

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique**  
**Université BLIDA -1-**

**Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales**

**Département : Navigation Aérienne**

**Spécialité : Opérations Aériennes**

*Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme*  
*Master en aéronautique*

**Thème**

***Etude de la tendance du modèle AROME  
utilisé à l'ONM à prévoir les phénomènes  
du brouillard***

**Réalisé par :**

**M<sup>elle</sup> ZEKHMI Ferroudja.**

**Dirigé par :**

**Pr. Tahar REZOUG: Promoteur.**

**Dr. Mohamed MOKHTARI: Encadreur.**

**-Promotion 2015-**

## Résumé

Plusieurs paramétrisations physiques reliant le contenu en eau liquide et la visibilité ont été développées ces dernières années. Ces paramétrisations sont validées par des campagnes de mesure effectuées spécialement sur les aérodromes. Dans ce travail, en combinant le paramètre de contenus en eau liquide prévu par AROME et les paramétrisations du brouillard, les visibilités sur tout le domaine d'intégration d'AROME ont été calculées. Les résultats obtenus sont validés par les données d'observations des stations météorologiques d'Alger, Oran et Constantine.

**Mots-clés:** paramétrisation, visibilité, brouillard, AROME.

## Abstract

Several physical parameterizations connecting the liquid water content and visibility have been developed in recent years. These parameterizations are validated by measuring campaigns performed especially on airfields. In this work, combining the liquid water content parameter under AROME and parameterizations of fog, visibility over the entire area of integration AROME were calculated. The results are validated by the data of observations from weather stations in Algiers, Oran and Constantine.

**Keywords:** parametrization, visibility, fog, AROME.

## ملخص

لقد وضعت العديد من المعايير والثوابت في السنوات الأخيرة والتي تربط محتوى الماء السائل والرؤية الجوية. هذه المعايير تم التحقق من صحتها عن طريق قياس الصحابة يؤديها خصوصا على المطارات. في هذا العمل، والجمع بين السائل المحتوى المائي المعلمة تحت AROME وتحديد البارامترات الضباب، حسبت رؤية غير جيدة على المنطقة بأكملها التكامل AROME يتم التحقق من صحة النتائج والملاحظات من بيانات محطات الأرصاد الجوية في الجزائر العاصمة وهران وقسنطينة.

**الكلمات المفتاحية:** معايير، الرؤية الجوية، الضباب، AROME

## Remerciements

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Mr REZOUG.T directeur du Laboratoire des Sciences Aéronautiques de m'avoir dirigée et donnée de bons conseils durant la période de préparation de ce travail.*

*J'adresse toute ma gratitude à Mr MOKHTARI.M, mon encadreur à l'ONM, de m'avoir proposée ce thème, encadrée avec toute efficacité et enthousiasme ce qui m'a permise d'avancer dans mon travail.*

*Je remercie tout particulièrement Mr HAMMADACHE.B directeur du Centre National et de la Prévision Météorologique à l'ONM de m'avoir permise de réaliser ce travail au sein de l'office.*

*Je tiens également à remercier madame BENREKTA. L chef de section marine à l'ONM pour toute l'aide qu'elle m'a apportée.*

*Je remercie tout le personnel de l'ONM en particulier le personnel de la PNT pour leur aide et sympathie.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail.*

*Merci à toute celles et ceux qui ont contribué à rendre cette expérience enrichissante.*

## *Dédicaces*

*J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils font pour moi même si je sais que je ne leurs ferai pas assez, merci pour votre patiente.*

*Ma grande tante Fatima.*

*Mes frères : Rabah, Kamel, M'nouar.*

*Mes sœurs : Nacima et Fetta.*

*Ma sœurs Dalila et son mari Kamel.*

*Ma sœurs Fadila et son Mari Mohammed ainsi mon adorable Thanina et mon petit mignon Amayas Amar.*

*La personne qui a été toujours à mes cotés pour m'encourager et me conseiller, Ghilas.*

*Ma très chère et ma meilleure amie Nouara qui m'a beaucoup soutenue, ses parents, ses frères et ses sœurs.*

*Toute mes amies : Menoucha, Amel, Soumia, Lamia.*

*Mes amis : Idir, Ghanou.*

*Toute ma famille, tout mes ami (e)s ainsi que tout ce qui m'ont aidée et soutenue.*

*Ferroudja*

## TABLE DES MATIERES

<b>Résumé</b> .....	<b>i</b>
<b>Remerciments.</b> .....	<b>ii</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>iii</b>
<b>TABLES DES MATIERES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>xii</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Principes météorologiques de base</b> .....	<b>3</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>3</b>
I. 1. L'atmosphère .....	<b>3</b>
I.1.1. Composition .....	<b>3</b>
I.1.2. Propriétés de l'atmosphère.....	<b>4</b>
I.1.3. La structure verticale de l'atmosphère.....	<b>5</b>
I.1.4. L'atmosphère standard.....	<b>6</b>
I. 2. L'eau dans l'atmosphère : .....	<b>7</b>
I.2.1.Origine : .....	<b>7</b>
I.2.2.Vapeur d'eau .....	<b>7</b>
I.2.3.Humidité relative de l'air .....	<b>7</b>
I.2.4.Température du point de rosée .....	<b>8</b>
I.2.5.Rapport de mélange .....	<b>8</b>
I.3.La visibilité .....	<b>9</b>
I.3.1. La visibilité météorologique .....	<b>9</b>
I.3.2. La visibilité aéronautique.....	<b>9</b>
I.3.3. Les différentes distances de visibilité.....	<b>9</b>
I.3.4. Les phénomènes météorologiques réduisant la visibilité .....	<b>10</b>
I.3.5.La mesure de la visibilité .....	<b>11</b>
I.3.5.1. Observation visuelle ou observation humaine .....	<b>11</b>
I.3.5.2. Observation instrumentale .....	<b>11</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>13</b>
<b>CHAPITRE II: Présentation du phénomène de brouillard</b> .....	<b>14</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>14</b>
<b>II.1. Définitions</b> .....	<b>14</b>
II.1.1. Le brouillard .....	<b>14</b>

II.1.2. La brume.....	14
II.1.3. Le smog .....	14
II.2. La différence entre les brumes et les brouillards .....	14
II.3 Les caractéristiques des brouillards .....	15
II.4. La formation du brouillard .....	15
II.5. La phase mature .....	16
II.6. Les différents types du brouillard .....	16
II.6.1. Brouillard de rayonnement .....	16
II.6.1.1. Le processus de formation du brouillard de rayonnement .....	17
II.6.1.2. Les conditions favorables à la formation du brouillard radiatif.....	17
II.6.1.3. Les conditions défavorables à la formation du brouillard radiatif .....	18
II.6.1.4. Les caractéristiques et les conditions à l'échelle synoptique .....	18
II.6.2. Brouillard d'advection .....	18
II.6.2.1. Le processus de formation du brouillard d'advection.....	19
II.6.2.2. Les conditions favorables à la formation du brouillard d'advection .....	19
II.6.2.3. Les caractéristiques et les conditions à l'échelle synoptique .....	20
II.6.3. Le brouillard de pente .....	20
II.6.3.1. Le processus de formation du brouillard de pente .....	20
II.6.3.2. Les conditions favorables à la formation du brouillard de pente.....	21
II.6.3.3. Les caractéristiques et les conditions à l'échelle synoptique .....	21
II.6.4. Brouillard de précipitation.....	22
II.6.4.1. Brouillard préfrontal.....	22
II.6.4.2. Brouillard postfrontal .....	23
II.6.5. Brouillard d'affaissement de stratus .....	23
II.6.5.1. Le processus de formation du brouillard d'affaissement de stratus.....	24
II.6.6. Brouillard d'évaporation .....	25
II.6.6.1. Le processus de formation du brouillard d'évaporation .....	26
II.6.6.2. Les conditions favorables à la formation du brouillard d'évaporation .....	26
II.6.7. Brouillard d'évaporation le matin.....	27
II.6.7.1. Le processus de formation du brouillard d'évaporation matinale .....	27
II.6.8. Brouillard de mélange .....	27
II.6.8.1 Le processus de formation du brouillard de mélange .....	28
II.6.9. Brouillard de glace .....	28
II.7. Dissipation du brouillard .....	29
II.7.1. Ensoleillement.....	29
II.7.2. Forte turbulence ou vent fort .....	30
II.7.3. Brouillard et les précipitations .....	30

II.8. Diagnostic du brouillard.....	31
II.8.1. Observations météorologiques classiques par des personnes .....	31
II.8.2. Stations d'observations automatiques.....	31
II.8.3. Observation à bord de navires .....	31
II.8.4. Caméra web .....	32
II.8.5. Imagerie satellitaire .....	32
II.9. Les dangers du brouillard .....	32
Conclusion .....	33
<b>CHAPITRE III: Outils et méthodes de prévision du brouillard.....</b>	<b>34</b>
Introduction.....	34
III.1. La prévision numérique du temps.....	34
III.1.1. La démarche scientifique et technique .....	34
III.1.2. La définition d'un modèle de prévision numérique du temps (PNT).....	35
III.1.3. Limites des modèles numériques.....	36
III.2. La prévision du brouillard à l'aide des modèles PNT .....	37
III.2.1. Le modèle GEM .....	37
III.2.2. L'approche du modèle NCEP RUC .....	38
III.2.3. Le modèle COBEL .....	38
III.3. Application de nouvelles paramétrisations de la visibilité dans les modèles de prévision numériques du temps pour les brouillards chauds .....	39
III.3.1. Les méthodes de paramétrisation de la visibilité.....	39
III.3.1.1. La paramétrisation de la visibilité en fonction du coefficient d'extinction .....	39
III.3.1.2. La paramétrisation de la visibilité en fonction de $N_d$ ou LWC.....	40
III.3.1.3. La paramétrisation de la visibilité K84 en fonction de LWC.....	43
III.3.1.4. La nouvelle paramétrisation de la visibilité en fonction de LWC et $N_d$ .....	44
III.4. Paramétrisation de la visibilité en fonction de l'humidité relative (HR).....	46
Conclusion .....	46
<b>CHAPITRE IV: Prévision du brouillard.....</b>	<b>47</b>
Introduction.....	47
IV.1. Les modèles numériques du temps utilisés à l'ONM.....	47
IV.1.1. Le modèle AROME.....	47
IV.2. La prévision du brouillard par AROME .....	48
IV.3. La présentation de la zone d'étude.....	49
IV.4. les données utilisées.....	50
IV.4.1. Les données des visibilité observées .....	50
IV.4.2. Calcul de la visibilité .....	51

IV.5. L'étude des situations météorologiques .....	51
IV.5.1. La situation du 12-04-2015 : Alger .....	51
IV.5.2. La situation du 14-10-2014 : Constantine.....	56
IV.5.3. La situation du 09-01-2014 :Oran .....	61
Conclusion : .....	65
<b>Conclusion générale</b> :.....	66
Références bibliographiques :.....	67
Annexe:.....	70

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

<b>Figure I.1.</b> : Structure verticale de l'atmosphère .....	5
<b>Figure I.2.</b> : Diagramme de Mollier .....	8
<b>Figure I.3.</b> : Le transmissomètre .....	12
<b>Figure I.4.</b> : Le déffusomètre .....	12

### Chapitre II

<b>Figure II.1.</b> : Brouillard de rayonnement .....	16
<b>Figure II.2.</b> : Processus de formation du brouillard de rayonnement .....	17
<b>Figure II.3.</b> : Brouillard d'advection .....	19
<b>Figure II.4.</b> : Mécanisme de formation du brouillard d'advection .....	19
<b>Figure II.5.</b> : Brouillard de pente .....	20
<b>Figure II.6.</b> : Mécanisme de formation du brouillard de pente .....	21
<b>Figure II.7.</b> : Brouillard de précipitation .....	22
<b>Figure II.8.</b> : Mécanisme de formation du brouillard préfrontal .....	23
<b>Figure II.9.</b> : Brouillard d'affaissement de stratus .....	24
<b>Figure II.10.</b> : La représentation du processus de formation du brouillard d'affaissement de stratus .....	25
<b>Figure II.11.</b> : Brouillard d'évaporation .....	25
<b>Figure II.12.</b> : Représentation du processus de formation du brouillard d'évaporation .....	26
<b>Figure II.13.</b> : Brouillard d'évaporation matinale .....	27
<b>Figure II.14.</b> : Brouillard de mélange .....	28
<b>Figure II.15.</b> : Mécanisme de formation du brouillard de mélange .....	28
<b>Figure II.16.</b> : Brouillard de glace .....	29

### Chapitre III

<b>Figure III.1.</b> : La grille du modèle numérique. Deux grandeurs atmosphériques y sont portées : le vecteur vent et la température (échelle à gauche) .....	36
---	----

<b>Figure III.2. :</b> LWC en fonction de $N_d$ à partir de deux mesures FSSP du programme du terrain RACE 1995. Le $N_{d96}$ et le $N_{d124}$ sont obtenus à partir des mesures FSSP-96 et FSSP-124 respectivement .....	<b>41</b>
<b>Figure III.3. :</b> La visibilité en fonction de $N_d$ . les visibilités $V_{96}$ et $V_{124}$ sont obtenues à partir des observations faites par FSSP-96 et FSSP-124, respectivement .....	<b>42</b>
<b>Figure III.4. :</b> La visibilité calculée à partir des mesures FSSP (FSSP-96 et FSSP-124), et la visibilité en fonction de LWC et IWC .....	<b>43</b>
<b>Figure III.5. :</b> La visibilité en fonction de LWC et $N_d$ .....	<b>44</b>

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1. :</b> Domaine d'intégration du modèle AROME en Algérie .....	<b>48</b>
<b>Figure IV.2. :</b> Localisation des stations à utilisées sur la carte .....	<b>50</b>
<b>Figure IV.3. :</b> Les visibilités ( $Vis_1, Vis_2, Vis_3, Vis_4, obs$ ) exprimées en (m) fonction du temps en (h) sur Alger .....	<b>52</b>
<b>Figure IV.4. :</b> Image satellite pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC donnée par EUMETSAT .....	<b>53</b>
<b>Figure IV.5. :</b> A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 1 <sup>ère</sup> relation pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC sur Alger. A droite, un zoom effectué sur la région d'Alger pour la même journée et même échéance .....	<b>54</b>
<b>Figure IV.6. :</b> A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 2 <sup>ème</sup> relation pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC sur Alger. A droite, un zoom effectué sur la région d'Alger pour la même journée et même échéance .....	<b>54</b>
<b>Figure IV.7. :</b> A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 3 <sup>ème</sup> relation pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC sur Alger. A droite, un zoom effectué sur la région d'Alger pour la même journée et même échéance .....	<b>55</b>
<b>Figure IV.8. :</b> A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 4 <sup>ème</sup> relation pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC sur Alger. A droite, un zoom effectué sur la région d'Alger pour la même journée et même échéance .....	<b>55</b>
<b>Figure IV.9.:</b> Les visibilités ( $Vis_1, Vis_2, Vis_3, Vis_4, obs$ ) exprimées en (m) en fonction du temps en (h) sur Constantine .....	<b>57</b>

- Figure IV.10.** : A gauche, la figure représente les visibilitées simulées par le modèle AROME en utilisant la 1<sup>ère</sup> relation pour la journée du 14-10-2014 à 7 UTC sur Constantine. A droite, un zoom effectué sur la région de Constantine pour la même journée et même échéance .....**59**
- Figure IV.11.** : A gauche, la figure représente les visibilitées simulées par le modèle AROME en utilisant la 2<sup>ème</sup> relation pour la journée du 14-10-2014 à 7 UTC sur Constantine. A droite, un zoom effectué sur la région de Constantine pour la même journée et même échéance .....**59**
- Figure IV.12.** : A gauche, la figure représente les visibilitées simulées par le modèle AROME en utilisant la 2<sup>ème</sup> relation pour la journée du 14-10-2014 à 7 UTC sur Constantine. A droite, un zoom effectué sur la région de Constantine pour la même journée et même échéance .....**60**
- Figure IV.13.** : A gauche, la figure représente les visibilitées simulées par le modèle AROME en utilisant la 3<sup>ème</sup> relation pour la journée du 14-10-2014 à 7 UTC sur Constantine. A droite, un zoom effectué sur la région de Constantine pour la même journée et même échéance .....**60**
- Figure IV.14.** : Les visibilitées ( $Vis_1$ ,  $Vis_2$ ,  $Vis_3$ ,  $Vis_4$ , obs) exprimées en (m) en fonction du temps en (h) sur Oran .....**62**
- Figure IV.15.** : A gauche, la figure représente les visibilitées simulées par le modèle AROME en utilisant la 1<sup>ère</sup> relation pour la journée du 09-01-2014 à 5 UTC sur Oran. A droite, un zoom effectué sur la région d'Oran pour la même journée et même échéance .....**63**
- Figure IV.16.** : A gauche, la figure représente les visibilitées simulées par le modèle AROME en utilisant la 2<sup>ème</sup> relation pour la journée du 09-01-2014 à 5 UTC sur Oran. A droite, un zoom effectué sur la région d'Oran pour la même journée et même échéance .....**64**
- Figure IV.17.** : A gauche, la figure représente les visibilitées simulées par le modèle AROME en utilisant la 3<sup>ème</sup> relation pour la journée du 09-01-2014 à 5 UTC sur Oran. A droite, un zoom effectué sur la région d'Oran pour la même journée et même échéance .....**64**
- Figure IV.18:** A gauche, la figure représente les visibilitées simulées par le modèle Arome en utilisant la 4<sup>ème</sup> relation pour la journée du 09-01-2014 à 5 UTC sur Oran. A droite, un zoom effectué sur la région d'Oran pour la même journée et même échéance.....**65**

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I

**Tableau I.1.** : Les gaz constituant l'air sec .....4

**Tableau I.2.** : Températures et pressions atmosphériques présentées en atmosphère-type.....6

### Chapitre III

**Tableau III.1.** : Résumé des paramétrisations utilisées dans l'étude de Gulpepe et al.2006 ...45

### Chapitre IV

**Tableau IV.1.** : Paramétrisations utilisées pour calculer la visibilité .....49

**Tableau IV.2.** : Les coordonnées géographiques des stations utilisées .....49

**Tableau IV.3.** : Valeurs des visibilités obtenues par les paramétrisations et les observations enregistrées par la station d'Alger en (m) et données chaque heure .....51

**Tableau IV.4.** : Valeurs des visibilités obtenues par les paramétrisations et les observations enregistrées par la station de Constantine en (m) et données chaque heure .....56

**Tableau IV.5.** : Valeurs des visibilités obtenues par les paramétrisations et les observations enregistrées par la station d'Oran en (m) et données chaque heure .....61

## LISTE DES ABREVIATIONS

**ALADIN** : Aire limitée Adaptation dynamique Développement INternational.

**AROME**: Application of Research to Operations at Mesoscale.

**ARPEGE** : Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle.

**AWOS** : Automated Weather Observing System / systèmes automatisés d'observation météorologiques.

**Bext** : Le coefficient d'extinction.

**CMC** : Centre Météorologique Canadien.

**CNRS** : Centre Nationale de la Recherche Scientifique.

**COBEL** : Code de Brouillard à l'Echelle Locale.

**EUMETSAT**: European Organisation for the Exploitation of METeorological Satellites

**FSSP**: Forward-Scattering Spectrometer Probe.

**GEM –LAM**: Global Environemental Multiscale-Limited Area Model.

**GEM** : Global Environnemental Multi-échelle / Global Environemental Multiscale.

**GRADS** : Grid Analysis And Display System.

**HR** : Humidité Relative.

**HR<sub>g</sub>** : Humidité Relative de glace.

**IWC** : Ice Water Content / la teneur en eau glacé.

**LA** : Laboratoire d'Aérologie.

**LWC** : Liquide Water Content / Contenu en Eau Liquide.

**MESO-NH** : MESO échelle Non Hydrostatique.

**METAR**: METeorological Airport Reportmre : l'erreur relative moyenne.

**N** : La densité en nombre de particules.

**NCEP** : National Center Environmental Prediction /Centre National pour la Préviation Environnementale.

**N<sub>d</sub>** : La concentration numérique des gouttelettes.

**NMM**: Nonhydrostatic Meso-scale Model.

**OACI** : Organisation de l'Aviation Civile Internationale.

**OMM** : Organisation Météorologique Mondiale.

**ONM** : Office National de la Météorologie.

**PAFOG** : Parametrized Fog.

**PNT** : Préviation Numérique du temps.

**POM** : Portée Optique Météorologique.

**PVP/RVR** : Portée Visuelle de la Piste / Runway Visual Range.

**Q<sub>ext</sub>** : Le coefficient d'extinction de Mie.

**r** : Le rayon des particules.

**RACE**: Radiation and Aerosol Cloud Experiment.

**rmse**: L'erreur quadratique moyenne.

**RUC** : Rapid-Update Cycle.

**T** : Température.

**T<sub>d</sub>** : Température du point de rosée / dew point.

**UTC**: Coordinated Universal Time.

**UV** : UltraViolet.

**Vis** : Visibilité.

**Vis<sub>cal</sub>** : Visibilité calculée.

**Vis<sub>k</sub>** : Visibilité Kunkel.

**Vis<sub>obs</sub>** : Visibilité observée

## Introduction générale

Le brouillard est l'un des phénomènes météorologiques les plus importants et les plus complexes à prévoir, il est susceptible de mettre la vie humaine en danger. Du point de vue météorologique le brouillard est un nuage bas qui atteint le sol, il est constitué de fines gouttelettes d'eau suspendues dans l'atmosphère. En réalité quand la visibilité s'abaisse toute circulation aérienne, routière et maritime peut devenir dangereuse et des mesures sont à prendre. Malheureusement ces mesures sont parfois très coûteuses (annulation des vols, retards des aéronefs, changement d'aéroport d'atterrissage...etc.). Les conséquences en cas d'accident sont susceptibles d'être plus dramatique, la réduction de la visibilité causée par les brouillards augmente le risque d'accident.

Pour toutes ces raisons, la communauté scientifique, notamment celle qui travaille dans le domaine de la météorologie, cherche à développer des systèmes de prévision et améliorer, sans cesse, la qualité de la prévision de ces phénomènes. Par ailleurs, pour développer ces systèmes de prévision il est très important de comprendre le mécanisme de formation ou de dissipation des brouillards lui même par une meilleure analyse de leurs paramètres ce qui a poussé un ensemble de chercheurs à construire des modèles opérationnels qui servent à la prévision du brouillard.

L'objectif de notre travail est d'étudier la tendance du modèle AROME (Application of Research to Operations at MEsoscale) à prévoir le phénomène du brouillard et de chercher une relation empirique adéquate qui permet de convertir l'intensité du brouillard en visibilité. Pour réaliser cette étude et atteindre l'objectif, des simulations avec le modèle AROME ont été effectuées sur le supercalculateur de l'Office National de la Météorologie (ONM). Pour valider nos résultats, nous avons choisi trois situations météorologiques de brouillard observées dans trois régions différentes: Oran, Alger, Constantine. Ces trois régions sont connues par de forte activité socio-économique à l'échelle nationale. Donc, valider un outil de prévision de brouillard sur ces régions est d'une importance vitale.

