

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université SAAD DAHLAB -BLIDA 1-

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Option : Opérations Aériennes

Organisme d'accueil

الديوان الوطني للأرصاد الجوية

Office National de la Météorologie

Thème

**Prévision des orages d'été au sud d'Algérie avec le
modèle AROME : Validation**

Réalisé Par :

Mlle .SAHRAOUI Bakhta

Promoteur :

Mr KOUIDER ELWAHAD

JURY :

Président : Mr LAGHA

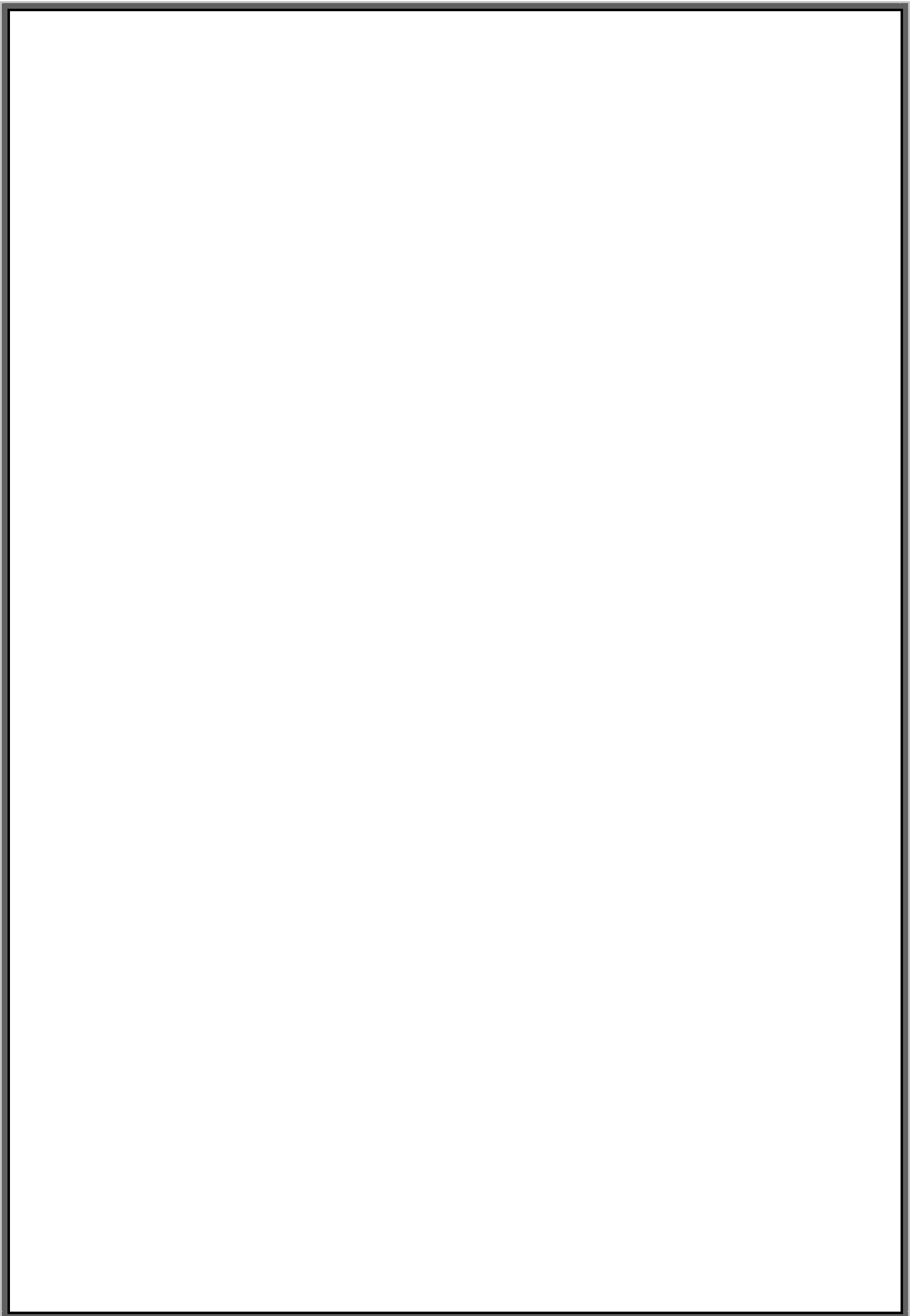
Examineur : Mr OUNNAR Ferhat

Examineur : Mr BOUDANI

Encadreur : -Mr MOKHTARI Morad

. -Mme BOUCHEFFA Amel

Promotion : 2016 /2017





Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier Dieu le Tout Puissant qui nous a donné la force pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier mon père et ma mère qui sont ma raison d'être, puisse Dieu m'accorder courage et moyen

bien vous le rendre un jour.

J'exprime mes remerciements et une vive reconnaissance à

Mr B. KOUIDER ELOUAHED, pour avoir accepté d'encadrer et diriger notre travail

Je remercie vivement Mr OUNNAR Ferhat, pour son aide et ses orientations.

Je remercie vivement tous le personnel du Centre National des Prévisions Météorologiques de L'Office National de la Météorologie et précisément mes encadreurs Mr MOKHTARI Morad et Mme Boucheffea Amel

Mes remerciements s'associent de la même manière aux membres du jury qui ont bien voulu examiner ce modeste travail.

Enfin J'exprime mes plus vifs et sincères remerciements à toutes

Les personnes qui ont contribué de près ou de loin à

L'aboutissement de ce mémoire.



Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire à :

Mes très chères à mon cœur mon père qui m'a toujours entouré de son affection et de sa tendresse que j'espère ne jamais décevoir et à la plus merveilleuse mère que j'adore qui m'a tout donné sans rien recevoir en parallèle : que dieu te protège et te garde.

*Mon frère **Hamid** et sa femme **Ratiba** et leurs adorables enfants : **Mohamed** et **Ali***

*Mon frère **Radouane** et sa femme **Hanane** et leurs adorables enfants : **Omar** et **Ayoub***

*Ma sœur **Oum El Kheir** et son mari **Athman** et son adorable fille **Miral El khansaa***

*A mes charmantes sœurs : **Nora** et **Khadidja** à qui je souhaite*

Une longue vie pleine de joie et de réussite.

*A mon plus cher frère **Ibrahim** à qui je souhaite beaucoup de réussite dans ses études*

*A ceux qui m'ont toujours aidé et soutenu durant toute ma scolarité, à mon grand-père **Mohamed** qui nous a quittés.*

*À toute la famille **SAHRAOUI** et **BEN MIRADI**.*

*A toutes les personnes avec lesquelles j'ai partagé les bons et les mauvais moments au cours de cinq ans d'étude, mes chères amies **El khansa Oum Chouhada**, **Nacira** et **Ratiba** et à toutes leurs familles.*

A toute la promotion d'Opérations Aériennes 2014/2015

A tous ceux qui sont chers et que je n'ai pas cités.

Bakhtout

Résumé

Les orages d'été sont des phénomènes météorologiques dangereux qui menacent la sécurité de l'aviation en générale. Le but de notre étude est d'évaluer la fiabilité du modèle AROME-SUD à prévoir les situations orageuses d'été. Pour cela, nous avons documenté la formation et la dissipation des orages d'été, puis étudié et calculé quelques indices d'instabilité avec le modèle AROME. Ensuite, nous avons analysé et comparé ces résultats avec l'observation réelle des situations choisies (la situation du 22 Juin 2016 et celle du 30 Aout 2016).

Sur la base de cette étude nous avons trouvé qu'AROME-SUD permet d'améliorer significativement la prévision des situations orageuses d'été. Les seuils de déclenchement des orages au sud du pays sont l'indice TOT (52°C) et le CAPE (1200 J/Kg).

ملخص

تعتبر العواصف الصيفية ظواهر جوية خطيرة جدا تشكل تهديدا على أمن مجال الطيران بصفة عامة. إن هدف دراستنا هو رؤية مدى قدرة نموذج AROME-SUD في التنبؤ بهذه العواصف الصيفية لأجل هذا قمنا بإظهار كيفية تشكل وتفكك العواصف الصيفية كما درسنا بعض مؤشرات عدم الاستقرار وقمنا بحسابها وتحليلها باستخدام نموذج AROME-SUD لنقارنها بعد ذلك بملاحظات حقيقية لحالات مختارة (حالة 22 جوان 2016 و 30 أوت 2016). انطلاقا من هذه الدراسة وجدنا أن نموذج AROME-SUD يسمح فعلا وبكل دقة بالتنبؤ بالعواصف الصيفية, وهذا ما يساعد على تفادي العديد من الكوارث ، وذلك من خلال المؤشرين (CAPE (1200J/ Kg) و TOT(52°C)).

Abstract

Summer thunderstorms are dangerous weather phenomena, threatening aircraft safety and aviation safety in general. The aim of our study is to evaluate the reliability of the AROME model to predict stormy summer situations. For this purpose, we have documented the formation and dissipation of summer storms, then studied and calculated some indices of instability with the AROME model. Then we analyzed and compared these results with the actual observation of the situations chosen (the situation of 22 June 2016 and that of 30 August 2016).

On the basis of this study we found that AROME South at 3km of horizontal resolution and 0 vertical levels in operation significantly improves the forecast of summer storm situations. Threshold storm thresholds in the south of the country are TOT (52°C) and CAPE (1200 J / Kg)

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	III
Sommaire	IV
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux	VIII
Liste des Abréviations	IX
Introduction generale.....	1
Chapitre I: Presentation du phenomene d'orage	4
Introduction	5
I.1.La météorologie et l'aéronautique	5
I.2.Définition de l'orage	5
I.3.formation d'un orage	6
I.4.Les Cumulonimbus	8
I.5.Classement des structures orageuses.....	10
I.6.Cycle de vie d'un orage	12
I.6.1.Stade du cumulus	12
I.6.2.Stade de maturité.....	12
I.6.3.Stade de dissipation.....	13
I.7.Types d'orages.....	14
I.7.1. Les orages frontaux (ou cycloniques)	14
I.7.2. Les orages orographiques (ou convectifs).....	15
I.7.3. Les orages de type thermiques ou de chaleur.....	15
I.7.4. Orage de neige ou thundersnow	16
I.8.Le temps dans un orage.....	17
I.8.1.Plafond bas et mauvaise visibilité	17
I.8.2.Pluie	17
I.8.3.Température	17
I.8.4.Pression	17
I.8.5.La grêle	18
I.8.6.Givrage.....	18
I.8.7.Vents	18

I.8.8.Rafales.....	19
I.8.9.Micro rafales	19
I.8.10.Turbulence	19
I.8.11. Ligne de grain	20
I.9. Dangers liés aux orages.....	21
I.9.1. La foudre	21
I.9.2. Les éclairs	22
I.9.3. tonnerre	23
I.9.4.La tornade	24
Conclusion.....	27
Chapitre II: La prevision des orages d’ete avec le modele AROME	28
Introduction	29
II.1. La prévision numérique du temps (PNT)	29
II.2. Les modèles de prévision numérique utilisés à l’ONM.....	30
II.2.1. Le modèle ARPEGE.....	30
II.2.2.Le modèle ALADIN	30
II .2.3. Le modèle Arome	31
II.2.3.1. Partie dynamique	32
II.2.3.2. Partie physique.....	32
II.2.3.3.Une meilleure simulation des nuages d'orages	33
II.3. Les Indices d’instabilités	34
II.3.1. Paramètres liés à la théorie de la particule (dans l’ordre du soulèvement).....	34
II.3.2.Indices « classiques » d’instabilité.....	36
II.3.3.La troisième catégorie comprend des indices d’instabilité proposés par divers auteurs et détailés par Sénési et Thepenier	37
II.4.L’organigramme	38
II.5.Les indices d’instabilités étudiés	40
II.5.1. Indice Total Total	41
II.5.2. L’indice de George K	42
II.4.3. Lifted index.....	44
II.4.4. L’énergie potentielle convective disponible (CAPE)	45
Conclusion.....	46
ChapitreIII: Analyse des situations d’ete orageuses	47
Introduction	48

III.1. Analyse de la situation du 30 /08/2016	48
III.1.1. La première échéance	48
III.1.2. La deuxième échéance.....	50
III .1.3.La troisième échéance	51
III.1.4. La quatrième échéance	52
III .2.Analyse de la situation du 22 /06/2016	53
III.2.1. La première échéance	53
III.2.2.La deuxième échéance.....	54
III .2.3.La troisième échéance	55
III.2.4.La quatrième échéance	56
Conclusion.....	57
Conclusion générale	59
References bibliographiques	61
Annexe	67

Liste des figures

Figure 1: Formation d'un orage.	7
Figure 2: Cumulonimbus nuage d'orage	8
Figure 3: Cumulonimbus Calvus	9
Figure 4: Cumulonimbus Capillatus.....	9
Figure 5: La cellule Monocellulaire	10
Figure 6: Les orages multicellulaires	11
Figure7: Orage super cellulaire.	11
Figure 8: Vue en plan d'une famille d'orages composée de cellules à différents stades de développement	12
Figure 9: Ligne de cellules orageuses en dissipation au coucher du soleil	13
Figure 10: Orage de neige	16
Figure 11: Formation du la grêle	18
Figure 12:Turbulence	20
Figure 13:La foudre	22
Figure 14:Des coups de tonnerre accompagnent les éclaires qui zèbrent le ciel au cours d'un orage.....	24
Figure 15:Tornade	25
Figure 16: Schéma présenté la formation d'une tornade	26
Figure 17:Les étapes d'une prévision	30
Figure 18:Domaine Aladin/Algérie	31
Figure 19: Domaine AROMESUD/Algérie.....	33
Figure 20:Résultat de prévision d'indice d'orage TOT avec le modèle AROME	42
Figure 21:Résultat de prévision d'indice d'orage K avec le modèle AROME.	43
Figure 22:Résultat de prévision d'indice d'orage LI avec le modèle AROME.	44
Figure 23:Résultat de prévision d'indice d'orage CAPE avec le modèle AROME	45
Figure 24:Les cartes de prévision des indices d'orage (CAPE ,KI,TOT,LI)du modèle AROME et l'image satellite pour la situation du 30/08/2016 a l'échéance 00 heure	48
Figure 25: Les cartes de prévision des indices d'orage (CAPE, KI ,TOT, LI) du modèle AROME et l'image satellite pur la situation du 30/08/2016 a l'echéance 06 heure.	50
Figure 26:les cartes de prévision des indices d'orage (CAPE, KI, TOT ,LI) du modèle AROMEet l'image satellite pour la situation 30/08/2016 a l'échéance 12 heure.	51

Figure 27:Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE ,K ,TOT , LI) du modèle AROME et l'image satellite pour la situation du 30/08/2016 a l'échéance 18 heure	52
Figure 28:Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE ,K,TOT,LI) du modèle AROME et l'image satellite pour la situation du 22/06/2016 a l'échéance 00 heure	53
Figure 29:Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE ,KI ,TOT,LI) du modèle AROME et l'image satellite pour la situation du 22/06/2016 a l'échéance 06 heure	54
Figure 30:Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE,K,TOT,LI) du modèle AROME et l'image satellite pour la situation du 22/06/2016 a l'échéance 12 heure.....	55
Figure 31:Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE,K,TOT,LI) du modèle AROME et l'image satellite pour la situation du 22/06/2016 a l'échéance 18 heure.....	56

Liste des tableaux

Tableau 1:Les paramètres liés à la théorie de la particule	34
Tableau 2:Les indices d'instabilité classiques	36
Tableau 3:Les indices d'instabilités	40
Tableau 4:La probabilité d'occurrence d'orage d'été pour l'indice TOT.	41
Tableau 5:La probabilité d'occurrence d'orage d'été pour l'indice K.....	43
Tableau 6:L'instabilité d'orage d'été pour l'indice LI.	44
Tableau 7:Risque d'orage d'été pour l'indice CAPE.	45

Liste des Abréviations

SIGMET : SIGNificant METeorological Information

MCS: Mesoscale Convective System

AROME: Application of Research to Operations at MESoscale

MESO-NH : Modèle de MESO échelle Non Hydrostatique.

PNT : La Prévision Numérique du Temps

ONM : Office National de la Météorologie

SI : Semi Implicite

SL : Semi Lagrangien

SLHD : Diffusion Horizontale Semi-Lagrangienne

ALADIN : Air Limitée Adaptation dynamique Développement International

ARPEGE : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

CEPMET : Le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme

GRADS: GRid Analysis and Display System

CAPE : L'énergie Potentielle Convective Disponible

TOT : Indice Total Total

PKI: L'indice de George K

LI: Lifted index

T : Température

Td : Température du point de rosée

Td moy : Température du point de rosée moyenne

T2m : Température à 2 mètre

VT : Totaux Verticaux

CT : Totaux Croisé

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'orage est un phénomène complexe. Il est intéressant et important par sa manifestation électrique, par les risques accrus de givrage qu'il présente à l'aviation, par la turbulence qu'il provoque : rafales brusques et violentes, courants verticaux à grande échelle, ascendants et descendants. C'est à ce titre qu'il retient l'attention du météorologiste et tout spécialement des services de prévision aéronautique.

Les orages d'été sont des phénomènes météorologiques très fréquents au sud de l'Algérie car le surchauffement du continent amène l'extension des basses pressions équatoriales sur le désert ce qui entraîne les dépressions sahariennes, sont des phénomènes ayant une forte variabilité spatiale et temporelle. Il est donc très difficile de prévoir exactement leur localisation, leur intensité et leur durée de vie.

Les modèles numériques sont des instruments nécessaires dans tous les domaines des sciences de l'environnement, en particulier dans celui de la prévision météorologique ou climatique. Aujourd'hui, il y a plusieurs modèles numériques utilisés (le modèle ALADIN, le modèle ARPEGE, le modèle Arome ...).

Le modèle AROME est le dernier né des modèles de prévision numérique du temps exploités au niveau de L'Office National de la Météorologie. Cet outil à maille très fine a été développé pour permettre une meilleure prévision des phénomènes convectifs dangereux tels que (les fortes pluies méditerranéennes, les orages violents, le brouillard...), et de la météorologie de basses couches.

Notre étude propose d'étudier la prévisibilité des orages d'été avec le modèle AROME-SUD à 3 km de résolution sur le sud du pays. Ceci peut se faire avec l'analyse des indices d'instabilité, les indices d'orage et la CAPE prévus par AROME, et l'évaluation des résultats de prévisions sur des situations orageuses d'été particulière (la situation du 30 /08/2016 et 22/06/2016).

L'objectif de ce travail est :

- Documenter sur les facteurs météorologiques contrôlant la formation et la dissipation des orages d'été dans la région du Sahara.
- Évaluer la fiabilité du modèle AROME-SUD à prévoir les situations orageuses d'été.
- Exposer aux prévisionnistes les seuils de déclenchement des orages au sud du pays à partir des indices calculés.

Pour répondre à cette préoccupation nous avons adopté la démarche méthodologique suivante :

Le chapitre un : est consacré pour faire une présentation générale sur le phénomène d'orage d'été (définition, sa formation, son cycle de vie, les types d'orage, les dangers liés aux orages...)

Le chapitre deux : ce chapitre est présenter les données et la méthodologie utilisées pour évaluer l'apport de l'augmentation de résolution d'AROME-SUD sur la prévision des orages d'été, et regroupe ainsi que définition de La prévision numérique du temps, les modèles de prévision utilise au niveau de L'ONM et l'explication des quatre indices d'instabilités (CAPE, TOT, K, LI).

