

Développement et conception de l'application MétéOrage

Oussama DOUBA^{1*}, BOURSSIA M'hamed¹, BEHAZ Ghanem¹, HADDI Fayçal¹, Salah SAHABI ABED¹

Abstract

La prévision des orages constitue jusqu'à aujourd'hui une tâche ardue aux prévisionnistes et exige d'énormes ressources ainsi qu'une connaissance du comportement des modèles utilisés acquise par l'expérience. La complexité de l'origine du phénomène rend sa prévision spatio-temporelle assez difficile nécessitant alors une connaissance préalable des outils et méthodes ne se limitant pas uniquement aux indicateurs dynamique, thermique ou énergétique. Les systèmes convectifs qui intéressent l'Algérie sont de différentes origines. En effet, l'identification des précurseurs des cyclogenèses et des précipitations intenses en région méditerranéenne demeure un sujet qui préoccupe toujours les spécialistes. Néanmoins, des tentatives de l'estimation de l'intensité des orages et les précipitations associées ainsi que leur probabilité d'occurrence basées sur des approches empiriques ont été développées afin de combler les lacunes des modèles numériques et venir en aide au prévisionniste pour reconforter sa décision dans l'émission de son bulletin d'alerte notamment, lorsqu'il s'agit d'un temps sévère. Le climat de l'Algérie rend encore plus complexe la prévision d'orages notamment dans les deux saisons d'automne et de printemps, parce que ces derniers n'accompagnent souvent pas nécessairement les systèmes dépressionnaires classiques traversant habituellement la région d'Ouest en Est comme en hiver ou résultant du phénomène de retour d'Est. Cet article propose une démarche de mise en œuvre d'un système fournissant des approches objectives empiriques de prévision d'orages et de leurs trajectoires, testées, expérimentées et validées par quelques chercheurs. Nous présenterons également une nouvelle interface web mettant en exergue la cartographie de ces indices d'orages déterminés à partir des données des sorties de modèles numériques (ALADIN, AROME ...) opérationnels à MétéoAlgérie. Un cas d'étude sera présenté dans le but de vérifier et de valider les résultats obtenus à travers cette interface développée et ce, lors d'une journée d'orages qui a intéressé le nord de l'Algérie et de vérifier ainsi l'approche proposée pour le suivi de la trajectoire des cellules orageuses.

Keywords

MétéoAlgérie, MétéOrage, convection, modèles numériques.

¹ Office national de la météorologie (CNPM-ONM), Dar El Beida, Alger

*Correspondant: douba.oussama69@gmail.com

Contents

1	Introduction	1
2	Calcul de l'indice CAPE :	3
3	Calcul de l'indice TEND :	3
4	Conclusion	6

1. Introduction

La prévision des orages et les phénomènes qu'ils engendrent continuent à constituer un défi majeur des spécialistes de la modélisation. La complexité de la paramétrisation des schémas convectifs et la diversité des échelles spatio-temporelles de la convection qui va d'une cellule orageuse simple, en passant par un système convectif à méso échelle, puis un cyclone tropical et enfin vers une Oscillation de Madden-Julian a mobilisé davantage la communauté scientifique afin de se pencher sur la question de l'amélioration des différentes approches. L'orage est un météore caractérisé par un bruit audible au sol résultant de la décharge électrique atmosphérique appelé « ton-

nerre » accompagnée par une manifestation lumineuse appelée éclair. En effet, les orages ne se manifestent qu'en présence d'un nuage connu sous le nom de Cumulonimbus (ou Cb en abrégé). Ce nuage est synonyme de la présence de l'instabilité convective atmosphérique. Le Cb donne souvent naissance à des précipitations intenses liquides ou solides (grêle ou de grêlons.), accompagnées des vents violents.

Prévoir les orages revient à prévoir le potentiel convectif de l'atmosphère, le taux d'humidité (qui représente le carburant) et l'instabilité ou le soulèvement (le moteur). La structure instable de la masse d'air et le soulèvement nécessaire à la formation des orages peuvent être provoqués par une ascendance synoptique le long d'une surface frontale, ou causés par un soulèvement orographique au vent d'un relief ou par un forçage dynamique d'altitude ou enfin par de la turbulence. L'orage se manifeste sous forme d'une cellule ordinaire, multicellulaire ou supercellulaire ayant des cycles de vie différents.

Le développement du Cb et sa structure sont également liés à ces forçages. En effet, la présence de la convergence du vent en basses couches de l'atmosphère et de la divergence

en altitude contribue à l'alimentation thermodynamique (moteur) de la cellule. La supercellule orageuse naît souvent suite à un cisaillement fort et tournant en basses couches et une instabilité importante de l'atmosphère.