Après cette introduction nous introduirons, dans le premier chapitre, quelques généralités concernant l'atmosphère terrestre, la présence de l'eau dans cette enveloppe et on parlera aussi de la visibilité météorologique. Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation du phénomène du brouillard. Nous allons recenser les différents types de brouillard, les conditions météorologiques favorisant sa formation et sa dissipation. Le troisième chapitre donnera un aperçu général sur la prévision numérique du temps et les modèles utilisés pour la

prévision du phénomène de brouillard. Nous allons aussi récapituler les différentes paramétrisations utilisées pour calculer les visibilités réduites par le brouillard. Le quatrième chapitre constituera la partie pratique de notre travail. Il regroupera la présentation du modèle AROME et les jeux d'expérience et simulation réalisées pour prévoir la visibilité à l'aide du modèle AROME. Nous présenterons, également, dans ce chapitre nos résultats et notre analyse. Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

# Introduction générale

# Chapitre I: Principes météorologiques de base

## Chapitre II: Présentation du phénomène de brouillard

# Chapitre III: Outils et méthodes de prévision du brouillard

# Chapitre IV: Prévision du brouillard

# Conclusion générale

# Références bibliographiques

# Annexe

## **Introduction :**

Ce chapitre comporte des généralités sur l'atmosphère terrestre et ses propriétés. On va définir, en premier lieu, sa composition physico-chimique, sa structure verticale et on définit aussi l'atmosphère de type OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). Ensuite, on va voir, en détail, l'origine et l'état de l'eau dans l'atmosphère. Enfin, on donnera quelques notions sur la visibilité météorologique, les phénomènes qui la réduisent et ainsi les différentes techniques utilisées pour la mesurer.

## **I.1. L'atmosphère**

### **I.1.1. Composition**

L'atmosphère est un mélange de gaz entourant la Terre. Ce mélange forme une enveloppe protectrice pour notre planète et elle est maintenue près de la terre grâce au champ gravitationnel de cette planète [1] et [2]. L'air atmosphérique est composé de la vapeur d'eau, d'air sec, des impuretés et de différentes particules microscopiques [3] :

- **Vapeur d'eau :** La vapeur d'eau est produite par la surface du globe. C'est un gaz invisible provenant de l'évaporation de l'eau, de la sublimation de la glace ou de l'évapotranspiration du milieu végétal. En effet, la vapeur d'eau joue un rôle important dans la détermination des conditions du temps et du climat. Ce gaz entraîne la formation des nuages, du brouillard et des précipitations, car il est instable [3].
- **Air sec :** L'air sec est composé d'un mélange de gaz qui se présentent en différent pourcentage [3]. Le tableau I.1 montre les gaz constituants l'air sec et leurs pourcentages en volume.
- **Impuretés et particules diverses microscopiques:** Elles sont composées de débris végétaux ou minéraux, de sel marin provenant de l'évaporation des embruns et de l'activité humaine (rejets industriels)... [3].

**Tableau I.1.** : Les gaz constituant l'air sec [4]

Gaz constituants de l'air sec	Pourcentages en volume
Azote (N <sub>2</sub> )	78,09
Dioxygène (O <sub>2</sub> )	20,95
Argon (A)	0,93
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0,035
Néon (Ne)	1,8 10 <sup>-3</sup>
Hélium (He)	5,25 10 <sup>-4</sup>
Krypton (Kr)	1,0 10 <sup>-4</sup>
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	5,0 10 <sup>-5</sup>
Xénon (Xe)	8,0 10 <sup>-6</sup>
Ozone (O <sub>3</sub> )	1,0 10 <sup>-6</sup>
Radon (Rn)	6,0 10 <sup>-18</sup>

### I.1.2. Propriétés de l'atmosphère

- **Inertie** : Puisque l'air est immobile et qu'il a une masse, il faut une force pour le mettre en mouvement, l'accélérer ou le freiner [5].
- **Fluidité** : En plus l'air est très fluide; il prétend à occuper tout l'espace libre et à exercer une pression sur tous les corps qu'il entoure [5].
- **Viscosité** : La viscosité de l'air est une propriété très importante. Elle lui permet de le mettre en mouvement et de provoquer ainsi un effet d'entraînement sur les couches voisines. La viscosité empêche, par contre, le cisaillement du vent de dépasser les valeurs habituelles [5].
- **Compressibilité et expansibilité** : Si la pression d'une masse d'air en un point de l'atmosphère augmente par rapport à la pression environnante, l'air prend de l'expansion et il prétend à occuper plus d'espace. Par contre, par augmentation de la pression environnante, le volume de cette masse diminuera car il est comprimé [5].
- **Thermodynamique** : Lorsque l'air s'élève de la surface terrestre, sa pression et sa température diminuent, tandis que son volume augmente. Par contre, l'air qui descend vers la surface subit certainement l'effet contraire c.-à-d. : compression, augmentation de sa température et son volume diminue. Ce phénomène joue un rôle très important dans la formation des nuages qui est causée par les mouvements verticaux de l'air [5].

### I.1.3. La structure verticale de l'atmosphère

En tenant compte de la variation verticale de la température, l'atmosphère terrestre est divisée en cinq couches, dont chacune possède des particularités propres liées à sa température, sa composition et sa pression [2]. La figure ci-dessous représente la structure verticale de l'atmosphère:

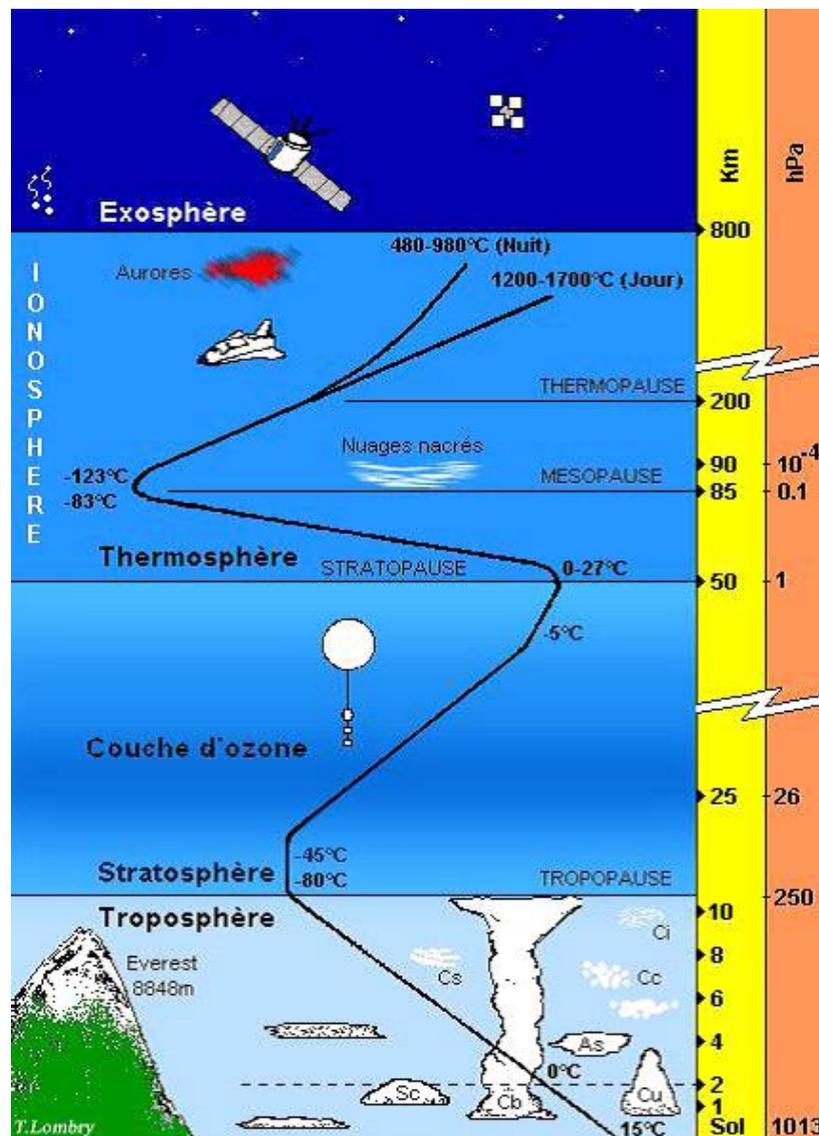


Figure I.1. : Structure verticale de l'atmosphère [6].

**1- La troposphère :** C'est la couche la plus basse de l'atmosphère. Elle est située entre la surface du globe et une altitude d'environ 6 -18 km selon la latitude et les saisons. Elle est aussi la plus dense. Sa température décroît de  $6^{\circ}\text{C}$  par kilomètre d'altitude. C'est à ce niveau que volent les avions de ligne et on trouve les différents phénomènes météorologiques : vents, formation des nuages, pluie, neige...etc. La limite supérieure de la troposphère se nomme la tropopause [2].

**2- La stratosphère :** C'est la couche de l'atmosphère la plus riche en ozone on la nomme « couche d'ozone ». Elle s'étend entre 20 et 50 km d'altitude. Cette couche est caractérisée par une augmentation de température avec l'altitude et cela est dû à l'absorption des rayons ultraviolets

(UV) provenant du soleil. La limite supérieure de la stratosphère se nomme la stratopause [2].

**3- La mésosphère :** C'est une zone de l'atmosphère située entre 50 et 85 km d'altitude. Elle est caractérisée par une rareté d'ozone et une décroissance de la température avec l'altitude. A sa limite supérieure on trouve les températures les plus basses de l'atmosphère terrestre. C'est dans cette couche que disparaissent les météorites chauffés à incandescence dès leur entrée dans les confins de l'atmosphère [5]. La limite supérieure de la mésosphère se nomme la mésopause.

**4- La thermosphère :** Cette couche est comprise entre 85 km et environ 800 km d'altitude. Elle est caractérisée par une faible densité de la matière et une forte augmentation de la température avec l'altitude qui est due aux gaz de la thermosphère qui stoppent les particules très énergétiques envoyées par le soleil [2].

**5- L'exosphère :** C'est la couche la plus élevée de l'atmosphère à partir de 800 km. Elle se dissipe peu à peu dans l'espace interplanétaire et l'air y devient extrêmement rare [2].

#### **I.1.4. L'atmosphère standard**

Afin de déterminer l'atmosphère standard, l'OACI a défini une loi de variation de la température et de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude. L'atmosphère standard permet l'étalonnage des instruments de vol et l'homologation des performances [7]. Le tableau ci-dessous montre la variation de la température et de la pression en fonction de l'altitude :

**Tableau I.2. :** Températures et pressions atmosphériques présentées en atmosphère-type [7].

Altitude en Mètres (m)	Température en degrés centigrades (°C)	Pression en Hectopascals (HPa)	Décroissance de la pression pour 1000m d'altitude en HPa
0	15°	1013	114
1000	8°5	899	104
2000	2°	795	94
3000	- 4°5	701	85
4000	-11°	616	76
5000	-17°5	540	68
6000	-24°	472	62
7000	-30°5	410	53
8000	-37°	357	50
9000	-43°5	307	43
10000	-50°	264	37
15000	-56°5	120	13
20000	-56°5	55	4

## **I.2. L'eau dans l'atmosphère**

### **I.2.1. Origine**

L'eau se présente dans l'atmosphère d'une façon permanente sous l'un des trois états physiques suivants : gazeux (vapeur d'eau), liquide (pluie, nuages) ou solide (neige, grêle, nuages de glace). Elle provient de l'évaporation au dessus des océans, des mers, des lacs, des sols humides ou elle est produite de l'activité humaine ou de l'évapotranspiration de végétations. Cette eau a un rôle primordial dans l'atmosphère, elle est comme un régulateur thermique [1].

### **I.2.2. Vapeur d'eau**

La troposphère comporte l'intégralité de la vapeur d'eau de l'atmosphère, en effet la vapeur d'eau est le seul gaz de l'atmosphère dont son état se transforme sous l'influence de légères modifications dans son environnement. La vapeur d'eau peut se transformer en gouttelettes ou en cristaux de glace ce qui entraîne la formation de nuages, brouillard, neige, pluie, grêle...etc. En plus de sa présence dans l'atmosphère en quantité variable, la vapeur d'eau a pour caractéristique d'atteindre un point de saturation qui dépend du rapport température-pression.

À pression constante, si on diminue la température le taux d'humidité augmente et si on augmente la température il diminue.

À température fixe, la quantité de vapeur est inversement proportionnelle à la variation de la pression : lorsque la pression diminue le taux d'humidité augmente, et lorsque la pression augmente le taux d'humidité diminue.

Dès que la vapeur d'eau atteint la quantité maximale et que l'air ainsi saturé se refroidit, le surplus de la vapeur devient liquide ou solide ce qui provoque la formation des nuages, brouillard, rosée, ou cristaux de glace [5].

Plusieurs facteurs contribuent à la variation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère [5]:

- L'évaporation de l'eau, principalement quand celle-ci est plus chaude que l'air qui l'entoure ;
- L'évaporation de la pluie chaude ;
- L'évapotranspiration de la végétation ;
- La combustion des matières organiques.

### **I.2.3. Humidité relative de l'air**

L'humidité relative indique le rapport entre le contenu réel de vapeur d'eau et la quantité nécessaire à la saturation. Elle se note HR et elle se mesure avec un hygromètre ou un psychromètre. Lorsque l'humidité relative atteint 100%, cela conduit à la formation de brouillard, nuages ou précipitations. Donc la connaissance de ce paramètre permet aux météorologistes de prévoir la formation des phénomènes météorologiques [1] et [5].

### I.2.4. Température du point de rosée Td (dew point)

Elle correspond à la température à laquelle la saturation de l'air est atteinte si la pression au cours du refroidissement reste constante. Ce phénomène peut se produire au cours du refroidissement nocturne ce qui entraîne de la rosée ou des brouillards [1]. En connaissant l'humidité relative et la température de l'air, la température du point de rosée peut être définie par le diagramme de Mollier représenté ci-dessous [1] :

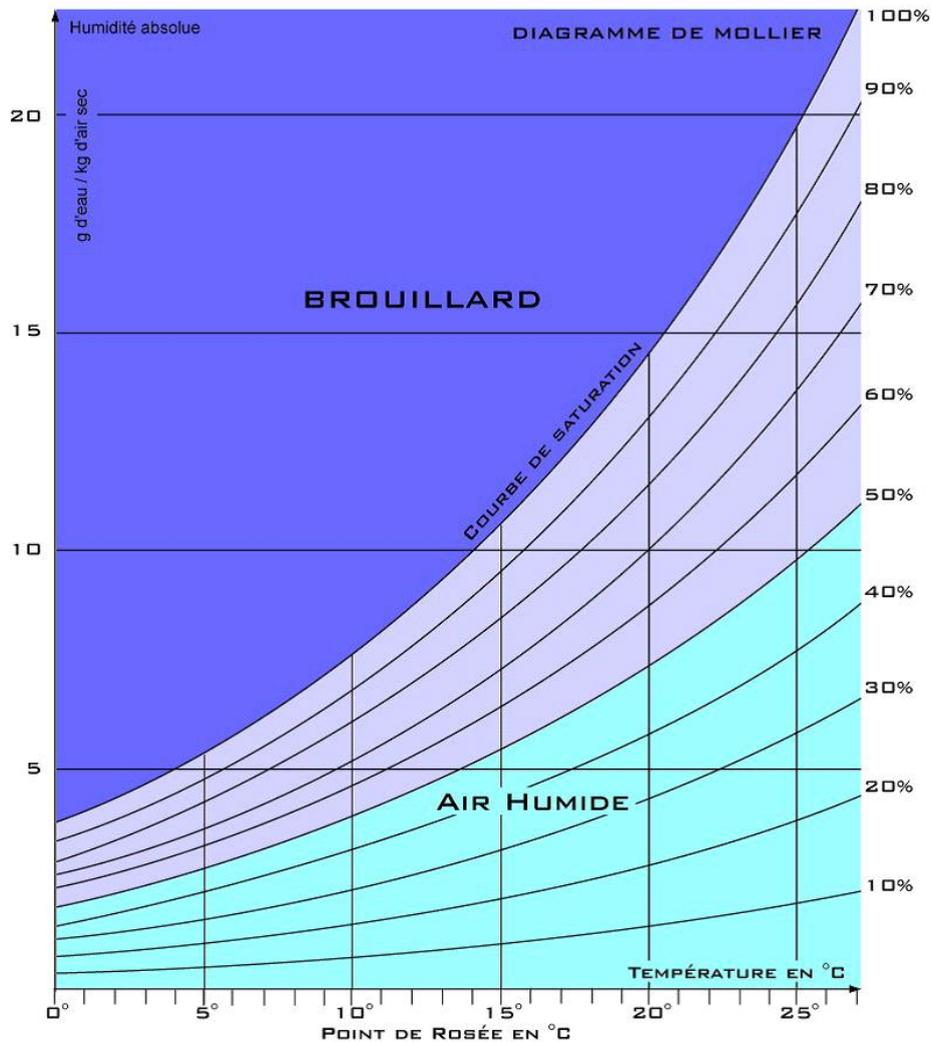


Figure I.2. : Diagramme de Mollier [1].

### I.2.5 Rapport de mélange

C'est le rapport entre une masse de vapeur d'eau et une masse d'air sec, comportées dans un même volume d'air humide, généralement il se traduit par g/kg d'air sec. Les météorologistes utilisent le rapport de mélange pour étudier l'évolution d'une petite quantité d'air.

Le rapport de mélange saturant est le rapport entre la masse maximale de vapeur d'eau que peut comporter l'air humide et la masse d'air sec contenues dans le même volume d'air, à une température donnée [5].

## I.3. La visibilité

### I.3.1. Visibilité météorologique

On distingue deux types de visibilité météorologiques :

- **La visibilité horizontale** : Elle correspond à la distance maximale à laquelle un observateur peut distinguer et identifier un objet situé au voisinage du plan horizontal où se place lui-même [3].
- **La visibilité verticale** : Elle correspond à la distance maximale à laquelle un observateur peut distinguer et reconnaître un objet sur la même verticale que lui [3].

- **Le coefficient d'extinction**

Les rayons lumineux qui traversent les différentes particules suspendues dans l'atmosphère sont altérés avec un effet d'extinction qui résulte de la diffusion et de l'absorption. La combinaison de l'absorption et de la diffusion est caractérisée par le coefficient  $\beta$  qui dépend de la concentration et de la taille des différentes particules dans l'atmosphère [8].

### I.3.2. Visibilité aéronautique

La visibilité aéronautique est déterminée comme étant la plus grande des deux valeurs suivantes :

- a) la plus grande distance à laquelle on peut distinguer et identifier un objet noir de dimensions adéquates placé au voisinage de la surface terrestre quand il est observé sur un fond lumineux;
- b) la plus grande distance à laquelle on peut voir et reconnaître des feux d'une intensité voisine de 1 000 candelas lorsqu'ils sont observés sur un fond non éclairé [9].

- **La visibilité dominante**

Elle correspond à la plus grande valeur de la visibilité qui est atteinte dans au moins la moitié d'un cercle d'horizon ou au moins la moitié de la surface de l'aérodrome. Ces secteurs peuvent comprendre des zones contiguës ou non contiguës. La visibilité dominante est susceptible d'être estimée par un observateur humain ou par un ensemble d'instruments, ces derniers permettent d'avoir une meilleure estimation de la visibilité [9].

### I.3.3. Les différentes distances de visibilité

- 1- **La portée visuelle** : On utilise la portée visuelle comme étant la distance de la visibilité de jour, elle correspond à la distance à laquelle un objet donné est susceptible d'être identifié dans des conditions déterminées avec les seules limitations de la transmissivité atmosphérique et du seuil de contraste [10].
- 2- **La portée lumineuse** : On utilise comme distance de visibilité de nuit, elle correspond à la plus grande distance à laquelle un feu donné est susceptible d'être identifié dans des conditions d'observation déterminées avec les seules limitations de la transmissivité atmosphérique et du seuil

d'éclairement sur l'œil de l'observateur [10].

3- **La portée optique météorologique (POM) :** Elle est définie par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) comme la longueur du trajet effectué par un faisceau de rayons lumineux parallèles dans l'atmosphère, se dégageant d'une lampe à incandescence à une température de couleur de 2700 K [10].

4- **La portée visuelle de la piste (PVP/RVR) :** C'est la distance jusqu'à laquelle le pilote d'un aéronef situé sur l'axe de la piste peut distinguer et identifier les marques qui délimitent la piste ou les feux qui balisent son axe [9].

### I.3.4. Les phénomènes météorologiques réduisant la visibilité

Il existe plusieurs phénomènes qui réduisent la visibilité, et ils peuvent être distingués selon leur origine en deux catégories:

**a) Les hydrométéores :** Ce sont des météores composés de particules d'eau liquide ou solide suspendues dans l'atmosphère [3].

- **Nuage :** Un nuage est composé de fines gouttelettes d'eau liquides ou solides dont la forme est variable en suspension dans l'atmosphère. La visibilité évolue à l'intérieur des nuages, elle peut atteindre 1 km dans les nuages minces, alors que dans les nuages denses qui portent de la pluie elle peut être réduite à quelques mètres seulement [5].
- **Brume :** C'est un amas de gouttelettes d'eau microscopiques ou de particules hygroscopiques humides en suspension dans l'atmosphère et qui réduisent la visibilité à la surface du globe [3].
- **Brouillard :** C'est l'accumulation de très petites gouttelettes d'eau liquide ou solide suspendues dans l'atmosphère et qui réduisent généralement la visibilité horizontale à la surface du globe [3]. [voir la définition détaillée dans le chapitre II]
- **Chasse-neige :** C'est le soulèvement d'un ensemble de particules de neige du sol par un vent suffisamment fort et turbulent [3]. On distingue deux types de chasse-neige :
  - 1- **Chasse-neige basse :** c'est le soulèvement de particules de neige par le vent à faible hauteur au-dessus du sol (2m max) [3].
  - 2- **Chasse-neige élevée :** c'est le soulèvement de particules de neige par le vent à des grandes hauteurs au-dessus du sol (au-dessus de 2m) [3].

**b) Les lithométéores :** Ce sont des météores composés de particules dont la plupart sont solides et non aqueuses (poussière, sable, sel marin...) Ces particules sont suspendues dans l'atmosphère et soulevées du sol par le vent [3].

- **Brume sèche :** C'est la présence de particules sèches, extrêmement petites dans l'atmosphère, qui sont invisibles à l'œil nu, elles sont suffisamment nombreuses pour

donner à l'air un aspect opalescent [3].

- **Brume de sable** : C'est la suspension des poussières ou de petites particules de sable dans l'atmosphère, qui ont été soulevées du sol par une tempête de poussière ou une tempête de sable [3].
- **Fumée** : C'est de petites particules provenant de combustions diverses suspendues dans l'atmosphère [3].
- **Chasse-poussière ou chasse-sable** : C'est le soulèvement d'un ensemble de particules de poussières ou de sable du sol à des hauteurs faibles ou modérées, par un vent suffisamment fort et turbulent [3]. On distingue :
  - 1- **Chasse-poussière basse ou chasse-sable basse** : C'est le soulèvement des particules par le vent à des hauteurs faibles au dessus du sol [3].
  - 2- **Chasse-poussière ou chasse-sable élevée** : C'est le soulèvement des particules par le vent à des hauteurs très importantes au dessus du sol [3].
- **Tempête de poussière ou tempête de sable** : C'est le soulèvement des particules de poussières ou de sable du sol à de grandes hauteurs par un vent turbulent et fort [3].

### **I.3.5. La mesure de la visibilité**

Il existe deux techniques importantes pour la mesure de la visibilité à savoir : l'observation visuelle et observation en utilisant des appareils de mesure.

#### **I.3.5.1. Observation visuelle ou observation humaine**

Les météorologues déterminent la visibilité à partir des objets ou des repères visuels (bâtiments, un château d'eau, colline...) dont la distance au point d'observation est connue. La visibilité est au moins égale à la distance séparant le repère du point d'observation quand on peut distinguer clairement les contours d'un des repères [11].

Les observations visuelles de jour sont plus précises à celle de la nuit ; car il est difficile de mesurer avec exactitude la visibilité la nuit [11].

#### **I.3.5.2. Observation instrumentale**

Des mesures instrumentales peuvent être réalisées pour limiter l'imprécision de l'observation, ces mesures représentent une aide pour l'observateur [11].