Le troisième chapitre : on a jugé utile de faire une analyse sur les cartes obtenues par le modèle AROME-SUD et les comparer avec l'image satellite et les observations réel pour déterminer les zones d'instabilités et les zones orageuses à l'aide des quelques indices d'instabilité. Enfin nous avons terminé par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

**PRESENTATION DU
PHENOMENE D'ORAGE**

Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons des notions concernant les orages. Nous définissons l'orage, les cumulonimbus et ses sortes, ainsi que nous présentons les différents types d'orage, formation d'un orage, cycle de vie et le classement des structures orageuses, nous présentons également les dangers liés aux orages.

I.1.La météorologie et l'aéronautique

Tout au long de son histoire, l'aviation est restée intimement liée à la météorologie. Il y a eu des avancées technologiques de toutes sortes (meilleurs avions, des systèmes de navigation aérienne améliorés et un programme de formation des pilotes systématisé), mais la météorologie continue d'être un élément de premier plan. Dans le monde de l'aviation, les mots conditions météorologiques ne désignent pas seulement « ce qui est en train de se produire » mais aussi « ce qui va se produire durant le vol ». [1]

Les phénomènes significatifs en météorologie aéronautique sont des phénomènes météorologiques pouvant affecter la sécurité de l'exploitation aérienne : orage, grêle, turbulence, givrage, ondes orographiques, tempête de sable ou de poussière, cyclone tropical, nuage radioactif. Ces phénomènes sont signalés par des messages SIGMET. [4]

I .2. Définition de l'orage

En météorologie l'orage est une perturbation atmosphérique caractérisée par une ou plusieurs décharges brusques d'électricité, se manifestant par une lueur brève et intense (éclair) et par un bruit sec ou un roulement sourd (tonnerre).

Les orages sont associés aux nuages de convection, en particulier les cumulonimbus et sont le plus souvent accompagnés de précipitation sous forme d'averses de pluie, de neige, de neige roulée, de grésil ou de grêle.

L'orage est généralement un phénomène de courte durée : de quelques dizaines de minutes à quelques heures. Il peut être isolé (orage dû à la présence de reliefs ou causé par le réchauffement du sol en été) ou organisé en ligne (dite « ligne de grains » par les météorologistes).

Chapitre I : Présentation du phénomène d'orage

Par certaines conditions, des orages peuvent se régénérer sans cesse au même endroit ou bien s'y succéder à leur maximum de maturité. Ils provoquent ainsi durant plusieurs heures de fortes précipitations qui conduisent à des inondations catastrophiques. Une forte averse sans tonnerre, ne peut être appelée orage. [2]

I.3.formation d'un orage

Les orages se forment au sein des cumulonimbus. Ces nuages à très grand développement vertical résultent de mouvements de convection très puissants, Ils peuvent se développer sous le fait d'un très grand échauffement du sol les journées d'été. Ils sont alors isolés et éclatent en fin d'après-midi la plupart du temps. [5]

La formation des orages est le résultat d'un certain nombre de conditions dont les principales sont :

I.3.1. Instabilité conditionnelle de la masse d'air

Une masse d'air est en instabilité conditionnelle lorsque sa courbe d'état est située entre l'adiabatique sèche et l'adiabatique saturée. Avant que l'air ne devienne instable, il doit être soulevé (par une cause extérieure) jusqu'à un niveau (p_1) où les particules d'air ascendant deviennent plus chaudes que l'environnement. Lorsque cette condition est réalisée, les particules d'air, relativement chaudes, continuent d'elles-mêmes leur mouvement ascendant jusqu'au moment où leur température devient égale à celle de l'air environnant. [7]

I.3.2. Déclenchement de l'instabilité

L'instabilité peut se déclencher par soulèvement de la masse d'air ou par convection. Le soulèvement des particules d'air jusqu'au niveau où elles deviennent plus chaudes que l'air environnant (p_1) est provoqué principalement par le relief et par les surfaces frontales.

D'autre part, la convection thermique due au réchauffement diurne du sol joue aussi un très grand rôle dans le déclenchement de l'instabilité puisqu'elle crée une instabilité absolue dans les basses couches de l'atmosphère. La convection intervient également par suite d'une advection d'air froid sur une surface plus chaude. [7]



Figure 1 : Formation d'un orage. [7]

I.3.3. Humidité de la masse d'air

L'importance de l'humidité de la masse d'air réside dans son influence sur l'altitude du niveau de condensation et de ce fait sur l'altitude du niveau à partir duquel les particules d'air s'élèvent d'elles-mêmes. Il est évident que le niveau de condensation et le niveau (p_1) sont d'autant plus bas que l'humidité relative est élevée.

Par conséquent, le soulèvement nécessaire au déclenchement de l'instabilité sera d'autant plus faible que l'humidité de la masse d'air est élevée, toute autre condition restant égale, les orages seront plus fréquents (aussi bien dans l'espace que dans le temps) et plus violents dans une masse d'air humide que dans une masse d'air sec. [7]

Pourquoi y-a-t-il tant d'orages l'été ?

Les orages ont habituellement lieu à la fin d'une chaude journée d'été, quand les Cumulonimbus ont atteint leur développement maximal (extension verticale pouvant atteindre la tropopause). Pourquoi ? Parce que l'été, le soleil brille plus longtemps et est plus fort ; il réchauffe l'air. Plus l'air est chaud, plus il monte vite et haut, rencontrant des zones de plus en plus froides. Il y a donc formation de plus de Cumulus ou Cumulonimbus. D'importantes masses d'air très froid et d'air très chaud se confrontent donc, cherchent à se repousser, montent et descendent en tourbillons, se mélangent chargeant ainsi les nuages d'électricité. [1]

I.4. Les Cumulonimbus

I.4.1. Définitions

Le cumulonimbus, nuage dense et puissant, à extension verticale considérable, en forme de montagne ou d'énorme tour, est le seul type de nuage capable de donner des orages de pluie de neige ou de grêle. [8]

Les Cumulonimbus sont des nuages qui " naissent " en basse altitude entre 0 et 2 km, leur sommet se trouve entre 5 km et la tropopause. Leur épaisseur, qui est souvent de 7km, est très épaisse. Il possède une des plus grandes extensions verticales dans la famille des nuages. Sa base se situe de quelques centaines de mètres à 2000m du sol. Son sommet peut parfois atteindre la tropopause [3].

I.4.2. Formation de Cumulonimbus

L'air chauffé par le rayonnement du soleil sur la surface terrestre se dilate et devient plus léger que l'air situé au-dessus de lui. Il s'élève alors comme une montgolfière. Si cet air est suffisamment humide, la vapeur d'eau qu'il contient se condense pour former des gouttelettes d'eau : un nuage de type Cumulus apparaît. Dans une atmosphère instable, les mouvements verticaux de l'air sont intenses et vont favoriser par cette condensation le grossissement du nuage qui se développe et monte en altitude. Les gouttelettes les plus élevées se transforment alors en cristaux de glace : le Cumulus devient un Cumulonimbus. [11]

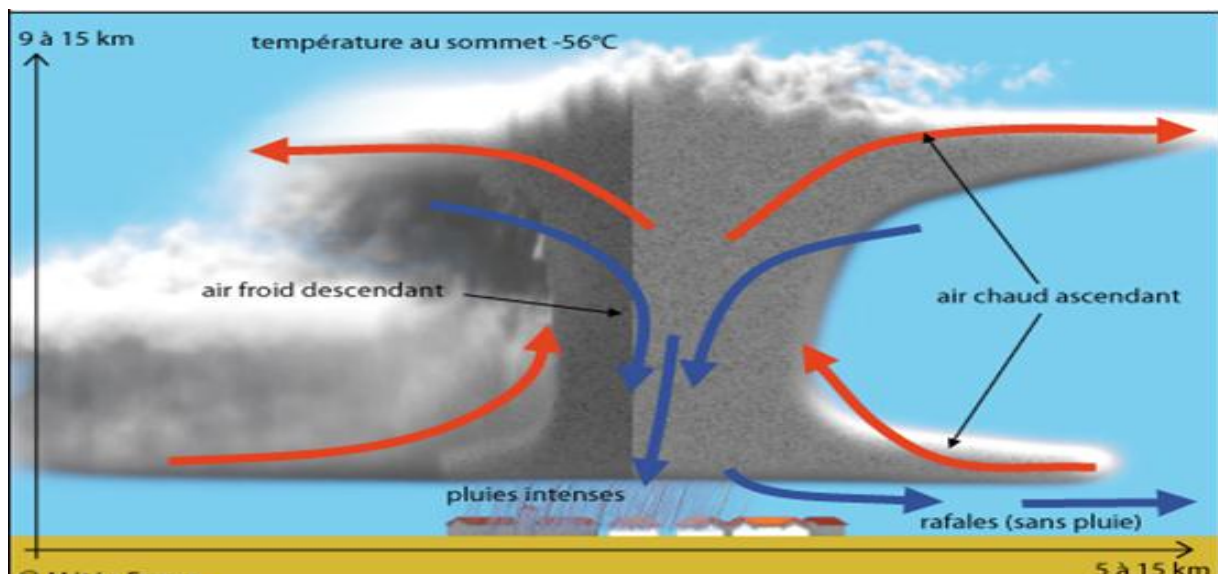


Figure 2: Cumulonimbus nuage d'orage [11]

I.4.3. Les types de Cumulonimbus

I.4.3.1. Cumulonimbus Calvus (cal)

Cumulonimbus dans lequel quelques protubérances au moins de sa région supérieure ont commencé à perdre leurs contours cumuliformes, mais dans laquelle aucune partie cirriforme ne peut être distinguée. Les protubérances et les bourgeonnements ont tendance à former une masse blanchâtre, avec des stries plus ou moins verticales. [10]



Figure 3 : Cumulonimbus Calvus .[10]

I.4.3.2. Cumulonimbus Capillatus (cap)

Il est caractérisé par la présence, principalement dans sa région supérieure, de parties nettement cirriformes à structure manifestement fibreuse ou striée, ayant fréquemment la forme d'une enclume, d'un panache ou d'une vaste chevelure plus ou moins désordonnée. Ce type de nuage donne généralement lieu à des averses ou à des orages, accompagnés souvent de grains et parfois de grêle il donne fréquemment naissance à des virga très nettes [10].



Figure 4 : Cumulonimbus Capillatus .[7]

Le Cumulonimbus comporte plusieurs particularités supplémentaires (voir annexe)

I.5. Classement des structures orageuses

On caractérise trois types d'organisation de cellules orageuses :

I.5.1. La cellule monocellulaire (ordinaire)

L'orage monocellulaire est le plus simple dans sa structure. Il est constitué d'une seule cellule dans laquelle on retrouve le courant ascendant qui une fois arrivé à maturité, se fait progressivement "asphyxier" par le courant descendant et les fortes pluies associées. C'est l'orage typique d'une fin d'après-midi d'été. Ce type de phénomène est de petite taille, souvent peu mobile, isolé et de par sa structure, n'excède généralement pas plus un hour. [6]



Figure 5 : La cellule Monocellulaire. [12]

I.5.2. L'orage multicellulaire

Orage formé de plusieurs cellules convectives à différents stades de leur existence. Les plus jeunes se trouvent à l'avant par rapport au déplacement, leur développement augmente vers l'intérieur de la masse nuageuse. En effet, il se développe lorsque la vitesse du vent se modifie avec l'altitude de sorte que le courant descendant (zone des fortes pluies) est décalé avec le courant ascendant et n'asphyxie plus ce dernier. Les orages multicellulaires peuvent parfois s'organiser en "amas orageux" de grande échelle appelé MCS (MEsocale convective system) et dont le développement peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres de diamètre. Les orages multicellulaires peuvent aussi s'organiser en "lignes de grains", fréquentes au passage des creux thermiques ou des fronts froids instables. [12]

Caractérisé par :

- Le plus courant, parfois fort,
- Groupes de cellules à différents stades de formation,
- Importance du courant de densité,
- Déplacement aléatoire ou sur un côté préférentiel. [4]



Figure 6 : Les orages multicellulaires. [12]

I.5.3. L'orage super cellulaire

Un orage super cellulaire n'est formé que d'une seule cellule convective de très grande taille, de très forte intensité et de très longue durée de vie. A titre de comparaison, le diamètre d'une super cellulaire à maturité varie de 20 km à 50 km alors que celui des multicellulaires ne dépasse pas 10 km. L'orage super cellulaire est particulièrement violent. Il se forme lorsqu'une masse d'air très instable rencontre une forte variation du vent en altitude. La grande majorité des tornades sont issues d'orages super cellulaires. [6]



Figure 7 : Orage super cellulaire. [12]

I.6.Cycle de vie d'un orage

Un orage, qui peut avoir 8km de diamètre ou, dans les cas extrêmes, 80km de diamètre, consiste généralement en deux cellules ou plus à des stades différents de leur cycle de vie. Le cycle de vie des cellules comprend les stades suivants [1] :

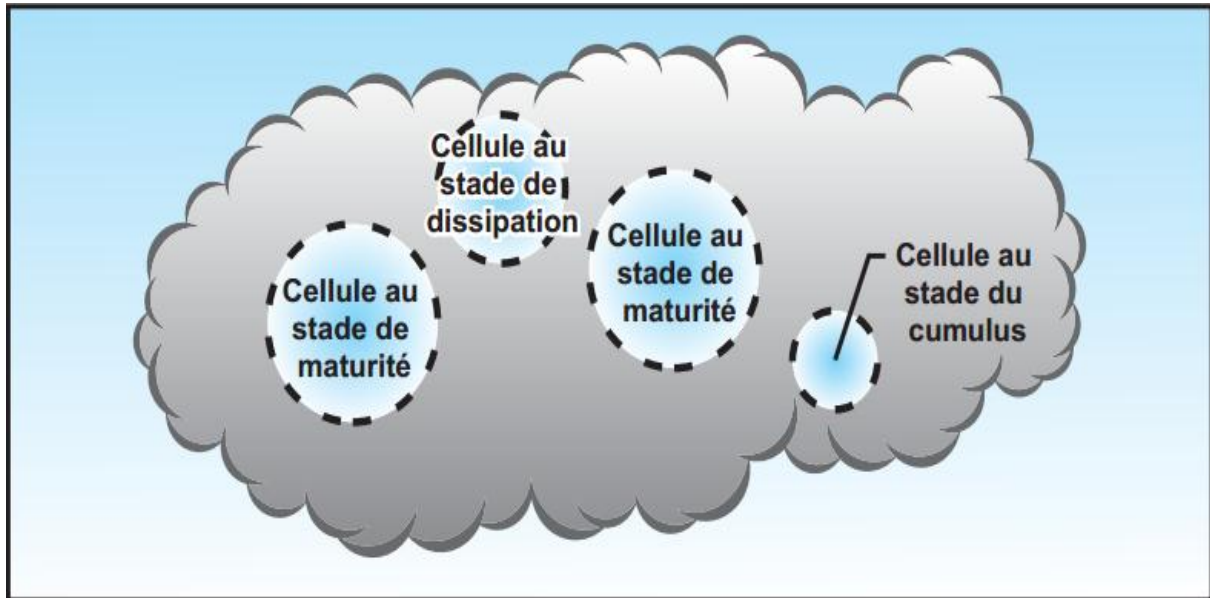


Figure 8 : Vue en plan d'une famille d'orages composée de cellules à différents stades de développement. [1]

I.6.1. Stade du cumulus

Au stade du cumulus, il n'y a que des courants ascendants. Ces courants peuvent atteindre une vitesse de 900m (3000 pieds) à la minute. Le nuage se bâtit donc rapidement dans la verticale et les courants ascendants transportent des gouttelettes d'eau surfondues bien au-dessus du niveau de congélation. Vers la fin de ce stade, le nuage peut très bien avoir une base de plus de 8km de diamètre et une extension verticale de 6000m (20 000 pieds). La durée moyenne de ce stade est d'environ 20 minutes. [1]

I.6.2. Stade de maturité

Le stade de maturité commence lorsque les précipitations commencent à tomber de la base du nuage. L'importante quantité d'eau tombant à travers le nuage provoque, par frottement, un renversement du sens des courants verticaux. Un courant descendant prend naissance dans la partie précipitante de la cellule et s'étend ensuite aux autres parties de la cellule.

Chapitre I : Présentation du phénomène d'orage

Les courants ascendants persistent cependant à côté des courants descendants et atteignent leur plus grande amplitude au début de ce stade et dans la partie supérieure du nuage (ils peuvent, localement, dépasser 25 m/s ou 90 km/h).

Les mouvements descendants sont généralement moins violents que les mouvements ascendants ; ils sont les plus importants dans la partie inférieure du nuage.

La limite entre les mouvements ascendants et descendants constitue une zone de turbulence sévère et de fortes accélérations verticales. Ce stade de maturité constitue la période d'orage, il dure de quinze à vingt minutes.

Les températures sont plus basses dans les courants descendants en comparaison avec l'air environnant et contrastent spécialement avec les températures dans les courants ascendants, les plus grandes anomalies négatives s'observent dans la partie inférieure du nuage (négatives dues à la friction, positives par induction). [7]

I.6.3. Stade de dissipation

Le stade de dissipation d'une cellule est caractérisé par la présence de courants descendants uniquement. Sans un apport additionnel d'humidité dans le nuage par les courants ascendants, la pluie cesse graduellement et les courants descendants s'affaiblissent. La cellule peut mettre de 20 à 30 minutes pour se dissiper complètement, laissant le ciel clair ou des couches de nuages disloquées. À ce stade, l'enclume, qui est presque exclusivement formée de cristaux de glace, se détache souvent et dérive en aval. [1]



Figure 9 : Ligne de cellules orageuses en dissipation au coucher du soleil. [7]

Les signes annonciateurs d'orage

- Le ciel s'assombrit rapidement, et dans les orages les plus violents il peut devenir d'un noir d'encre. Plus il est sombre, plus le nuage est épais.
- Le vent se renforce et tourne à la bourrasque. Ces rafales précèdent souvent de fortes pluies.
- En montagne, on peut observer des lueurs à l'extrémité des objets pointus (feux de Saint-Elme) ou entendre des bourdonnements diffus. Ces signes indiquent l'imminence d'un coup de foudre. [11]

I.7.Types d'orages

I.7.1. Les orages frontaux (ou cycloniques)

Les orages associés à un front froid forment une ligne appelée ligne de grains. Ces orages sont alimentés par le front et ont en abondance humidité, mouvements ascensionnels et instabilité. Parfois il se forme des orages auto-entretenus très violents à l'extrémité d'une ligne de grains. Appelés orages super cellulaires, ils peuvent durer plusieurs heures, car le front froid leur fournit un flux continu d'air plus froid à moyenne altitude qui augmente l'instabilité atmosphérique. Ils engendrent les vents, les averses de grêle et les tornades les plus destructeurs. [6]

Dans cette catégorie, on distingue les orages à fronts chauds, à fronts froids, à front occlus et préfrontaux.