De manière générale, les modèles numériques tels que ALADIN et AROME (TERMONIA, 2018) ont du mal à localiser les zones de développement des cellules orageuses, parce qu'ils sont liés à des phénomènes physiques très complexes d'une part, et se manifestent sur une échelle spatio-temporelle relativement petite par rapport aux perturbations synoptiques, ce qui nécessitera une meilleure maîtrise du sujet et une expérience avérée des prévisionnistes.

Le besoin d'une application visuelle permettant le suivi du potentiel convectif des nuages d'orages demeure indispensable pour le service de prévision de MétéoAlgérie. Le nord de l'Algérie se trouvant dans une zone de transition entre le climat méditerranéen et celui du Sahara connaît dans la saison automnale et printanière particulièrement, des passages réguliers de perturbations atmosphériques d'origine convective générant des précipitations intenses qui sont souvent à l'origine des inondations. Comme, le pays a connu dans le passé des situations dramatiques suite à de fortes chutes de pluies engendrées par des nuages convectifs qui ont intéressé plusieurs wilayas. L'inondation de Bab El oued à Alger en 2001 qui a coûté la vie à plus de 700 personnes marque toujours les esprits. Sur le plan scientifique, et malgré les avancées dans la paramétrisation, des modèles numériques du temps n'ont toujours pas réussi à prévoir de manière très fiable les systèmes convectifs et leur classification. En effet, et pour pallier à ce problème, plusieurs tentatives ont eu lieu afin d'asseoir un moyen de prévision empirique permettant de déceler les cellules orageuses à travers des indices employant des paramètres décrivant le caractère instable de l'atmosphère, son potentiel convectif et sa capacité à développer des nuages à fortes précipitations. Dans cette étude, une analyse de recherche approfondie a été menée pour mettre en œuvre une application permettant de prévoir sur une base empirique le développement d'un orage ainsi que la trajectoire probable dans son évolution future. L'outil à développer consiste en une mise en œuvre d'une combinaison d'indices permettant le développement d'un système de prévision d'orage. Le but de ce système étant de fournir un outil d'aide aux prévisionnistes, basé sur la prévision des orages établie de manière objective, se servant de nombreuses méthodes et outils que des prévisionnistes utilisent dans quelques services météorologiques afin d'effectuer des évaluations subjectives du potentiel de convection sévère, et en s'appuyant sur des paramètres des modèles atmosphériques. Le prévisionniste lui reviendra toujours et en analysant les conditions atmosphériques, la décision de lancer des alertes d'orages ou de déclarer leur présence ainsi que leurs intensités. Dans notre étude, l'analyse conduite utilise les données des modèles numériques tel que la température et l'humidité relative à plusieurs niveaux, l'indice empirique

de prévision d'orages K, la thêta prime et la thêta prime W, le tourbillon potentiel ainsi que la vitesse verticale.

Par la suite, les résultats issus du traitement de ces équations seront animés sur une interface web développée avec une technologie informatique performante afin d'assurer la convivialité et le bon fonctionnement de l'application dans le but de satisfaire le besoin opérationnel.

État de l'art dans le domaine de la prévision empirique des orages:

La prévision des orages a fait l'objet de beaucoup de recherches. Les techniques utilisées dans la prévision de ces phénomènes à grande échelle ont eu lieu depuis l'année 1951. Comme les orages se manifestent souvent à une échelle dite « la méso-échelle », leur formation et leur développement sont tributaires alors des facteurs agissant à cette échelle (S. Tajbakhsh et al., 2009, Doswell et al. (1981) et Maddox et Doswell (1982)). Plusieurs méthodes empiriques de prévision d'orages sous forme d'indices ont été élaborées. Parmi ces indices, on citera l'indice de Showalter, l'indice de Galway, la CAPE.. L'indice de stabilité Showalter (Showalter, 1953) pour la prévision d'orages est basé sur les principes de la thermodynamique pour l'évaluation de la probabilité des orages. Galway, J.G (Galway, 1956), a mis en œuvre un indice portant son nom appelé l'indice de levé de Galway, utilisé comme un prédicteur de l'instabilité latente déterminant pour le développement des orages. Miller (Miller, 1972) dans ses notes sur l'analyse et les procédures de prévision des orages violents a mis en évidence également un indice appelé totaux-totaux et un second indice dit indice de menace du temps violent (SWEAT). Outre ces prédicteurs empiriques, les outils de prévision d'orages les plus utilisés et les plus répandus se basent sur l'énergie potentielle convective disponible ou en anglais « Convective Available Potential Energy » (CAPE). Dans cette étude nous avons utilisé une série d'indices combinés pour la prévision des orages. Parmi ces indices on citera l'indice K de George (George, 1960) pour la prévision du temps sévère élaboré pour le secteur de l'aéronautique et basé sur la température et l'humidité aux niveaux 850, 700 et 500Hpa (voir plus loin en détail).