Deux appareils de mesure sont utilisés:

- 1- **Le transmissomètre** : Cet instrument permet d'évaluer la portée visuelle de la piste (RVR) en émettant un faisceau lumineux limité en direction d'un récepteur placé à 30 ou 50 m et évalue son atténuation au cours du trajet. Le transmissomètre est un équipement qui mesure la POM sur une gamme restreinte de 75 à 1500 m avec un pas de 30 m [11].

Cet instrument est illustré dans la figure ci-après :



**Figure I.3.** : Le transmissomètre [11].

2- **Le diffusomètre** : C'est un appareil qui évalue l'intensité lumineuse d'un faisceau lumineux réfléchi par l'atmosphère, en déterminant le coefficient de diffusion de la lumière par des particules qui sont en suspension dans l'atmosphère. L'inconvénient de cette mesure instrumentale est qu'elle est réalisée dans un petit volume d'atmosphère qui n'est pas toujours représentatif parce que, généralement, la visibilité n'est pas homogène autour de l'endroit de l'observation. Le domaine de la mesure de la distance de visibilité à l'aide d'un diffusomètre est plus vaste de 10 m à 10 km sur un aéroport [11]. Le diffusomètre est montré dans la figure ci-dessous:



**Figure I.4** : Le déffusomètre [11].

## **Conclusion**

Sont présentées dans cette section quelques propriétés et caractéristiques de l'atmosphère terrestre, ainsi que sa composition. Nous avons, aussi, donné quelques particularités de la vapeur d'eau dans cette enveloppe gazeuse sous différents états. Nous avons défini la visibilité météorologique, la distance de la visibilité et les phénomènes météorologiques réduisant la visibilité. Enfin, nous avons représenté les techniques principales de mesure de la visibilité.

## **Introduction**

Ce chapitre sera dédié à la présentation du phénomène du brouillard. Nous allons présenter quelques définitions du brouillard, ses caractéristiques, sa formation, sa dissipation et leurs différents types. Ensuite, nous allons décrire quelques méthodes utilisées par les prévisionnistes pour diagnostiquer ce phénomène. Enfin, nous allons parler des dangers du brouillard sur l'aéronautique.

### **II.1. Définitions**

#### **II.1.1. Le brouillard**

Le brouillard est composé de fines gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace en suspension dans l'air accompagnés de particules microscopiques qui sont saturées d'eau, qui réduisent la visibilité en surface. La composition du brouillard est identique à celle d'un nuage. En effet, il s'agit d'un nuage dont la base touche le sol [10].

#### **II.1.2. La brume**

C'est la réduction de la visibilité par de petites gouttelettes d'eau en suspension dans l'air et qui est un voile continu [5]. [Voir la définition détaillée dans le chapitre I]

#### **II.1.3. Le smog**

Le mot smog est issu de la contraction de deux mots anglais smoke qui signifie la fumée et fog qui signifie le brouillard. En 1905, il a été décrit comme un brouillard naturel qui est contaminé par des polluants naturels. C'est-à-dire, c'est un mélange de fumée et de brouillard. Aujourd'hui, le smog représente une brume jaunâtre composée d'un mélange de polluants atmosphériques [12]. Le smog se présente particulièrement sur des grandes villes lorsqu'une forte humidité et une pollution atmosphérique durable se mélangent en créant un type d'aérosol humide qui risque d'être dangereux pour la santé [13].

### **II.2. La différence entre les brumes et les brouillards**

La visibilité est considérée comme étant la propriété la plus simple pour distinguer la brume du brouillard. En effet lorsque la visibilité est supérieure à 1 km on parle de la brume et lorsque la visibilité est réduite à moins d'un km on parle du brouillard.

Au fait, la différence réelle entre ces deux phénomènes est physique, pendant la formation de la brume la saturation n'est pas atteinte de fait l'humidité relative est de 70 à 75% par contre le brouillard se forme lorsque l'air est saturé ; c'est à dire l'humidité relative est supérieure à 100% [13].

### II.3. Les caractéristiques des brouillards

Ces caractéristiques dépendent de type du brouillard, de son état d'évolution et aussi de son altitude. On distingue:

- **Le rayon des particules** : il diffère d'un type à un autre. Par exemple le rayon des gouttelettes pour un brouillard d'advection est d'environ 10  $\mu\text{m}$  et pour un brouillard de rayonnement il est de 2,5 à 5  $\mu\text{m}$ .
- **L'épaisseur de la couche du brouillard** : elle varie de quelque dizaine à quelque centaine de mètres.
- **Le contenu en eau liquide** : les valeurs du contenu en eau liquide oscillent de quelque  $\text{mg.m}^{-3}$  à quelque centaine de  $\text{mg.m}^{-3}$ , lorsque la valeur maximale dépasse 0,1 à 0,3  $\text{g.m}^{-3}$  au sol cela implique la fusion du brouillard avec un stratus. La valeur maximale du contenu en eau liquide du brouillard radiatif est de 100  $\text{g.m}^{-3}$  et de 200  $\text{g.m}^{-3}$  pour un brouillard d'advection [13].

### II.4. La formation du brouillard

Lorsque l'humidité relative est élevée et que la température de l'air se rapproche à celle du point de rosée, l'air se condense sous forme liquide et s'attache à des particules de poussières, de sel, de glace ou de fumée en suspension dans l'atmosphère en entraînant la formation de plusieurs phénomènes tel que le brouillard, les nuages...etc. Généralement, le brouillard survient lorsque la température de l'air dépasse la température du point de rosée de 2.5°C. Même si la température de l'air égale à celle du point de rosée et que l'humidité relative atteint 100% la formation du brouillard n'est pas obligatoire. Par contre, il peut se former à des niveaux d'humidité moins élevés dans certaines conditions.

L'épaisseur du brouillard où sa hauteur maximale par rapport à la surface terrestre ou de l'eau est définie par la hauteur à laquelle une masse d'air plus chaud ou plus sec emprisonne une couche d'air plus frais au voisinage de la surface terrestre. L'épaisseur du brouillard évolue en fonction de la pression de l'air sus-jacent. Une hausse de pression de l'air sus-jacent entraîne la compression de la couche du brouillard alors que la diminution de la pression entraîne son extension [14].

## II.5. La phase mature

Au cours de la phase de maturation, le brouillard interagit sur son environnement par:

1- Le refroidissement radiatif au sommet de la couche du brouillard qui entraîne la déstabilisation de la nappe du brouillard. Lors de la phase mature, la couche du brouillard devient neutre peut être même légèrement instable.

2- La diffusion turbulente à l'intérieur du brouillard évolue avec le vent ainsi que la stabilité des basses couches.

3- La sédimentation des gouttelettes d'eau condensées : la turbulence et la sédimentation diffusent l'eau produite au sommet de la nappe du brouillard vers les basses couches.

On peut donc déduire que le développement vertical du brouillard est piloté par l'intensité du vent aussi par le refroidissement radiatif [15].

## II.6. Les différents types du brouillard

### II.6.1. Brouillard de rayonnement

Le brouillard de rayonnement ou brouillard radiatif est le plus fréquent des brouillards. Il est de faible épaisseur (de 1 à 10 mètres d'épaisseur) et apparaît au-dessus des surfaces terrestres. Mais, il y a une possibilité qu'il s'avance au dessus de l'eau sous l'effet des vents faibles qui soufflent vers la mer pendant la nuit. Ce type de brouillard se forme généralement à la fin de l'automne et au début de l'hiver lorsque les nuits deviennent plus longues ainsi que les surfaces terrestres comprennent plus d'humidité [14]. La Figure (II.1) illustre la réduction de la visibilité par le brouillard radiatif.



**Figure II.1.** : Brouillard de rayonnement [16].

### II.6.1.1. Le processus de formation du brouillard de rayonnement

Le brouillard radiatif se forme pendant les nuits humides lorsque la température de l'air est abaissée par refroidissement jusqu'à atteindre la valeur du point de rosé ( $T=T_d$ ) ce qui mène à la saturation de l'air ainsi à la condensation des gouttelettes d'eau sur les noyaux de condensation.

Le brouillard de rayonnement apparaît à partir du sol au fur et à mesure que la nuit avance. Généralement, il est plus dense au lever du soleil. La figure ci-dessous illustre le mécanisme de formation du brouillard radiatif [14].



Figure II.2. : Processus de formation du brouillard de rayonnement [14].

### II.6.1.2. Les conditions favorables à la formation du brouillard radiatif

- Ciel dégagé ou peu nuageux : plus le ciel est clair plus le processus de refroidissement radiatif durant la nuit est efficace.
- Faibles turbulences ou vents faibles : les vents qui ne dépassent pas 10 nœuds permettent de maintenir les gouttelettes d'eau en suspension dans l'air près du sol et si la turbulence est insuffisante il y aura seulement de la rosée [12].
- L'évolution de la valeur du rapport de mélange avec l'altitude : cela facilite l'apparition d'un brouillard plus épais [12].
- Un abaissement faible de la température du point de rosée  $T_d$  au coucher du soleil : favorise la formation du brouillard avec un refroidissement moins intense [12].
- Noyaux de condensation : si le taux des noyaux de condensation est élevé l'étape de condensation est plus favorisée [12].
- La surface de la terre mouillée : conduit à l'apparition du brouillard avec un refroidissement plus faible [12].
- Terres basses ou vallées : le brouillard radiatif se forme généralement sur des terres basses

ou dans des vallées parce que l'air froid descend le long des pentes et se condense aux creux des vallées [12].

### **II.6.1.3. Les conditions défavorables à la formation du brouillard radiatif**

- Forte turbulence ou vent fort supérieur à 10 nœuds : l'air humide se mélange avec l'air sec ce qui empêche la saturation [12].
- Vent nul ou vent trop faible sur les premiers mètres au dessus de la surface terrestre : cela favorise le dépôt de la gelée blanche ou de la rosée [12].
- Ciel nuageux : réduit le refroidissement radiatif du sol [12].
- Forte dépression de la température du point de rosée : ce qui mène à un refroidissement moins intense [12].

### **II.6.1.4. Les caractéristiques et les conditions à l'échelle synoptique**

- Air stable: inversion.
- La formation et l'épaississement de ce type de brouillard sont au lever du soleil.
- Sa dissipation est généralement au cours de la matinée au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente.
- Le brouillard radiatif se focalise dans les régions les plus basses où l'air froid est plus condensé.
- Le brouillard radiatif est plus courant dans les zones qui se caractérisent par des vents légers et un ciel dégagé où la pression est élevée.
- Ce type de brouillard est susceptible d'être causé par un aéronaut à cause de la vapeur d'eau qui existe dans les gaz d'échappement ainsi la présence des noyaux de condensation [12].

## **II.6.2 Le brouillard d'advection**

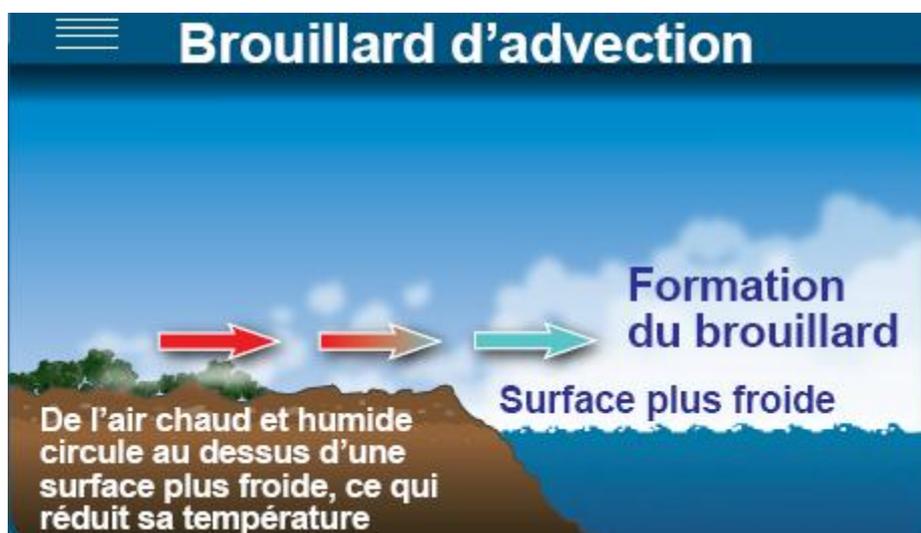
Le brouillard d'advection peut se produire au dessus des zones terrestres ou au dessus de la mer. Ce type du brouillard est habituellement plus épais au dessus de l'eau qu'au dessus des terres [14]. La figure ci-dessous présente l'influence du brouillard d'advection sur la visibilité.



**Figure II.3.** : Brouillard d'advection. [17]

### II.6.2.1. Le processus de formation du brouillard d'advection

Le brouillard d'advection se forme lorsqu'une masse d'air chaud et humide se déplace au dessus d'une surface plus froide, l'air humide se refroidit par conduction et transfère sa chaleur à une surface plus froide et quand sa température atteint celle du point de rosée  $T_d$ . Cela provoque la saturation de l'air [14]. Ce mécanisme est illustré dans la figure ci après :



**Figure II.4.** : Mécanisme de formation du brouillard d'advection [14].

### II.6.2.2. Les conditions favorables à la formation du brouillard d'advection

- Humidité relative élevée : le refroidissement est moins intense lorsque l'air est humide.
- Vents modérés de 8 à 17 nœuds : le brouillard est moins épais en présence des vents plus faibles, les vents les plus forts forment une couche de stratus bas.

- La différence entre la température de l'air et la température de la surface doit être importante, lorsque l'air est chaud le refroidissement par advection est intense
- La surface froide peut être une région couverte de glace ou de neige, une étendue d'eau froide (mer, lac.....) [12].

### II.6.2.3. Les caractéristiques et les conditions à l'échelle synoptique

- Changement de la direction du vent : un vent qui provient d'une autre direction peut transporter de l'air plus froid ou plus sec ce qui met fin aux conditions nécessaires à la formation du brouillard d'advection [12].
- La présence des obstacles terrestres contre le vent peut bloquer la formation du brouillard.
- Lorsque la surface se réchauffe, le brouillard d'advection devient moins dense, au fur et à mesure de l'augmentation de la température, la valeur de l'humidité spécifique croît et celle de l'humidité relative diminue [12].

### II.6.3 Le brouillard de pente

Ce type de brouillard est fréquent sur le côté face au vent des montagnes ou sur une surface à pente plus douce [12]. Ce brouillard est présenté par la Figure (II.5).

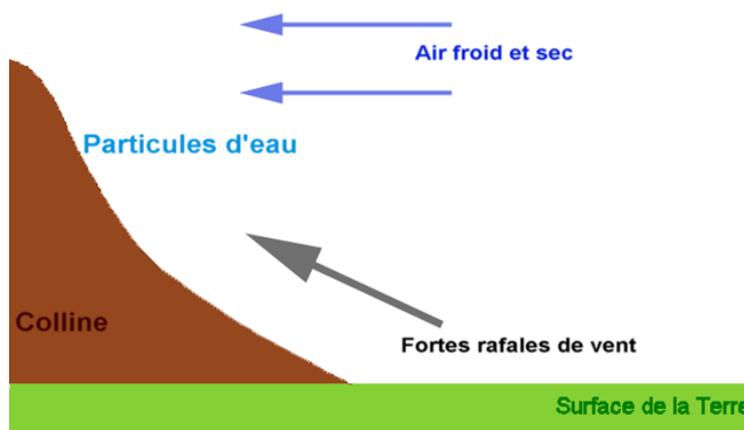


Figure II.5. : Brouillard de pente [18].

#### II.6.3.1. Le processus de formation de brouillard de pente

Le brouillard de pente se forme lors du déplacement de l'air vers des niveaux plus élevés. Cet air est soumis à un refroidissement adiabatique au fur et à mesure qu'il monte le long d'une pente. Lorsque la température de cet air atteint celle du point de rosée il y aura le phénomène

de saturation. La présence des noyaux de condensation combinés au refroidissement entraînent la condensation qui conduit à la formation brouillard [12]. La figure ci après présente le processus de formation de ce type de brouillard.



**Figure II.6.** : Mécanisme de formation du brouillard de pente [18].

### II.6.3.2. Les conditions favorables à la formation du brouillard de pente

- La force du vent est importante : les vents faibles entraînent des brouillards moins épais alors que les vents forts provoquent plus de mélange au voisinage du sol de façon qu'un brouillard épais puisse apparaître si l'air est saturé sur une couche plus dense.
- La valeur de l'humidité relative est élevée et elle augmente avec l'altitude : ce qui exige moins de refroidissement.
- Zone montagneuse ou en pente : de façon que le refroidissement adiabatique peut se produire au même temps que l'air est forcé de s'élever.
- La différence entre la température de l'air et la température du point de rosée doit être faible : ce qui nécessite un refroidissement moins important.
- Masse d'air stable [12].

### II.6.3.3. Les caractéristiques et les conditions à l'échelle synoptique

- La hauteur de la pente joue un rôle très important puisque  $T_d$  diminue à peu près 2 degrés chaque 1 km.
- La formation de brouillard de pente s'accorde étroitement à la topographie à l'échelle locale.
- Le brouillard de pente demeure jusqu'au changement de la direction du vent ou de la masse d'air.
- Lorsqu'il y a des précipitations, le brouillard de pente contribue à un brouillard de précipitation de plus vaste étendue.
- Il se disparaît sous le vent à cause du phénomène de subsidence [12].

## II.6.4. Brouillard de précipitation

Le brouillard de précipitation se présente avec les précipitations. Il peut transformer en bruine qu'en forte pluie parce que les gouttelettes les plus fines s'évaporent plus facilement. Plus la durée des précipitations est longue plus les vents sont légers ce qui rend la présence du brouillard possible. On distingue deux types de brouillard de précipitation : un qui se forme généralement à l'avant d'un front chaud et l'autre après le passage d'un front froid [12].

La figure ci-dessous montre la diminution de la visibilité en cas du brouillard de précipitation.



Figure II.7. : Brouillard de précipitation [19].

### II.6.4.1. Brouillard préfrontal : front chaud

- **Processus de formation brouillard préfrontal**

C'est le brouillard qui se présente à l'avant d'un front chaud et qui est provoqué généralement par l'augmentation de l'humidité dans l'air froid se trouvant en bas. Cette augmentation est due à l'évaporation des précipitations qui tombent à l'avant du front et cela entraîne la saturation de l'air en provoquant une condensation dans toute les couches d'air froid [14]. Le mécanisme d'apparition de ce type de brouillard est expliqué dans la figure (II.8).



**Figure II.8.** : Mécanisme de formation du brouillard préfrontal [14].

- **Les caractéristiques et les conditions à l'échelle synoptique**

- L'association du brouillard préfrontal à des nimbostratus provoque de la pluie pendant quelques heures. Durant que la pluie tombe, la base des nimbostratus descend jusqu'au sol en produisant l'apparition du brouillard au même temps que le front chaud approche. Après le passage du front le brouillard se lève.
- Le mécanisme de formation des stratus fractus est pareil à celui du brouillard préfrontal.
- Le brouillard préfrontal est généralement suivi de bruine [12].

#### **II.6.4.2. Brouillard postfrontal: front froid**

Les précipitations qui pénètrent dans l'air froid et stable provoquent ce type de brouillard en entraînant la saturation de l'air par augmentation d'humidité [12].

Le brouillard postfrontal est identique au brouillard radiatif qui se présente au dessus d'une surface humide sous un ciel dégagé et avec des vents faibles [14].

#### **II.6.5. Brouillard d'affaissement de stratus**

On l'appelle aussi brouillard d'inversion. Il s'agit d'un brouillard se produisant par abaissement régulier de la base d'une couche de stratus [14]. La figure ci-après illustre la présence de ce type de brouillard.



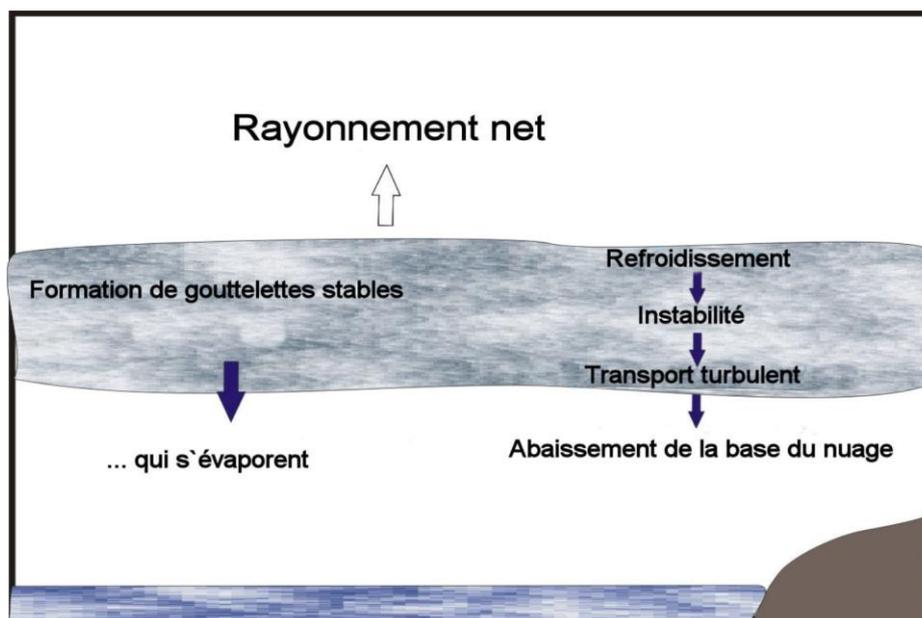
**Figure II.9.** : Brouillard d'affaissement de stratus [14].

#### **II.6.5.1. Le processus de formation du brouillard d'affaissement de stratus**

Le processus de formation de ce type de brouillard commence généralement la nuit. En effet, le refroidissement par rayonnement est réduit en présence de stratus mais il n'est pas éliminé si la couche du nuage n'est pas épaisse. Par ailleurs, la surface supérieure du stratus représente une surface de refroidissement radiatif en l'absence de nuages dans l'atmosphère au dessus de cette surface. La perte de chaleur est redistribuée vers le bas par le mélange d'air ce qui entraîne le refroidissement de l'air sous la couche du nuage et l'abaissement du niveau de condensation.

Le refroidissement du dessus de la surface du nuage provoque la formation de gouttelettes d'eau plus grosses et stables, ces gouttelettes entraînent l'allongement de la base du nuage vers le bas jusqu' à ce qu'il atteigne le sol [12].

Ce mécanisme est illustré dans la figure ci-après.



**Figure II.10 :** Représentation du processus de formation du brouillard d'affaissement de stratus [12].

### II.6.6. Brouillard d'évaporation

Il est aussi appelé fumée de mer ou fumée de mer arctique. Ce type apparaît durant les mois les plus froids de l'année lorsque l'air qui se déplace au dessus de l'eau est plus froid. Le brouillard d'évaporation est susceptible d'avoir plusieurs mètres d'épaisseur et il provoque généralement du givrage sur la surface des avions, des navires...etc. [14]. Ce type de brouillard est présenté dans la figure ci-dessous.



**Figure II.11. :** Brouillard d'évaporation [14].

### II.6.6.1. Processus de formation du brouillard d'évaporation

La fumée de mer arctique se présente par évaporation quand l'air froid et sec circule au dessus d'une surface d'eau considérablement plus chaude [12]. La couche d'air inférieure près de l'eau se réchauffe en contact de l'air froid avec cette eau qui est plus chaude [14]. La quantité de la vapeur d'eau dans l'air augmente au même temps que l'eau chaude s'évapore, simultanément. Cet air est réchauffé par l'eau chaude mais le rapport de mélange augmente plus vite que le rapport de mélange de saturation. Ce qui se présente par un état de condensation et de sursaturation [12]. La figure ci-dessous illustre le mécanisme de formation de ce type de brouillard.

