h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

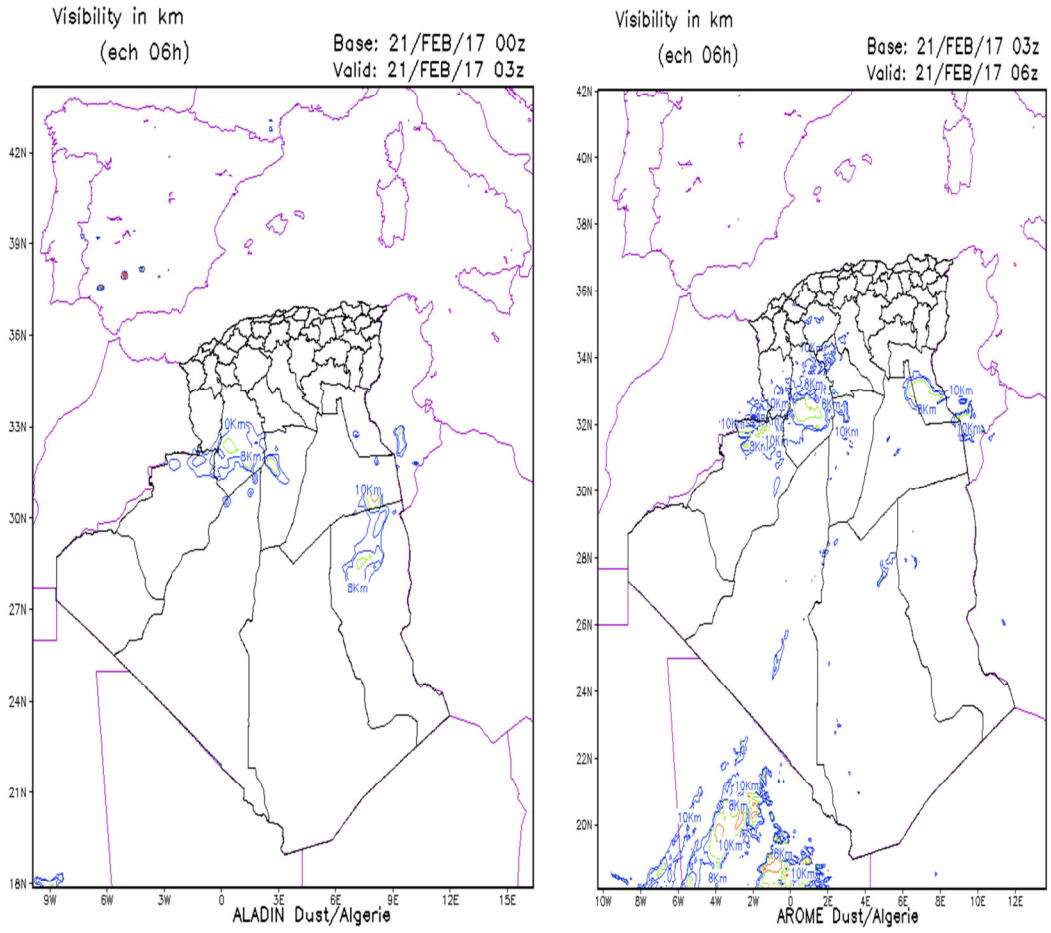


**Figure69**: visibilité prévu le 21/02/2017 à 06h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

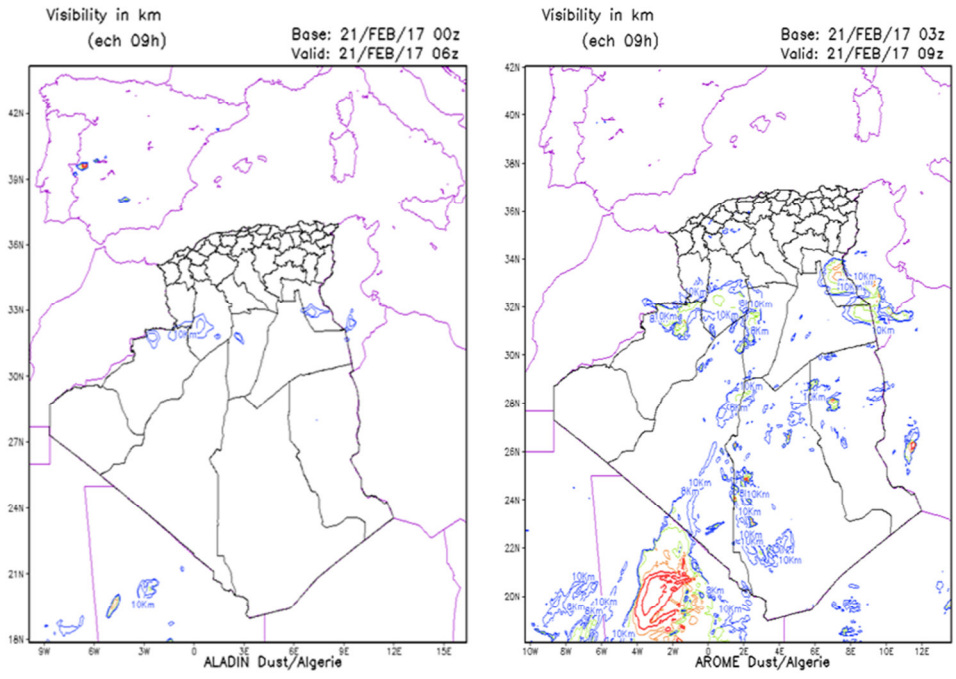


**Figure70**: visibilité prévu le 21/02/2017 à 09h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

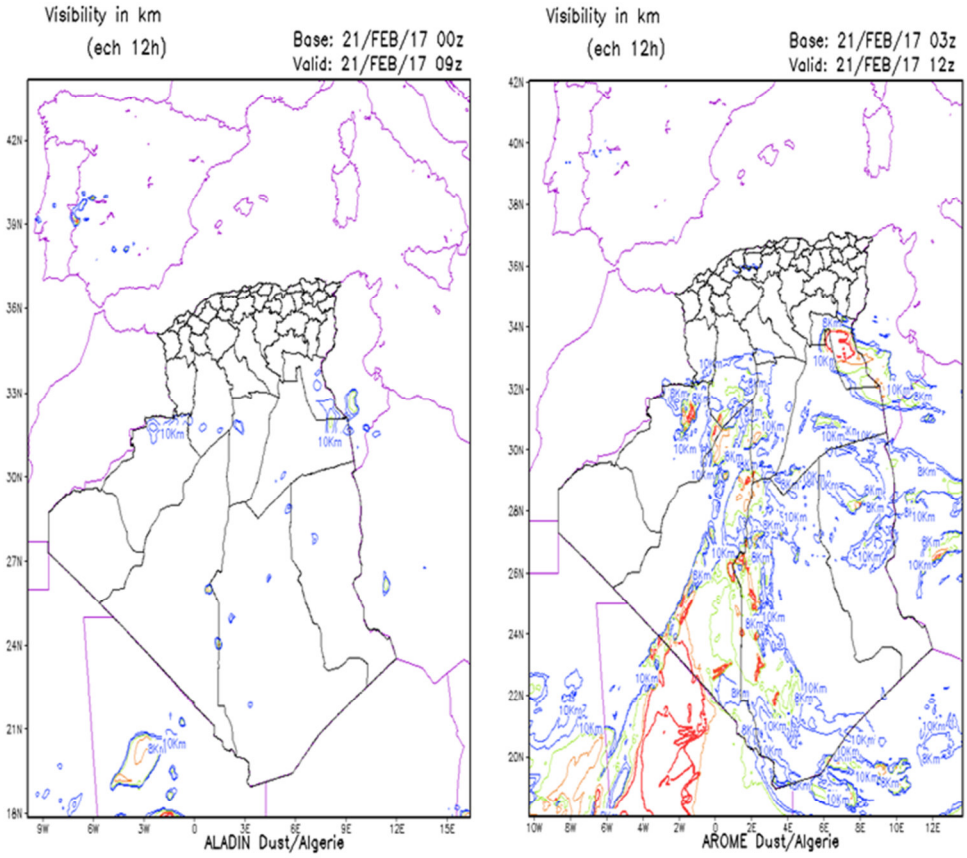


**Figure71**: visibilité prévu le 21/02/2017 à 12h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

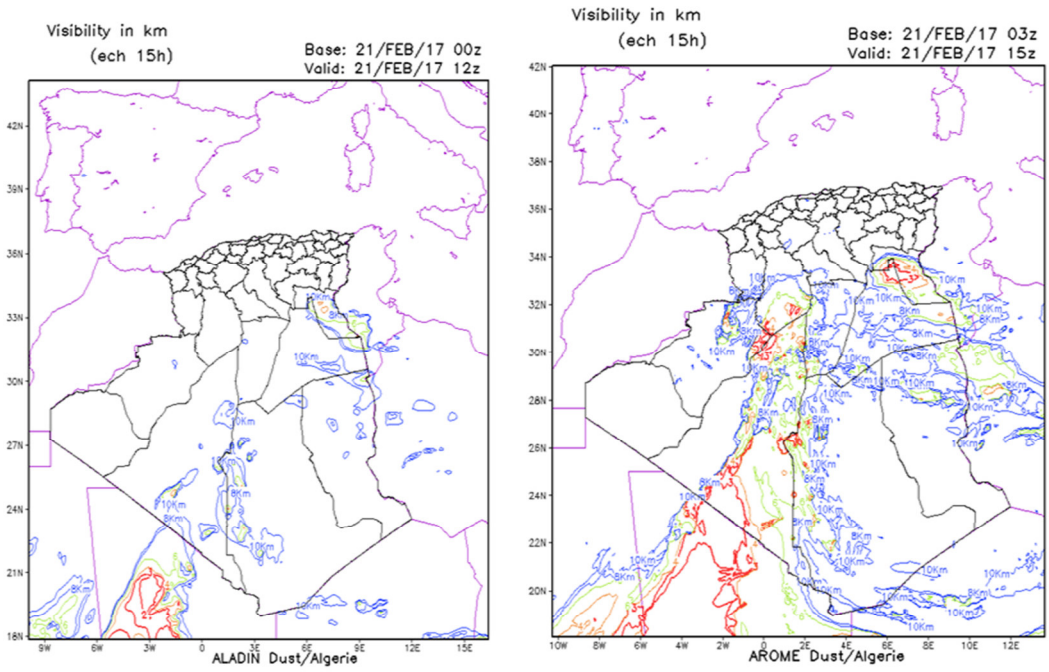


**Figure72**: visibilité prévu le 21/02/2017 à 15h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

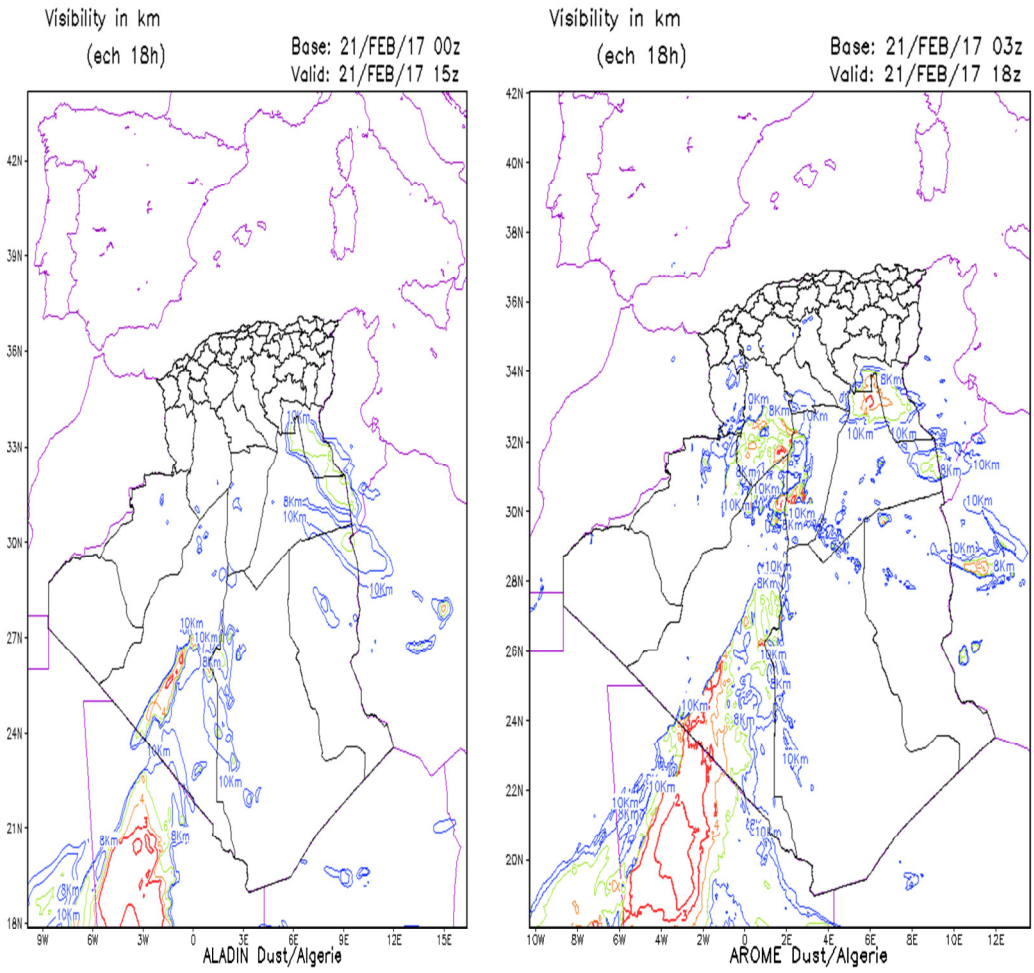