I.7.1.1. Les orages à front chaud

Se forment quand de l'air instable s'élève et traverse la surface frontale du phénomène. Leur front est parfois très étendu (plusieurs centaines de kilomètres), alors que la largeur ne dépasse pas 50 km. Le ciel est alors encombré de cumulonimbus épars, avec courants ascensionnels peu intenses. Les cumulonimbus ont des contours gonflés en raison des mouvements convectifs actifs de l'air. [6]

I.7.1.2 Les orages à front froid

Sont souvent violents et susceptibles de provoquer la formation de tornades. Ils se forment quand une masse d'air froide plus rapide que le front chaud passe sous celui-ci. Alors l'air chaud

Chapitre I : Présentation du phénomène d'orage

et humide qui est plus léger que l'air froid, s'élève en créant des courants ascendants et donc un cumulonimbus. [3]

I.7.1.3. Les orages à front occlus

Interviennent quand une masse d'air chaud évincée par la rencontre de deux masses d'air froid qui la soulève. Lors de ces orages la base des cumulonimbus est généralement à des altitudes très élevées. [3]

I.7.1.4. Les orages préfrontaux

Ils sont très violents et les plus difficiles à prévoir. Trois facteurs interviennent à la formation de ses orages : une poussée d'un front froid, un air instable et le réchauffement du sol consécutif à un fort rayonnement. [9]

I.7.2. Les orages orographiques (ou convectifs)

Les orages peuvent se produire par suite du réchauffement diurne, du passage d'air froid et humide sur une surface plus chaude ou par ascendance orographique. La topographie est donc un facteur très important. [6]

Les orages orographiques interviennent par un écoulement instable d'air chaud et humide qui est soulevé par une chaîne de montagnes. Alors le long de la chaîne de montagnes ces orages s'alignent et agissent tant que l'écoulement d'air les alimente. Ils éclatent souvent sur les reliefs et restent au même endroit. [9]

I.7.3. Les orages de type thermiques ou de chaleur

Ces orages sont causés par une surchauffe des sols. C'est aux tropiques où ils sont très intenses comme la chaleur au sol atteint son maximum ! Ces orages, peuvent éclater à n'importe quel moment de la journée ou de la nuit également, et sur la terre ferme ou en mer, contrairement aux autres orages. C'est bien entendu en saison chaude que ces orages éclatent. Ces orages peuvent se répéter plusieurs jours à la suite. [3]

I.7.4. Orage de neige ou thundersnow

Ces orages connus sous le nom d'orage de neige se produisent contrairement aux autres types d'orages en hiver lors des tempêtes de neige. Ce qui en fait un phénomène relativement rare. Ils se forment dans une masse d'air très instable comme tous les autres orages mais contrairement à un orage typique, la masse d'air qui est soulevée dans un thundersnow est déjà sous le point de congélation. C'est pour cela que les courants ascendants du nuage d'un orage de neige sont généralement limités comme l'air froid venant du pôle fait que la tropopause est plus basse. Alors la différence de température entre le sol et le sommet est moins importante que lors des orages des saisons chauds, ce qui peut limiter encore plus la convection. [9]



Figure 10 : Orage de neige. [9]

Lors des courants ascendants les collisions entre les cristaux de glace crée une différence de potentiel électrique entre deux points du nuage. Mais l'activité électrique reste en général assez faible, constituée d'intenses éclairs souvent positifs en raison d'une présence importante de cristaux de glace (chargés positivement). Et le tonnerre s'entend moins loin comparer aux orages d'été (dans un rayon de 3 à 5 km). [9]

I.8. Le temps dans un orage

I.8.1. Plafond bas et mauvaise visibilité

La visibilité est souvent nulle à l'intérieur d'un nuage d'orage. Le plafond et la visibilité peuvent aussi être réduits par les précipitations dans l'espace vertical situé entre la base du nuage et le sol. [15]

I.8.2. Pluie

Au début, la pluie associée à une cellule ne couvre que quelques kilomètres carrés. Lorsque l'air froid s'étale, la pluie suit le mouvement pendant un certain temps puis perd du terrain, tandis que la zone d'air froid sans pluie s'élargit. À mesure que la cellule se dissipe, la zone de pluie diminue tandis que l'air froid continue de s'étaler. [15]

I.8.3. Température

La température près de la surface baisse rapidement lors du passage d'un orage dans ce secteur. L'air immédiatement sous l'orage provient du cumulonimbus, plus froid que l'air de surface. [15]

Même si l'air du nuage se réchauffe quelque peu lors de sa descente vers la surface, ce réchauffement ne sera pas suffisant pour que sa température soit égale à celle de l'air en surface.

Par conséquent, lors du passage d'un orage, on notera dans la plupart des cas une baisse importante de la température de surface. [15]

I.8.4. Pression

Au cours du stade initial de l'orage, le courant ascendant dominant produit une baisse de la pression en surface. Lorsque la cellule parvient à maturité, la sortie d'air froid cause une hausse soudaine de la pression, qui diminue une fois que la cellule est passée.

Les changements de pression de surface sont fréquents et difficilement prévisibles lors du passage d'un orage.

I.8.5. La grêle

Dans les cellules matures dont les courants ascendants sont d'une intensité inhabituelle, il peut y avoir de la grêle. Si la cellule s'élève en diagonale, il est possible que la grêle près de son sommet tombe dans un ciel dégagé. Elle semble alors tomber d'étages en surplomb. La grêle est plus fréquente à des altitudes d'environ 3 000 à 4 500 m.

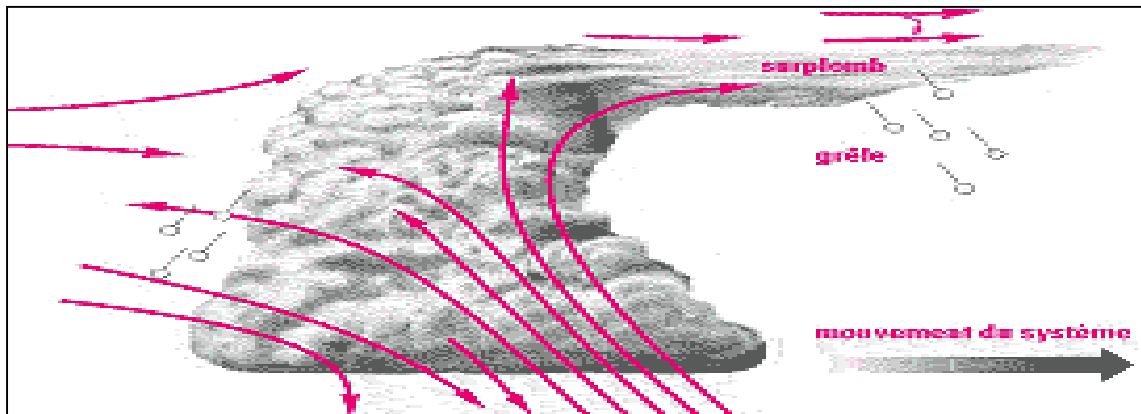


Figure 11 : Formation de la grêle. [9]

I.8.6. Givrage

Les nuages d'orage comprennent des courants verticaux assez forts pour transporter en altitude de grosses gouttelettes avec une rapidité telle que le contenu en eau du nuage peut être relativement élevé. [15]

C'est probablement dans la partie supérieure des cellules venant d'atteindre leur maturité, que les possibilités de givrage sont les plus fortes. La concentration des gouttelettes diminue alors à mesure que la cellule traverse sa phase de maturité, de sorte qu'au stade de la dissipation, la partie supérieure de la cellule se compose surtout de cristaux de glace.

I.8.7. Vents

Au stade cumulus, un léger afflux d'air gagne la cellule puis, à mesure que le courant descendant se développe, son air froid s'étale le long de la surface. Cet air s'enfonce sous l'air chaud, de sorte qu'il crée une sorte de front froid miniature.

Chapitre I : Présentation du phénomène d'orage

Ce front est appelé front de rafale. Lorsque le front d'attaque de l'air froid se manifeste par une brusque saute de vent, ce vent, surtout en surface, est accompagné de fortes rafales quelquefois destructrices. [15]

I.8.8. Rafales

Les rafales sont des variations transitoires et irrégulières de la vitesse du vent, causées par de petits tourbillons insérés dans l'écoulement général de l'air. Dans un orage, elles résultent des mouvements de cisaillement.

Au sein du nuage, les rafales s'intensifient avec l'altitude jusqu'à 1 500 à 3 000 m au-dessus du sommet. En général, les rafales sont au plus faible au voisinage ou en dessous de la base du nuage.

Dans les couches inférieures, les rafales sont au plus fort lorsque le courant descendant atteint le sol, c'est-à-dire peu de temps après le début de la pluie. L'anneau de fortes rafales s'étale alors vers l'extérieur de la zone de pluie, avec une vitesse de déplacement maximale dans la direction du vent dominant. [15]

I.8.9. Micro rafales

Les micros rafales sont d'intenses courants descendants qui se produisent à petite échelle sous un orage violent ; en atteignant le sol, elles soufflent vers l'extérieur, à partir du centre de la base de l'orage. Elles sont la cause de cisaillement horizontal et vertical.

I.8.10. Turbulence

Dans un nuage, la turbulence est constituée de courants soutenus et non horizontaux ; lors d'un orage, ces courants sont continus au-dessus de tout le secteur.

Durant la période active de la cellule, le nuage est presque entièrement parcouru par cette turbulence. Un courant ascendant prédomine durant le stade initial, alors que durant le stade terminal de l'orage, c'est le courant descendant qui est dominant.

La largeur du courant ascendant associé au développement du cumulus est habituellement inférieure à 7,5 km, bien qu'à l'occasion il puisse s'élargir jusqu'à 12 km. Durant le stade

Chapitre I : Présentation du phénomène d'orage

terminal, le courant ascendant est presque entièrement confiné à une altitude de 3 à 4,5 km.

Les courants descendants sont plus lents et de moindre étendue horizontale que les courants ascendants. Les courants descendants traversent la base du nuage et s'arrêtent près du sol, où l'air froid s'étale horizontalement. De la phase de maturité au stade de dissipation, le courant atteint sa vitesse maximale puis diminue d'intensité. [15]

Sous le nuage, le courant principal est le courant descendant d'air froid associé à la zone de précipitations. Bien qu'il commence à s'étaler et à ralentir avant d'atteindre le sol, à des altitudes de moins de 300 m en zone de précipitations, il peut être important.

Généralement, un courant de cette sorte ne s'étend pas horizontalement sur plus de 5 km.

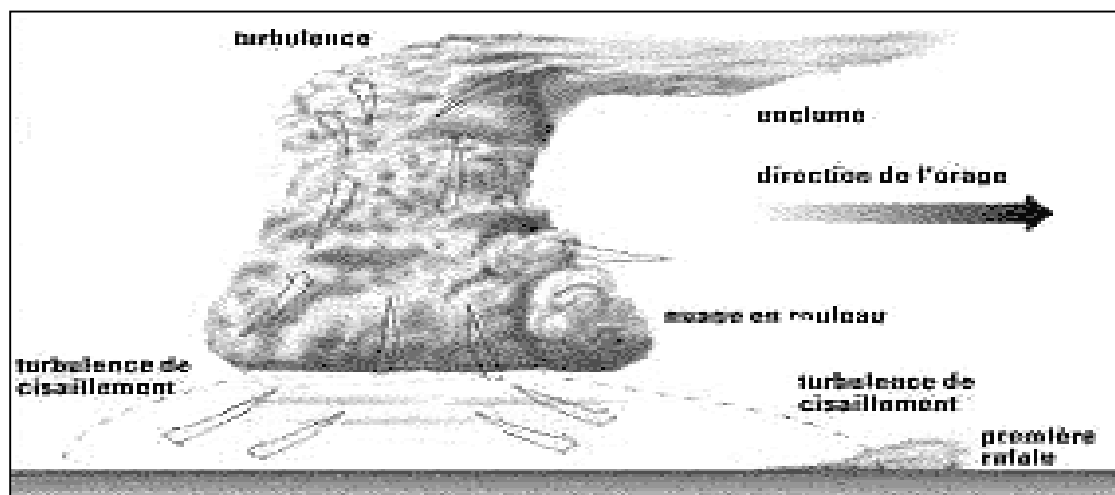


Figure 12 : Turbulence. [15]

I.8.11. Ligne de grain

Le grain est une variation violente du vent qui se produit le long d'une ligne étroite et mobile. Cette ligne est très souvent accompagnée d'averses ou d'orages. Elle se développe fréquemment à l'avant d'un front froid dans de l'air humide et instable, mais elle peut également se développer dans l'air instable, très loin de tout front.

Elle renferme souvent des orages super cellulaires très violents, et présente donc le plus grand danger.

Chapitre I : Présentation du phénomène d'orage

Une ligne de grain se forme rapidement ; elle atteint son intensité maximale en après-midi et durant les premières heures de la tombée de la nuit. [15]

I.9. Dangers liés aux orages

Il peut être très dangereux pour un avion de s'aventurer à l'intérieur ou à proximité d'un orage. En plus des risques habituels, comme une forte turbulence, un givrage intense, de gros grêlons, de fortes précipitations, une visibilité réduite et des décharges électriques à l'intérieur et autour de la cellule, d'autres dangers peuvent être présents dans le milieu environnant. [1]

I.9.1. La foudre

La foudre correspond à un phénomène naturel de décharge électrique qui se produit à partir des orages de nuages (les cumulonimbus), à l'intérieur d'un nuage, entre nuages ou entre le nuage et le sol. Elle peut occasionner de sérieux dégâts lorsqu'elle frappe des constructions ou des êtres vivants. [14]

I.9.1.1. Formation de la foudre

Lorsqu'un front froid rencontre un front chaud, ce premier passe sous le second, créant des vents ascendants et descendants dans les cumulonimbus, pouvant être épais de plusieurs kilomètres. Les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace en suspension se percutent tandis que le frottement génère l'électrisation du nuage, avec une séparation des charges : les gouttelettes, chargées négativement, tombent en bas du nuage, tandis que les cristaux de glace, chargés positivement, occupent les plus hautes altitudes. Cette différence de potentiel peut générer des éclairs à l'intérieur du cumulonimbus ou entre deux nuages.

Ces modifications altèrent également la charge électrique au sol, qui devient négative. Lorsque la différence de potentiel est trop importante, il y a une violente décharge électrique entre le nuage et le sol, le plus souvent, ou entre le sol et le nuage, produisant un plasma, à l'origine de l'éclair de lumière et d'un claquement sonore sourd, le tonnerre.

I.9.1.2. Les dangers de la foudre

La foudre frappe la surface de la Terre environ 5 millions de fois par jour. Si l'essentiel du temps elle ne cause pas de dégâts, il arrive régulièrement qu'elle frappe un être humain, le tuant parfois, ou un bâtiment, qu'elle peut endommager. Lorsqu'elle frappe un arbre, elle peut aussi générer un incendie. [14]



Figure 13 : La foudre. [14]

I.9.2. Les éclairs

On appelle éclair, le phénomène lumineux naturel accompagné de coups de tonnerre, qui se produit au cours des orages.

Lorsque de l'électricité statique accumulée dans le ciel se décharge brusquement, les gaz de l'atmosphère sont chauffés et ionisés. Il y a formation d'un plasma et émission soudaine de lumière sous la forme d'éclairs [14].

I.9.2.1. Les types d'éclairs

- **L'éclair en nappe** (ou éclair intra nuageux) est visible lorsque la foudre est proche de l'horizon ; il s'agit d'un éclair en zigzag au sein d'un nuage. C'est le plus commun, il est perceptible par l'élimination du nuage lointain qu'il provoque. [6]
- **L'éclair en zigzag** est facilement reconnaissable par son déplacement du nuage au sol, du sol au nuage ou d'un nuage à l'autre. Chaque trait de foudre est constitué de deux décharges qui se déplacent selon la même trajectoire dans deux directions opposées. Le premier (traceur) se dirige en zigzag vers le bas et complète le circuit entre nuage et sol. Ce phénomène est suivi par un très fort courant électrique (arc en retour) qui remonte le canal ionisé créé par le précurseur. Ce type d'éclair peut être très destructeur.
- **L'éclair de chaleur** ressemble à l'éclair en nappe, sauf que l'on n'entend pas le tonnerre en raison de son éloignement. Son nom est dû au fait que de tels éclairs, souvent visibles lors des orages estivaux, s'observent alors que la température au sol est élevée. Les éclairs de

Chapitre I : Présentation du phénomène d'orage

chaleur sont parfois orangés, et ce en raison de la réfraction de la lumière par les particules présentes dans l'atmosphère.

- **Le feu de Saint-Elme** (ou **feu de Saint-Nicolas** et **feu de Sainte-Anne**) a l'apparence d'une brume verte ou bleutée suspendue dans les airs au-dessus d'un objet élevé. Ce phénomène est déclenché par une grande quantité d'étincelles et par le champ électrique qu'elle engendre. Son appellation est liée au fait que les marins pouvaient voir ce type d'éclair alors qu'ils étaient en vigie en haut du mât. [6].
- **L'éclair en boule** est la forme la plus rare de la foudre. Très rares sont ceux qui ont réussi à observer cette foudre ou la photographier. De plus, elle reste un véritable mystère pour les scientifiques qui n'expliquent toujours pas sa formation.
- **Les farfadets** (ou **sprites**, ou **sylphes rouges**) sont des phénomènes optiques se produisant à très haute altitude associée aux orages, visible sous forme d'éclairs lumineux de faibles intensités, présents au-dessus des nuages orageux. En général, ils se manifestent avec un éclair survenant au-dessous. [6]

La couleur des éclairs peut nous informer de la composition de l'air ambiant de l'orage :

- Un éclair rouge va nous indiquer de la pluie dans l'air ;
- Un éclair bleu la présence de grêle ;
- Un éclair jaune est un signe d'une quantité importante de poussière dans l'atmosphère ;
- Un éclair blanc veut dire que l'air est très sec. [9]

I.9.3. tonnerre

Le terme tonnerre désigne le claquement sec ou le roulement sourd que l'on entend lors des orages au moment où les éclairs zèbrent le ciel. Le tonnerre, bruit de la foudre.

Le tonnerre ne constitue pas, en lui-même, un danger venu du ciel. Il n'est autre que le bruit fait par la foudre, lorsque cette décharge électrique traverse le ciel, elle réchauffe l'air qui se dilate brusquement. Cette dilatation soudaine produit un bruit qui peut être assourdissant. Si l'éclair est droit, on n'entend qu'un seul coup de tonnerre. S'il est zébré, on perçoit une succession de grondements. [14]

Chapitre I : Présentation du phénomène d'orage

Estimer la distance de l'orage grâce au tonnerre

Généralement, un claquement sec est synonyme d'orage très proche et un grondement sourd et persistant signifie que la foudre frappe au loin.

La différence entre la vitesse de propagation du son (340 mètres par seconde) et celle de la lumière dans l'air (quelque 300.000 kilomètres par seconde) permet d'estimer la distance à laquelle se situe l'orage qui gronde. Un écart de trois secondes entre la vision de l'éclair et la perception du bruit du tonnerre place l'orage à une distance d'environ un kilomètre de l'observateur. Parfois, il est possible de voir des éclairs sans entendre le tonnerre, il s'agit alors d'éclairs de chaleur. [14]



Figure 14 : Des coups de tonnerre accompagnent les éclaires qui zèbrent le ciel au cours d'un orage. [14]

I.9.4.La tornade

Est une perturbation atmosphérique tourbillonnaire de grande intensité mais de dimension limitée accompagnée de vents violents, contrairement à l'ouragan. Il s'agit du phénomène météorologique le plus violent et le plus destructeur, avec des rafales de plus 300 km/h, pouvant même atteindre plus de 700 km/h dans les cas les plus extrêmes. Néanmoins, son étendue géographique et sa durée de vie sont faibles. [14]



Figure 15 : Tornado. [14]

I.9.4.1. Les conditions

Les tornades proviennent quelquefois d'orages isolés, mais le plus fréquemment, elles résultent d'orages super cellulaires associés à des fronts froids ou des lignes de grains. Cependant, pour qu'une tornade se développe, il faut que l'air soit excessivement instable. Cela est rendu possible par [6] :

-le réchauffement de l'air près de la surface grâce à l'action du rayonnement solaire et par un apport d'air chaud et humide.