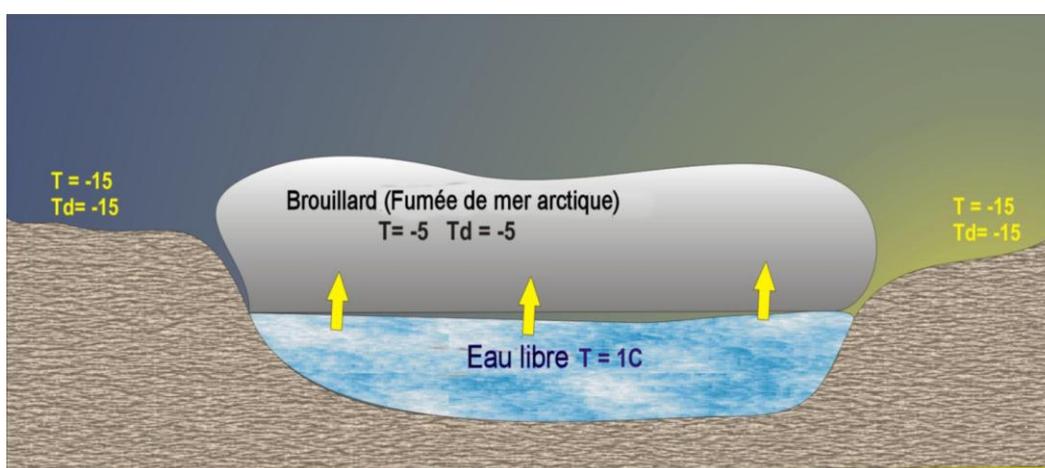


Figure II.12. : Représentation du processus de formation du brouillard d'évaporation [12].

### II.6.6.2. Les conditions favorables à la formation du brouillard d'évaporation

- Tôt le matin : l'eau est chaude par rapport à la température de l'air.
- À l'automne : l'air est froid comparé à la température de l'eau.
- Humidité relative élevée : plus l'humidité relative est élevée plus le processus d'évaporation est réduit.
- Un taux élevé de noyaux de condensation : cela favorise le processus de condensation.
- Vents faibles : la vapeur d'eau est dissipée par les vents forts.
- En hiver : il se forme dans les arctiques au dessus des surfaces d'eau entourées de glace ou les régions côtières près d'eau libre où l'air est très froid comparé à la température de l'eau [12].

### **II.6.7. Brouillard d'évaporation le matin**

Ce type de brouillard se produit dans des situations assez similaires à celles qui provoquent la formation du brouillard radiatif excepté que la rosée s'est déposée sans qu'il se forme le brouillard radiatif [12]. La Figure (II.13) représente le brouillard d'évaporation matinale.



**Figure II.13. :** Brouillard d'évaporation matinale [20].

#### **II.6.7.1. Le processus de formation du brouillard d'évaporation matinale**

Ce type de brouillard apparait après le lever du soleil lorsqu'il ya évaporation et mélange près du sol. Généralement, à la fin d'une nuit calme et un ciel dégagé, quand le refroidissement par rayonnement a diminué la température de l'air dans une couche mince au voisinage de la surface jusqu'à la température du point de rosée ceci provoque la formation d'une couche épaisse de la rosée sur le sol. Après le lever du soleil, le réchauffement solaire provoque l'évaporation de la rosée en augmentant la vapeur d'eau dans l'air, le mélange de l'air humide avec de l'air plus sec sus-adjacent par un vent léger entraine une sursaturation et par conséquent la formation du brouillard [12].

#### **II.6.8. Brouillard de mélange**

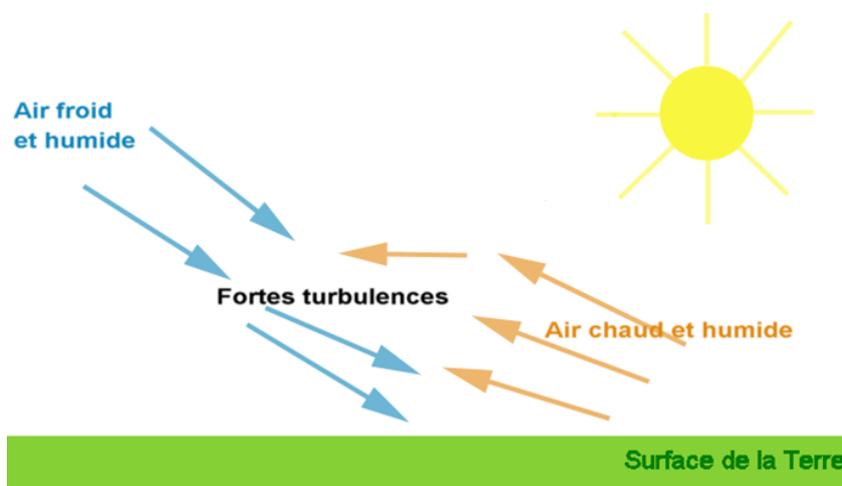
Le brouillard de mélange est lié à une advection locale de deux masses d'air distinctes. Il est différent du brouillard d'advection du fait que ce dernier est lié à une advection d'air chaud et humide à grande échelle qui circule sur une terre froide [21]. Ce type de brouillard est représenté dans la figure ci-dessous.



**Figure II.14.** : Brouillard de mélange [22].

### II.6.8.1. Le processus de formation du brouillard de mélange

Le brouillard de mélange se forme lorsqu'une masse d'air chaud et humide se rencontre avec une masse d'air froid et humide sous un vent fort. Ce qui résulte une masse d'air saturée ainsi la condensation des particules par le refroidissement en entraînant la formation du brouillard [21]. La figure ci après montre le mécanisme de formation du brouillard de mélange.



**Figure II.15.** : Mécanisme de formation du brouillard de mélange [18].

### II.6.9. Brouillard de glace

On l'appelle également « brouillard glacé ». Il est constitué de minuscules cristaux de glace et il apparaît pendant les mois d'hiver les plus froids [14]. Les basses températures ( $T < -10^{\circ}\text{C}$ ) et la présence des noyaux de glace dans l'air avec une humidité relative de glace très élevée ( $\text{HR}_g > 99\%$ ) entraînent la formation de ce type de brouillard [12].

La formation du brouillard glacé est suffisamment courante lorsque la température de l'air est inférieure à  $-30^{\circ}\text{C}$  et lorsque les vents sont faibles.

Le brouillard de glace est susceptible d'être très dense et il se prolonge jour et nuit jusqu'à l'élévation de la température [14]. La Figure (II.15) illustre la réduction de la visibilité par ce type de brouillard.



**Figure II.16. :** Brouillard de glace [23].

## **II.7. Dissipation du brouillard**

La connaissance des processus de formation du brouillard est très essentielle à fin d'arriver à prévoir sa dissipation [12]. Généralement, les conditions suivantes provoquent la réduction de l'effet de ce phénomène :

- Une longue période d'ensoleillement.
- Une forte turbulence ou vent fort.
- Début de précipitation.
- Toute variation importante des processus de formation du brouillard.

### **II.7.1. Ensoleillement**

Les effets de l'ensoleillement comme processus de dissipation du brouillard dépendent de sa capacité à réchauffer l'air pour diminuer l'humidité relative. Lorsque la lumière du soleil pénètre dans le brouillard et réchauffe la surface terrestre elle provoque une augmentation de la température de l'air qui est au voisinage de la terre. Alors, l'air chaud en s'élevant il se mélange avec l'air dans le brouillard ce qui permet l'augmentation de sa température. Dans l'air, légèrement plus chaud, l'évaporation d'une partie des gouttelettes du brouillard permet à une plus grande quantité de la lumière d'arriver à la surface. L'augmentation du réchauffement provoque ainsi la dissipation totale du brouillard.

Dans les situations où il ya la présence de la rosée avec le brouillard, l'effet du soleil favorise la formation du brouillard (dans le cas du brouillard d'évaporation matinale). L'évaporation de la rosée permet au brouillard de persister plus longtemps que sur les surfaces sans rosée. Parfois, le brouillard est susceptible d'être transformé en stratus lors de sa dissipation.

L'angle du soleil joue un rôle très important dans la dissipation du brouillard et il varie pour plusieurs raisons. Il dépend de :

- 1- L'heure : l'ensoleillement est un mécanisme plus efficace du lever du soleil jusqu'à midi.
- 2- La période de l'année : l'ensoleillement est plus rapide en été qu'en hiver.
- 3- La latitude de la région : l'ensoleillement est meilleur aux basses latitudes qu'aux latitudes élevées.

Le brouillard dure plus longtemps s'il est d'une épaisseur importante et donc la quantité de la lumière du soleil qui y pénètre est faible [12].

### **II.7.2. Forte turbulence ou vent fort**

Les vents forts provoquent un fort mélange turbulent qui combine de l'air plus sec avec le brouillard en entraînant sa dissipation [12].

### **II.7.3. Brouillard et les précipitations**

Le brouillard provoque couramment des précipitations sous forme de pluie, bruine et même de la neige très légère [12].

**a- Pluie et brouillard en même temps :** Lors d'un épisode de forte pluie la visibilité est parfois réduite à moins de 1 km à cause de l'intensité de cette pluie. Lorsque la pluie tombe sur un brouillard déjà formé la visibilité est souvent améliorée parce que la concentration de fines gouttelettes dans le brouillard diminue sous l'effet de balayage [12].

**b- Bruine et brouillard en même temps :** Lors d'un épisode de bruine accompagné de brouillard la visibilité est souvent mauvaise, sans doute à cause de la grande concentration numérique des gouttelettes ainsi de leur dimension comparée à celle de la pluie [12].

**c- Neige et brouillard en même temps :** Lors d'un épisode de brouillard ayant une quantité importante de liquide et si la neige tombe les flocons de neige vont grossir et les gouttelettes liquides vont devenir plus rares et cela diminue la visibilité. Dans un brouillard composé de cristaux de glace, il est probable que les flocons de neige balayent une partie de ces flocons, ce qui entraîne une amélioration de la visibilité en comparant au brouillard seul [12].

## **II.8. Diagnostic du brouillard**

Le diagnostic du brouillard et des stratus est susceptible d'être compliqué car ce sont des nuages bas. C'est-à-dire, ils se présentent au voisinage de la surface sous d'autres couches nuageuses et ils évoluent fortement dans le temps et dans l'espace [12].

Dans ce qui suit, nous allons décrire quelques méthodes de diagnostic utilisées par les prévisionnistes.

### **II.8.1. Observations météorologiques classiques par des personnes**

Ces observations fournissent plus de détail sur l'existence des brouillards et des stratus avec une meilleure précision. Mais malheureusement, lorsque les stations au sol où ont lieu ces observations sont dispersées la résolution spatiale devient plus faible ce qui explique la mauvaise fiabilité des observations [12].

### **II.8.2. Stations d'observations automatiques**

Ces stations sont de plus en plus nombreuses, mais elles ne donnent généralement que les paramètres météorologiques de base tel que : la pression, la température, l'humidité relative...etc. A partir de ces données rapportées des déductions incertaines peuvent être établies concernant l'existence de brouillard ou de stratus.

Les systèmes automatisés d'observation météorologiques (AWOS) sont implantés dans des aéroports. Ces systèmes contiennent un capteur qui mesure la visibilité telle qu'elle a été aperçue par l'œil humain.

Les prévisionnistes peuvent déduire la nature de l'obstacle de la vision en associant l'information donnée par ces systèmes et celle du célomètre. Le résultat final obtenu à partir de ces deux moyens dépend de la formation et de l'expérience du prévisionniste ainsi de sa manière d'interpréter les données [12].

### **II.8.3. Observation à bord de navires**

Généralement les observations faites à bord des navires ne contiennent pas de renseignements spécifiques à propos de la visibilité et de la hauteur du plafond. Ces observations comprennent des informations générales et imprécises. Les navires destinés à des fins de recherches

océanographiques, glaciologiques ou atmosphériques donnent souvent des informations plus détaillées [12].

#### **II.8.4. Caméra web**

Les caméras web représentent des ressources très importantes pour les prévisionnistes. Quand leur signal est disponible, les caméras web peuvent participer à combler les lacunes entre les stations d'observation classique et elles sont susceptibles de fournir une meilleure estimation de ce qui apparaît à des zones particulières. La mise à jour des images à des intervalles de quelques minutes donne une résolution temporelle plus efficace. Bien que ces images ne donnent pas d'estimation numérique de la visibilité, les caméras web sont susceptibles de se présenter spécifiquement utiles pour les diagnostics de brouillard. Dans certains cas, elles permettent la déduction de l'existence de stratus bas [12].

#### **II.8.5. Imagerie satellitaire**

L'imagerie satellitaire donne de grandes possibilités pour le diagnostic de brouillard et de stratus mais elle présente de nombreuses limites. Des nuages en altitude peuvent recouvrir le brouillard et les stratus, ainsi ces derniers peuvent se fondre avec les éléments topographiques ou même être invisible dans certains canaux car ils se trouvent sous une région de forte inversion dans les bas niveaux donc qui comporte des températures plus élevées en surface. Des techniques de différenciation des canaux vont pouvoir se montrer prometteuses dans certaines situations où les données satellitaires sont introduites à des observations modélisées. Au contraire même si elles permettent une identification correcte de la zone de brouillard et de stratus, elles ne donnent pas des renseignements sur la visibilité dans le brouillard ou la hauteur de la base de stratus au dessus de la surface [12].

### **II.9. Les dangers du brouillard sur l'aéronautique**

Le brouillard est l'un des phénomènes météorologiques les plus dangereux pour tous types de transport : routier, maritime et aérien. Pour ce dernier, il est difficile pour un pilote de maintenir la sécurité à l'intérieur du brouillard puisqu'il diminue la visibilité à moins de 1km alors le sol et les obstacles deviennent invisibles [1].

Sur les aéroports, la présence du brouillard est susceptible de retarder les décollages des avions ou leurs atterrissages. Aussi, le brouillard peut annuler les vols ou bloquer totalement le trafic aérien. Ce qui entraîne des pertes financières importantes pour le domaine aéronautique ainsi la difficulté de gérer le trafic aérien [13]. Le brouillard peut être givrant s'il

est constitué de gouttelettes d'eau surfondue à une température négative cela peut engendrer des dépôts important sur les aéronefs, les chaussés en introduisant un autre phénomène aussi très dangereux qui est le givrage [1].

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, Nous avons présenté le phénomène du brouillard d'une manière détaillée. Nous avons mentionné ses caractéristiques, sa formation, sa phase mature, sa dissipation. Puis nous avons illustré ses différents types, leurs processus de formation et quelques techniques utilisées pour diagnostiquer le brouillard. Enfin, Nous avons cité quelques dangers du brouillard sur l'activité aérienne.

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons donner une idée générale sur la prévision numérique du temps et définir, également, le modèle numérique de prévision du temps. Ensuite, nous allons citer quelques modèles utilisés pour la prévision météorologique. Enfin, nous expliciterons les différentes méthodes utilisées pour la paramétrisation de la visibilité réduite par le brouillard.

### **III.1. La prévision numérique du temps**

C'est une science très jeune étant donné qu'elle est apparue pendant la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> qui bénéficiait de façon continue des évolutions en matière d'outils de calculs automatiques.

Le principe de cette discipline est la simulation de l'évolution de l'atmosphère sur un ordinateur d'une manière réaliste plus rapide que son évolution ne se produise dans la réalité. Cette simulation dépend des lois physiques gouvernant l'évolution atmosphérique. Les principales sont celles de la mécanique des fluides qui sont complétées par celles d'autres processus existants dans l'atmosphère comme, la convection, le rayonnement, les changements d'état d'eau (liquide, gazeux, solide), la turbulence...etc. [24].

#### **III.1.1. Démarche scientifique et technique**

La première phase de la démarche consiste à formuler des hypothèses cohérentes sur la nature du milieu atmosphérique et son évolution. Ces hypothèses sont traduites en équation mathématique en décrivant les différentes interactions à laquelle est soumise une particule fluide de masse unité pendant un temps infinitésimal.

On aura ainsi un système d'équations différentielles non linéaire qui suit les grands principes physiques comme la conservation de la masse ou de l'énergie.

La résolution de ce système d'équation fait intervenir des termes inconnus nouveaux qui sont définis par la connaissance de l'état initial de l'atmosphère. Ceci introduit un élément essentiel qui est la nécessité de décrire le temps qu'il fait au début de la prévision avec la même forme mathématique et physique que celle qui se produit dans le système d'équation à résoudre.

Ces systèmes d'équations représentent des systèmes dynamiques très complexes qui donnent, pour la plupart du temps, une sensibilité assez compliquée à l'état initial en fonction du temps qu'il fait et du type de phénomène à examiner.

Puisqu'on ne connaît pas la solution analytique de ces équations, on s'efforce alors à calculer des solutions approchées ce qui mène à un algorithme qui permet de calculer les états successifs à venir en connaissant l'état initial. Cet algorithme est mis en œuvre grâce à un programme d'ordinateur et il fonctionne à partir de l'état initial, pour simuler les états futurs de l'atmosphère. Les services météorologiques disposent de plusieurs types d'observations de l'atmosphère à savoir : satellites, radars, stations terrestres, navires, ballon...etc.

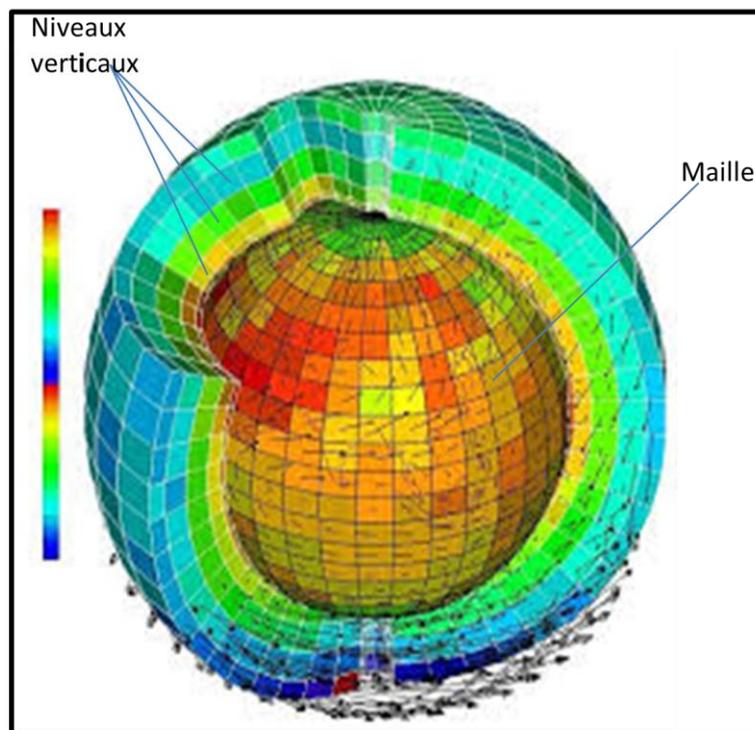
Toutes ces données sont collectées à travers le globe et sont ensuite subies un traitement particulier dans le cycle d'assimilation des données à fin de préparer, à partir de ces données, l'état initial des modèles numériques connu sous le nom « ANALYSE » [24].

### **III.1.2. La définition d'un modèle de prévision numérique du temps (PNT)**

Un modèle de prévision numérique du temps (PNT) constitue l'un des outils les plus intéressants pour la prévision météorologique opérationnelle. Les modèles numériques sont principalement des programmes informatiques qui traduisent les systèmes mathématiques des équations qui régissent l'atmosphère en code informatique, généralement écrit en fortran. Ces modèles permettent de prévoir l'état futur de l'atmosphère (pour les heures, jours et semaines qui viennent), en se basant sur une estimation de son état présent [12].

- **La grille des modèles numériques :**

La numérisation des équations est effectuée en divisant l'espace au moyen de boîtes définies par une grille horizontale et par un certain nombre de niveaux verticaux (figure III.1). Dans chaque boîte, l'atmosphère est supposée homogène et il suffit donc de connaître les valeurs des diverses grandeurs atmosphériques en un point de chaque boîte [25].



**Figure III.1.** : La grille du modèle numérique. Deux grandeurs atmosphériques y sont portées : le vecteur vent et la température (échelle à gauche) [25].

### III.1.3. Limites des modèles numériques

La précision des prévisions numériques dépend avant tout de la puissance des ordinateurs et de la résolution des modèles mais aussi il existe d'autres paramètres qui viennent de limiter cette résolution.

D'une part la résolution spatiale des modèles ne permet pas de simuler des évènements locaux comme une tornade ou un orage qui évoluent dans l'espace. Chacun de ces phénomènes représentent une certaine évolution verticale propice ou non au développement d'activité près du sol. Les modèles numériques ont du mal à simuler les supercellules orageuses associées aux cumulonimbus qui s'étendent parfois sur plusieurs kilomètres pour cette raison qu'un orage local sera indétectable.

D'autre part, il y a la résolution temporelle, chaque phénomène atmosphérique évolue à une certaine vitesse dans le temps qui varie également en fonction de son stade évolutif. Des frottements entre les masses d'air et sur le sol, autant de variable qu'il est parfois difficile d'évaluer et de quantifier en raison d'interactions multiples (par exemple les caractéristiques de l'air en altitude, les reliefs...etc).

La résolution spatio-temporelle d'un modèle de prévision dépend également du phénomène étudié et de son cycle de vie en obéissant aux lois de la thermodynamique.

D'autres facteurs peuvent limiter la qualité du modèle de prévision, ce dernier doit prendre en compte les propriétés du milieu pluvio-nuageux (c.-à-d. la taille des gouttelettes d'eau et leur état physique), de la chimie atmosphérique ainsi que les détails du sol (végétation, montagne, ville, neige...etc.).

Enfin, un modèle numérique n'est pas isolé et doit tenir en compte au bord de son domaine de données extérieures particulièrement des prévisions internationales. Pour que le modèle soit fiable il faut l'alimenter avec des informations bien précises sur le temps qu'il fait par tout sur le globe. A ce moment-là, c'est le modèle globale qui tient compte des renseignements apportés par les stations météorologiques, telles que les avions, les radars, les satellites...etc. Mais étant donné que la densité de réseau d'observation est faible, notamment au-dessus des océans, régions désertiques, les données qui manquent doivent être interpolées à partir des mesures connues, ce qui influence sur la qualité de la prévision météorologique [26].

## **III.2. Prévision du brouillard à l'aide des modèles PNT**

### **III.2. 1. Le modèle GEM**

En français le modèle GEM est nommé comme « modèle Global Environnemental Multi-échelle » tandis qu'en anglais « the Global Environmental Multiscale » : c'est un modèle opérationnel qui est utilisé par le centre météorologique canadien (CMC).

Le modèle GEM est susceptible d'être utilisé pour une grande diversité de phénomènes météorologiques et pour une vaste échelle spatiale. Pour pouvoir modéliser l'atmosphère de l'échelle micro à l'échelle planétaire plusieurs configurations de grille sont disponibles [12].

Ce modèle comprend les 3 configurations suivantes [12]:

- 1- Une configuration globale : cette configuration couvre la planète terre avec une résolution de  $0.9^\circ$  (latitude et longitude), elle donne une prévision jusqu'à 10 jours.
- 2- Une configuration régionale : cette configuration du modèle GEM est appelée « modèle régional », elle est utilisée pour fournir des prévisions déterministes à court terme (48 heures). Le modèle régional utilise une grille planétaire à mailles

horizontales variables avec une zone de résolution horizontale uniforme de 15 km et de 58 niveaux dans la verticale.

- 3- GEM –LAM (Limited Area Model): dans cette configuration la grille du modèle est une zone "rectangulaire" au-dessus d'une partie spécifique du globe. La configuration LAM permet d'utiliser une résolution plus élevée sur une région déterminée du modèle du modèle GEM grâce à la grande quantité de points dans la grande quantité de points dans la grille, cette méthode permet d'initialiser un schéma de condensation plus détaillé et apte à simuler le brouillard.