Définition de quelques indices :

En 1960, George (George, 1960) a développé l'indice KI (dit Indice K de George) pour la prévision d'orages. L'indice (KI) est défini par l'équation :

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}) \quad (1)$$

On constate que KI augmente avec la diminution de la stabilité statique dans la couche 850 – 500Hpa, et avec l'augmentation de l'humidité à 850Hpa et de l'humidité relative au niveau 700Hpa. Selon ses recherches, les orages se produiront avec une probabilité de 50% si la valeur KI est de 26 °C ou plus (George, 1960 et S. Tajbakhsh et al. 2009).

Galway (Galway, 1956) a établi des seuils critiques sur son indice matérialisé par LI, qui est un indice de soulèvement de la particule ou de la couche. Cet indice interprète l'instabilité de la couche. Il est donné par l'équation :

$$LI = T_{500} - (LT)_s \quad (2)$$

Où T_{500} est la température en °C du niveau 500 Hpa et $(LT)_s$ la température qu'aurait une particule d'air atmosphérique au niveau 500 Hpa après avoir été soulevée depuis la surface à la température maximale prévue et une température du point de rosée obtenue grâce au rapport de mélange moyen couvrant la couche allant de la surface jusqu'au 3000 pieds d'altitude. En effet, des valeurs de LI situées entre -3 et -5 matérialisent une instabilité dite marginale au moment où l'indice de Showalter indique que les orages modérés sont prévus quand son indice SI varie entre 0 et -4 (Showalter, 1953 et S. Tajbakhsh et al., 2009). La sévérité des orages peut être également évaluée par l'indice Total-Total. Cet indice est donné par l'équation suivante :

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500} \quad (3)$$

Où T est la température et Td, la température du point de rosée. Dans le schéma de prévision, l'indice TT reste un indicateur faible de l'évolution des tempêtes sévères dans le cas où il est inférieur ou égal à 50. Il deviendra par contre modéré, s'il est supérieur à 50 et inférieur à 55 (Ellrod et Field, 1984). L'indice SWEAT est défini par l'équation :

$$SWEAT = +20(TT - 49) + 2f_{850} + f_{500} + 125(S + 0.2) \quad (4)$$

(Randy et al. 1989), Où : f_{850} = vitesse du vent à 850 Hpa en nœuds et f_{500} = vitesse du vent à 500 Hpa en nœuds et $S = \sin(\text{vitesse du vent } 500\text{Hpa} - \text{vitesse du vent à } 850\text{Hpa})$ et TT : Indice Total-Total défini précédemment. A noter que le terme $125(S + 0.2)$ prendra des valeurs nulles dans certains cas de direction et/ou de vitesses du vent aux niveaux 850 et 500 Hpa. L'indice SWEAT prendra pour une activité orageuse modérée une valeur comprise entre 300 et 400. L'instabilité latente (en particulier près de la surface), l'instabilité potentielle et l'instabilité conditionnelle sont trois paramètres fondamentaux décisifs dans la détermination du niveau de probabilité de déclenchement des orages (Haklander et al. (2003).

Méthode et données utilisées :

Nous proposons dans cet article le calcul de l'indice de prévision d'orage basé sur la détermination et la combinaison de plusieurs indices et paramètres afin d'établir un système d'équations à partir des sorties des modèles numériques. Nous nous servirons particulièrement de l'indice d'orage de George (K) défini précédemment et qui donne une indication sur la fréquence des orages dans une masse d'air donnée, ainsi que l'indice de l'énergie potentielle convective disponible CAPE et l'indice de la tendance TEND.

Indice K (°C)	Probabilité d'orages (%)	Caractère des orages
Moins de 15	0	aucun
15 - 20	20	peu probables
20 - 25	20 - 40	isolés
25 - 30	40 - 60	très épars
30 - 35	60 - 80	épars
35 - 40	80 - 90	nombreux
> 40	100	certain

Table 1. Les seuils de l'indice K avec leurs probabilités d'orage

J/Kg	Type de phénomène associé
0 à 1000	marginale instable donnant des averses ou des orages ordinaires
1000 à 2500	modérément instable donnant des orages qui peuvent être violents
2500 à 3500	très instable donnant des orages violents
3500 ou plus	extrêmement instable et très favorable à des orages violents généralisés

Table 2. Les seuils de l'indice de l'énergie potentielle de convection disponible (CAPE), et les types de phénomènes associés.