-le refroidissement de l'air en altitude provoqué par un apport d'air.

Il est nécessaire qu'une couche d'air relativement froid surmonte une couche d'air relativement chaud et humide.

Dans ces conditions, il suffit d'une poussée vers le haut pour que se développent de violents orages qui peuvent dégénérer en tornades. Les orages les plus violents attirent l'air vers la base de leur nuage avec une grande force. Si l'arrivée d'air a un mouvement rotatif initial, il y aura souvent formation d'un tourbillon extrêmement concentré, se dirigeant de la surface vers l'intérieur du nuage. [6]

La vitesse du vent à l'intérieur d'un tel tourbillon peut excéder 375 km/h. En conséquence, la pression à l'intérieur du tourbillon est très basse. Les vents violents ramassent poussières et débris, et, sous l'effet de cette basse pression, un nuage en forme d'entonnoir se crée, de la base du cumulonimbus jusqu'au sol. Si le nuage n'atteint pas la surface, on a un entonnoir nuageux. L'entonnoir nuageux qui touche le sol est une tornade.

I.9.4.2. La formation

D'après les modèles usuels, la naissance d'une tornade à partir d'un violent orage se fait en deux étapes :

Etape 1 : le courant ascendant de l'orage se met d'abord à tourner. Le basculement de l'axe de rotation semble être le mécanisme principal intervenant à ce stade. La colonne d'air ascendante et en rotation, qui a un diamètre de 10 à 20 kilomètres, constitue le méso cyclone (si, par la suite, il engendre une tornade, ce qui n'est généralement pas le cas, on l'appellera un vortex tornadique). Les observations par radar Doppler ont montré que le mouvement de rotation commence dans la troposphère moyenne, à des altitudes comprises entre quatre et huit kilomètres. [6]

Etape 2 : ce courant tournant se propage ensuite vers le sol par un effet de tube dynamique. Le long de la colonne en rotation, le champ de pression est en équilibre avec le champ de vents où la circulation est fortement incurvée. En effet, la force dirigée vers l'intérieur, qui s'exerce sur l'air du fait de la faible pression qui règne au centre de la colonne, est équilibrée la rotation de l'air autour du centre de la colonne. [6]

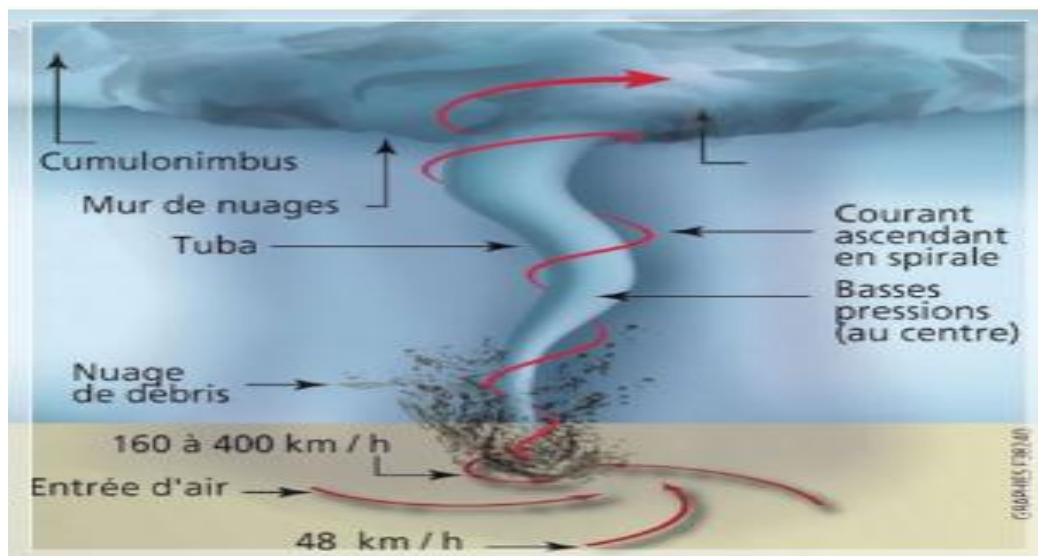


Figure 16 : Schéma présenté la formation d'une tornade. [6]

Dans ces conditions d'équilibre cyclonique, l'air circule facilement, autour et le long de l'axe du cyclone, mais il ne peut pratiquement pas s'en éloigner ou s'en approcher. Alors qu'auparavant une partie de l'air entrainé dans la colonne ascendante à l'altitude des couches moyennes, maintenant la presque totalité de l'air s'engouffre à la base du tuba. Le cyclone se comporte comme un tube dynamique. Tout se passe comme dans le tuyau d'un aspirateur, hormis le fait que l'air n'est pas canalisé par les parois d'un tuyau mais par son propre mouvement

Chapitre I : Présentation du phénomène d'orage

tourbillonnaire. Il en résulte une intensification du courant ascendant et, par conséquent, un renforcement des vents qui convergent sous le cyclone. Du fait du cisaillement de la direction du vent, l'air qui s'engouffre dans le courant ascendant s'élève en tournant autour du centre de la colonne. [6]

Les dangers d'orage sur les aéronefs

Pour le trafic aérien, les dangers induits par un orage sont multiples. Lors de turbulences, l'avion est pris entre des courants d'air ascendants et descendants, les passagers ressentent de fortes secousses et la structure de l'appareil est mise à rude épreuve. La grêle peut endommager les vitres ou le nez de l'avion et le radôme (une zone sensible qui abrite les principaux instruments de navigation). La foudre peut également engendrer des fissures dans la carlingue. Enfin, les températures extrêmement basses dans les cumulonimbus peuvent faire geler les sondes qui livrent alors des données erronées.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le phénomène de l'orage d'une manière détaillée, Nous avons mentionné sa formation, son cycle de vie (phase de mature et dissipation). Puis nous avons illustré ses différents types et le temps dans un orage. Enfin nous avons cité quelques dangers liés aux orages.

CHAPITRE II :

**LA PREVISION DES
ORAGES D'ETE AVEC LE
MODELE AROME**

Introduction

La prévision des orages d'été est très difficile, parce qu'ils sont régis par l'interaction de plusieurs processus, pour poursuivre l'amélioration des prévisions des orages d'été on a utilisé le modèle à maille fine AROME-SUD.

II.1. La prévision numérique du temps (PNT)

La prévision numérique du temps (PNT) est une application de la météorologie et de l'informatique. Elle repose sur le choix d'équations mathématiques offrant une proche approximation du comportement de l'atmosphère réelle. Ces équations sont ensuite résolues, à l'aide d'un ordinateur, pour obtenir une simulation accélérée des états futurs de l'atmosphère. Le logiciel mettant en œuvre cette simulation est appelé un modèle de prévision numérique du temps. En gros, cela se résume à un gros ordinateur qui reçoit des informations, les traite, calcule et envoie ces informations sous forme de cartes que nous utilisons pour les prévisions du temps. [16]

En météorologie opérationnelle, la PNT est utilisée pour faire des prévisions dont les résultats numériques bruts subiront diverses formes de post-traitements pour les rendre utilisables. Les résultats seront traités par d'autres logiciels ou interprétés par des météorologues pour satisfaire les besoins spécifiques des utilisateurs. Cela inclut la prévision météorologique et des applications dans un grand nombre de domaines d'activité, tels que les transports, l'agriculture, la mitigation (atténuation) des désastres, etc.....

Les étapes d'une prévision

La prévision météorologique est élaborée en trois étapes fondamentales : l'observation, la simulation de l'évolution de l'atmosphère à l'aide des modèles numériques et l'analyse des résultats par les prévisionnistes.

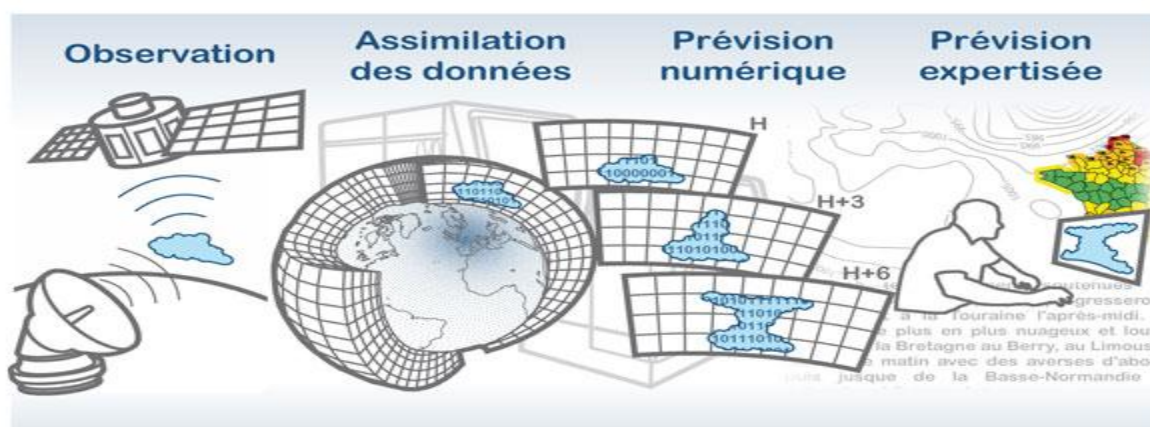


Figure 17 : Les étapes d'une prévision. [11]

II.2. Les modèles de prévision numérique utilisés à l'ONM

Les modèles numériques sont aujourd'hui des instruments indispensables dans le domaine des sciences de l'environnement, en particulier dans celui de la prévision météorologique ou climatique. [11]

II.2.1. Le modèle ARPEGE

Le modèle de prévision numérique planétaire Arpège (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) est un élément essentiel pour la prévision opérationnelle du temps à Météo-France. Il fait partie intégrante du logiciel Arpège-IFS conçu, développé et maintenu en coopération avec le CEPMMT (Centre Européen Pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme). Ce logiciel intègre la majorité des applications nécessaires à la prévision numérique opérationnelle permettant ainsi d'assurer une stricte cohérence des calculs effectués dans l'analyse, le modèle et les post-traitements. Avec une nouvelle version tous les 9 mois environ, ce code est en constante évolution afin d'exploiter au mieux la puissance des supercalculateurs, assimiler les données des nouveaux systèmes d'observation et améliorer les composantes du modèle de prévision. Le modèle Arpège a une durée de vie largement supérieure à celle de tous ses prédécesseurs. [11]

II.2.2. Le modèle ALADIN

La version opérationnelle ALADIN-Algérie couvre toute l'Algérie. Elle a une résolution horizontale de $12\text{Km} \times 12\text{Km}$ et une résolution verticale de 70 niveaux. Le premier niveau est

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

situé à 17 mètres et le dernier niveau à 65 Kilomètres. Alimenté par les simulations d'ARPEGE toute les 3 heures afin de lui fournir les conditions de bord.

ALADIN (Air Limitée Adaptation dynamique Développement International) a été développé dans le cadre d'une collaboration internationale entre météo France et des services météorologique partenaires, dans le but de mieux suivre le comportement des phénomènes de petite échelle tels que : le soulèvement orographique, la convection, la brise de mer ou de terre etc..... Ce projet a été mené en collaboration avec 16 pays Européens et d'Afrique du nord. [17]

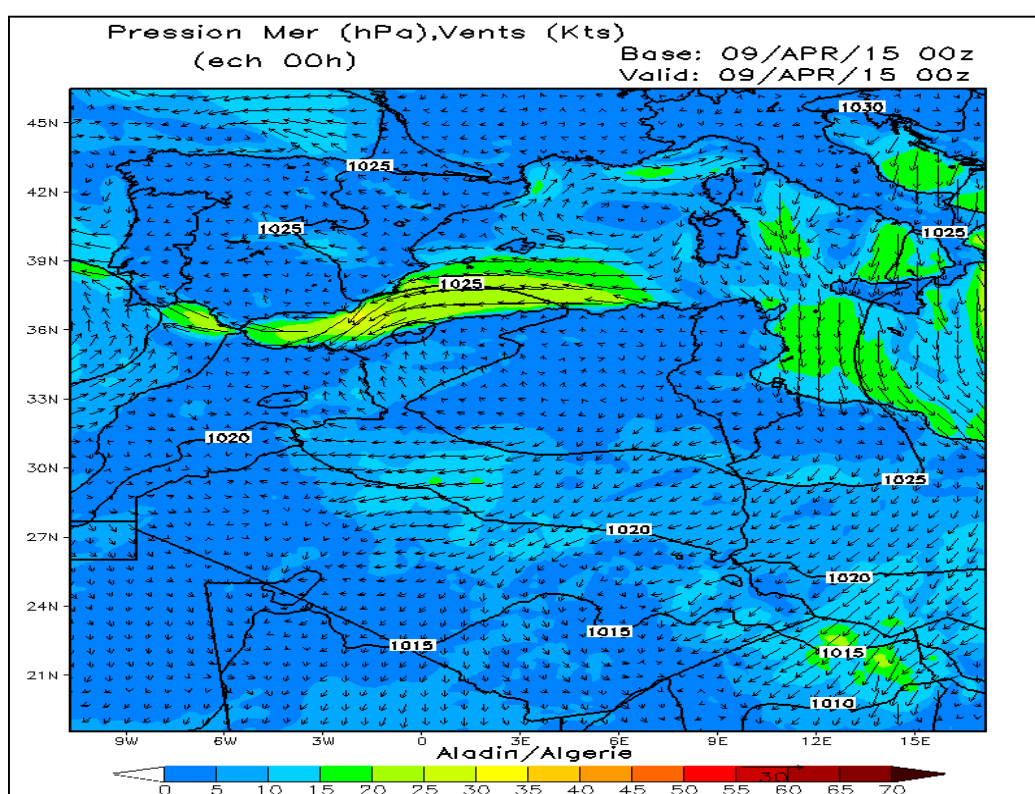


Figure 18 : Domaine Aladin/Algérie. [17]

II .2.3. Le modèle Arome

Le modèle AROME (Application of Research to Operations at MEsoscale) est le modèle qui est utilisé par l'ONM pour la modélisation à maille fine. Il est opérationnel depuis Mars 2014. AROME a été conçu pour améliorer la prévision à courte échéance des phénomènes dangereux tels que les fortes pluies, les orages violents, le brouillard.

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

La version AROME couvre toute l'Algérie. Elle a une résolution horizontale de 3 km x 3 km et une résolution verticale de 41 niveaux. Le premier niveau est situé à 17 mètres et le dernier niveau à 45 kilomètres. [11]

II.2.3.1. Partie dynamique

AROME est basé sur un système d'équations compressible et non hydrostatique. C'est un modèle avec un schéma de discrétisation temporelle de type semi implicite (SI). Son schéma d'advection est semi Lagrangien (SL). Ce type de schéma numérique SI-SL permet d'utiliser un grand pas de temps ce qui limite le coût de calcul (ce qui est primordial pour la prévision opérationnelle) par rapport à un modèle Eulérien explicite. C'est un modèle spectral (certaines variables pronostiques sont représentées à partir d'une double décomposition de Fourier). La discrétisation verticale se fait par différences finies. Il décrit l'évolution de 12 variables pronostiques : la température, les 2 composantes du vent horizontal, l'énergie cinétique turbulente, l'humidité spécifique, les contenus spécifiques en pluie, neige, gouttelettes d'eau nuageuses, et cristaux de glace, ainsi que 2 variables non hydrostatiques (divergence verticale, l'écart à la pression hydrostatique). Une diffusion horizontale semi-Lagrangienne (SLHD) en point de grille (Vana et al. 2009) est appliquée sur ces 5 espèces de contenus spécifiques. Une diffusion numérique spectrale linéaire du quatrième ordre est appliquée sur le vent, la température, et les variables non hydrostatiques. Son intensité est inversement proportionnelle à la pression, c'est à dire que la diffusion spectrale augmente avec l'altitude. [21]

II.2.3.2. Partie physique

Les paramétrisations physiques d'AROME sont communes avec celles du modèle Mésoscale Non Hydrostatique (Modèle de MESO échelle Non Hydrostatique). Le schéma microphysique à un moment en phase mixte (Pinty et Jabouille 1998) permet d'utiliser 5 variables pronostiques d'hydrométéores (3 précipitants : pluie, neige, graupels et 2 non précipitants : cristaux de glace et gouttelettes d'eau nuageuse). Pour le mélange sous maille, on utilise une équation d'évolution pronostique de la turbulence avec la longueur de mélange de Bougeault et Lacarrère (1989) et un schéma de convection peu profonde qui représente les thermiques de la couche limite (Pergaud et al. 2009). AROME utilise également le schéma de surface SURFEX et un schéma de paramétrisations du rayonnement issu du Centre Européen de Prévision. [21]

II.2.3.3. Une meilleure simulation des nuages d'orages

Autre atout, Arome tient compte des mouvements verticaux violents de petite échelle associés au développement des cumulonimbus, les nuages d'orages. Un modèle à maille plus large, comme Aladin, ne "voit" pas ces mouvements verticaux locaux. Avec sa maille de 3 km, Arome est capable de les modéliser ainsi que le cycle de vie des systèmes nuageux qui produisent des précipitations. Il peut alors mieux simuler les phénomènes "convectifs", les systèmes pluvio-orageux. [11]

Dans le cadre de cette étude, le modèle qui est en adéquation avec notre thème est la nouvelle version du modèle AROME qui couvre la totalité du pays avec une résolution spatiale de 3 km, cette extension du modèle AROME permet la prévision des phénomènes locaux à échelle fine dans les régions sud du pays.