### **III.2.2. L'approche du modèle NCEP RUC**

Le modèle Rapid-Update Cycle (RUC) est l'un des modèles PMN du centre national pour la prévision environnementale (NCEP) des Etats Unis d'Amérique qui utilisent un type de schéma microphysique explicite des nuages similaire à celui de la configuration LAM du modèle GEM, dans lequel les rapports de mélange de masse des hydrométéores comme les nuages, la pluie, la neige et glace sont définis. Les coefficients d'extinction qui conviennent aux rapports de mélange des hydrométéores sont calculés à partir de l'algorithme de Stoelinga et Warner (1999) suivant des relations empiriques et théoriques. Les coefficients sont ensuite additionnés et utilisés pour calculer la visibilité [12].

### **III.2.3. Le modèle COBEL**

COBEL signifie : COde de Brouillard à l'Echelle Locale, son développement a été dans les années 1990 par le Centre National de Recherche Météorologiques de Météo-France et le Laboratoire d'Aérodynamique (LA) du Centre Nationale de la Recherche Scientifique (CNRS).

Ce modèle a une dimension (verticale) permet de calculer l'évolution des paramètres atmosphériques en un point géographique et sur de nombreux niveaux verticaux. Les 20 premiers niveaux représentent les 200 premiers mètres de l'atmosphère. Au début il a été conçu pour les activités de recherche puis il devient très intéressant pour l'aéronautique parce que le brouillard réduit la sécurité et la régularité du trafic.

Le modèle COBEL estime sur la verticale l'évolution des paramètres atmosphériques (température, l'humidité, le contenu en eau liquide, la turbulence...etc.) et ainsi les conditions de visibilité existant sur l'aéroport c'est pour cette raison que plusieurs aéroports en France sont équipés de systèmes de mesures installés près de pistes et qui transmettent leur données à COBEL [27].

### **III.3. Application de nouvelles paramétrisations de la visibilité dans les modèles de prévision numériques du temps pour les brouillards chauds**

Gultepe et al. (2006) ont appliqué des différentes méthodes pour la paramétrisation de la visibilité sur des modèles méso-échelle non hydrostatique avec un plan microphysique détaillé pour montrer la différence dans le calcul de la visibilité en utilisant les anciennes et les nouvelles équations [28].

Afin de développer de nouvelles méthodes de paramétrisation pour les brouillards chauds, Gultepe et al. (2006) ont utilisé des observations qui ont été recueillies durant la campagne de mesure RACE (Radiation and Aerosol Cloud Experiment) qui a eu lieu dans l'est du Canada au cours des mois d'Août et Octobre en 1995. Plusieurs instruments de mesure ont été déployés pendant cette campagne de mesure pour collecter les données utiles pour la validation de la nouvelle paramétrisation proposée par Gultepe et al. (2006). Ces données concernent : la concentration des gouttelettes  $N_d$ , le contenu en eau liquide LWC, température  $T$ , l'humidité relative  $RH_w$ . Par exemple la concentration numérique des gouttelettes  $N_d$  est obtenue à partir de deux mesures FSSP (Forward-Scattering Spectrometer Probe), FSSP-100 avec une gamme de taille d'origine (2.1- 48.4  $\mu\text{m}$  ; FSSP-96) et une large gamme de taille (4.6-88.7  $\mu\text{m}$ ).

Les observations obtenues à partir des instruments de surface à proximité de l'aéroport de Zurich comme Vis,  $T$ , la vitesse du vent,  $RH_w$  pour la journée du 28 Novembre 2004 ont été également utilisées pour valider les simulations NMM 3D (Nonhydrostatic Meso-scale Model) [28].

#### **III.3.1. Les méthodes de paramétrisation de la visibilité**

##### **III.3.1.1. La paramétrisation de la visibilité en fonction du coefficient d'extinction $\beta_{\text{ext}}$ :**

Le coefficient d'extinction a été calculé à partir des mesures FSSP et obtenu par la relation suivante [28] :

$$\beta_{\text{ext}} = \sum Q_{\text{ext}}.n(r)\pi r^2 dr \quad (\text{III.1})$$

Où :

$n$  : est la densité en nombre des particules

$r$  : est le rayon des particules

$Q_{\text{ext}}$  : est le coefficient d'extinction de Mie : il est lié au nombre de concentration, rayon des particules et à la longueur d'onde de la lumière, lorsque la taille des gouttelettes augmente et dépasse  $4 \mu\text{m}$ ,  $Q_{\text{ext}}$  devient 2. Il varie entre 3.8 et 0.9 lorsque les tailles des particules sont inférieures à  $4 \mu\text{m}$ .

Le coefficient d'extinction est converti en visibilité horizontale en utilisant l'équation III.2 [28]:

$$\text{Vis} = - \frac{\ln 0.02}{\beta_{\text{ext}}} \quad (\text{III.2})$$

### III.3.1.2. La paramétrisation de la visibilité en fonction de $N_d$ ou LWC

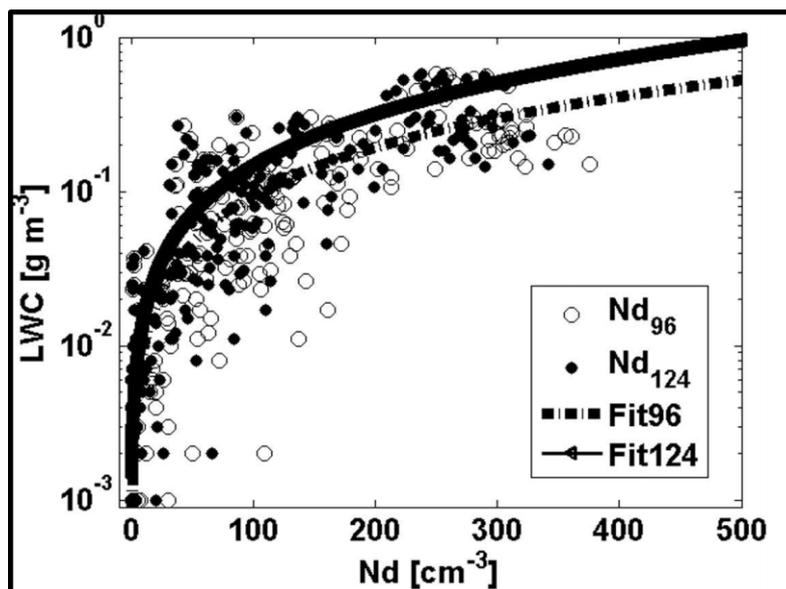
Une nouvelle paramétrisation a été développée après avoir montré la relation entre Vis et LWC et entre Vis et  $N_d$ . La figure (III.1) montre que LWC est obtenu à partir de sondes à fil chaud par contre  $N_d$  qui basé sur des mesures de FSSP-100 avec la gamme de taille d'origine et la gamme de taille étendue.

LWC est proportionnel à  $N_d$ , pour un LWC donné  $N_d$  change de quelque gouttelettes par volume jusqu'à  $100\text{cm}^{-3}$ . Les lignes ajustées de la figure III. 1 pour FSSP-96 et FSSP-124 sont données par les relations suivantes [28] :

$$\text{LWC}_{96} = 1*10^{-6} *N_d^2 + 0.0014*N_d \quad (\text{III.3})$$

Et :

$$\text{LWC}_{124} = 3*10^{-7} *N_d^2 + 0.0009*N_d \quad (\text{III.4})$$



**Figure III.2 :** LWC en fonction de  $N_d$  à partir de deux mesures FSSP du programme du terrain RACE 1995. Le  $N_{d96}$  et le  $N_{d124}$  sont obtenus à partir des mesures FSSP-96 et FSSP-124, respectivement [28].

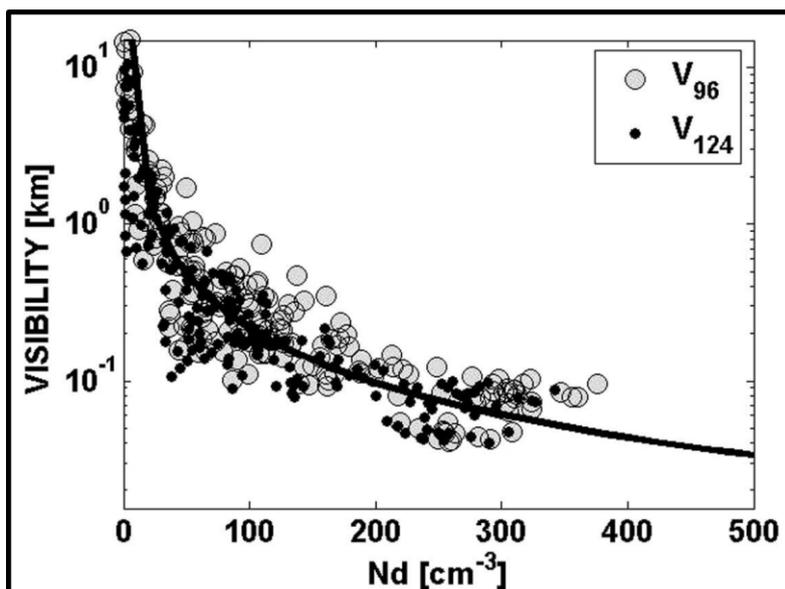
L'erreur quadratique moyenne (rmse) et l'erreur relative moyenne (mre) dans l'estimation de LWC sont de  $0.02 \text{ g.m}^{-3}$  et 76%, respectivement, indiquent une grande variabilité dans les observations. Les ajustements aux données FSSP montrent des différences significatives liées à leurs gammes de taille; ici, les observations de FSSP-96 ont été prises en compte dans les calculs en raison de l'existence de petites gouttelettes de brouillard ( $<50 \text{ um}$ ).

La figure (III.2) représente la visibilité en fonction de  $N_d$  qui est obtenu à partir des mesures de FSSP avec la gamme de taille d'origine. Cette figure montre aussi que la visibilité diminue rapidement quand  $N$  augmente  $N_d < 100 \text{ cm}^{-3}$  et ensuite elle diminue petit à petit pour  $N_d > 100 \text{ cm}^{-3}$ .

L'équation pour l'ajustement est donnée par [28]:

$$\text{Vis} = 44.989 * N_d^{-1.1592} \quad (\text{III.5})$$

L'erreur quadratique moyenne (rmse) et l'erreur relative moyenne (mre) dans l'estimation de la visibilité sont 18 m et 46%, respectivement. De grande variation de la visibilité (Vis) se produit lorsque  $N_d$  varie de quelques gouttelettes jusqu'à  $100 \text{ cm}^{-3}$ . Au-dessus de  $100 \text{ cm}^{-3}$ , la visibilité (Vis) devient inférieure à 100 m.

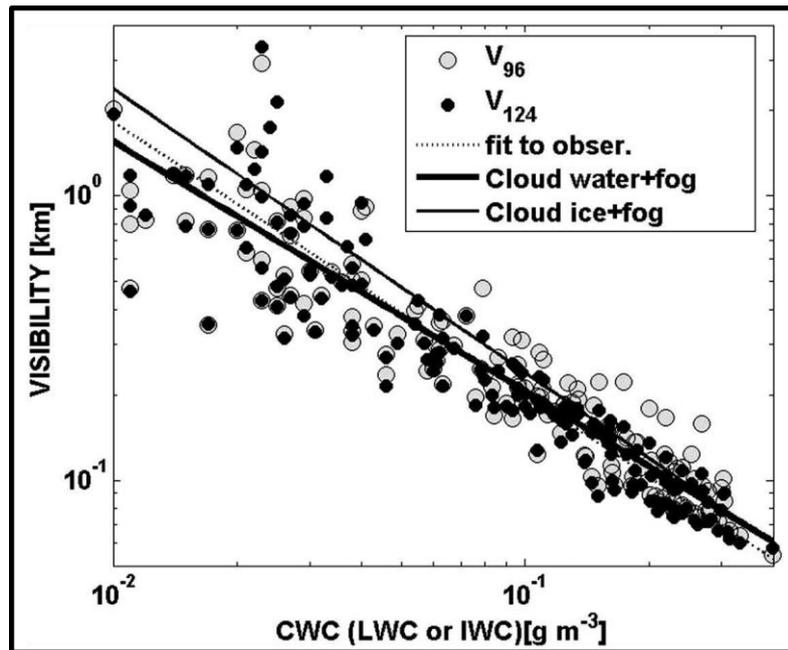


**Figure III.3 :** La visibilité en fonction de  $N_d$ . les visibilités  $V_{96}$  et  $V_{124}$  sont obtenues à partir des observations faites par FSSP-96 et FSSP-124, respectivement [28].

La figure (III.3) montre à la fois la Visibilité en fonction de LWC et en fonction de la teneur en eau glacé IWC. On remarque que la variabilité de la visibilité (Vis) en fonction de la teneur en eau condensé est comparable à la variabilité de la visibilité (Vis) en fonction de  $N_d$  indiquée précédemment. L'ajustement de la visibilité (Vis) en fonction de LWC est obtenu par la relation suivante [28]:

$$Vis = 0.0219 * LWC^{-0.9603} \quad (III.6)$$

La visibilité devient plus petite à  $LWC > 0.03 \text{ g.m}^{-3}$  relatif à l'ajustement  $Vis_k$  et à  $LWC < 0.03 \text{ g.m}^{-3}$  elle devient plus grande. L'erreur quadratique moyenne (rmse) et l'erreur relative moyenne (mre) dans l'estimation de la visibilité sont à peu près 37 m et 44%.



**Figure III.4 :** La visibilité calculée à partir des mesures FSSP (FSSP-96 et FSSP-124), et la visibilité en fonction de LWC et IWC [28].

### III.3.1.3. La paramétrisation de la visibilité K84 en fonction de LWC

La paramétrisation de la visibilité était également fondée sur les mesures FSSP dans la gamme de taille 0.5 – 45  $\mu\text{m}$ . Les paramétrisations pour le coefficient d'extinction en fonction de LWC de Kunkel (1984) et en fonction d'IWC de Stoelinga et Warner (1999) sont données par les relations suivantes [28]:

$$\beta_{\text{ext;water}} = 144.7 * \text{LWC}^{0.88} \quad (\text{III.7a})$$

et:

$$\beta_{\text{ext;ice}} = 163.9 * \text{IWC}^{1.0} \quad (\text{III.7b})$$

Où :

$\beta_{\text{ext}}$  et LWC : ont des unités de  $[\text{km}^{-1}]$  et  $[\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ , respectivement.

Puis,  $\beta_{\text{ext}}$  de l'équation précédente est converti en  $\text{Vis}_k$  en utilisant l'équation (III.2).

Après la conversion, l'équation de  $\text{Vis}_k$  en fonction de LWC est donnée comme [28] :

$$\text{Vis}_k = 0.027 * \text{LWC}^{-0.88} \quad (\text{III.8})$$

Cette équation est utilisée pour la paramétrisation de la variabilité dans de nombreux modèles opérationnels de prévision.

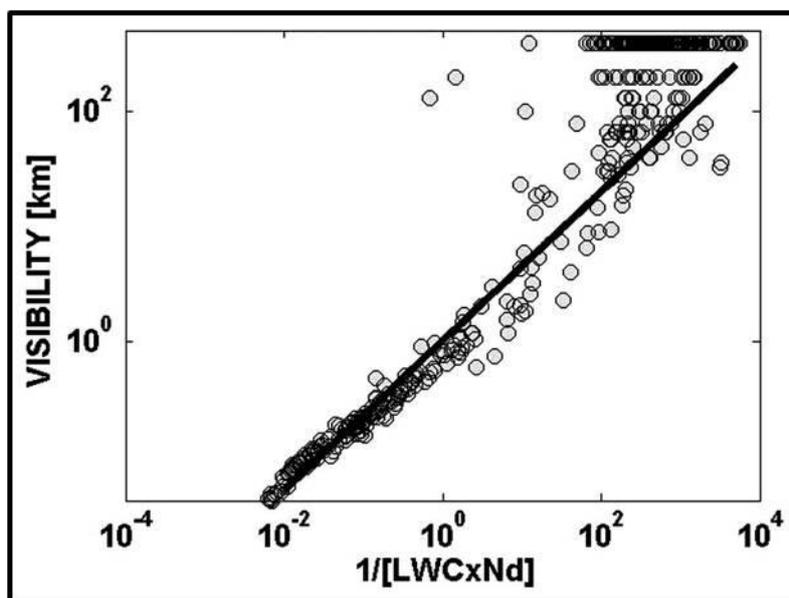
### III.3.1.4. Nouvelle paramétrisation de la visibilité en fonction de LWC et $N_d$ :

En utilisant l'information de la visibilité qui diminue en augmentant  $N_d$  et LWC comme indiqué dans les figures (III.2) et (III.3), une relation entre Vis et  $(LWC*N_d)^{-1}$  a été étudiée. L'équation de l'ajustement est donnée par la relation suivante [28] :

$$Vis = \frac{1.002}{(LWC*N_d)^{0.6473}} \quad (III.9)$$

Cet ajustement montre que la visibilité est inversement proportionnelle à LWC et  $N_d$ .

L'erreur relative moyenne (mre) dans l'estimation de la visibilité est 27 %. Les limites maximales de LWC et  $N_d$  utilisées dans la dérivation de l'équation (III.9) sont d'environ 0.5  $g.m^{-3}$  et 400  $cm^{-3}$  respectivement et les limites minimales de LWC et  $N_d$  sont 0.005  $g.m^{-3}$  et 1  $cm^{-3}$  respectivement.



**Figure III.5. :** La visibilité en fonction de LWC et  $N_d$  [28].

Les équations (III.8) et (III.9) sont utilisées dans le modèle NMM 3D avec le modèle microphysique 1D PAFOG (Parametrized Fog) pour étudier un épisode de brouillard sur l'aéroport de Zurich en Suisse. Les paramétrisations ont été testées sur cet aéroport en raison

de la disponibilité des observations en surface et la configuration du modèle sur les terrains inhomogènes.

Dans cette étude, ils ont également utilisé deux autres équations qui ont une relation avec la densité du brouillard.

L'équation proposée pour les brouillards légers [28] :

$$Vis_{ML} = 120 * N_d^{-0.77} \quad (III.10)$$

La relation proposée pour les brouillards lourds [28] :

$$Vis_{MH} = 80 * N_d^{-1.1} \quad (III.11)$$

Le tableau (III.1) récapitule les différentes paramétrisations de visibilité et les résultats obtenus pour chaque paramétrisation :

**Tableau III.1:** Récapitulatif des paramétrisations utilisées dans l'étude de Gultepe et al. (2006) [28].

La paramétrisation	L'erreur relative $ Vis_{obs} - Vis_{scal} $	Explication
$LWC_{96} = 1 * 10^{-6} * N_d^2 + 0.0014 * N_d$	75%	Tous types de brouillard (2.1-48.4 $\mu$ m)
$LWC_{124} = 3 * 10^{-7} * N_d^2 + 0.0009 * N_d$	75%	Tous types de brouillard (4.6-88.7 $\mu$ m)
$Vis = 44.989 * N_d^{-1.1592}$	46%	Tous types de brouillard
$Vis = 0.0219 * LWC^{-0.9603}$	44%	Tous types de brouillard
$Vis_k = 0.027 * LWC^{-0.88}$	Supposée 44%	Tous types de brouillard
$Vis = \frac{1.002}{(LWC * N_d)^{0.6473}}$	27%	Tous types de brouillard
$Vis_{ML} = 120 * N_d^{-0.77}$	Supposée 46%	Brouillard léger
$Vis_{MH} = 80 * N_d^{-1.1}$	Supposée 46%	Brouillard lourd

L'erreur relative représente la différence entre la visibilité observée et la visibilité calculée. Les résultats obtenus par les différentes paramétrisations de la visibilité citées dans le tableau (III.1) sont différents. D'après ces résultats, il a été constaté qu'il est nécessaire d'introduire

la concentration en nombre des gouttelettes ( $N_d$ ) et le contenu en eau liquide (LWC) dans les modèles numériques de prévision.

#### **III.4. Paramétrisation de la visibilité en fonction de l'humidité relative (HR)**

Une autre relation lie la visibilité avec l'humidité relative a été proposée [12].

$$\text{Vis}_4 = - 41,5 \ln (\text{HR}) + 192,3 \quad (\text{III.12})$$

Où : HR est l'humidité relative en %.

Vis : visibilité en km.

### **Conclusion**

Nous avons consacré cette section pour donner un aperçu sur la prévision numérique du temps, on a expliqué les différentes phases de son développement, on a parlé aussi sur les modèles numériques du temps et leurs limites. Nous avons présenté quelques modèles utilisés pour la prévision du brouillard. On a terminé ce chapitre par la présentation de différentes méthodes de paramétrisation de la visibilité.

## **Introduction**

Le brouillard constitue l'un des phénomènes météorologiques les plus importants et les plus complexes à prévoir. De sa formation à sa dissipation, plusieurs paramètres météorologiques interagissent et à l'échelle plus fine. Pour être capable de prévoir ce phénomène, on doit se disposer des modèles numériques de très hautes résolutions, possédant des schémas de paramétrisation physique plus développés. Dans ce contexte, nous allons tester les performances de modèles AROME Algérie à prévoir les phénomènes de brouillard. Pour se faire, nous allons combiner entre les relations de visibilité citées dans le chapitre précédent avec les sorties de modèle AROME Algérie dans le but de calculer les visibilités réduites par le brouillard.

### **IV.1. Définition du modèle AROME utilisés à l'ONM**

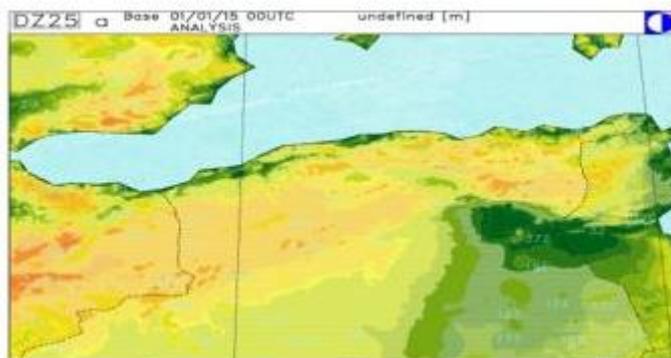
#### **IV.1.1. Le modèle AROME**

Le modèle AROME qui signifie en anglais : Application of Research to Operations at MESoscale, est un modèle numérique à aire limité exploité par l'ONM en opérationnel, depuis Mai 2014, pour la modélisation à échelle fine avec une résolution horizontale de 3 km et une résolution verticale de 41 niveaux [29].

Il a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance (48 heures) des phénomènes dangereux tels que le brouillard, orage violent, forte pluie...etc. [29]

Le modèle AROME est alimenté par les modèles de grande échelle tels qu'ALADIN et ARPEGE. AROME utilise la dynamique non hydrostatique (NH) du code ALADIN et les paramétrisations physiques du modèle de recherche MESO-NH (Modèle de MESO échelle Non Hydrostatique). Dans sa configuration opérationnelle à l'ONM, AROME est couplé au modèle ALADIN toutes les heures et il fournit deux prévisions par jours 00 UTC et 12 UTC [29].

La figure ci-dessous représente le domaine d'intégration du modèle AROME Algérie :



**Figure IV.1.** : Domaine d'intégration du modèle AROME en Algérie [30].

## IV.2. La prévision du brouillard par AROME

Généralement, le brouillard dépend du contenu en eau liquide qui se trouve dans les basses couches atmosphériques et de la concentration des hydrométéores dans ces couches. C'est pour cela, la majorité des paramétrisations de visibilité citées dans le chapitre précédent utilise le contenu en eau liquide (LWC) comme paramètre focal pour calculer les visibilités. Par ailleurs ce paramètre est un élément prévisible par le modèle AROME. Donc, nous pouvons l'utiliser (l'équation  $Vis_1$  et  $Vis_2$ ), en entrée, pour calculer d'une façon diagnostique les visibilités et bien sûr l'occurrence de brouillard.