1. Calcul de l'indice K : Pour rappel, l'indice (K) est défini par l'équation : $KI = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})$ Les valeurs de l'indice K en liaison avec la probabilité d'orages et leurs caractères sont données par le tableau suivant :

2. Calcul de l'indice CAPE :

Le second indice introduit est celui du paramètre CAPE. Nous avons utilisé la CAPE issu du modèle de prévision numérique. Pour rappel, la CAPE représente l'énergie potentielle convective reliée à la vitesse des mouvements des particules ascendantes du nuage ; Elle représente alors l'énergie potentielle convective susceptible d'être transformée en énergie cinétique pendant les mouvements ascendants. Une particule d'air atmosphérique poursuit son ascension tant que sa température est plus élevée que le milieu environnant qu'elle rencontre (flottabilité) et donc, elle est déterminante pour la mesure de l'extension verticale du nuage convectif. Plus la CAPE est importante, plus les orages risquent d'être violents (Maryam R. Ziarani et al., 2019).

3. Calcul de l'indice TEND :

Le troisième indice calculé dans cet article est celui de la tendance « TEND » (Miller, 1972). Nous avons utilisé des équations qui calculent la tendance entre deux couches de l'atmosphère, basée sur la température à plusieurs niveaux, la température potentielle θ , la température du point

de rosée. L'équation de l'indice TEND est donnée par la formule suivante :

$$TEND(n) = (14.55 + 0.114T_n)^{1-RH_n} + ((2.5 + 0.007T_n)(1 - RH_n))^3 \quad (5)$$

Où : T: Température, RH: L'humidité relative Cet indice est utilisé pour le calcul de l'équation de l'intensité d'orage.

Prévision de l'intensité des orages :

La prévision de l'intensité des orages (IO) utilisée dans cette étude repose sur la combinaison des deux indices, l'indice K et celui de la tendance en altitude à plusieurs niveaux TEND. Cette approche a été utilisée par Miller en 1972 dans la prévision d'orages pour arrêter les probabilités des orages à partir de changement de la température et de l'humidité à plusieurs niveaux avec l'intégration de la Température Potentielle Equivalente.

$$IO = (0.56K) + (0.1355TEND) + (0.215(\theta'W)) + (0.12Td(n) - (T(n) - Td(n))) \quad (6)$$

Avec

$$\theta' = \theta E - \frac{WL}{cp} \quad (7)$$

L: la chaleur latente de vaporisation, Cp: la chaleur spécifique de l'air sec et W: le rapport de mélange

Développement de l'interface WEB :

Afin de permettre un usage convivial de cet outil basé sur un système de visualisation, nous avons développé une application WEB au profit de l'exploitation pour aider les prévisionnistes à détecter les cellules orageuses et surveiller leurs trajectoires. Cette application renseigne également sur la quantité de pluie précipitable ainsi que la nébulosité au-dessus d'un point du domaine couvert par cet outil. Une fois mise en œuvre, cette application a été installée sur le site web de l'Office dans le DNS suivant: <http://meteorage.meteo.dz> La figure 1 montre la page d'accueil de l'application MétéOrange.

Cas d'étude portant sur la situation orageuse survenue en Algérie : Afin de procéder à la vérification et la validation de ce produit, nous nous sommes intéressés à une situation d'orages survenus le 12 Septembre 2019 et qui a concerné une large partie du nord de l'Algérie. A ce titre, nous nous focaliserons sur la région de l'Algérois où des pluies intenses se sont abattues durant cette journée et notamment la nuit. Les pluies recueillies à partir de 20H (heure locale) ont inondé plusieurs rues, des maisons et des locaux commerciaux notamment dans les communes de Bir Mourad Rais, Hydra, Ben Aknoun, Gué de Constantine, Alger centre, la commune de Bab-el-Oued ainsi que le métro d'Alger.