**Figure73** : visibilité prévu le 21/02/2017 à 18h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

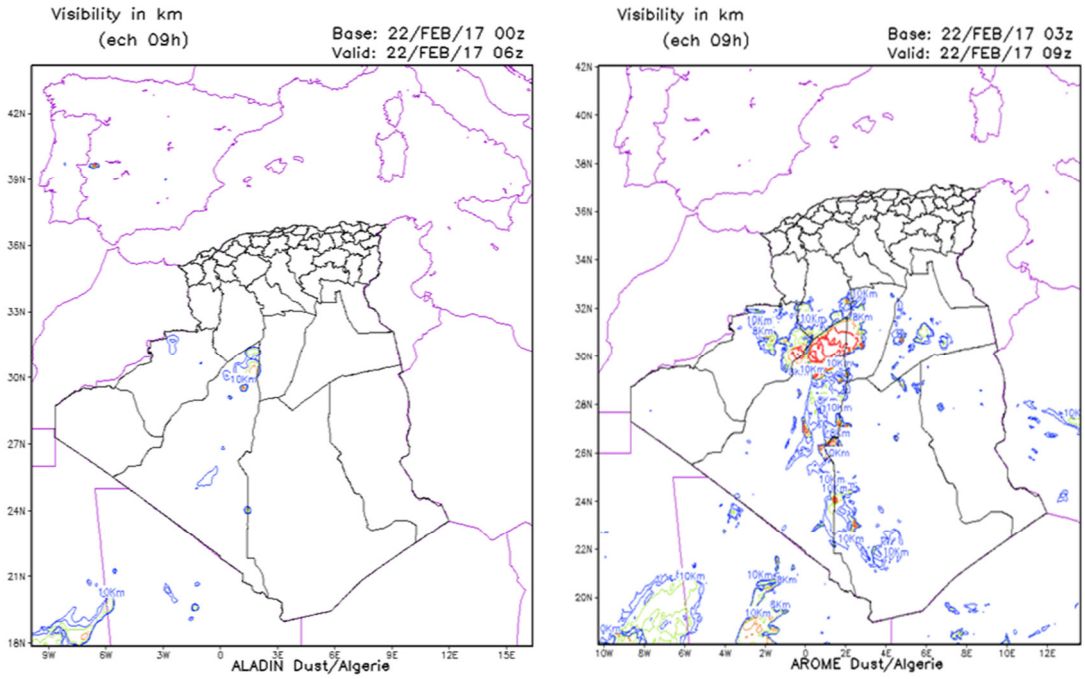


**Figure74** : visibilité prévu le 22/02/2017 à 09h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

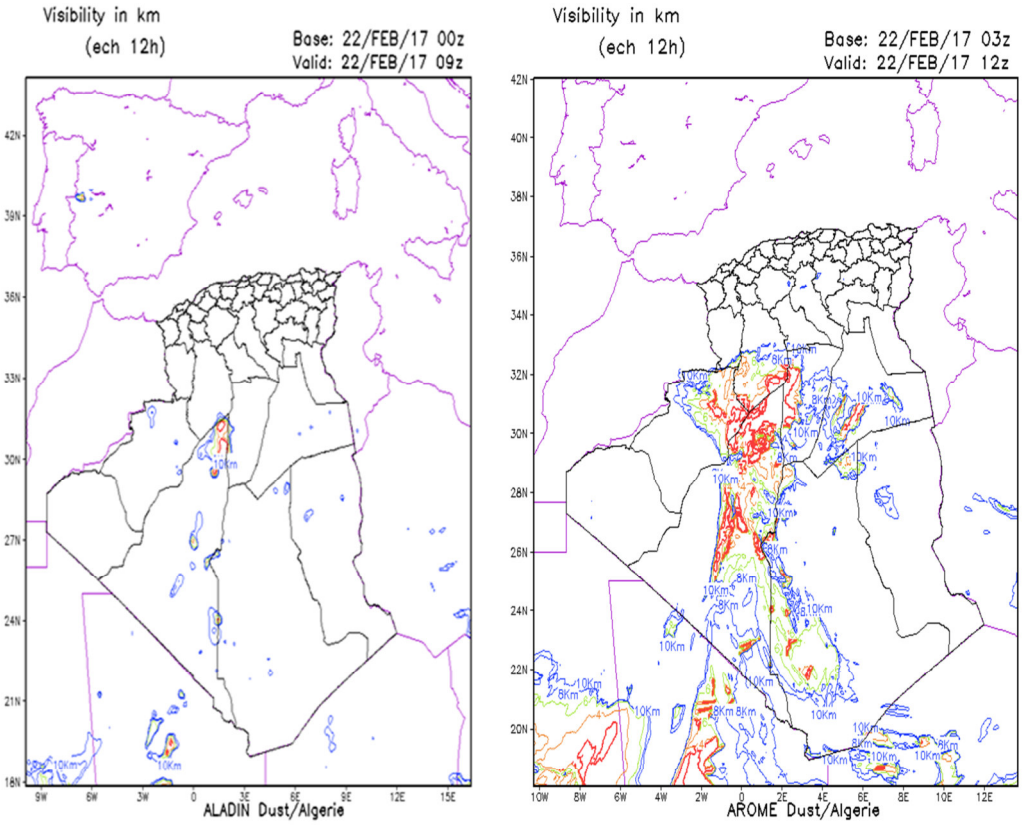


**Figure74** : visibilité prévu le 22/02/2017 à 12h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

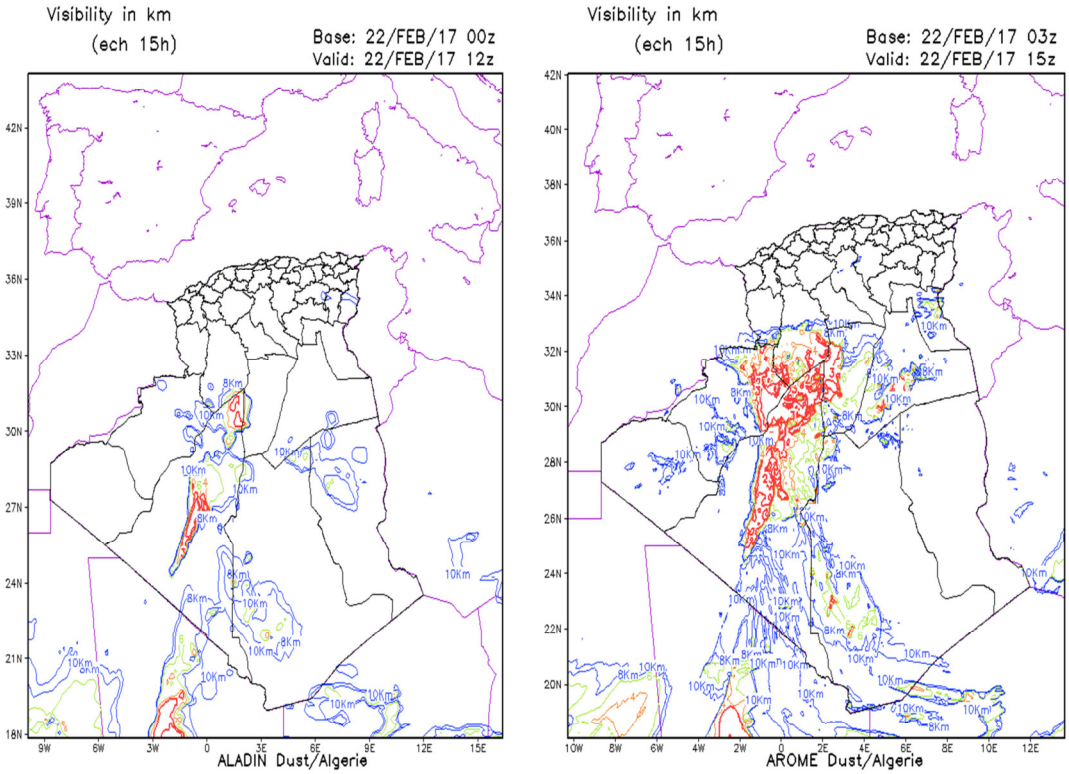


**Figure75** : visibilité prévu le 22/02/2017 à 15h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

# ANEXE

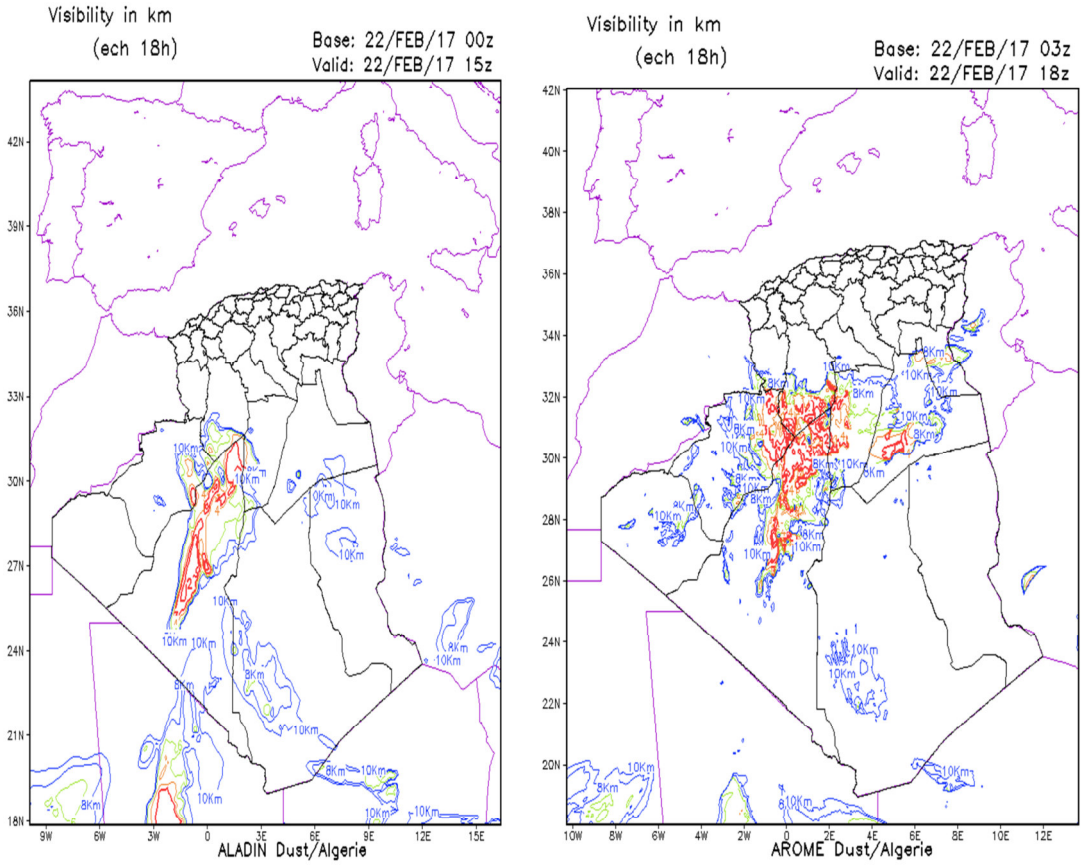


**Figure76** : visibilité prévu le 22/02/2017 à 18h par les modelés ALADIN-AROME respectivement

[01] : Annexe 03 OACI