Nous allons utiliser une autre équation de paramétrisation (l'équation  $Vis_3$ ) en fonction du contenu en eau liquide LWC et de la concentration numérique des gouttelettes  $N_d$ , le paramètre  $N_d$  sera déterminé en fonction de la température comme suit [12]:

$$N_d = - 0.071T^2 + 2.213T + 141.56 \quad (IV.1)$$

Où :  $N_d$  : la concentration numérique des gouttelettes est exprimée en  $cm^{-3}$ .

T : la température est exprimée en °C.

On utilisera également une équation de paramétrisation en fonction de l'humidité relative (l'équation  $Vis_4$ ) [12].

Le tableau IV.1 récapitule les différentes relations utilisées pour calculer les visibilités.

**Tableau IV.1 :** Paramétrisations utilisées pour calculer la visibilité [28].

<b>Le paramètre utilisé dans l'équation de la paramétrisation.</b>	<b>L'équation de la paramétrisation.</b>
En fonction du contenu en eau liquide (LWC)	$Vis_1 = 0.027 LWC^{0.88}$
	$Vis_2 = 0.219 LWC^{-0.9603}$
En fonction du contenu en eau liquide (LWC) et la concentration numérique des gouttelettes ( $N_d$ )	$Vis_3 = - \frac{1.002}{(LWC * N_d)^{0.6473}}$
En fonction de l'humidité relative (HR)	$Vis_4 = - 41,5 \ln (HR) + 192,3$

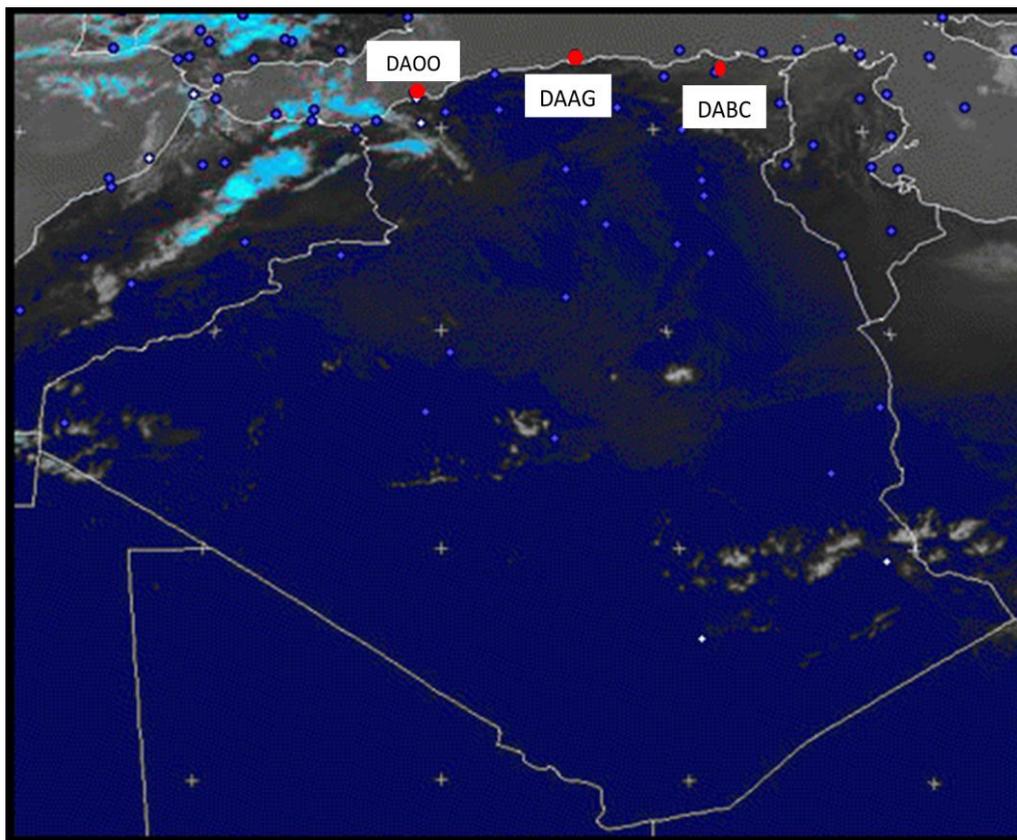
### IV.3. La présentation de la zone d'étude

La prévisibilité du brouillard par le modèle AROME sera validée sur trois régions d'Algérie : Alger, Constantine et Oran. Ces régions sont souvent assistées aux phénomènes de brouillard. Nous utilisons pour la validation, les données d'observation des trois stations météorologiques suivantes : Alger (DAAG), Oran (DAOO) et Constantine (DABC). Le tableau IV.2 donne la position géographique de ces trois stations météorologiques.

**Tableau IV.2. :** Les coordonnées géographiques des stations utilisées.

<b>station</b>	<b>Code OACI</b>	<b>latitude</b>	<b>longitude</b>
Alger	DAAG	36.71 N	3.25 E
Constantine	DABC	36.28 N	6.61 E
Oran	DAOO	35.63 N	0.6 W

On a situé sur la carte suivante les stations à utiliser : Oran, Alger, Constantine



**Figure IV.2.** : Localisation des stations à utilisées sur la carte.

#### **IV.4. Les données utilisées**

##### **IV.4.1. Les données des visibilité observées**

Pour les stations d'Oran et de Constantine nous avons utilisé des visibilité observées durant l'année 2014 et on a choisi les journées où la présence du phénomène a été signalée. Les valeurs de visibilité observées pour ces journées sont extraites à partir des messages METARs (METeorological Airport Report).

En ce qui concerne la station d'Alger, on a choisi une journée de l'année 2015, l'image satellite de la journée choisie a montré la présence du brouillard sur la région d'Alger, et on a également utilisé les observations faites par cette station (METAR). Les observations sur les stations sont faites chaque une demi-heure et diffusées dans les METAR.

#### IV.4.2. Calcul de la visibilité

L'objectif de notre étude est de préparer un nouveau produit qui va servir à la prévision de phénomène de brouillard. Pour se faire, nous avons écrit un programme en Fortran, qui permet la lecture des données d'entrée prévues par AROME, telles que l'humidité relative et le LWC pour chaque heure. Ensuite, le programme calcule, en utilisant les relations citées dans le tableau IV.1, les visibilités.

#### IV.5. L'étude des situations météorologiques

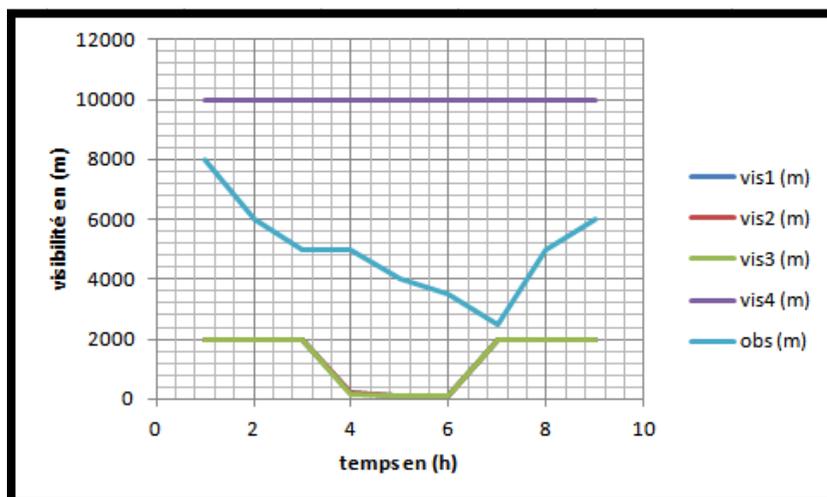
##### IV.5.1. La situation du 12-04-2015 : Alger

Le tableau (IV.3) montre les résultats des paramétrisations de la visibilité simulées par le modèle AROME sur la zone d'Alger et ainsi les observations faites sur la station d'Alger pour la journée du 12-04-2015. Les valeurs sont exprimées en (m) et données chaque heure.

**Tableau IV.3. :** Valeurs des visibilités obtenues par les paramétrisations et les observations enregistrées par la station d'Alger en (m) et données chaque heure.

T (h)	Vis <sub>1</sub> (m)	Vis <sub>2</sub> (m)	Vis <sub>3</sub> (m)	Vis <sub>4</sub> (m)	Obs (m)
1	2000	2000	2000	10000	8000
2	2000	2000	2000	10000	6000
3	2000	2000	2000	10000	5000
4	215	219	175	10000	5000
5	85	94	94	10000	4000
6	88	96	96	10000	3500
7	2000	2000	2000	10000	2500
8	2000	2000	2000	10000	5000
9	2000	2000	2000	10000	6000

On a représenté les résultats du tableau (IV.3) sous forme de graphe qui est illustré ci-dessous :



**Figure IV.3. :** Visibilités ( $Vis_1$ ,  $Vis_2$ ,  $Vis_3$ ,  $Vis_4$ , obs) exprimées en (m) en fonction du temps en (h) sur Alger.

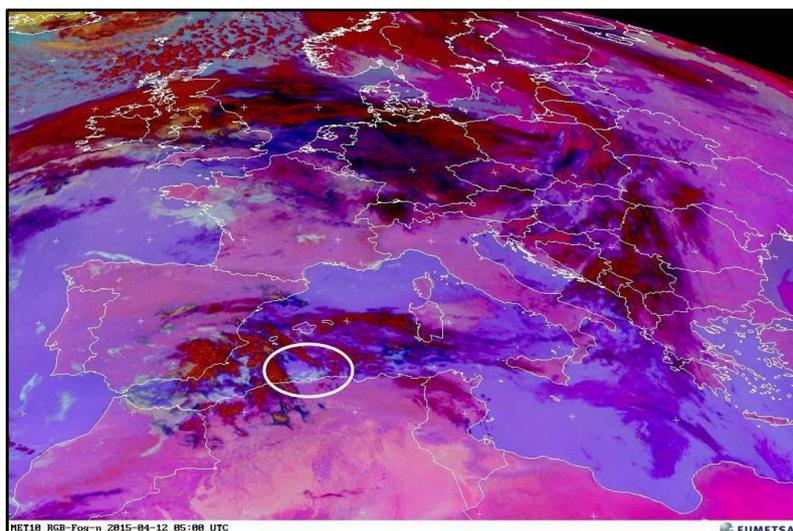
- **Analyse du graphe et du tableau:**

- Les valeurs d'observations données par la station d'Alger montrent que la visibilité est supérieure à 1000 m : on parle du brouillard lorsque la visibilité est moins de 1 km. Mais d'après l'image satellite illustrée dans la figure (IV.6) on peut voir clairement qu'il y a du brouillard sur Alger.
- La 4<sup>ème</sup> relation qui est la paramétrisation de la visibilité en fonction de l'humidité relative donne des visibilités supérieures à 10 km pour toutes les heures.
- Pour les relations  $Vis_1$ ,  $Vis_2$  et  $Vis_3$  : de 1 h à 3 h, la visibilité commence à diminuer à moins de 1 km. Pour ces échéances on peut dire que le brouillard commence à se former. On remarque que la valeur minimale de la visibilité est enregistrée à 5 :00 heures du matin (phase mature du brouillard). Au-delà de cette heure-ci, la visibilité augmente progressivement jusqu'à atteindre à 7 :00 heures la valeur de 2000 m. valeur imposée dans le programme pour pouvoir la visualisation du champ de brouillard par l'utilitaire de visualisation GRADS. On constate que les ajustements obtenus par ces trois relations ont presque une même allure, puisque ils utilisent, tous, comme donnée d'entrée le LWC.

- ❖ **L'image satellite pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC:**

La figure ci-dessous représente une image satellite prise à 5 :00 de matin. Cette image nous permet d'apercevoir les zones d'apparition du brouillard sur le centre d'Europe ainsi sur le nord-africain.

On remarque qu'il y a une couleur grise sur plusieurs régions et notamment sur la zone d'Alger et ses alentours (zone encerclée). Lorsque cette couleur apparaît sur l'image cela signifie la présence du brouillard sur cette zone. Donc on déduit qu'il y a du brouillard sur Alger à 5 UTC.



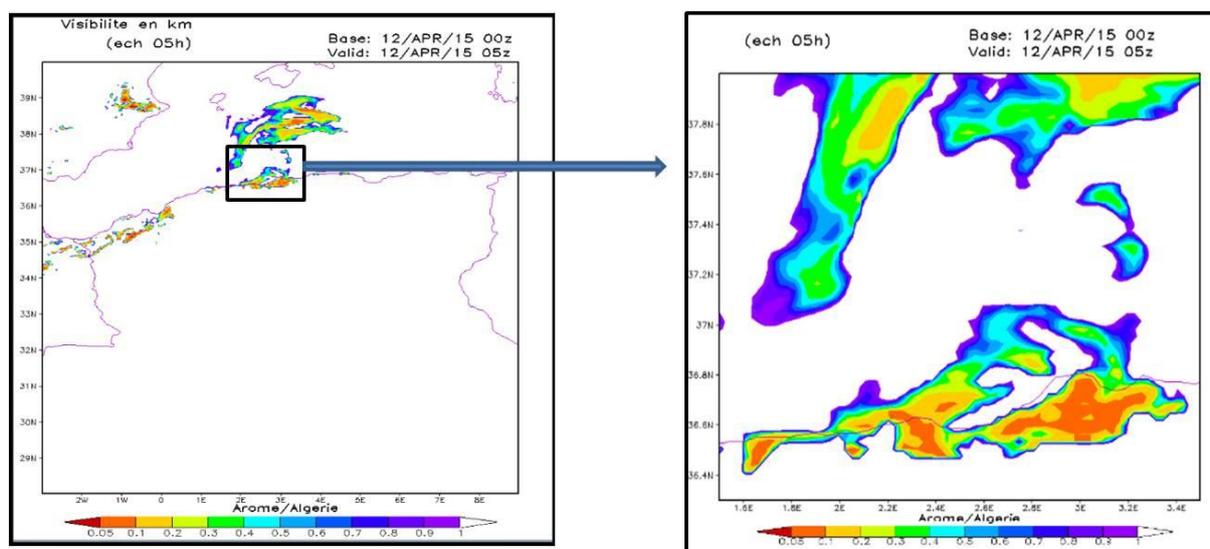
**Figure IV.4. :** Image satellite pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC donnée par EUMETSAT

- **Simulation des visibilitées par AROME**

Les figures qui suivent montrent l'évolution de la visibilité sur Alger pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC en utilisant les équations de paramétrisation de la visibilité.

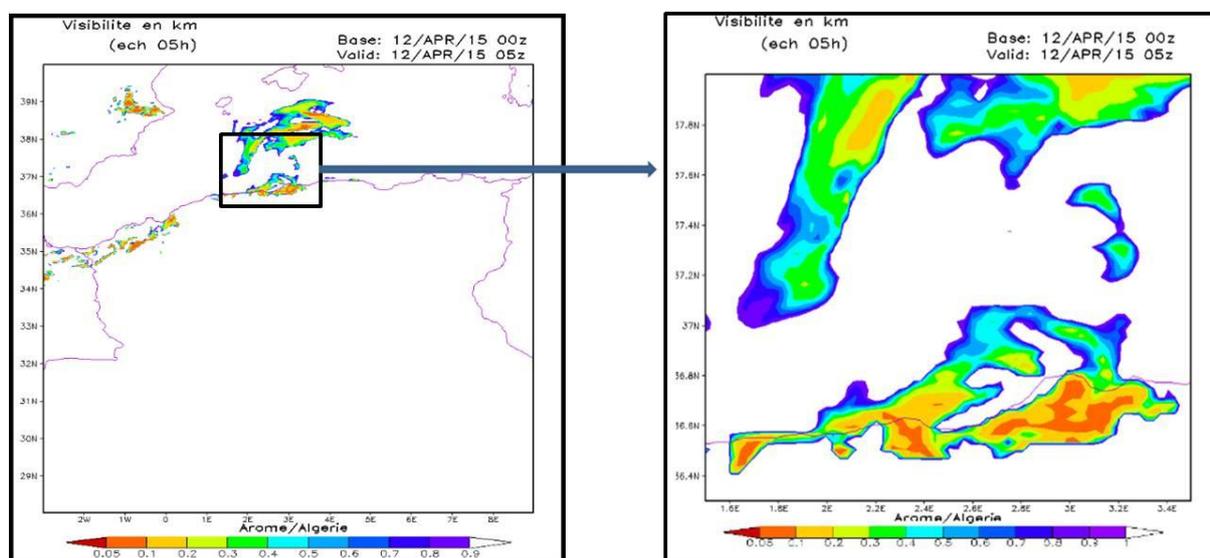
On a également effectué un zoom sur cette région pour voir la variation de la visibilité sur Alger et ses alentours.

➤ **Les visibilités obtenues en utilisant la 1<sup>ère</sup> équation de la paramétrisation:**



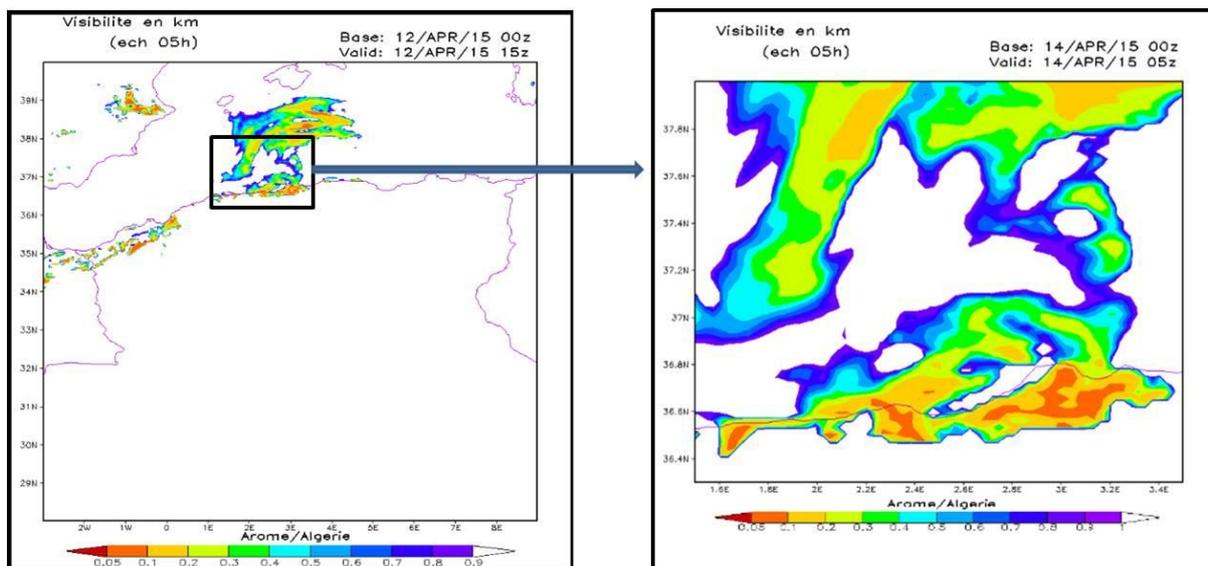
**Figure IV.5 :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 1<sup>ère</sup> relation pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC sur Alger. A droite, un zoom effectué sur la région d'Alger pour la même journée et même échéance.

➤ **Les visibilités obtenues en utilisant la 2<sup>ème</sup> équation de la paramétrisation:**



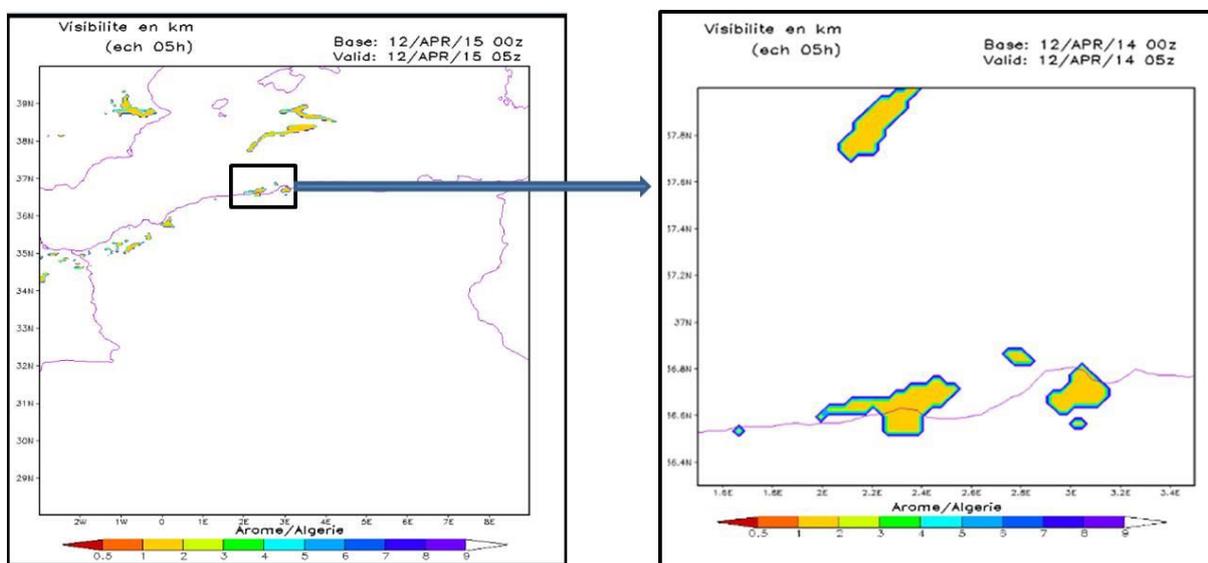
**Figure IV.6 :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 2<sup>ème</sup> relation pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC sur Alger. A droite, un zoom effectué sur la région d'Alger pour la même journée et même échéance.

➤ Les visibilités obtenues en utilisant la 3<sup>ème</sup> équation de la paramétrisation:



**Figure IV.7. :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 3<sup>ème</sup> relation pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC sur Alger. A droite, un zoom effectué sur la région d'Alger pour la même journée et même échéance.

➤ Les visibilités obtenues en utilisant la 4<sup>ème</sup> équation de la paramétrisation:



**Figure IV.8. :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 4<sup>ème</sup> relation pour la journée du 12-04-2015 à 5 UTC sur Alger. A droite, un zoom effectué sur la région d'Alger pour la même journée et même échéance.

**Remarque :**

D'après ces figures on remarque que les visibilitées données par les relations  $Vis_1$ ,  $Vis_2$  et  $Vis_3$  ont à peu près une même forme, sauf la relation  $Vis_4$  qui a donné des résultats différents.

Le modèle AROME a pu détecter la présence du brouillard à Alger même si les valeurs sont différentes à celles des observations.