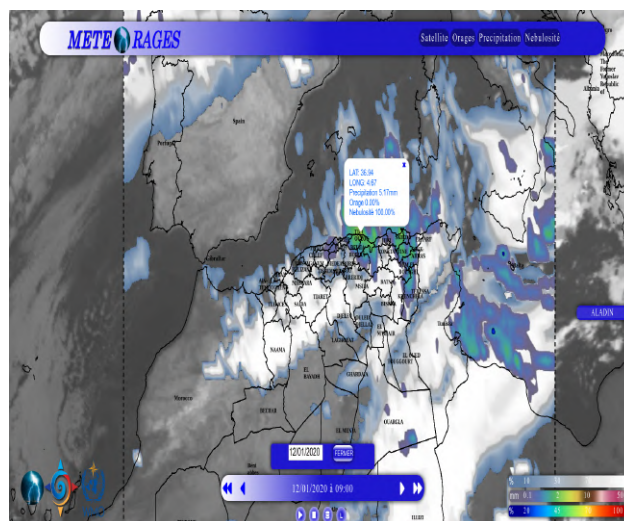


Figure 1. Visualisation de l'application MétéOrange.

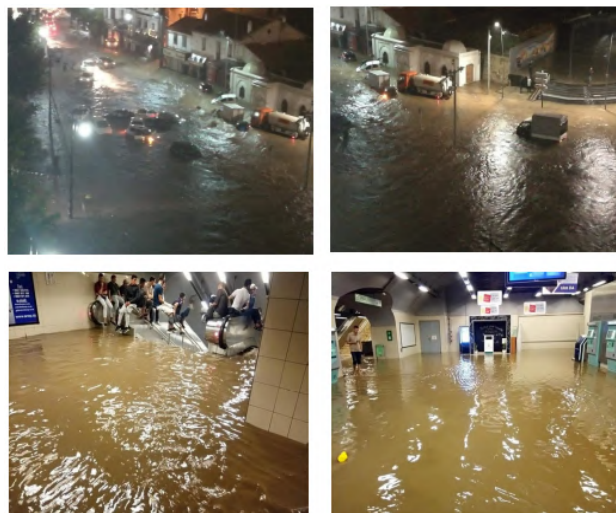


Figure 2. Les dégâts engendrés par les précipitations de la journée du 12 septembre 2019 dans les rues et le métro d'Alger

Plusieurs véhicules ont été emportés par les flots au niveau de la rue Frères Bouadou à Bir Mourad Rais, suscitant une grande panique parmi les habitants, a-t-on constaté (Figure 2).

En examinant la photo satellitaire prise à 21h00 de la journée du 12 septembre 2019 sur la région (figure 3), on observe clairement l'existence de plusieurs cellules orageuses sur les wilayas du nord de l'Algérie. Des amas nuageux convectifs couvrant la zone d'Alger s'étendant jusqu'à la Méditerranée sont visibles sur cette image et sont à l'origine des pluies intenses sous forme d'averses ayant causé des dégâts susmentionnés.

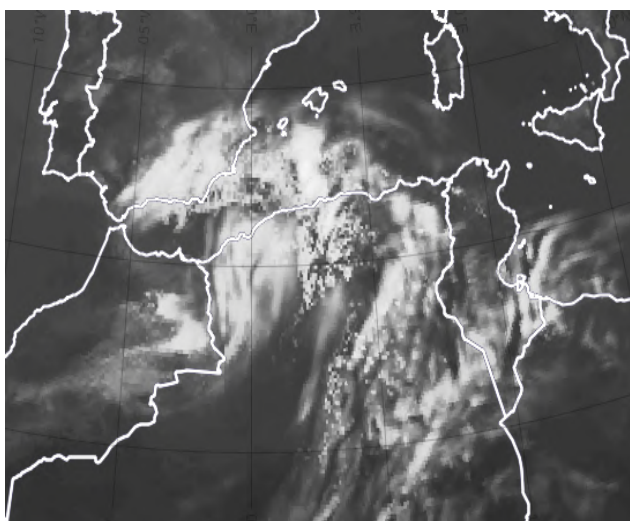


Figure 3. L'image satellitaire du 12 Septembre à 21H couvre le domaine du nord de l'Algérie

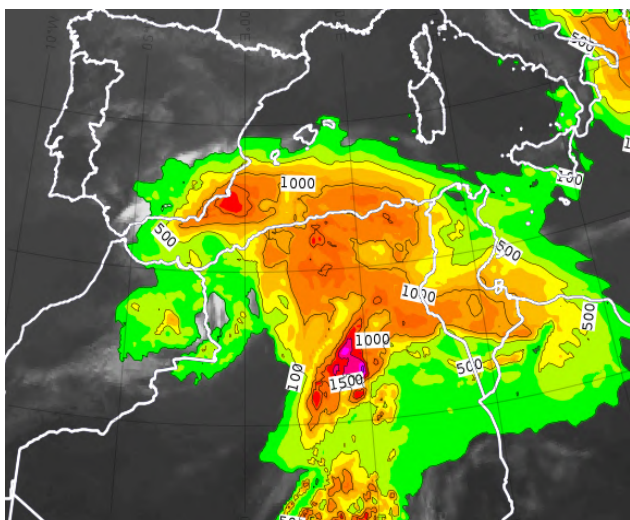


Figure 4. Prévission de la CAPE par le modèle ARPEGE_0.1 R00h pour la journée du 12 septembre 2019 à 21h