[02] : MOKHTARI {simulation du sable par le model ETA} université Saad Daheb de Blida 2005.

[03] : OULEBSSIR .K {distribution verticale des aérosols désertique : validation sur un cas d'étude} université Saad Daheb de Blida 2012.

[04] : LADJALI. O et SALEH. F {Le vent de sable dans le sud Algérien : caractéristiques et conséquences pour l'homme}. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene 2014.

[05] : OVIDIU PANCRAT {télédétection de l'aérosol désertique depuis le sol par radiométrie infrarouge thermique multi bande} université des sciences et technologies de Lille 16juillet 2003.

[06] : ABDELRAHIM HAMZA {apport des sondeurs à laser (lider) dans l'étude de la pollution par les aérosols} université d'Oran 15fevrier 2012.

[07] : NADIA ZIAR {calcul des propriétés physique des nanoparticules de nitrât d'ammonium en utilisent les méthodes de Ab initio dynamique moléculaires} Université Hassiba Benbouali Chlef 2009.

[08] :Patrick CHAZETTE {étude de l'impact radiatif des aérosols dans la couche limite planétaire}

[09] : Michel LEGRAND {étude des aérosols sahariens au-dessus de l'Afrique a l'aide du canal à 10 microns de meteosat : visualisation, interprétation et modélisation} l'université des sciences et techniques de Lille. juillet 1990.