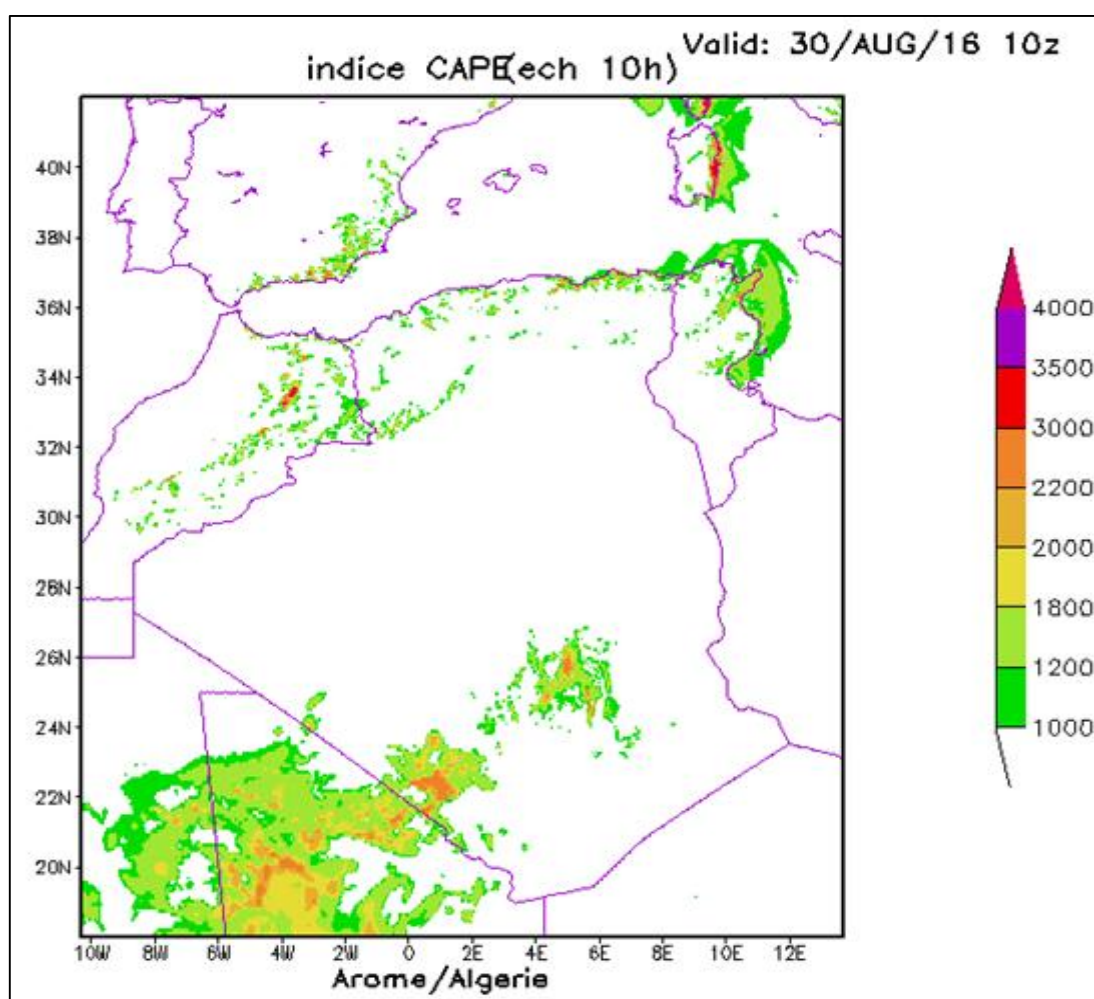


Figure 19: Domaine AROME-SUD/Algérie.

II.3. Les Indices d'instabilités

Une étude bibliographique nous a permis de répertorier de nombreuses propositions d'indices d'instabilité. Les indices d'instabilité peuvent être classés en trois catégories. [18]

II.3.1. Paramètres liés à la théorie de la particule (dans l'ordre du soulèvement)

Tableau 1: Les paramètres liés à la théorie de la particule. [18]

Nom usuel	Abréviation	Formule
Niveau de condensation	Lcl	/
Niveau de convection libre	Lfc	/
Soulèvement initial	Dpsollfc	Psol – Lfc
Convection Inhibition	Cin	$g \cdot \int_{psol}^{lfc} \frac{(\theta - \theta')}{\theta'}$
Pression au sommet du nuage	Ptop	/
Épaisseur du nuage	Dptoplcl	Lcl - Ptop
Ptop – Psol	Dptoppsol	Ptop – Psol
Cape	Cape	$g \cdot \int_{lfc}^{ptop} \frac{(\theta - \theta')}{\theta'}$
Capex	Capex	/
Capexx	Capexx	/
Cape algébrique	Cape-alg	Cape + Cin

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

Avec :

Lcl : Pression à laquelle la particule devient saturée par soulèvement adiabatique (base du nuage).

Lfc : Niveau d'intersection de la courbe d'état avec la pseudo-adiabatique saturée issue du point de condensation (base d'intégration du Cape). La flottabilité devient positive.

Dpsollfc : Épaisseur de la zone de flottabilité négative.

Cin : Énergie nécessaire pour soulever la particule d'air jusqu'au niveau de convection libre. Négative ou nulle avec cette définition.

θ : température potentielle de la particule. θ' : température potentielle de l'environnement.

Ptop : Niveau auquel la pseudo-adiabatique suivie par la particule soulevée recoupe la courbe d'état.

Épaisseur du nuage : Épaisseur du Cape.

Cape : Énergie potentielle convective disponible.

Capex : Cape calculé avec $\Theta'w$ maximale de la journée.

Capexx : avec la $\Theta'w$ maximale dans les 300 premiers hPa.

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

II.3.2. Indices « classiques » d'instabilité

Tableau 2: Les indices d'instabilité classiques [18]

Nom usuel	Abréviat	Formule
1-Adedokun 2	Adedokun2	$\Theta'w \text{ sfc} - \Theta_s 500$
2-Energy Index	Etot	$\Theta_e 850 - \Theta_e 500$
3-Instabilité convective	Instab 2	$\Theta_e 100 - \Theta_e (600 - 500)$
4-Modified Total Totals	Ttmod	$(T_{sol} - 850 - T_{500}) + (T_d 850 - 500)$
5-Showalter modifié	Showalmod	$T_{500} - T_{pm500}$
6-Lifted Index ou indice de Galway	Galway	$T_{500} - T_{px500}$
7-Faust	Faust	$T_{pm500} - T_{500}$
8-Deep Convective	Index Dci	$T_{850} + T_d 850 - \text{Galway}$
9-K modifié	Kmod	$(T_{850} - T_{500}) + T_{dsol} - 850 - (T_{700} - T_d 700)$
10-Jefferson	Jefferson	$1,6. \Theta'w 850 - T_{500} - 0,5. (T_{700} - T_d 700) - 8$
11-Telfer	Telfer	$F [(T_{700} - T_d 700) + (T_{600} - T_d 600), (T_{850} - T_{500})]$
12-Severe weather threat	Sweat	$12.T_d 850 + 20.(tt - 49) + 2.f_{850} + f_{500} + 125.(S + 0,2)$

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

Avec :

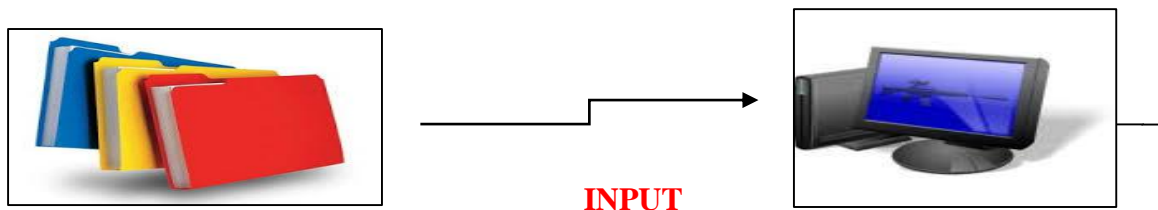
1. Différence entre la Θ'_w en surface et celle du point d'état à 500 hPa supposé saturé.
2. Proportionnel à la différence d'énergie statique humide entre deux courants hypothétiques, l'un ascendant depuis le niveau 850 hPa, l'autre descendant depuis le niveau 500 hPa, avec :
$$E = C_p \cdot \Theta_e = C_p T + gz + Lq$$
3. Similaire à Energy Index mais pour d'autres couches
4. Θ_e 100 signifie Θ_e moyenne sur la couche d'épaisseur 100 hPa près du sol.
5. Utilisation de T et Td moyennes dans la couche sol-850 hPa.
6. Tpm500 : température à 500 hPa de la particule définie par la température à 850 hPa et l'humidité moyenne sur la couche 850-500 hPa, après soulèvement. Comme Showalter, mais calculé avec la particule sol ayant la température maximale de la journée (Tpx500) et le rapport de mélange moyen des 1 000 premiers mètres (Galway, 1956).
7. Comme Showalter, sauf le calcul de Td à 850 hPa par moyenne des (T - Td) à 850, 700 et 500 hPa.
9. Abaque utilisant l'humidité des couches moyennes et la stabilité de la couche (850-500 hPa).
10. $S = \sin (dd500 - dd850)$.

II.3.3. La troisième catégorie comprend des indices d'instabilité proposés par divers auteurs et détaillés par Sénési et Thepenier

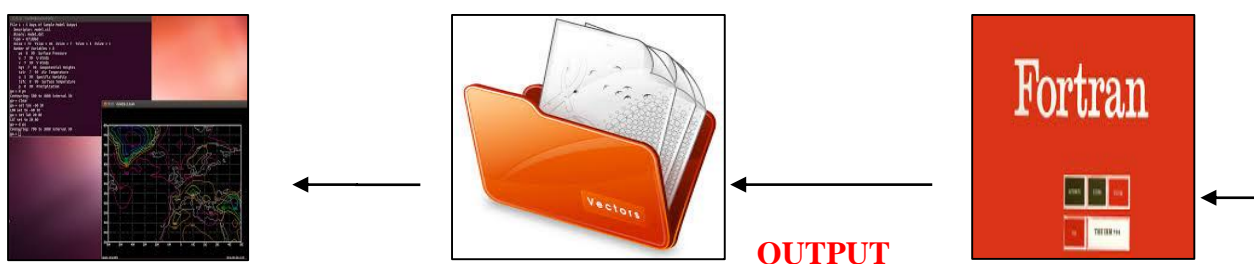
Ces indices sont en général calculés à partir de la différence de température entre un niveau de basses couches et un niveau de moyenne troposphère, avec ou sans soulèvement saturant de la particule de basses couches. Trois indices appartenant à cette catégorie : (Indices de Showalter, de Galway et Dci). Plusieurs types de température sont utilisés : (température « classique », température du point de rosée, moyenne des deux températures potentielle équivalente). Certains indices mélangent deux types de température. [18]

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

II.4. L'organigramme

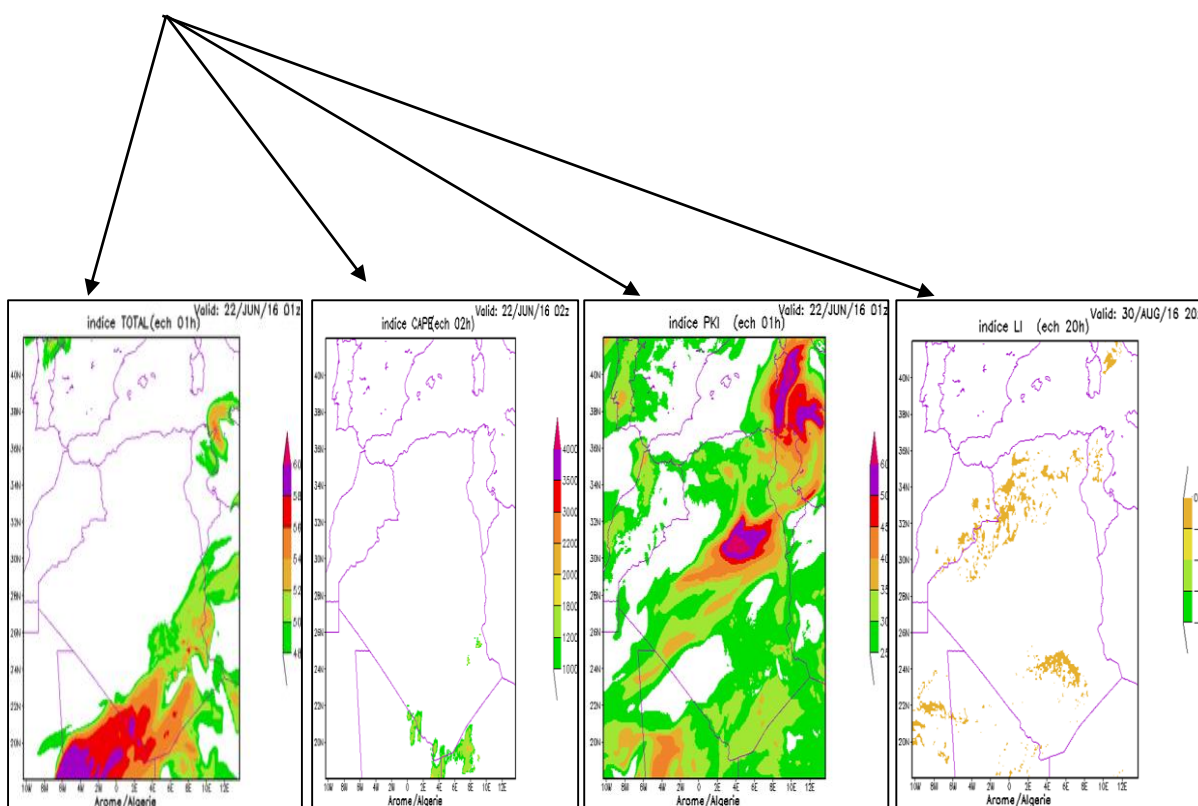


Les fichiers de prévision du modèles AROME-SUD



Logiciel GRADS

Fichier.dat



Résultats de prévision des indices d'orage (TOT, CAPE, PKI, LI) avec le modèle AROME-SUD (échéances 00 à 23h).

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

Cet organigramme résume le fonctionnement du code pour établir des cartes de prévisions des orages d'été sur la régions sud d'Algérie en utilisant la nouvelle version du modèle a échelle fine AROME-SUD

Le programme utilise les fichiers de prévision du modèles AROME-SUD comme INPUT et calcule sur chaque point de grille du modèle les indices (TOT, CAPE, PKI, LI).

Et ce programme finira par générer des fichiers OUTPUT présenté sous forme de tableaux contenant la liste de tous les points de grille du modèle (latitude et longitude) ainsi les prévisions météorologiques des paramètres souhaité jusqu'à 48 heures d'échéances. Ces fichier output sont ensuite injecté dans un logiciel de traçage des cartes météorologique GrADs pour mieux représenter la distributions spatiale et temporelle de chaque indice.

II.5. Les indices d'instabilités étudiés

Tableau 3: Les indices d'instabilités [19]

Pour prévoir les orages convectifs non sévères	<ol style="list-style-type: none">1. Indices Showalter2. indices Showalter modifiés3. K-index4. K-index modifiés5. Indices Rackliff6. Indices Jefferson7. indices Adedokun (2)
Pour la prévision d'orages et de tornades sévères	<ol style="list-style-type: none">1. Lifted index2. Indices Total Total3. Indices Total Total modifiés4. Indices Total Energie5. Indices de menace grave (SWEAT)6. Indice d'instabilité par convection7. Indice d'instabilité convective du Barbier
Pour le paramétrage de la stabilité statique dans les modèles numériques et études diagnostiques	.Mesures thermiques de la stabilité statique (6)
Pour estimer les hauteurs des bases de nuages et la surface critique température de convection	.L'énergie potentielle convective disponible (CAPE)

Après l'étude des données disponibles au niveau de l'ONM. On a sélectionné un certain nombre d'indices pour la prévision des orages d'été en Algérie.

Dans notre étude on a étudié quatre indices seulement (CAPE, TOT, PKI, LI). Puis nous analysons les cartes et les distributions de chaque indice d'instabilité et leur corrélation avec l'activité orageuse de l'image satellitaire durant la journée échéances (00, 06, 12 et 18 heures).

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

L'objectif principal de notre analyse est d'obtenir l'indice optimal pour améliorer la prévision des orages d'été.

II.5.1. Indice Total Total

L'indice total total a été parmi les paramètres utilisés dans la construction de graphique des paramètres de prévision. L'indice a également été modifié pour être un prédicateur important au printemps pour les prévisions de probabilité d'orage de 12 jusqu'à 36 heures et encore mieux prédicateur pour les prévisions de probabilités conditionnelles des tempêtes locales sévères. [20]

$$\text{TOT} = Vt + ct = (T(\text{sol} - 850) - T500) + (Td\ 850 - T\ 500) \dots\dots(01)$$

Tableau 4: La probabilité d'occurrence d'orage d'été pour l'indice TOT. [19]

Indice TOT	La probabilité d'orage (%)	Fréquence
<48	<44	0
48	[44-45]	Quelques orages faibles
50	[46-47]	Orage, épars
[52-58]	[48-49]	Isolé, modéré, épars
60	[50-57]	Violents tornades isolés
	[58-59]	Violents tornades
	Plus de 59	Violents épars tornades

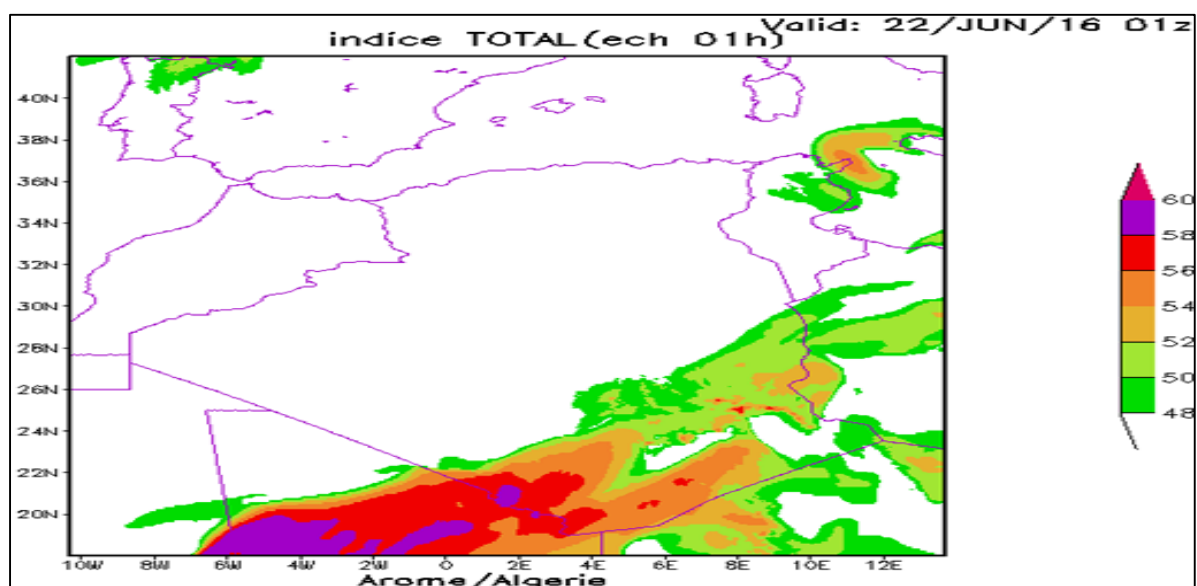


Figure 20 : Résultat de prévision d'indice d'orage TOT avec le modèle AROME-SUD.

II.5.2. L'indice de George K

$$K = T_{85} - T_{50} + Td_{85} - T_{70} - Td_{70} \dots \dots \dots (02)$$

L'indice a été élaboré à partir des données radiosondage.

L'inclusion du terme de dépression du point de rosée reflète l'importance sur l'évaluation de la pénétration verticale de l'humidité de bas niveau, pensé pour être essentiel pour la formation d'orages de masse d'air. Une petite modification est ajoutée cet indice.