Prévission du CAPE pour la journée du 12 septembre 2019 :

La CAPE prévue par le modèle ARPEGE 0.1 le 12 septembre 2019 à 21h00 (figure 4) sur la région montre des valeurs supérieures à 1015 J/Kg au-dessus de la région du nord du pays et ce, des wilayas du centre jusqu'aux wilayas situées à l'Est avec un maximum de valeurs atteignant 1500 J/Kg sur les régions du nord du Sahara central (région de Ghardaia, El-Goléa..).

Application et vérification de l'outil MétéOrage sur la

situation orageuse survenue le 12 septembre 2019 :

Afin d'alimenter l'application MétéOrage avec l'indice d'orage, nous avons tourné le modèle opérationnel ALADIN pour la journée de 12 septembre 2019 où nous avons cal-

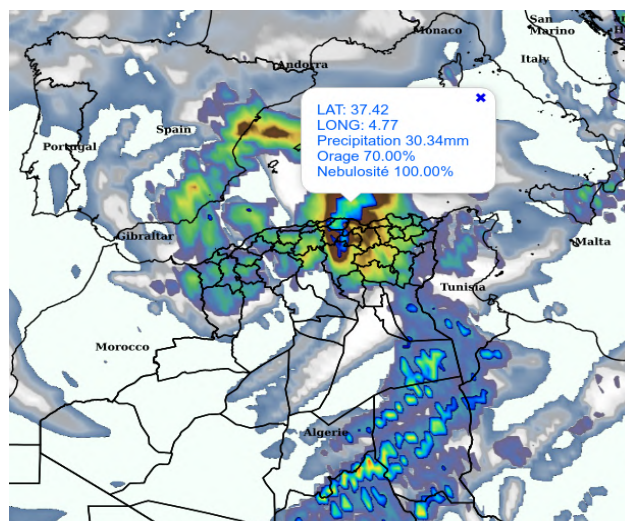


Figure 5. Superposition de la nébulosité totale avec la précipitation et l'indice d'orage de la journée de 12 septembre 2019 à 21h.

culé tous les paramètres nécessaires ainsi que les indices présentés précédemment. Cet outil appliqué à la situation de la journée du 12 septembre 2019 a pu mettre en évidence une situation d'orages avec une probabilité atteignant 70% . La quantité des précipitations donnée par cette application s'élève à 30.34mm. La figure 5 montre une capture d'écran de l'application illustrant les cellules orageuses ainsi que la probabilité sur le risque de l'Orage au-dessus du point de latitude 37.42°N et de longitude 4.77° E.

Prévission de la trajectoire de l'Orage :

Une fois les indices d'orage calculés, nous nous sommes penchés sur l'étude de la prévission de la trajectoire des cellules orageuses basée sur plusieurs approches existantes dans la littérature. Haklander et al. (2003) proposent une méthode qui repose essentiellement sur des tests de seuils de plusieurs paramètres tels que la vitesse verticale, le tourbillon potentiel, et la température potentielle équivalente. Pour notre cas, nous avons appliqué ces approches sur le modèle numérique en chaque point de grille et nous avons effectué plusieurs tests sur chaque échéance afin d'estimer la trajectoire de chaque point de grille. L'approche choisie consiste à regrouper tous les points de grilles constituant une cellule orageuse sur le domaine. Ensuite, nous sélectionnons parmi ces points de grilles ceux qui mettent en évidence une probabilité importante de formation d'orages ici fixée à 40 % de chance et plus ; le reste des cellules étant éliminé. Par la suite, nous nous focalisons sur le centre (spatialement) de chaque cellule orageuse ainsi sélectionnée, et nous suivrons sa nouvelle position prévue durant la prochaine échéance. Un vecteur de déplacement pourrait ainsi être généré reliant les points des centres de ces cellules orageuses. En intégrant l'analyse de quelques paramètres cruciaux tels que le vent d'altitude (Plusieurs niveau 500, 700