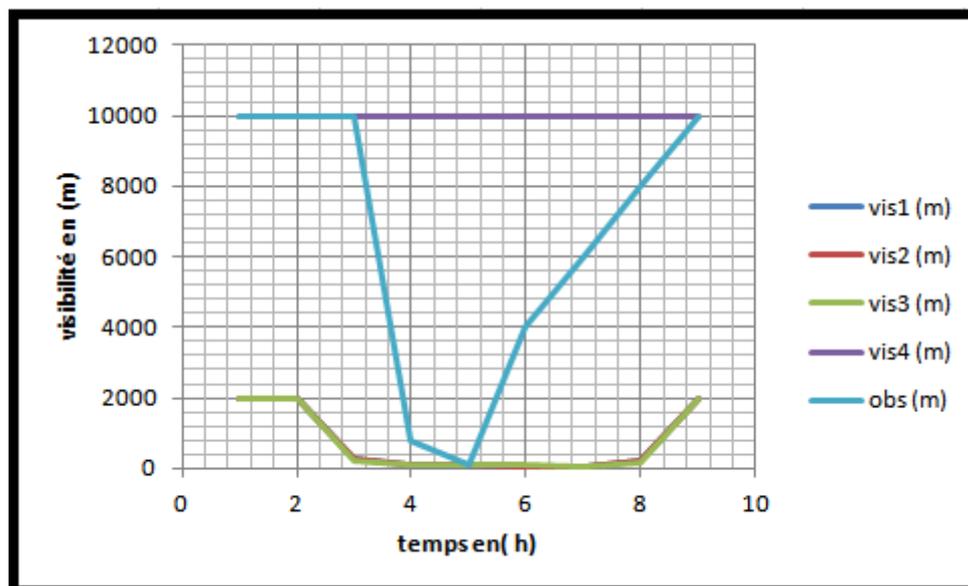
**IV.5.2. La situation du 14-10-2014 : Constantine**

Le tableau ci-dessous illustre les résultats de paramétrisation de la visibilité simulée par le modèle AROME sur la région de Constantine plus exactement sur un point dont les coordonnées géographiques sont : latitude 36.31 N, longitude 5.99 E. Ainsi les observations données par la station de Constantine. Ces valeurs sont exprimées en (m) et données pour chaque heure (de 1 :00 du matin à 9 :00 du matin).

**Tableau IV.4. :** Valeurs des visibilitées obtenues par les paramétrisations et les observations enregistrées par la station de Constantine en (m) et données chaque heure.

<b>T(h)</b>	<b>Vis<sub>1</sub> (m)</b>	<b>Vis<sub>2</sub>(m)</b>	<b>Vis<sub>3</sub> (m)</b>	<b>Vis<sub>4</sub> (m)</b>	<b>Obs (m)</b>
1	2000	2000	2000	10000	9999
2	2000	2000	2000	10000	9999
3	293	291	218	10000	9999
4	77	86	89	10000	800
5	91	100	99	10000	100
6	64	72	78	10000	4000
7	48	56	64	10000	6000
8	201	206	169	10000	8000
9	2000	2000	2000	10000	9999

Les résultats du tableau sont représentés par le graphe suivant :



**Figure IV.9.:** Les visibilités ( $Vis_1$ ,  $Vis_2$ ,  $Vis_3$ ,  $Vis_4$ , obs) exprimées en (m) en fonction du temps en (h) sur Constantine.

- **Analyse du graphe et du tableau :**

- On remarque que la paramétrisation en fonction de l'humidité relative donne des valeurs supérieures à 10000 m pour toutes les échéances.
- De 1 :00 h à 2 :00 h : les trois autres paramétrisations ( $Vis_1$ ,  $Vis_2$ ,  $Vis_3$ ) ont donné des valeurs de visibilité supérieures à 2000 m.
- On remarque qu'à partir de 2 :00 h du matin la visibilité commence à diminuer à moins de 1 km et les résultats donnés par les trois relations sont proches : formation du brouillard.
- A 7 :00 h du matin, on observe les valeurs minimales des visibilités obtenues à partir des trois relations de  $Vis_1$ ,  $Vis_2$  et  $Vis_3$ : c'est la phase mature du brouillard.
- Et à partir de 7 :00 h la visibilité augmente jusqu'à atteindre 2000 m à 9 :00 h. Les ajustements obtenus par ces trois relations ont presque une même allure.
- Pour l'ajustement des observations : de 1 :00 h à 3 :00 h du matin ils ont signalé une très bonne visibilité de 9999 m, à partir de 3 :00 h la visibilité diminue jusqu'à atteindre la valeur minimale à 5 :00 h (100 m) puis à partir de cette heure la visibilité augmente jusqu'au maximum (9999 m) : dissipation du brouillard.

- On peut constater qu'à 5 :00 h du matin les valeurs des observations données par la station de Constantine et les résultats obtenus à partir les paramétrisations  $Vis_1$ ,  $Vis_2$ ,  $Vis_3$  sont proches.

#### ❖ **Simulation des visibilitées par AROME**

Les figures représentées ci-dessous illustrent la variation de la visibilité sur la région de Constantine pour la journée du 14-10-2014 à 5 UTC en utilisant les équations de paramétrisation de la visibilité.

On a effectué un zoom sur cette zone pour localiser la station de Constantine sur la carte, on remarque que les valeurs minimales de la visibilité sont enregistrées à une distance de 68.82 km de cette station.

#### - **Le calcul de la distance :**

La longitude de la station de Constantine est : 6.61 E.

La longitude à laquelle on a observé des visibilitées inférieures à 1000 m est : 5.99 E.

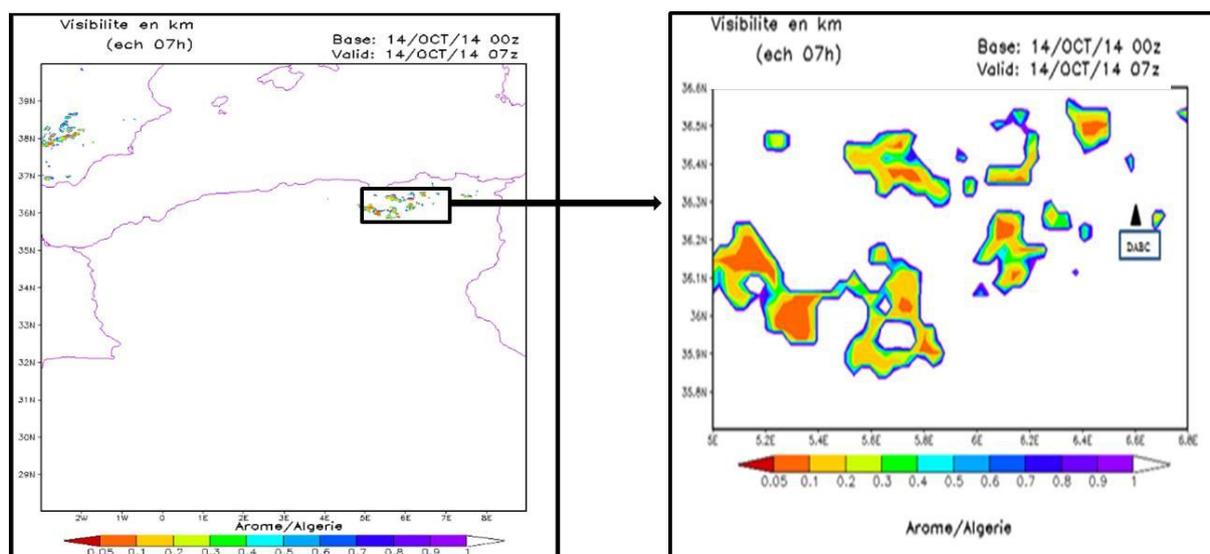
On a :

$$1^\circ \longrightarrow 111 \text{ km.}$$

Pour calculer la distance entre ces longitudes :

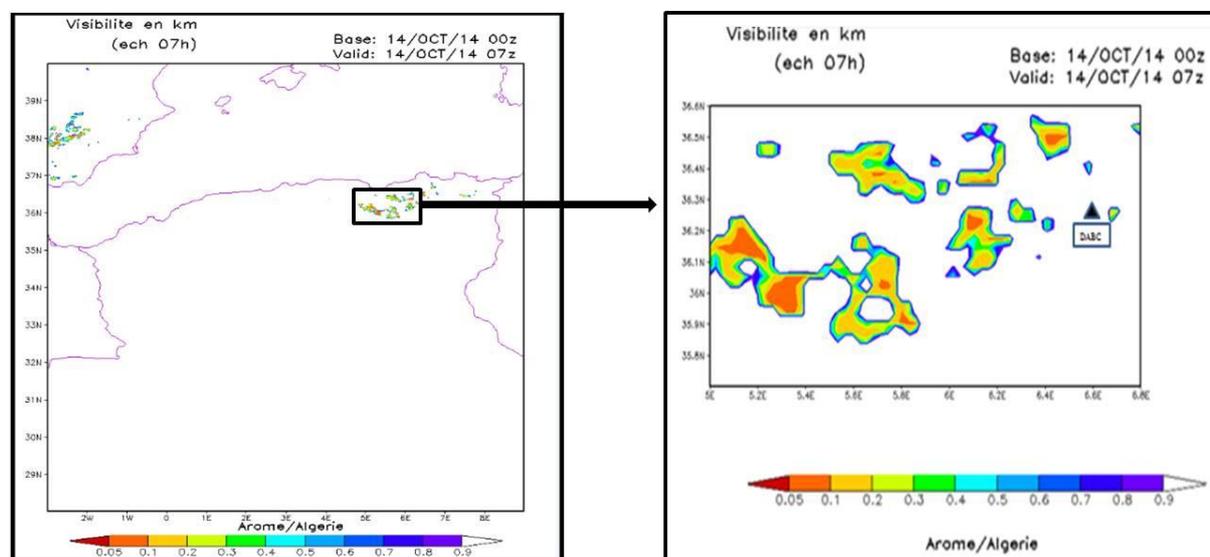
$$(6.61-5.99)*111 = 68.82 \text{ km.}$$

➤ **Les visibilités obtenues en utilisant la 1<sup>ère</sup> équation de la paramétrisation:**



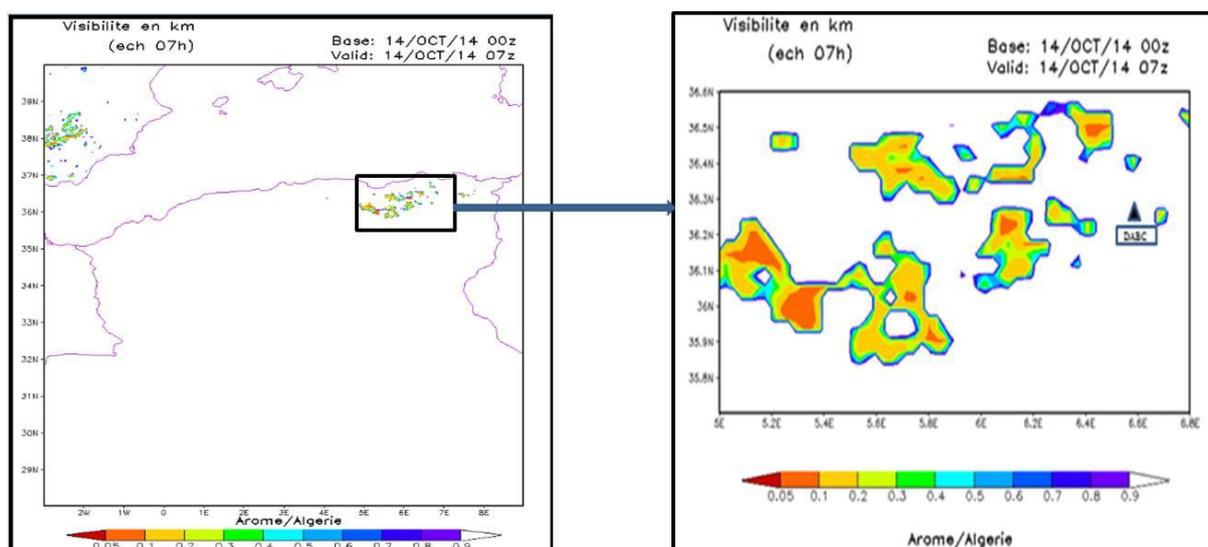
**Figure IV.10. :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 1<sup>ère</sup> relation pour la journée du 14-10-2014 à 7 UTC sur Constantine. A droite, un zoom effectué sur la région de Constantine pour la même journée et même échéance.

➤ **Les visibilités obtenues en utilisant la 2<sup>ème</sup> équation de la paramétrisation:**



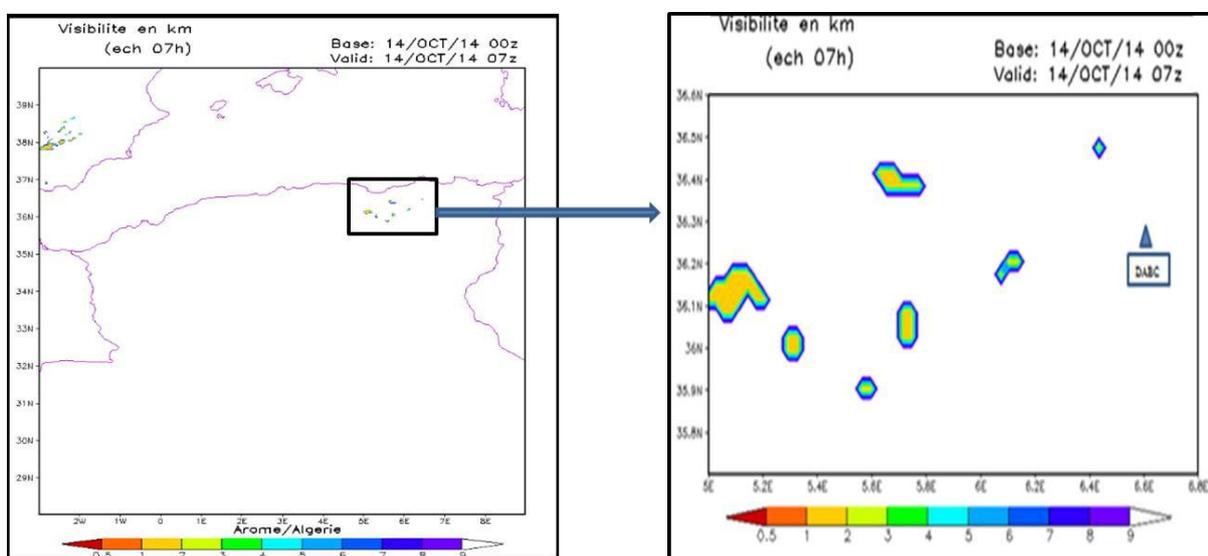
**Figure IV.11. :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 2<sup>ème</sup> relation pour la journée du 14-10-2014 à 7 UTC sur Constantine. A droite, un zoom effectué sur la région de Constantine pour la même journée et même échéance.

➤ **Les visibilités obtenues en utilisant la 3<sup>ème</sup> équation de la paramétrisation:**



**Figure IV.12. :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 3<sup>ème</sup> relation pour la journée du 14-10-2014 à 7 UTC sur Constantine. A droite, un zoom effectué sur la région de Constantine pour la même journée et même échéance.

➤ **Les visibilités obtenues en utilisant la 4<sup>ème</sup> équation de la paramétrisation:**



**Figure IV.13. :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 4<sup>ème</sup> relation pour la journée du 14-10-2014 à 7 UTC sur Constantine. A droite, un zoom effectué sur la région de Constantine pour la même journée et même échéance.

**Remarque:**

Les figures ci-dessus montrent que les visibilitées données par les relations  $Vis_1$ ,  $Vis_2$  et  $Vis_3$  ont presque la même forme, par contre celles données par la relation  $Vis_4$  est totalement différentes.

Le modèle AROME a pu prévoir la réduction de la visibilité et la présence du brouillard sur Constantine la journée de 14-10-2014 mais avec des valeurs très accentuées par rapport aux observations.

**IV.5.3. La situation du 09-01-2014 : Oran**

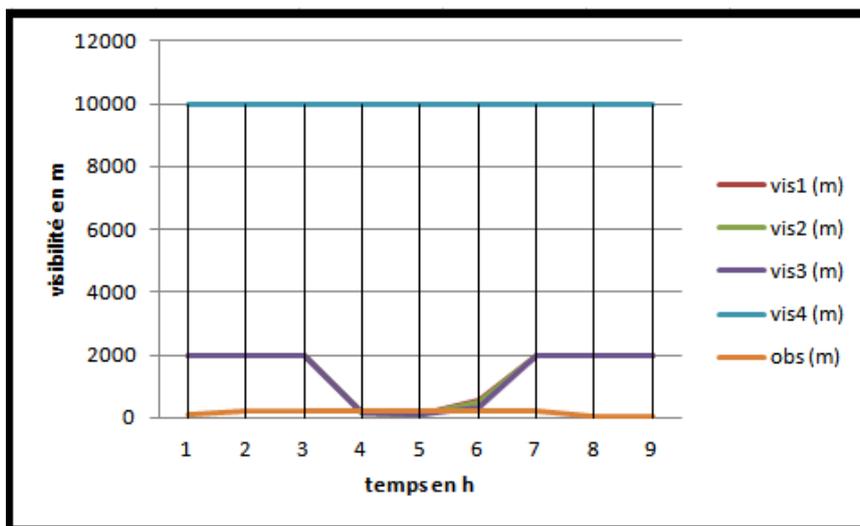
La présence du brouillard est très fréquente sur la région d'Oran en raison de sa proximité de la mer, s'ajoute à cela l'existence du marais (Sebkha d'Oran) au voisinage de l'aéroport, ce qui favorise la formation de ce phénomène.

Le tableau suivant représente les résultats des paramétrisations de la visibilité en utilisant les 4 relations ( $Vis_1$ ,  $Vis_2$ ,  $Vis_3$ ,  $Vis_4$ ) simulées par le modèle AROME sur le point dont les coordonnées géographiques sont : latitude 35.68 N, longitude 0.631 W. Et ainsi les observations données par la station d'Oran. Ces valeurs sont exprimées en (m) et données pour chaque heure.

**Tableau IV.5. :** Valeurs des visibilitées obtenues par les paramétrisations et les observations enregistrées par la station d'Oran en (m) et données chaque heure.

<b>T (h)</b>	<b>Vis<sub>1</sub> (m)</b>	<b>Vis<sub>2</sub> (m)</b>	<b>Vis<sub>3</sub> (m)</b>	<b>Vis<sub>4</sub> (m)</b>	<b>Obs (m) (m)</b>
1	2000	2000	2000	10000	100
2	2000	2000	2000	10000	200
3	2000	2000	2000	10000	200
4	154	161	141	10000	200
5	118	127	118	10000	200
6	535	505	326	10000	200
7	2000	2000	2000	10000	200
8	2000	2000	2000	10000	50
9	2000	2000	2000	10000	50

Les données du tableau ci-dessus sont représentées sous forme du graphe suivant :



**Figure IV.14. :** Les visibilités ( $Vis_1$ ,  $Vis_2$ ,  $Vis_3$ ,  $Vis_4$ , obs) exprimées en (m) en fonction du temps en (h) sur Oran.

- **Analyse du graphe et du tableau :**

- On remarque que les résultats obtenus par la 4<sup>ème</sup> relation sont beaucoup surestimés. En effet la visibilité prévue dépasse 10 km pour toutes les échéances.
- De 1 :00 h à 3 :00 h : les visibilités calculées à partir des trois relations  $Vis_1$ ,  $Vis_2$  et  $Vis_3$  sont surestimées.
- A partir de 3 :00 heures du matin AROME commence à prévoir la réduction de la visibilité et la présence du brouillard. Les visibilités minimales prévues sur Oran pour la journée de 09-01-2014 est moins d'un kilomètre sont enregistrées à 5 :00 de matin et sont égales  $Vi_{s1} = 118$  m,  $Vi_{s2} = 127$  m,  $Vi_{s3} = 118$  m. On constate que ces valeurs sont très proches et aussi proches à celles des observations : la phase mature du brouillard.
- A partir de 6 :00 h du matin nous remarquons que la visibilité augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur de 2000 m (presque même résultats pour les trois relations  $Vis_1$ ,  $Vis_2$ ,  $Vis_3$ ) : dissipation du brouillard.

### ❖ Simulation des visibilités par AROME

Les figures ci-dessous représentent la visibilité sur Oran pour la journée du 09-01-2015 à 5 :00 UTC en utilisant les quatre équations précédentes pour la paramétrisation de la visibilité.

On a effectué un zoom sur cette région (latitude entre 35.1N et 36.1N et longitude entre 1.7 W et 0) pour situer la station d'Oran. On a pu enregistrer les valeurs de visibilité inférieure à 1 km à une distance de 3.441 km de la station.

#### - Le calcul de la distance :

La longitude de la station d'Oran est : 0.6 W

La longitude à laquelle on a observé des visibilités inférieures à 1000 m est : 0.631 W.

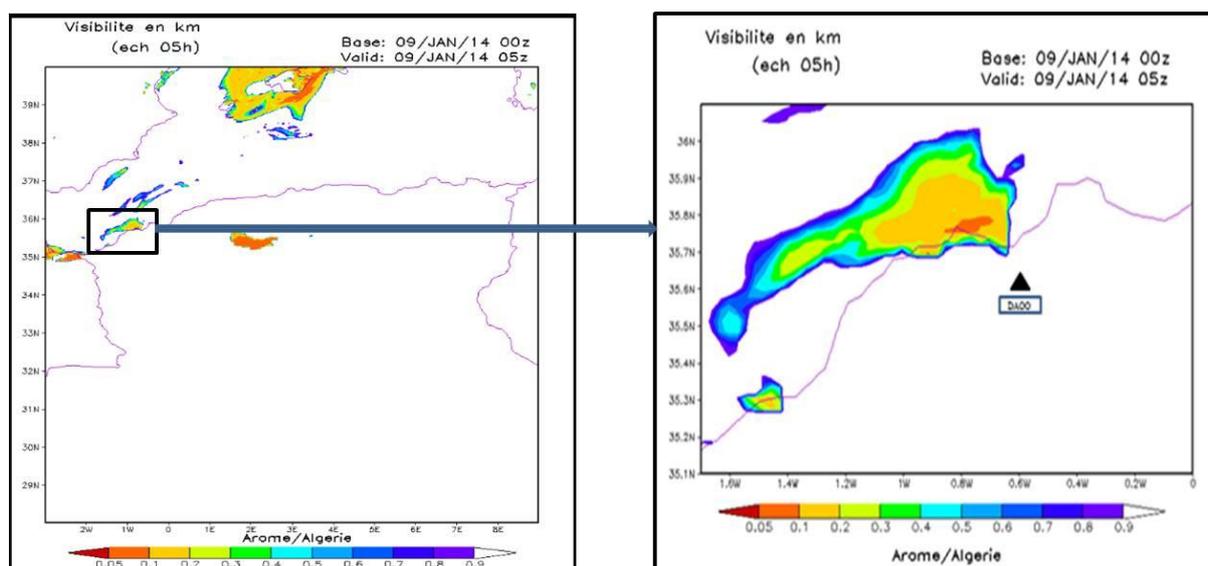
On a :

$$1^{\circ} \longrightarrow 111 \text{ km.}$$

Pour calculer la distance entre ces longitudes :

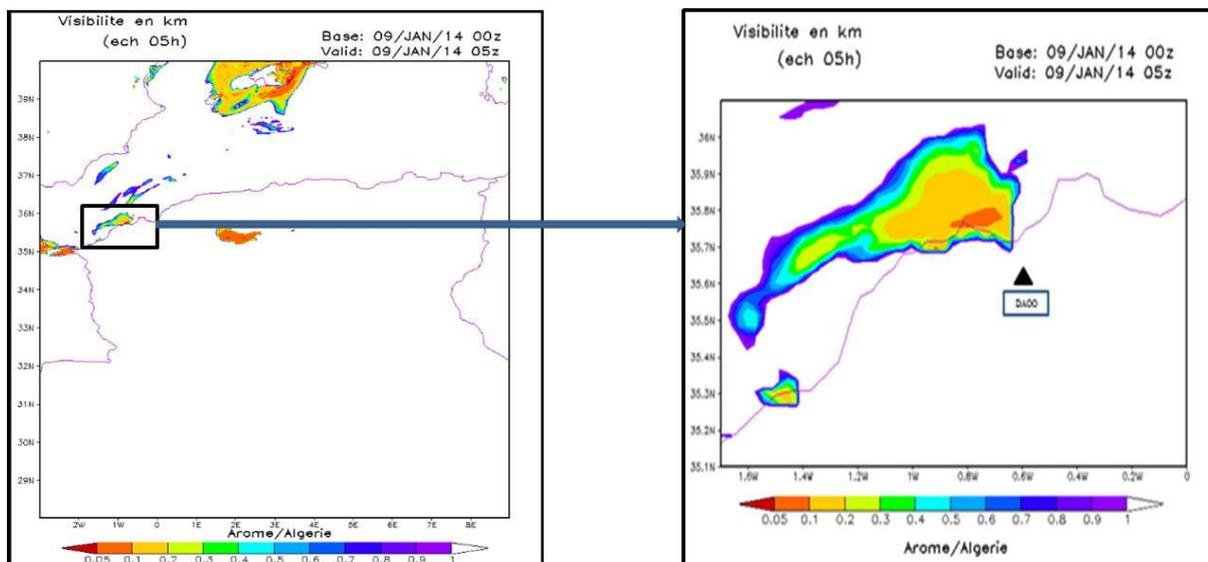
$$(0.631-0.6)*111 = 3.441 \text{ km.}$$

#### ➤ Les visibilités obtenues en utilisant la 1<sup>ère</sup> équation de la paramétrisation:



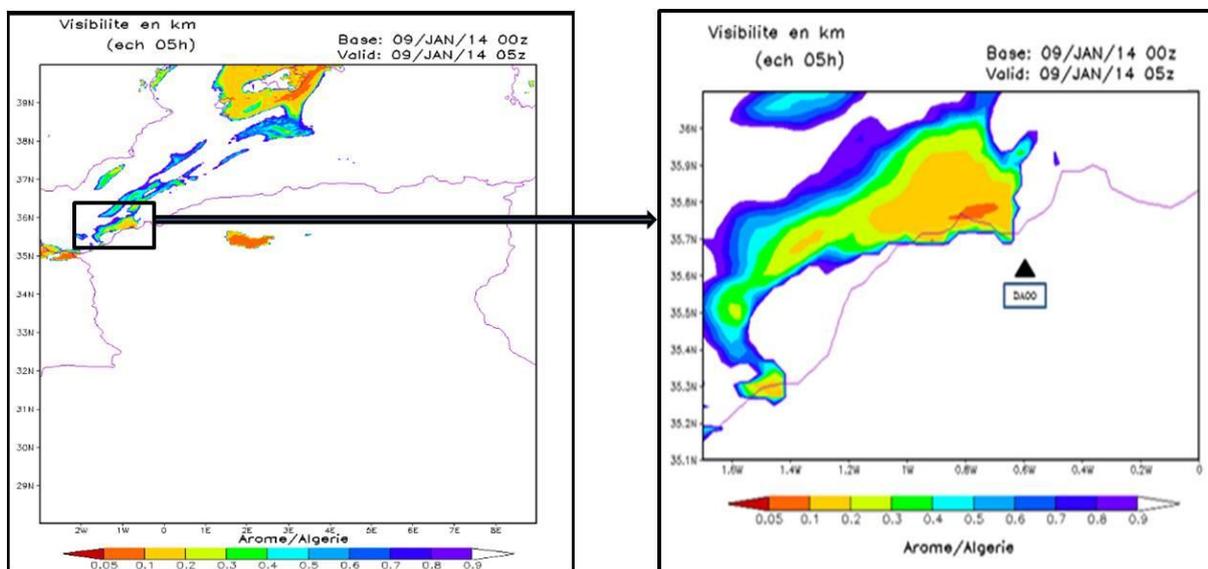
**Figure IV.15. :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 1<sup>ère</sup> relation pour la journée du 09-01-2014 à 5 UTC sur Oran. A droite, un zoom effectué sur la région d'Oran pour la même journée et même échéance.