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td \text{ moy } (2m-85) - (T_{70} - Td_{70}) \dots \dots \dots (03)$$

Cette modification est une amélioration pour l'indice K par l'inclusion de la thermique et les caractéristiques de l'humidité du 2m avec le respect de la température et l'humidité. [20]

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

Tableau 5: La probabilité d'occurrence d'orage d'été pour l'indice K. [19]

Indice K	La probabilité d'orage (%)	Fréquence
Moins de 15	0	Aucun
[15-20]	20	Peu probable
[20-25]	[20-40]	Isolé
[25-30]	[40-60]	Très épars
[30-35]	[60-80]	Epars
[35-40]	[80-90]	Nombreux
Plus de 40	100	Certains

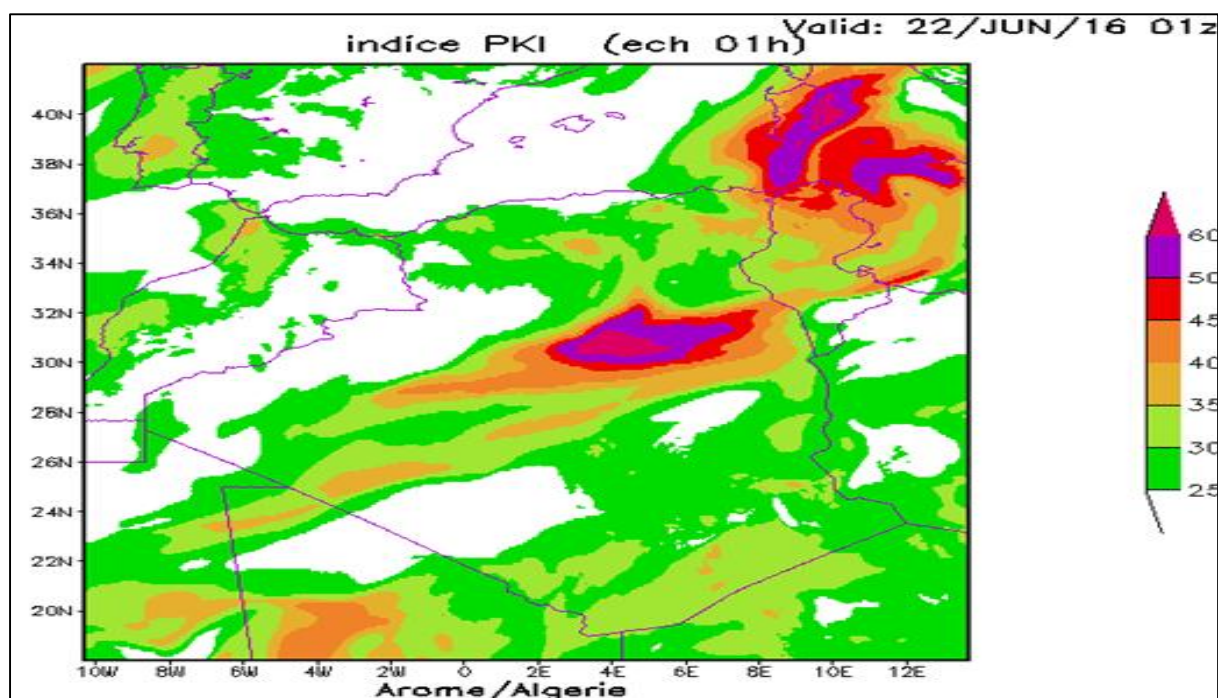


Figure 21 : Résultat de prévision d'indice d'orage K avec le modèle AROME-SUD.

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

II.4.3. Lifted index

Indice de soulèvement LI est la différence de température entre une parcelle d'air soulevée adiabatiquement (sans échange de chaleur) depuis le sol et la température de l'environnement à une hauteur de pression donnée dans la troposphère, généralement 500 hPa. Lorsque la valeur est négative, l'atmosphère est instable.

Cet indice en degré Celsius, caractérise la stabilité de l'air, il renseigne sur la possibilité de déclenchement d'orages ainsi que sur le potentiel de génération de phénomènes violents comme la grêle, les tornades... [22]

Tableau 6:L'instabilité d'orage d'été pour l'indice LI. [22]

LI (°C)	Instabilité
-2 à 0	faible
-4 à -2	modérée
-6 à -4	forte
-10 à -6	très forte
< -10	extrême

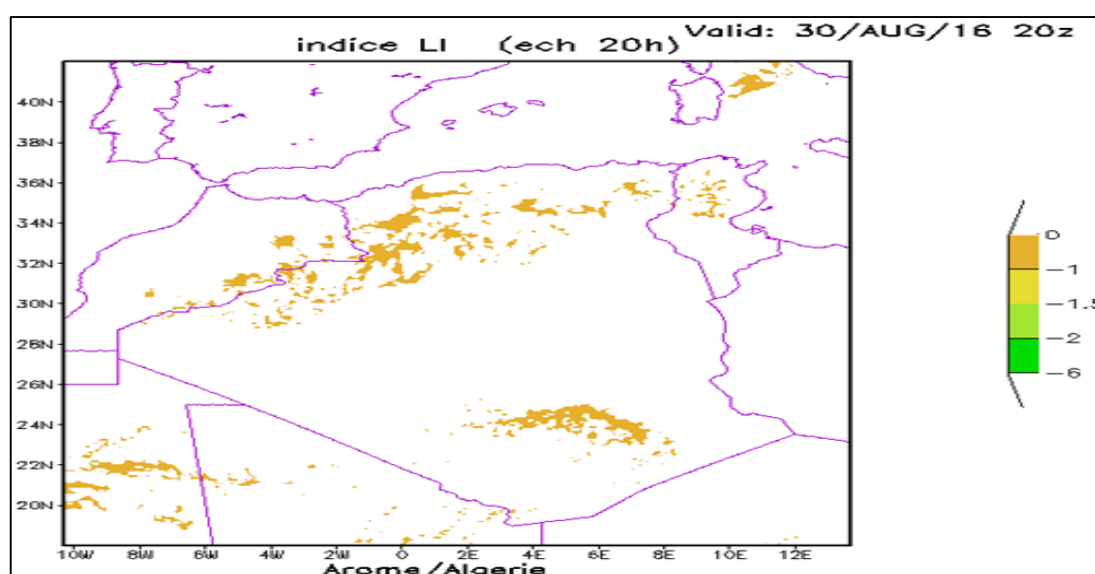


Figure 22 : Résultat de prévision d'indice d'orage LI avec le modèle AROME-SUD.

II.4.4. L'énergie potentielle convective disponible (CAPE)

Désigne l'énergie convective disponible dans 1 Kg d'air. Ça désigne donc une quantité d'énergie dans un volume d'air qui reste toujours le même. Mais il faut comprendre que cette énergie disponible se manifeste sous forme de chaleur latente, c'est à dire une quantité d'énergie qui rentre dans les changements d'état de l'eau (condensation_ évaporation). Ça désigne donc une quantité d'énergie plus chaude que son environnement (donc susceptible d'avoir un mouvement ascendant =convectif). Cette flottabilité (poussée d'Archimède) ou on peut mesurer cette énergie (CAPE) a lieu donc entre le niveau de convection libre (niveau ou la parcelle d'air devient plus chaude que l'air ambiant dans sa limite inférieure), jusqu'au niveau d'équilibre thermique dans sa limite supérieure. [20]

Tableau 7:Risque d'orage d'été pour l'indice CAPE. [22]

CAPE (J/kg)	Risque
$1000 < X < 2500$	d'orage d'intensité faible à moyenne.
> 2500	d'orage de forte intensité (forte rafale de vent).
> 3000	de tornade

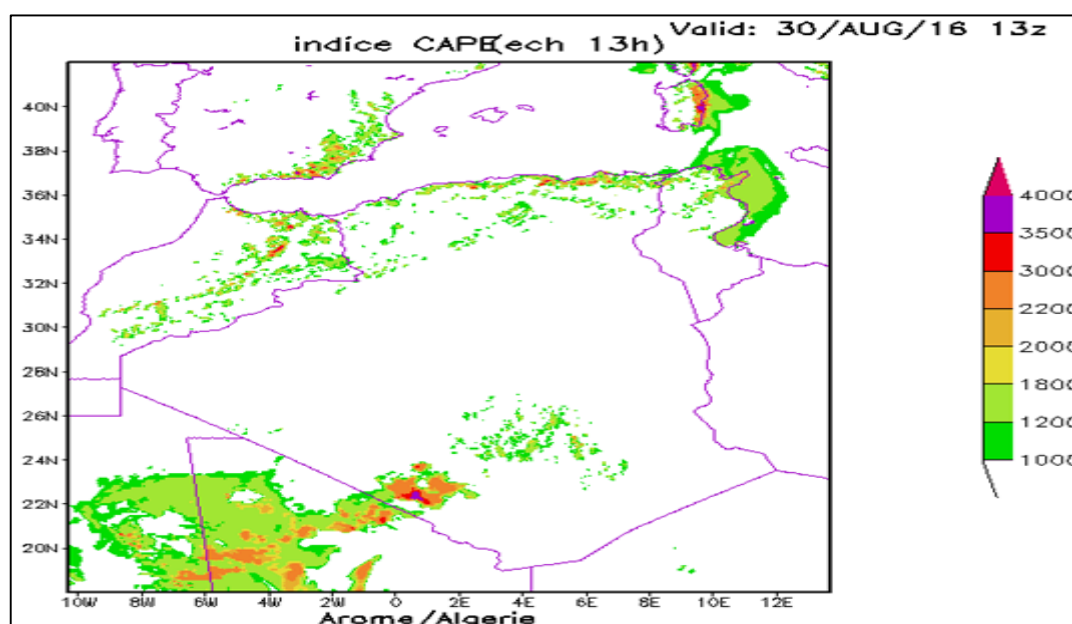


Figure 23 : Résultat de prévision d'indice d'orage CAPE avec le modèle AROME-SUD.

Chapitre II : La prévision des orages d'été avec le modèle AROME

Conclusion

Aujourd'hui, grâce aux progrès accomplis avec des modèles numériques à maille fine AROME, exploité en opérationnel à l'ONM, la prévision des situations orageuses au sud devrait être significativement amélioré car ce modèle peut simuler la structure des plus gros orages et de leurs principaux impacts.

CHAPITRE III :
ANALYSE DES SITUATIONS
D'ETE ORAGEUSES

Introduction

La prévisibilité des orages avec le modèle AROME-SUD à 3 km de résolution sur le sud de l'Algérie, peut se faire avec l'analyse des indices de stabilité, les indices d'orage et la CAPE prévus par AROME et l'évaluation des résultats de prévisions sur des situations orageuses particulière.

III.1. Analyse de la situation du 30 /08/2016

III.1.1. La première échéance

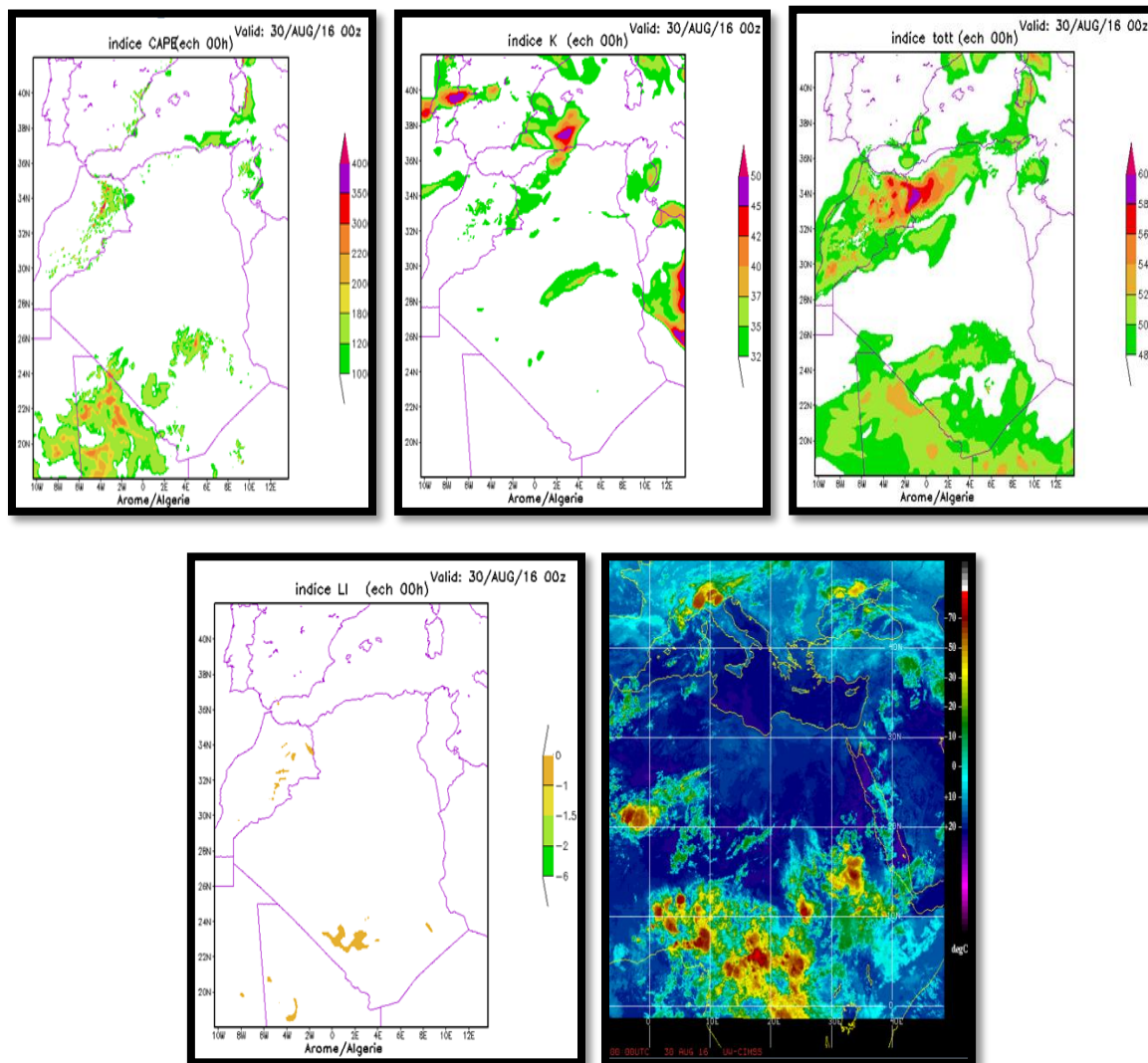


Figure 24 : Les cartes de prévision des indices d'orage (CAPE ,KI,TOT,LI)du modèle AROME-SUD et l'image satellite pour la situation du 30/08/2016 a l'échéance 00 heure.

Chapitre III : Analyse des situations d'été orageuses

L'instabilité est représentée par l'énergie potentielle convective disponible. Plus elle est forte, plus les orages risquent d'être violents avec une activité électrique et de la grêle plus marquées. Le CAPE est reliée à la vitesse des mouvements ascendants du nuage.

Pour cette situation d'été à l'échéance 00 heure le CAPE révèle des valeurs qui varient entre 1000 et 1800 J/Kg sur le sud de l'Algérie, cette marge indique une occurrence d'orage d'intensité faible à moyenne.

Le TOT prévu par AROME indique des valeurs remarquables (varient entre 48 et 54°C) sur l'intégralité du sud de pays, qui annonce de forts orages.

Le KI indique quelques zones faiblement instables.

LI (Lifted Index) permet de déterminer la présence ou non d'un potentiel orageux. Si le LI est négatif, des orages peuvent éclore. Plus le LI est bas plus le potentiel orageux est élevé.

Pour cette situation le LI donne des valeurs qui varient entre 0 et -1°C sur le sud-ouest de l'Algérie, ce résultat indique un risque d'orage faible.

L'image satellitaire permet de bien cerner la position des nuages orageux déjà formés. Cette image satellite est une source précieuse d'observation et d'amélioration de la prévision immédiate de quelques minutes à quelques heures. De plus, grâce aux images colorées, on peut très nettement localiser les orages avec en superposition les impacts de foudre de l'orage associé.

L'image satellite capturée durant cet épisode orageux montre que le potentiel convectif atteint -30°C sur les régions sud du pays, ce qui témoigne d'une moyenne activité orageuse sur ce secteur.

III.1.2. La deuxième échéance

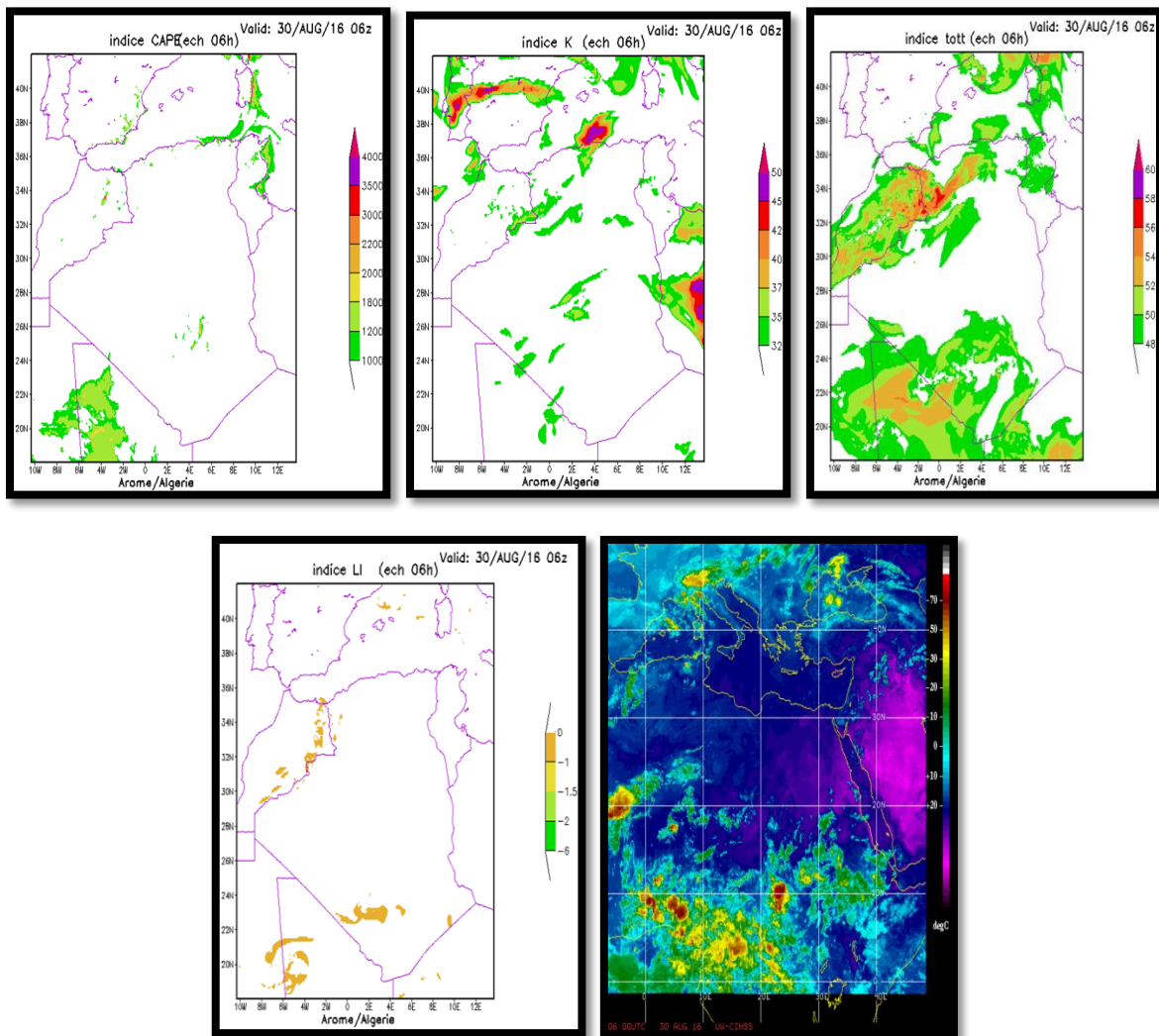


Figure 25 : Les cartes de prévision des indices d'orage (CAPE, KI ,TOT, LI) du modèle AROME-SUD et l'image satellitaire pur la situation du 30/08/2016 a l'échéance 06 heure.