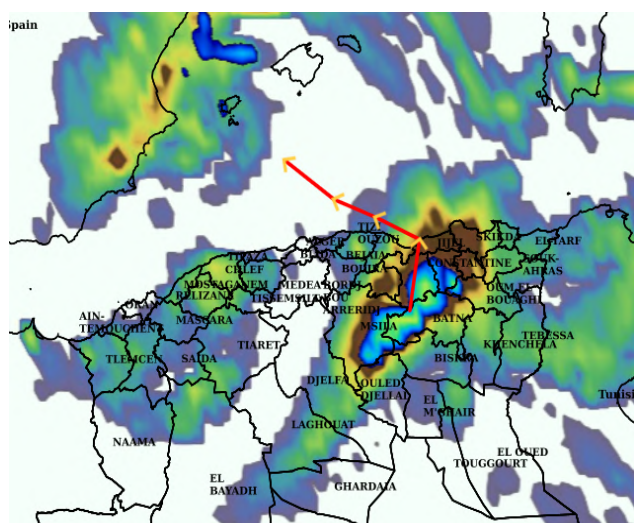


Figure 6. Le trajectoire prévue des cellules orageuses donnée par l'application MétéOrage pour la situation orageuse observée le 12 septembre 2019.

et 850), la vitesse verticale, le tourbillon potentiel et la température potentielle équivalente, cela permettra d'estimer la trajectoire la plus probable des cellules orageuses actives sur le domaine concerné. La figure 6 illustre la trajectoire prévue des orages relative à la situation observée le 12 septembre 2019 et matérialisée par la ligne rouge.

La figure 7 renferme plusieurs images extraites grâce à l'application MétéOrage qui marquent le suivi de la trajectoire des cellules orageuses à partir de 15h00 de la journée du 12 Septembre jusqu'à 06h de la journée du 13 septembre 2019 par échéance de 3 heures. Les images de la figure 7 montrent bien l'existence d'une formation de cellules orageuses au-dessus des wilayas de l'Est à partir de 18h du soir pendant la journée du 12 Septembre. Ce foyer orageux s'est déplacé vers le centre du pays entre 21h et minuit de la même journée. La cellule orageuse a poursuivi son évolution en direction de la Méditerranée aux environs de 3h de la journée du 13 septembre 2019. L'image de 21h00 marque également la présence de quelques foyers orageux au sud du pays dus particulièrement à l'advection de l'air chaud venant du sud et se refroidissant en altitude.

Les résultats de l'application MétéOrage comparés avec la situation réellement observée grâce à l'imagerie satellitaire (Figure 3), montre que l'outil développé a pu bien déceler les cellules orageuses et les localiser avec une précision très satisfaisante et suivre avec quasi-exactitude leurs trajectoires.

4. Conclusion

Dans cet article nous avons pu mettre en exergue une tentative de calcul de l'indice empirique de prévision d'orage basé sur la combinaison de plusieurs indices proposés dans la littérature et qui ont été testés et validés dans le passé par plusieurs auteurs. Nous avons eu à utiliser plusieurs

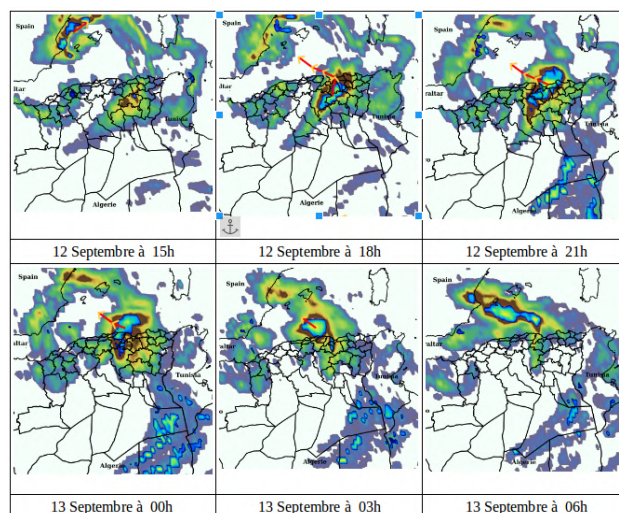


Figure 7. Trajectoire des cellules orageuses déterminée au moyen de l'application MétéOrage de la journée de 12 septembre de 15h jusqu'à 13 septembre à 06h de l'année 2019.