➤ **Les visibilités obtenues en utilisant la 2<sup>ème</sup> équation de la paramétrisation:**



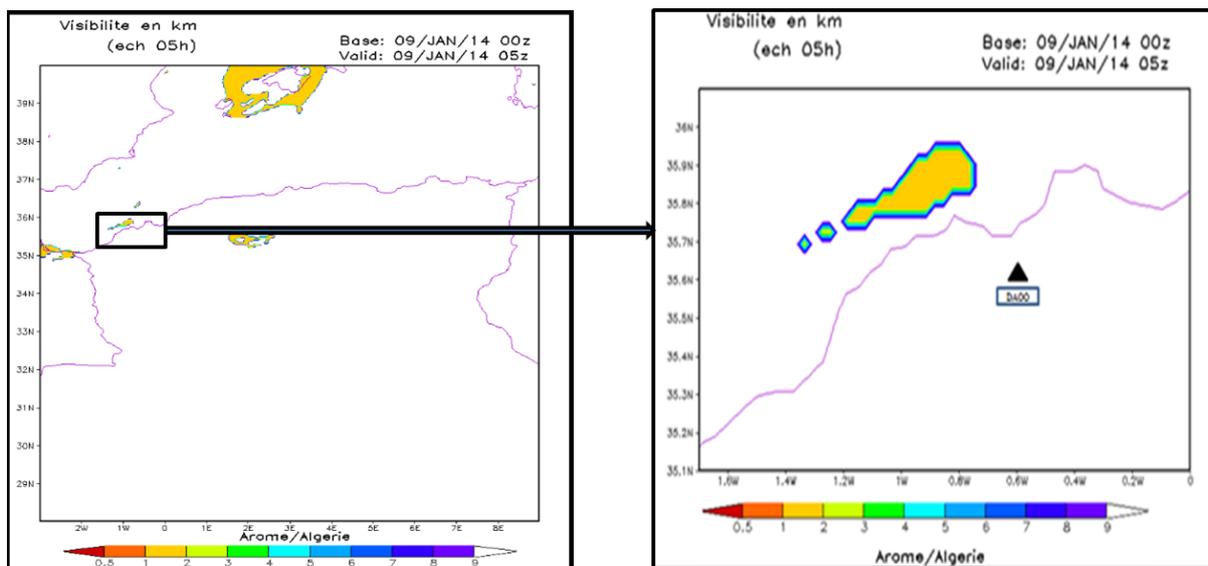
**Figure IV.16. :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 2<sup>ème</sup> relation pour la journée du 09-01-2014 à 5 UTC sur Oran. A droite, un zoom effectué sur la région d'Oran pour la même journée et même échéance.

➤ **Les visibilités obtenues en utilisant la 3<sup>ème</sup> équation de la paramétrisation:**



**Figure IV.17. :** A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle AROME en utilisant la 3<sup>ème</sup> relation pour la journée du 09-01-2014 à 5 UTC sur Oran. A droite, un zoom effectué sur la région d'Oran pour la même journée et même échéance.

➤ **Les visibilités obtenues en utilisant la 4<sup>ème</sup> équation de la paramétrisation:**



**Figure IV.18.** : A gauche, la figure représente les visibilités simulées par le modèle Arome en utilisant la 4<sup>ème</sup> relation pour la journée du 09-01-2014 à 5 UTC sur Oran. A droite, un zoom effectué sur la région d'Oran pour la même journée et même échéance.

**Remarque :**

D'après les figures ci-dessus on constate que les visibilités données par les relations  $Vis_1$ ,  $Vis_2$  et  $Vis_3$  ont à peu près une même forme, excepté la relation  $Vis_4$  qui a donné des résultats différents. On peut dire que le modèle AROME a pu donner l'information sur l'existence du brouillard à Oran même si les valeurs sont différentes à celles des observations.

**Conclusion**

L'analyse des résultats des visibilités obtenus par le modèle AROME sur les trois sites, Alger, Oran et Constantine nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- AROME prévoit la réduction des visibilités pour les journées testées pour les trois sites ; donc l'occurrence du brouillard sur l'ensemble des sites.
- Les résultats obtenus avec les relations  $Vis_1$ ,  $Vis_2$  et  $Vis_3$  sont en bon accord avec les observations.
- La qualité de la prévision de visibilité par la relation  $Vis_4$  est très mauvaise.
- En terme intensité, les visibilités prévues par AROME sont très accentuées par rapport à l'observation.

## Conclusion générale

Le présent travail avait pour objectif de tester la prévisibilité du brouillard avec le modèle AROME sur quelques situations observées sur Oran, Alger et Constantine en cherchant une relation empirique permettant la conversion de l'intensité du brouillard en visibilité. Cette étude nous a permis aussi d'enrichir nos connaissances sur le brouillard.

Dans le cadre de ce travail, nous avons effectué une recherche bibliographique sur le brouillard, sa formation, sa dissipation et ses différents types ainsi sa relation avec la visibilité météorologique. Nous avons cherché également des relations de paramétrisation de la visibilité en cas d'un épisode de brouillard.

Dans ce contexte, nous avons examiné quatre relations de paramétrisation de la visibilité puis nous avons comparé les résultats aux données de visibilités observées par les stations météorologiques installées sur les régions de notre étude. Les résultats de la comparaison montrent que les paramétrisations de la visibilité en fonction du contenu en eau liquide et/ou de la concentration des gouttelettes d'eau simulées par le modèle AROME ont donné des résultats très satisfaisants par rapport aux observations pour les échéances du temps étudiées. En outre, nos résultats montrent que le modèle AROME a pu prévoir l'occurrence de brouillard et détecter les zones de faibles visibilités aux alentours des régions étudiées. Par contre, la paramétrisation 4 qui calcule la visibilité à partir de l'humidité relative donne de mauvais résultats par rapport à l'observation.

Cette étude concerne la prévision du brouillard par le modèle opérationnel à maille fine AROME. Les paramétrisations utilisées dans cette étude sont validées pour trois situations météorologiques et sur trois régions. Cependant le phénomène de brouillard est un phénomène local qui dépend aussi des caractéristiques de chaque région et de la topographie. C'est pour cela des études approfondies, sur tout le territoire national, seront nécessaires afin de généraliser ces paramétrisations sur l'ensemble des régions du nord de l'Algérie.

## Références bibliographiques

[1]: Météorologie du BIA au CAEA. Tome5.

[2]: [atomes-crochus.org/ToDownload/texte\\_fr.pdf](http://atomes-crochus.org/ToDownload/texte_fr.pdf). [Date de consultation: 11-02-2015]

[3]: météorologie générale Tome I, J.BESSE-A.FOURNE-M.RENAUDIN-1989.

[4]: [education-meteofrance.fr/dossiers-thematiques/le\\_fonctionnement-de-l-atmosphere/la-composition-de-l-atmosphere/la-structure-de-latmosphere](http://education-meteofrance.fr/dossiers-thematiques/le_fonctionnement-de-l-atmosphere/la-composition-de-l-atmosphere/la-structure-de-latmosphere). [Date de consultation: 17-02-2015]

[5]: METAVI : l'atmosphère, le temps et la navigation aérienne. Environnement Canada.2011.

[6]: [www.astrusurf.com/luxorion/meteo-atmosphere.htm](http://www.astrusurf.com/luxorion/meteo-atmosphere.htm). [Date de consultation: 13-02-2015]

[7]: [www.ffme.fr/fiches-ffme-techniques/page-l-atmosphere.html](http://www.ffme.fr/fiches-ffme-techniques/page-l-atmosphere.html). [Date de consultation: 06-04-2015]

[8]: Thèse de doctorat: estimation des conditions de visibilité météorologique par caméras routières, Raouf Barbari, 2012.

[9]: Annexe 3 de l'OACI: Assistance météorologique à la navigation aérienne internationale, seizième édition, 2007.

[10]: Thèse de doctorat : détection des conditions de visibilité et estimation de la distance de visibilité par vision embarquée, Nicolas HAUTIERE, 2005.

[11]: [www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-mete/le-brouillard](http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-mete/le-brouillard). [Date de consultation: 06-03-2015]

[12]: Environnement Canada : « Manuel sur le brouillard et la prévision du brouillard », Garry Toth, Ismail Gultepe, Jason Milbrandt, Bjarne Hansen, Garry Pearson, Chris Fogarty et William Burrows, 2010.

[13]: Thèse de doctorat : Conception et prototypage d'un lidar pour la mesure du contenu en eau liquide dans le brouillard, Céline KLEIN, 2013

[14]: Environnement Canada-GUIDE DE METEO MARINE NATIONAL-Chapitre 4-LE BROUILLARD.

- [15]: Thèse de doctorat : Prévion locale des faibles visibilités pour l'aéronautique, Samuel REMY, 2009.
- [16]: [fr.questmachine.org/Rosée,-brouillard-et-givre](http://fr.questmachine.org/Rosée,-brouillard-et-givre). [Date de consultation: 17-03-2015]
- [17]: [www.memoireonline.com/02/13/6917/m\\_Phenomenes-dangereux-aeronautiques-modeles-et-brouillard--Douala-et-Cotonou-0.html](http://www.memoireonline.com/02/13/6917/m_Phenomenes-dangereux-aeronautiques-modeles-et-brouillard--Douala-et-Cotonou-0.html) [Date de consultation: 22-03-2015]
- [18]: [www.meteolafleche.com/brouillard.html](http://www.meteolafleche.com/brouillard.html) [Date de consultation: 16-03-2015]
- [19]: [lagazettedesjeudis.overblog.com/2013/12/le-brouillard-3.html](http://lagazettedesjeudis.overblog.com/2013/12/le-brouillard-3.html) [Date de consultation: 10-04-2015]
- [20]: [moniquedebohan.kazeo.com/bohan-divers/bohan-sous-les-brouillards-d-octobre,a2628003.html](http://moniquedebohan.kazeo.com/bohan-divers/bohan-sous-les-brouillards-d-octobre,a2628003.html) [Date de consultation: 02-04-2015]
- [21]: Concepts et méthodes pour le météorologiste. Tome1, Cristophe calas, 2013.
- [22]: [www.photocascadia.com/blog/photographing-in-fog-by-david-m-cobb/](http://www.photocascadia.com/blog/photographing-in-fog-by-david-m-cobb/) [Date de consultation: 10-04-2015]
- [23]: [www.jeanlucfohal.be/Pages/Montagnes/Himalaya/Inde/Nun%202013/Nun2013photos.htm](http://www.jeanlucfohal.be/Pages/Montagnes/Himalaya/Inde/Nun%202013/Nun2013photos.htm) [Date de consultation: 10-04-2015]
- [24]: [www.cnrm.meteo.fr/spip.php?rubrique148](http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?rubrique148). [Date de consultation: 26-04-2015]
- [25]: Jean Coiffier « Un demi-siècle de prévision numérique du temps», La Météorologie 8 série- n°30- juin 2000.
- [26]: [www.astrosurf.com/luxorion/meteo-previsions-numeriques.htm](http://www.astrosurf.com/luxorion/meteo-previsions-numeriques.htm). [Date de consultation: 26-04-2015]
- [27]: [www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article212](http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article212). [Date de consultation: 26-04-2015]
- [28]: I. Gulpepe, M.D. Muller, Z. Boybeyi, «A new visibility parametrization for warm-fog applications in numerical weather prediction models» journal of applied meteorology and climatology, vol.45, pp.1469-1479, November 2006.
- [29]: [www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article120](http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article120). [Date de consultation: 01-05-2015]
- [30]: [www.meteo.dz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=172&Itemid=170](http://www.meteo.dz/index.php?option=com_content&view=article&id=172&Itemid=170) [Date de consultation: 01-05-2015]

## Annexe

- **Observations météorologiques de la station d'Alger (DAAG) diffusées dans le message METAR:**

OGIMET

**DAAG, Dar-El-Beida (Algeria).**  
**WMO index: 60390. Latitude 36-43N. Longitude 003-15E. Altitude 25 m.**

METAR/SPECI from DAAG, Dar-El-Beida (Algeria).

SA 12/04/2015 10:30-> METAR DAAG 121030Z 33004KT 290V360 8000 NSC 20/15 Q1025=

SA 12/04/2015 10:00-> METAR DAAG 121000Z 31005KT 270V350 7000 NSC 20/14 Q1025=

SA 12/04/2015 09:30-> METAR DAAG 120930Z 00000KT 7000 NSC 20/13 Q1025=

SA 12/04/2015 09:00-> METAR DAAG 120900Z 00000KT 6000 FEW010 19/13 Q1025=

SA 12/04/2015 08:30-> METAR DAAG 120830Z 00000KT 5000 FEW006 18/13 Q1025=

SA 12/04/2015 08:00-> METAR DAAG 120800Z 00000KT 5000 SCT006 16/14 Q1025=

SA 12/04/2015 07:30-> METAR DAAG 120730Z 00000KT 4000 BR FEW006 SCT200 15/14 Q1025=

SA 12/04/2015 07:00-> METAR DAAG 120700Z 00000KT 2500 BR SCT006 14/13 Q1025=

SA 12/04/2015 06:30-> METAR DAAG 120630Z 00000KT 3500 BR SCT006 14/13 Q1025=

SA 12/04/2015 06:00-> METAR DAAG 120600Z 00000KT 3500 BR SCT006 13/13 Q1024=

SA 12/04/2015 05:30-> METAR DAAG 120530Z 00000KT 4000 BR SCT006 13/13 Q1024=

SA 12/04/2015 05:00-> METAR DAAG 120500Z 00000KT 4000 BR SCT006 13/12 Q1024=

SA 12/04/2015 04:30-> METAR DAAG 120430Z 00000KT 5000 SCT006 BKN200 13/12 Q1024=

SA 12/04/2015 04:00-> METAR DAAG 120400Z 00000KT 5000 SCT006 BKN200 12/11 Q1024=

SA 12/04/2015 03:30-> METAR DAAG 120330Z 00000KT 5000 SCT010 12/11 Q1024=

SA 12/04/2015 03:00-> METAR DAAG 120300Z 00000KT 5000 SCT010 12/11 Q1024=

SA 12/04/2015 02:30-> METAR DAAG 120230Z 00000KT 5000 SCT010 13/12 Q1024=

SA 12/04/2015 02:00-> METAR DAAG 120200Z 00000KT 6000 SCT010 12/11 Q1024=

SA 12/04/2015 01:30-> METAR DAAG 120130Z 00000KT 8000 SCT013 12/11 Q1024=

SA 12/04/2015 01:00-> METAR DAAG 120100Z 00000KT 8000 FEW013 13/12 Q1024=

- **Observations météorologiques de la station de Constantine (DABC) diffusées dans le message METAR:**

<b>OGIMET</b>	
<b>METAR/SPECI from DABC, Constantine (Algeria).</b>	
SA 14/10/2014 10:30->	METAR DABC 141030Z 06004KT 9999 SCT023 FEW026CB BKN200 21/12 Q1011=
SA 14/10/2014 10:00->	METAR DABC 141000Z 15006KT 9999 SCT023 FEW026CB BKN200 20/12 Q1012=
SA 14/10/2014 09:30->	METAR DABC 140930Z 20017KT 9999 SCT023TCU FEW026CB BKN030 21/12 Q1012 RERA=
SA 14/10/2014 09:00->	METAR DABC 140900Z 20005KT 9999 SCT023TCU BKN030 20/12 Q1012=
SA 14/10/2014 08:30->	METAR DABC 140830Z 20006KT 8000 SCT023 FEW026CB BKN033 19/13 Q1013=
SA 14/10/2014 08:00->	METAR DABC 140800Z 24009KT 8000 SCT023 FEW026CB BKN033 17/15 Q1014=
SA 14/10/2014 07:30->	METAR DABC 140730Z 02004KT 7000 FEW003 SCT023 SCT026CB BKN100 16/15 Q1012=
SA 14/10/2014 07:00->	METAR DABC 140700Z 26009KT 6000 FEW003 SCT023 SCT026CB BKN100 16/15 Q1012=
SA 14/10/2014 06:30->	METAR DABC 140630Z 32007KT 4000 1500E -RA VCFG SCT026 SCT030CB BKN100 15/14 Q1013=
SA 14/10/2014 06:00->	METAR COR DABC 140600Z 31006KT 4000 1500E VCFG SCT026 BKN100 15/14 Q1011=
SA 14/10/2014 05:30->	METAR DABC 140530Z 19003KT 0700 FG NSC 14/14 Q1011=
SA 14/10/2014 05:00->	METAR DABC 140500Z 00000KT 0100 FG NSC 14/14 Q1012=
SA 14/10/2014 04:30->	METAR DABC 140430Z 35003KT 0800 MIFG NSC 14/13 Q1012=
SA 14/10/2014 04:00->	METAR DABC 140400Z 00000KT 6000 NSC 15/14 Q1013=
SA 14/10/2014 03:30->	METAR DABC 140330Z 34003KT 8000 NSC 15/14 Q1013=
SA 14/10/2014 03:00->	METAR DABC 140300Z 34004KT CAVOK 15/14 Q1013=
SA 14/10/2014 02:30->	METAR DABC 140230Z NIL=
SA 14/10/2014 02:00->	METAR DABC 140200Z 33004KT CAVOK 15/14 Q1013=
SA 14/10/2014 01:30->	METAR DABC 140130Z 00000KT CAVOK 15/14 Q1014=
SA 14/10/2014 01:00->	METAR DABC 140100Z 00000KT CAVOK 15/13 Q1014=

- **Observations météorologiques de la station d'Oran (DAOO) diffusées dans le message METAR:**

<b>OGIMET</b>	
<b>DAOO, Oran / Es Senia (Algeria).</b> <b>WMO index: 60490. Latitude 35-38N. Longitude 000-36W. Altitude 90 m.</b>	
<b>METAR/SPECI from DAOO, Oran / Es Senia (Algeria).</b>	
SA 09/01/2014 10:30->	METAR DAOO 091030Z 00000KT 4000 BR SCT010 SCT233 11/10 Q1021=
SA 09/01/2014 10:00->	METAR DAOO 091000Z 00000KT 0400 FG BKN010 10/10 Q1021=
SA 09/01/2014 09:30->	METAR DAOO 090930Z 00000KT 0100 FG BKN010 09/09 Q1021=
SA 09/01/2014 09:00->	METAR DAOO 090900Z 00000KT 0050 FG BKN010 09/09 Q1021=
SA 09/01/2014 08:30->	METAR DAOO 090830Z 00000KT 0050 FG BKN010 09/09 Q1021=
SA 09/01/2014 08:00->	METAR DAOO 090800Z 00000KT 0050 FG BKN010 09/09 Q1021=
SA 09/01/2014 07:30->	METAR DAOO 090730Z 22002KT 0050 FG BKN010 10/10 Q1021=
SA 09/01/2014 07:00->	METAR DAOO 090700Z 00000KT 0200 FG BKN010 10/10 Q1021=
SA 09/01/2014 06:30->	METAR DAOO 090630Z 00000KT 0200 FG BKN010 10/10 Q1020=
SA 09/01/2014 06:00->	METAR DAOO 090600Z 00000KT 0200 FG BKN010 10/10 Q1020=
SA 09/01/2014 05:30->	METAR DAOO 090530Z 00000KT 0200 FG BKN010 09/09 Q1020=
SA 09/01/2014 05:00->	METAR DAOO 090500Z NIL=
SA 09/01/2014 04:30->	METAR DAOO 090430Z 00000KT 0200 FG BKN010 09/09 Q1020=
SA 09/01/2014 04:00->	METAR DAOO 090400Z 00000KT 0200 FG BKN010 10/10 Q1020=
SA 09/01/2014 03:30->	METAR DAOO 090330Z 00000KT 0200 FG BKN010 10/10 Q1020=
SA 09/01/2014 03:00->	METAR DAOO 090300Z 00000KT 0200 FG BKN010 10/10 Q1020=
SA 09/01/2014 02:30->	METAR DAOO 090230Z 00000KT 0200 FG BKN010 10/10 Q1021=
SA 09/01/2014 02:00->	METAR DAOO 090200Z 00000KT 0200 FG BKN010 10/10 Q1021=
SA 09/01/2014 01:30->	METAR DAOO 090130Z 00000KT 0100 FG BKN010NSC 11/11 Q1021=
SA 09/01/2014 01:00->	METAR DAOO 090100Z 00000KT 0100 FG BKN010NSC 11/11 Q1021=