Pour la même situation l'échéance 06 heure l'énergie potentielle convective disponible indique un faible potentiel d'orage sur la carte variant entre 1000 et 1200 J/Kg, cette valeur indique une occurrence d'orage d'intensité faible sur le sud de l'Algérie.

La carte obtenue par l'indice TOT indique une activité d'orage sur le sud-ouest du pays qui peut atteindre 54°C. Pour l'indice KI les valeurs de l'instabilité varient entre 32 et 37°C, le LI donne des valeurs qui varient entre 0 et -1°C sur le sud-ouest du pays, ce résultat indique un risque d'orage faible. L'image satellitaire confirme les résultats obtenus par l'indice TOT.

III .1.3. La troisième échéance

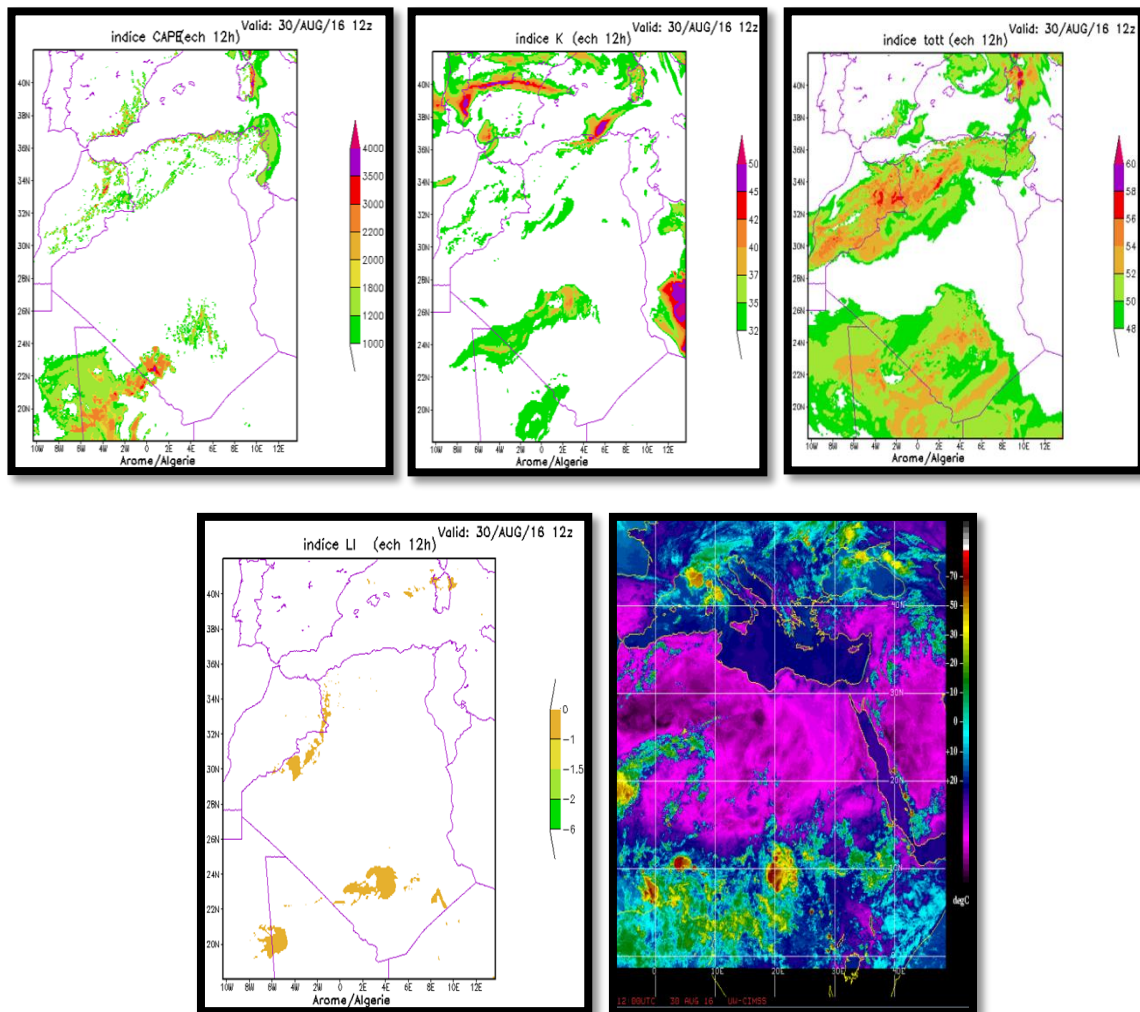


Figure 26 : les cartes de prévision des indices d'orage (CAPE, KI, TOT, LI) du modèle AROME-SUD et l'image satellite pour la situation 30/08/2016 a l'échéance 12 heure.

Pour le même jour et à l'échéance 12 heure la CAPE montre une instabilité importante qui peut atteindre jusqu'au 4000 J/Kg au sud-ouest et sud de l'Algérie ce qui est témoignage d'un orage de forte intensité, le TOT indique des valeurs marquées sur l'intégralité du sud et sud-ouest du pays compris entre 48 et 56°C, c'est une preuve sur une forte activité d'orage, la valeur du KI peut atteindre 42°C sur le sud-ouest du pays . Le LI donne des valeurs qui varient entre 0 et -1°C sur le sud de l'Algérie, ce résultat indique un risque d'orage faible.

L'image satellitaire réelle capturée pour la même journée et la même échéance confirme les résultats obtenus par le CAPE et l'indice TOT. Ce résultat a confondu avec les observations réelles de station de Tamanrasset :


```
201608301200 METAR DAAT 301200Z 16008KT 9999 SCT046TCU SCT100 31/11 Q1024=  
201608301230 METAR DAAT 301230Z 18009KT 9999 TS FEW040CB SCT046TCU 30/12  
Q1023=
```

III.1.4. La quatrième échéance

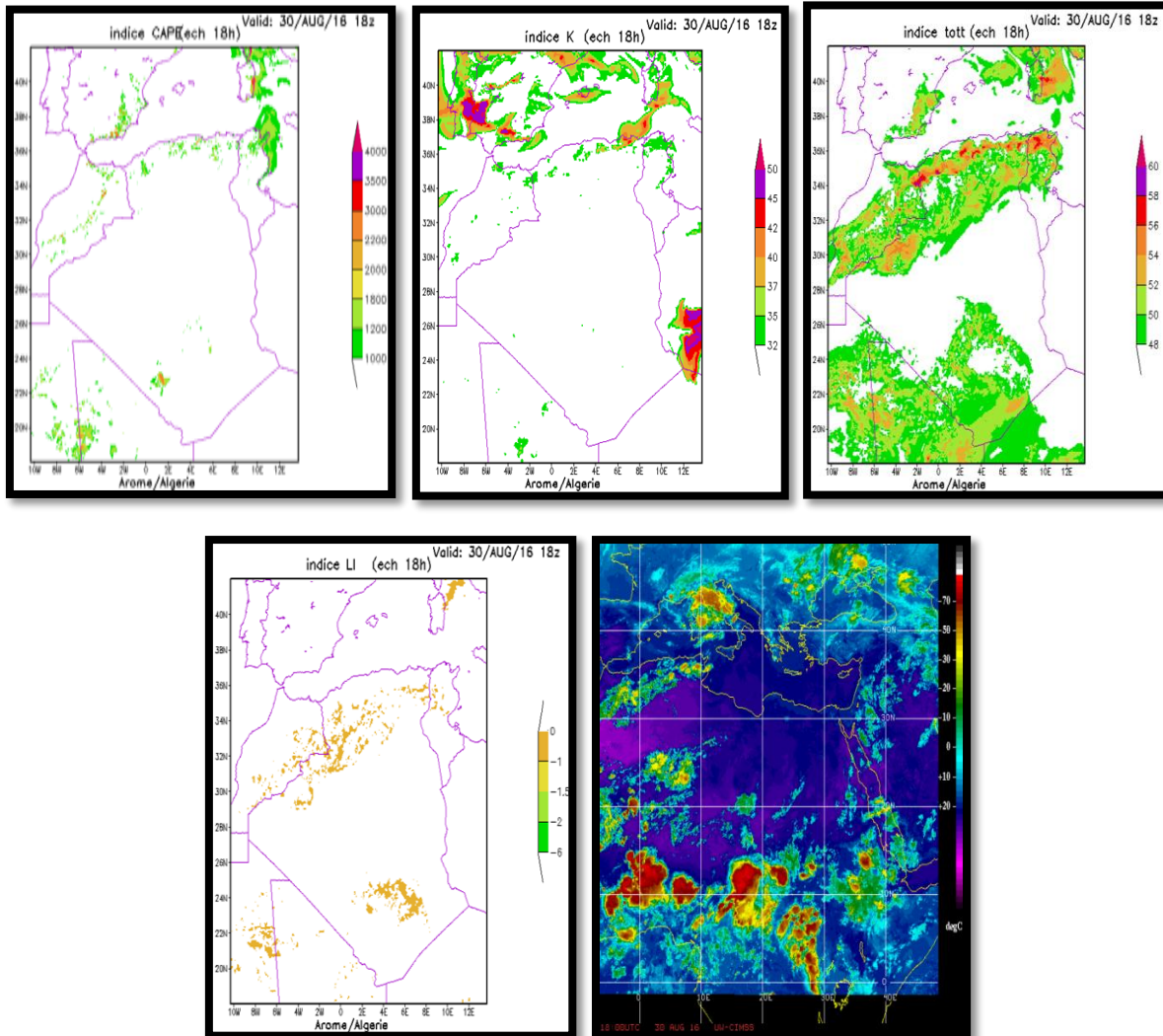


Figure 27 : Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE, K, TOT, LI) du modèle AROME-SUD et l'image satellite pour la situation du 30/08/2016 à l'échéance 18 heure .

L'énergie potentielle convective disponible pour cette échéance montre une instabilité comprise entre 1000 et 2200 J/Kg sur le sud et sud-ouest du pays. L'indice KI n'indique rien pour cette échéance. Le LI donne des valeurs qui varient entre 0 et -1°C sur le sud de l'Algérie, ce résultat indique un risque d'orage faible. Le TOT prévu par AROME indique des valeurs marquées sur l'intégralité du nord et du sud du pays qui peut atteindre 58°C, cette valeur est importante dans la prévision.

L'image satellite capturé durant cet épisode orageux montre que le potentiel convectif atteint jusqu'à -60°C sur les régions nord et sud du pays, ce qui montre d'une fort activité orageuse

Chapitre III : Analyse des situations d'été orageuses

sur ce secteur. Les observations réelles de stations de Tamanrasset et de Bechar confirment les résultats obtenus :

```
201608301800 METAR DAAT 301800Z 08018KT 9999 -TSRA FEW040CB SCT046TCU
21/15 Q1024=
201608301830 METAR DAAT 301830Z 07019KT 9999 -RA FEW040CB SCT046TCU 21/15
Q1024 RETS=
```

```
SA 30/08/2016 18:00-> METAR DAOR 301800Z 09014KT 1500 BLSA FEW030CB SCT033TCU 37/11
Q1018=
```

III .2. Analyse de la situation du 22 /06/2016

III.2.1. La première échéance

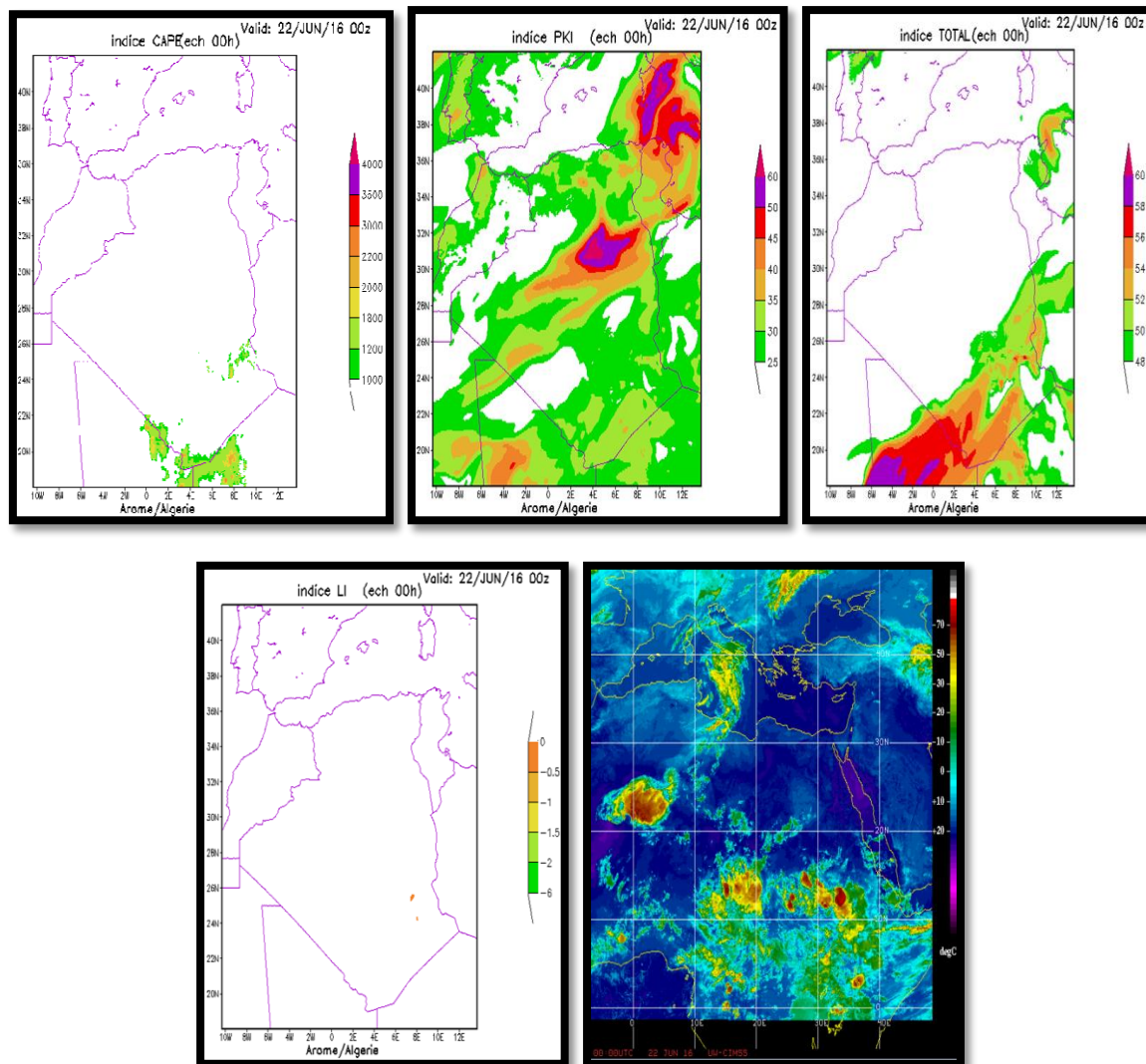


Figure 28 : Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE, K, TOT, LI) du modèle AROME-SUD et l'image satellite pour la situation du 22/06/2016 à l'échéance 00 heure.

Chapitre III : Analyse des situations d'été orageuses

L'énergie potentielle convective disponible prévue par AROME pour cette situation d'été à l'échéance 00 heure révèle des valeurs qui varient entre 1000 et 2000 J/Kg sur le sud de l'Algérie, cette valeur indique un risque d'orage d'intensité faible à moyenne.

Pour cette échéance l'indice LI n'indique rien, l'indice KI prévu par AROME indique des valeurs marquées sur l'intégralité de l'Algérie (60°C), le TOT indique une activité d'orage qui peut atteindre 58°C sur la région sud du pays, et presque la même tendance de l'instabilité indiquée par l'image satellitaire réelle pour même échéance, qui montre que le potentiel convectif atteint jusqu'à -70°C.

III.2.2. La deuxième échéance

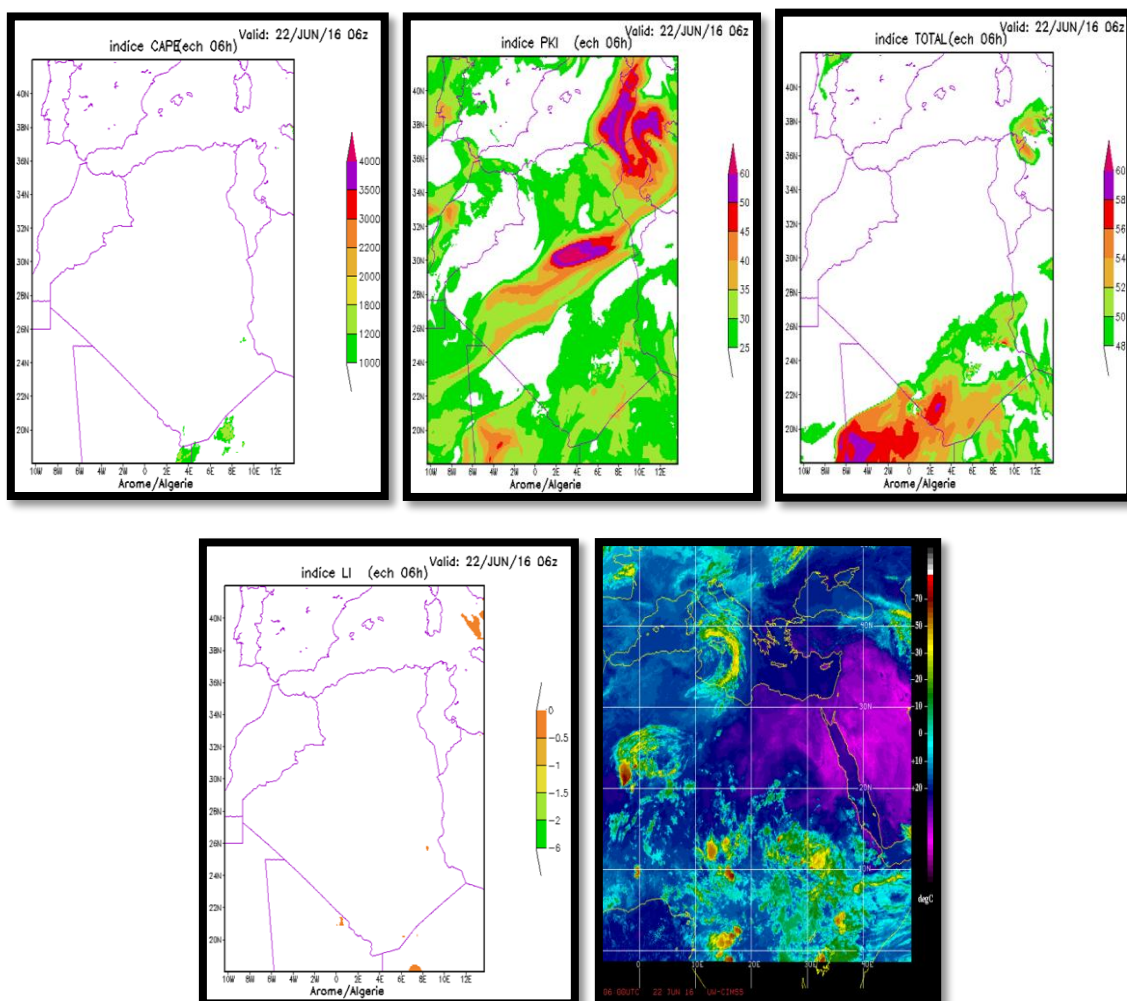


Figure 29 : Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE, KI, TOT, LI) du modèle AROME-SUD et l'image satellite pour la situation du 22/06/2016 à l'échéance 06 heure.