paramètres physiques atmosphériques ayant trait au phénomène de convection et qui commandent le développement des nuages d'orages afin d'arrêter un indicateur sur la probabilité de formation d'orage ainsi que les précipitations qui risquent d'être enregistrées. La méthode proposée pour le suivi de ces cellules orageuses à travers la probabilité de leur occurrence ainsi que les quantités de pluie précipitables estimées grâce aux modèles de prévision de temps et appliquée pour le cas de la situation météorologique qui a prévalu le 12 septembre 2019, s'est avérée concluante. La validation de cet outil sur d'autres situations orageuses est indispensable en vue de son amélioration. En effet, l'indice de probabilité avait estimé à 70% de chance l'occurrence d'orage et plus de 30mm le cumul de pluie attendu au-dessus de la région de l'Algérois. Cette application portée sur une plateforme visuelle en format d'interface rendra l'usage de cet outil très convivial et facilitera par conséquent le suivi continu de la trajectoire prévue des systèmes orageux. En perspective il sera judicieux d'introduire des équations qui permettent de corriger la trajectoire des cellules orageuses avec l'image satellitaire et ce, en temps réel. La mise en exploitation en phase expérimentale de cet outil le rendra plus formant. L'introduction des images radars dans cette interface renforcera davantage le système d'alerte précoce ainsi que la prévision immédiate puisqu'il permettra de localiser avec quasi-exactitude les positions des cellules orageuses et informera sur sa structure.

Références

- [1] S. Tajbakhsh, P. Ghafarian, and F. Sahraian, Instability indices and forecasting thunderstorms: the case of 30 April 2009, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 403–413, 2012

- [2] J.B. Cohuet, R. Romero, V. Homar, V. Ducrocq, C. Ramis, Initiation of a severe thunderstorm over the Mediterranean Sea, *Atmospheric Research* 100 (2011) 603–620
- [3] Ramis, C., Romero, R., Homar, V., 2009. The severe thunderstorm of 4 October 2007 in Mallorca: an observational study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 1237–1245.
- [4] Riosalido, R., 1990. Characterization of mesoscale convective systems by satellite pictures during PREVI-MET-89. Segundo Simposio Nacional de Predicción Madrid, Instituto Nacional de Meteorología, pp. 135–148.
- [5] Rotunno, R., Klemp, J.B., 1985. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J. Atmos. Sci.* 42, 271–292.
- [6] George J. Maglaras and Kenneth D. LaPenta, DEVELOPMENT OF A FORECAST EQUATION TO PREDICT THE SEVERITY OF THUNDERSTORM EVENTS IN NEW YORK STATE, National Weather Service Forecast Office Albany, New York, June 1997.
- [7] Kenneth D. Lapenta, 1995: Forecasting tornadic versus non-tornadic severe thunderstorms in New York State. Eastern Region Technical Attachment, No. 95-4A, National Weather Service, NOAA, US. Department of Commerce, 15 pp.
- [8] Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., et al. (2018). The aladin system and its canonical model configurations arome cy41t1 and alaro cy40t1. *Geoscientific Model Development*, 11(1) :257.
- [9] Doswell III, C. A., Weiss, S. J., & Johns, R. H. (1993). Tornado forecasting: A review. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, Geophys. Monogr, 79, 557-571.
- [10] Maddox, R. A., & Doswell III, C. A. (1982). An examination of jet stream configurations, 500 mb vorticity advection and low-level thermal advection patterns during extended periods of intense convection. *Monthly Weather Review*, 110(3), 184-197.
- [11] George, J. J.: Weather forecasting for aeronautics, Academic press, 673 pp., 1960.
- [12] Galway, J.G. (1956) The Lifted Index as a Predictor of Latent Instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37, 528-529.
- [13] Showalter, A.K. (1953) A Stability Indices for Thunderstorm Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34, 250-252.
- [14] Miller, R. C.: Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Center, AWS Tech. Report 200 (Rev.), Headquarters Air Weather Service, Scott AFB, 106 pp., 1972
- [15] Ellrod, G., and G. Field, 1984: The characteristics and prediction of Gulf Stream thunderstorms. Preprints. Tenth Conf. Weather Forecasting and Analysis. Clearwater Beach, Amer. Meteor. Soc , 15-21.
- [16] Haklander, A. J. and Delton, A. Van.: Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands, *Atmos. Res.*, 67–68, 273– 299, 200
- [17] Randy A. Peppler and Peter J. Lamb, *Monthly Weather Review*, Volume 117, Numéros 5 à 8, 1989
- [18] Maryam Ramezani Ziarani, Bodo Bookhagen, Torsten Schmidt , Jens Wickert , Alejandro de la Torre and Rodrigo Hierro, Using Convective Available Potential Energy (CAPE) and Dew-Point Temperature to Characterize Rainfall-Extreme Events in the South-Central Andes, *Atmosphere* 2019, 10, 379; doi:10.3390/atmos-10070379.