[10] : CECILE COUCHA {interactions entre poussières désertiques et convection profonde en Afrique de l'ouest : observation et modélisation à échelle convective} université de Toulouse 20 avril 2011.

[11] : RAOUF BABARI estimation de la visibilité météorologique par caméras routières} l'Université Paris-Est 2012.

[12] : LE FIGARO.fr

[13] :TH. LEKAS, G. KALLOS, J. KUSHTA, S. SOLOMOS, E.MAVROMATIDIS {dust impact on aviation} hellenic air force academy.

[14] : ESAM MOUSA KHALIFA { conscious study of impact of dust storm on aviation and airport management }international journal of science research and technolog 2016 ..

[15] Ambar, A et Mokhtari, M.: Desert dusts modeling in AROME: Contribution of physical parameterizations at convective scale, ALaldin-Hirlam newslatter. P8-12, 2017.

[16] . Sity, Y. et al.: The AROME-France Convective-Scale Operational Model. AMS. 2011.

[17] :Chaboureau, J.-P. et al.: Fennec dust forecast intercomparison over the Sahara in June 2011, Atmos. Chem. Phys., 16, 6977-6995, doi:10.5194/acp-16-6977-2016, 2016

[18] :Mokhtari et al.: Importance of the surface size distribution of erodible material: an improvement on the Dust Entrainment And Deposition (DEAD) Model, Geosci. Model Dev., 5, 581–598, 2012, doi:10.5194/gmd-5-581-2012.

[19] : [http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/la-prevision-du-temps/les-etapes-de-prevision].

[20] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Vent]

[21]: [https://norois.revues.org/1188]

[22] : http://www.cityzeum.com/le-sahara-algerien

[23] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%AAte_de_sable

[24] :www.meteoalecole.org/.../af_-_mesure_de_la_visibilite.pdf

[25] : [https://fsu.valahia.ro/images/avutgs/1/2004/2004040112.pdf]

[26] : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%A9vision_num%C3%A9rique_du_temps]

[27] : NADIA BOUKAREM {mécanisme de soulèvement d'aérosol désertique en Afrique de l'ouest} université pierre et marie curie parie 2008.

[28] : Pierre OZER {utilisation de la visibilité horizontale pour l'estimation de la qualité de l'air à Niamey (Niger)}.