L'instabilité indiquée par le CAPE ne désigne pas un potentiel suffisant pour le déclenchement d'orage, la carte obtenue par l'indice LI reste toujours vierge, le KI indique des valeurs

marquées sur l'intégralité de l'Algérie atteint jusqu'à 60°C sur le sud du pays. Le TOT révèle des valeurs qui varient entre 48 et 60°C sur le sud du pays, cette marge indique une probabilité d'occurrence d'orage d'été violent, épars et tornade.

III .2.3. La troisième échéance

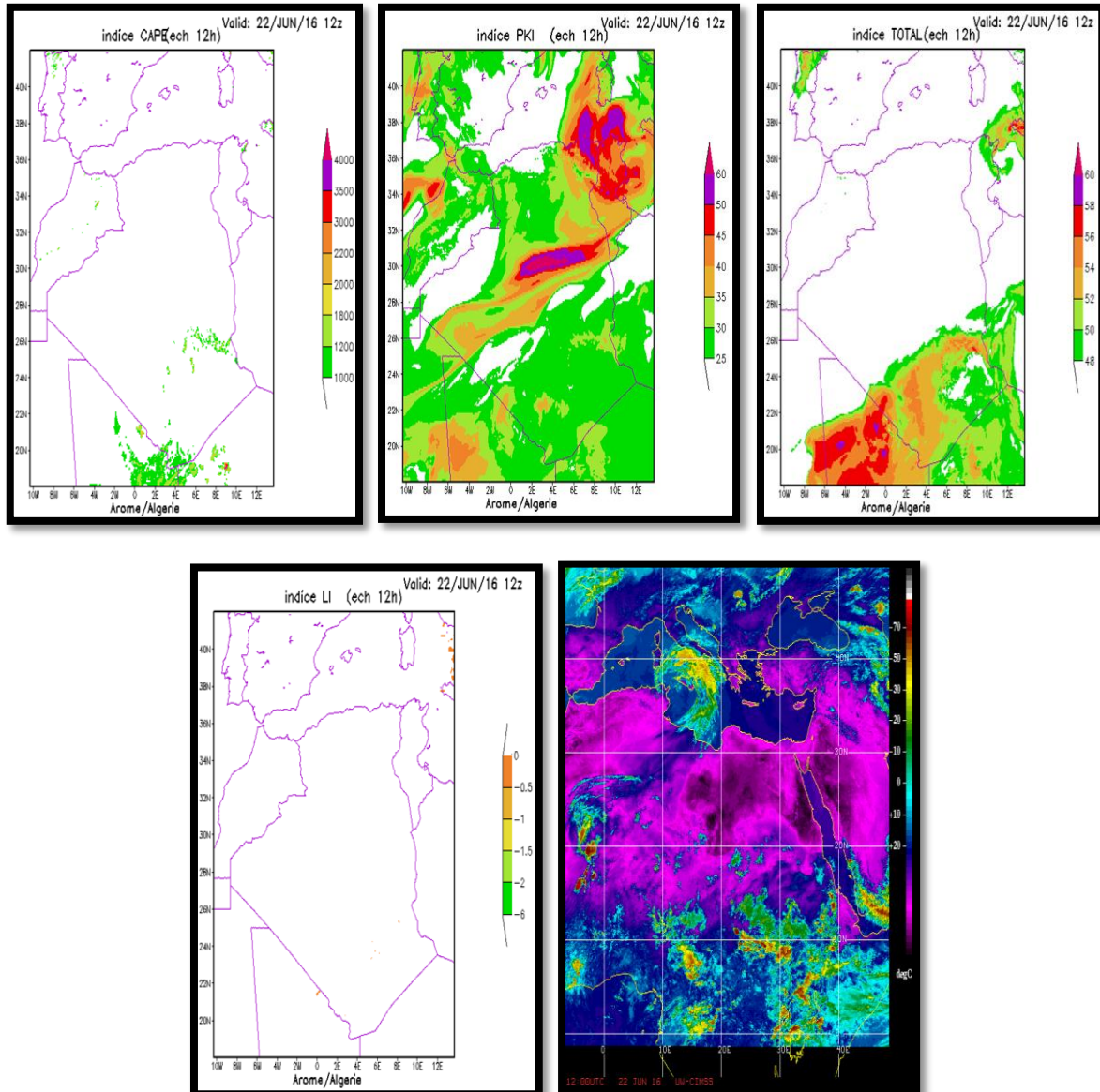


Figure 30 : Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE, K, TOT, LI) du modèle AROME-SUD et l'image satellite pour la situation du 22/06/2016 à l'échéance 12 heure.

La carte obtenue par l'indice LI reste toujours vierge. L'énergie potentielle convective disponible montre une instabilité variant entre 1000 et 1800 J/Kg sur certaines zones du sud. La carte de prévision d'indice TOT annonce de forts orages répandus à l'extrême sud du pays

Chapitre III : Analyse des situations d'été orageuses

contrairement à ce qui est illustré sur la carte d'indice KI qui indique des valeurs remarquables sur l'intégralité du pays.

L'image satellite capturée durant cet épisode orageux montre que le potentiel convectif atteint -50°C sur les régions sud du pays, ce qui témoigne d'une forte activité orageuse sur cette zone. Le résultat pour cette échéance et très proche à l'observation réelle :

```
201606221230 METAR DAAT 221230Z 22006KT 170V260 2000 TS HZ FEW040CB SCT053
33/06 Q1022=
201606221200 METAR DAAT 221200Z VRB03KT 2000 HZ FEW040CB SCT053 32/08
Q1022=
```

III.2.4. La quatrième échéance

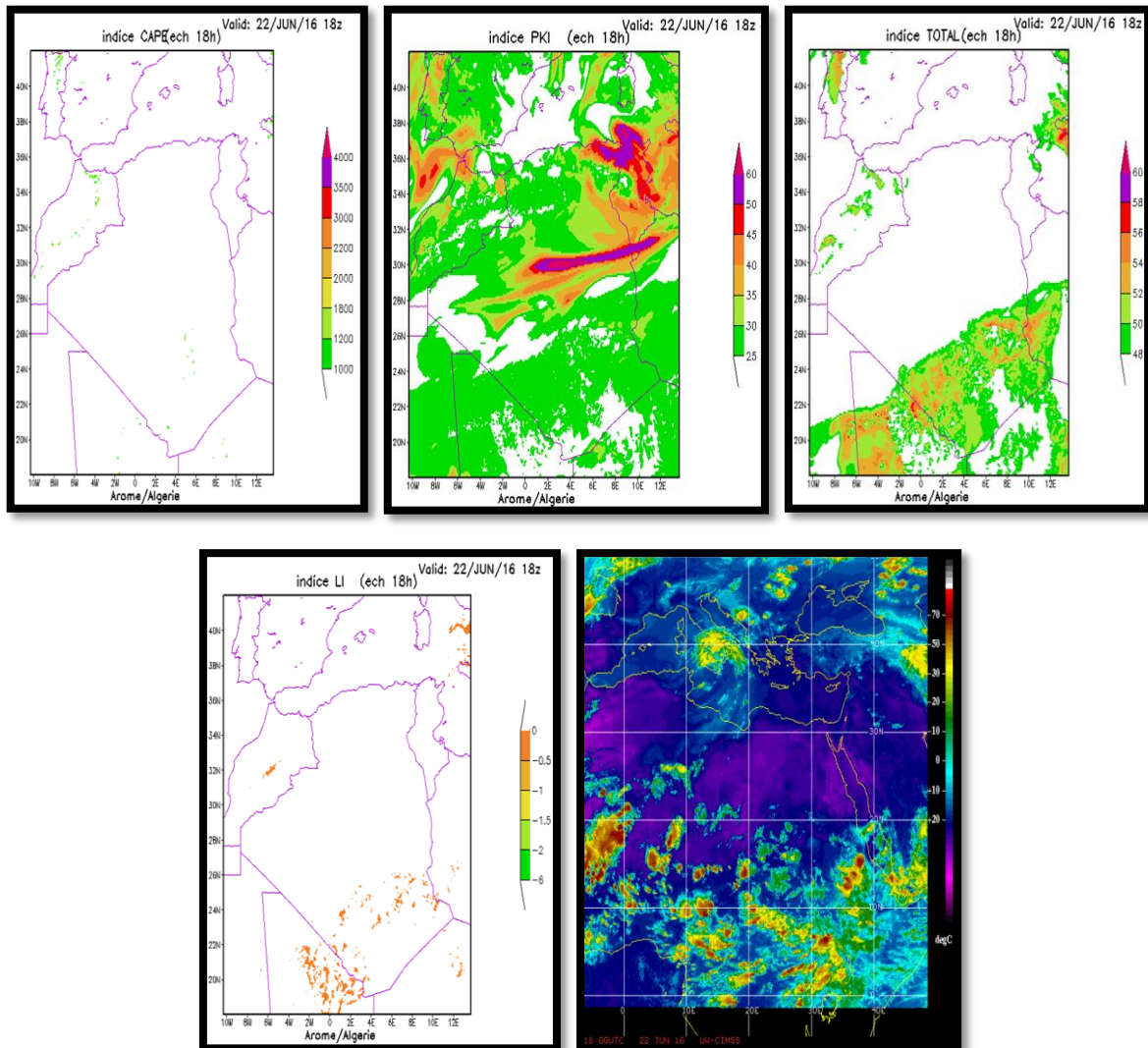


Figure 31 : Les cartes de prévision des indices d'orages (CAPE, K, TOT, LI) du modèle AROME-SUD et l'image satellite pour la situation du 22/06/2016 à l'échéance 18 heure.

Chapitre III : Analyse des situations d'été orageuses

Pour cette échéance l'indice CAPE n'indique rien, le LI donne des valeurs qui varient entre 0 et -0.5°C sur certaines zones du sud, ce résultat indique un risque d'orage faible, l'indice KI indique des valeurs marquées sur l'intégralité de l'Algérie atteignant jusqu'à 60°C , pour cette échéance la valeur de l'indice TOT atteint 56°C sur le sud du pays, le KI et le TOT sont les plus proches de l'image satellitaire, et l'observation réelle confirme ses résultats :

```
201606221830 METAR COR DAAT 221830Z 28011KT 4000 HZ FEW040CB SCT053TCU  
28/09 Q1021=  
201606221800 METAR DAAT 221800Z 27011KT 4000 HZ FEW040CB SCT053TCU 28/09  
Q1021=
```

Conclusion

D'après les analyses des cartes on a trouvé que les seuils de déclenchement des orages au sud du pays à partir de ces indices calculés sont le CAPE (1200 J/Kg) et l'indice TOT (52°C).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce mémoire s'est basé sur l'étude des orages d'été dans les régions sahariennes du pays. Plus précisément, il s'est focalisé sur la prévision des indices d'orages qui donnent une bonne interprétation du comportement des cellules orageuses et leurs développements dans l'atmosphère.

Dans cette étude nous avons choisi d'utiliser le modèle AROME-SUD pour le calcul des différents types d'indices d'orages. En effet, ce modèle est une nouvelle version du modèle AROME qui se caractérise par une extension de sa résolution spatiale pour couvrir tout le pays, AROME-SUD offrait une meilleure résolution spatiale sur notre champ d'étude donc, il nous donne plus d'information sur Les dépressions thermique sahariennes et les orages d'été.

Les résultats des simulations numériques dès les situations analysées montrent une certaine cohérence comparée aux observations. Ces résultats indiquent la présence de forts foyers orageux à l'intérieur de la couche limite atmosphériques que nous avons assimilé à des dépressions thermiques, car ils sont dus aux forces de gradient de température en altitude et aux vitesses verticales du vent.

Ce nouveau produit, qui est la prévision des indices d'orages, calculé à partir des champs prévus par la nouvelle version AROME-SUD, offre une information supplémentaire, pour le prévisionniste, concernant l'apparition et l'évolution des cellules orageuses sur la région sud du pays. Ceci permettra à terme d'affiner la qualité et la fiabilité des prévisions météorologiques.

ANNEXE

Annexe**Les particularités supplémentaires du Cumulonimbus****1-Le cumulonimbus Praecipitatio (pra)**

Précipitations sous forme de pluie, neige, granules de glace, grésil, grêle, etc... Tombant d'un nuage et atteignant la surface du globe. Cette particularité supplémentaire se présente, le plus souvent, avec les altocumulus (rare), les altostratus, les nimbostratus, les stratocumulus, les stratus, les cumulus et les cumulonimbus. [10]



Figure 1 : Le cumulonimbus Praecipitatiole. [10]

2-Cumulonimbus Virga (vir)

Traînées de précipitations, verticales ou obliques, attenantes à la surface intérieure d'un nuage, et n'atteignant pas la surface du globe. Cette particularité supplémentaire se présente, le plus souvent, avec les cirrus (rare), les cirrocumulus, les altocumulus, les altostratus, les nimbostratus, les stratocumulus, les cumulus et les cumulonimbus. [10]



Figure 2 : Cumulonimbus Virga. [10]

3-Le cumulonimbus Incus (inc)

Région supérieure d'un cumulonimbus étalée en forme d'enclume, d'aspect lisse, fibreux ou strié.

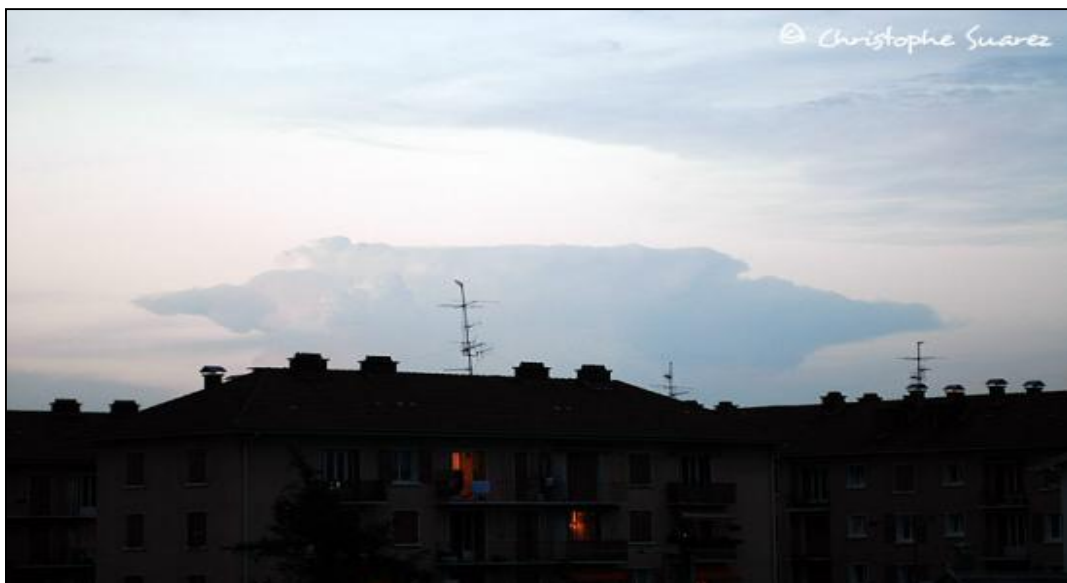


Figure 3 : Le cumulonimbus incus. [10]

4-Le cumulonimbus Pannus (pan)

Lambeaux déchiquetés qui, constituant parfois une couche continue, apparaissent au-dessous d'un autre nuage et peuvent se souder avec lui. Ce nuage annexe se présente, le plus souvent, avec les altostratus, les nimbostratus, les cumulus et les cumulonimbus. [10]



Figure 4 : Cumulonimbus Pannulse. [10]

5-Cumulonimbus Mamma (mam)

Protubérances pendantes à la surface intérieure d'un nuage, et ayant l'aspect de mamelles. Cette particularité supplémentaire se présente, le plus souvent, avec les cirrus, les cirrocumulus, les altocumulus, les altostratus, les stratocumulus et les cumulonimbus.



Figure5 : Cumulonimbus Mama. [10]

6-Le cumulonimbus Pileus (pil)

Nuage annexe à faible extension horizontale, en forme de bonnet ou de capuchon ; ce nuage est situé au-dessus du sommet d'un nuage cumuliforme ou est attenant à sa région supérieure

qui, souvent, le transperce. Il arrive fréquemment d'observer plusieurs pileus superposés. Le pileus se présente principalement avec les cumulus et les cumulonimbus. [10]



Figure 6 : Le cumulonimbus Pileus . [10]

7-Le cumulonimbus Velum (vel)

Voile nuageux annexe à grande extension horizontale, situé légèrement au-dessus des sommets d'un ou plusieurs nuages cumuliformes ou attenant à leurs régions supérieures qui souvent, le transpercent. Le velum se présente principalement avec les cumulus et les cumulonimbus. [10]



Figure 7 : Le cumulonimbus Velum. [10]

8-Le cumulonimbus Arcus (arc)

Rouleau horizontal, dense, ayant des bords plus ou moins effilochés, situé à l'avant de la partie inférieure de certains nuages et prenant lorsqu'il est étendu l'aspect d'un arc sombre et menaçant. Cette particularité supplémentaire se présente avec les cumulonimbus et plus rarement avec les cumulus. [10]



Figure 8 : Le cumulonimbus Arcus. [10]

9-Le cumulonimbus Tuba (tub)

Ils sont plus au moins dangereux, Colonne nuageuse ou cône nuageux renversé en forme d'entonnoir, sortant de la base d'un nuage, elle constitue la manifestation nuageuse d'un tourbillon de vent plus ou moins intense appelé trombe. Cette particularité supplémentaire se présente avec les cumulonimbus et beaucoup plus rarement avec les cumulus. [10]



Figure 9: Le cumulonimbus Tuba. [10]

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] LAKP-Atlantique (LAWM-Atlantic-2-FR) (www.navcanada.ca)
- [4] Les guides pratiques météo France (guide aviation)
- [5] Météorologie du B.I. A au C.A.E.A. Tome 5.
- [18] Indices d'instabilité et occurrence d'orage : le cas de l'île-de France - Stéphane Sénési et Rose-May Thepenier Météo-France, Centre national de recherches météorologiques, Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique.
- [19] Areview of static stability indices and related thermodynamic parameters by Randy A. Peppier
- [20] La prévision des orages avec le modèle AROME validation - Mémoire de master en exploitation aéronautique : IDGA Habib et LASLEDJ Fadoua -Université Blida 1, juin 2016.
- [21] Evaluation de la prévision de situations orageuses avec des simulations AROME à l'échelle kilométrique - Julien LEGER.
- [17] Mémoire BOUCHEFFA Amel, étude de la tendance des modèles ALADIN et AROME utilisés à l'ONM à prévoir le cisaillement du vent de basse couche, dirige par Mr. REZOUG et Mr. MOUKHTARI, mémoire de master 2 en exploitation aéronautique, Université Blida 1, juin 2014.
- [2] www.lavionnaire.fr
- [3] orage-tpe.e-monsite.com
- [6] www.meteo45.com
- [7] www.astrosurf.com
- [8] www.universalis.fr
- [9] la.climatologie.free.fr
- [10] Meteonew.free.fr
- [11] www.meteofrance.fr

[12] clubmeteo.e-monsite.com

[13] www.meteo.org

[14] www.futura-sciences.com

[15] mgmeteo.fr.pagesperso-orange.fr

[16] meteofoudre.org

[22] www.keraunos.org