

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère des Travaux Publics et des Transports
Office National de la Météorologie



Journal Algérien de Météorologie Appliquée

Volume 1 - Mars 2017

ISSN 3088-7925

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère des Travaux Publics et des Transports
Office National de la Météorologie

JOURNAL ALGÉRIEN DE MÉTÉOROLOGIE APPLIQUÉE

Volume 1 - Mars 2017
Diffusion Interne

Contact

Adresse Office National de la météorologie
 1, Avenue Mohamed Khemisti, BP. 153
 Dar El Beida , Alger, Algérie
Courriel revue.jama@meteo.dz
Site Web www.meteo.dz

Comité d'édition

Directeur Mr. MOKHTARI Mohamed
Membres Mr. ABANE Hakim
Mr. REZOUG Tahar
Mr. HEMDANE Yacine
Mr. SAHABI Abed Salah
Mme SABRI Amina Feriel
Mr. BOUZGHAIA Siraj-Eddine

Comité de lecture

Directeur	Mr. MOKHTARI Mohamed
Membres	Mr. HAMADACHE Bachir
	Mr. HAOUARI Mahmoud
	Mr. ABANE Hakim
	Mr. BENAMARA Mohamed Arab
	Mr. REZOUG Tahar
	Mr. HEMDANE Yacine
	Mr. SAHABI Abed Salah
	Mme SABRI Amina Feriel

Préambule

Le monde a changé et change à un rythme qui nous oblige, nous aussi, à nous adapter. Il nous appartient de prendre notre responsabilité et poser des gestes concrets pour assurer la prospérité de notre Office. La clé de notre prospérité, c'est la productivité, cette dernière doit devenir notre obsession. Un des principaux piliers de la productivité c'est l'innovation.



Convaincu que la science et la recherche en général et dans le domaine de la météorologie en particulier constituent un levier pour le développement du pays, l'Office National de la Météorologie a, dans son plan stratégique de développement, accordé une attention particulière à la dimension scientifique et de recherche et développement. Cette démarche s'est concrétisée par La création de la commission climatologique en 2015 puis du conseil scientifique de l'Office National de la Météorologie (ONM) en janvier 2016.

Cette avancée perceptible s'est couronnée récemment par la création d'une revue propre à l'office. Cette revue permettra indubitablement à tout le personnel technique et chercheurs de l'office et de ses collaborateurs (universités, instituts ...) d'utiliser cet espace pour la publication de leurs travaux innovants visant en premier lieu, l'amélioration des services offerts par l'office et le renforcement de ses capacités.

En raison du caractère interdisciplinaire dont jouit la météorologie et les questions transversales que traite cette discipline, cette revue constituera sans doute un espace d'émulation et de production scientifique au sein de la communauté des chercheurs du pays. De ce fait, cette revue demeure ouverte aux universitaires, chercheurs et experts intéressés par les questions ayant trait à la météorologie en général.

A travers cette revue, l'Office s'ouvre davantage vers le monde extérieur. La présence des universitaires dans le conseil scientifique témoigne une fois de plus du nouveau souffle que compte apporter l'ONM à tous les scientifiques de l'établissement, visant particulièrement à promouvoir leurs relations avec les universités et instituts du pays qui constituent un vivier de l'innovation et de la création. Face à cet important événement, Je ne peux que me réjouir de ce premier numéro de notre revue qui porte désormais le nom « JAMA : Journal Algérien de la Météorologie Appliquée », et j'invite par la même occasion toutes les compétences de l'ONM et nos associés d'apporter leur soutien afin de booster davantage la recherche et d'assurer la pérennité de notre prestigieuse revue.

Mr. Brahim. IHADADENE
Directeur Général de l'Office
National de la Météorologie

Sommaire des Articles

F. ABANE	Apport du modèle AROME dans la prévision de pluies convectives : « Retour d'expérience »	13-22
H. ABANE	Circulations atmosphériques de grande échelle associées aux extrêmes de température (canicules, nuits chaudes et vagues de chaleur) sur l'Algérie	23-30
H. ABANE	Approche Statistique de la modélisation des phénomènes lithométéores	31-36
A. AMBAR	Modélisation des aérosols désertiques dans AROME : Apport du schéma physique à l'échelle convective et impact radiatif	37-42
A. BOUCHEFFA	Mise en oeuvre d'une base de données vent ALADIN et réalisation d'une carte de régime des vents dominants en Algérie	43-50
S. BOUZGHAIA	Évaluation des performances des modèles WW3 et WAM par comparaison avec les données du réseau de bouées REDEXT	51-54
I. DEHMOUS	Mise en exploitation du modèle de prévision routière METRo en Algérie.	55-58
M. HAOUARI	Disponibilité des jours pour la cuisson solaire à Ain-Sefra	59-62
N. KESSALI	Development of a high-resolution nearshore wave forecasting system for the Algerian coasts	63-66
S. SAHABI-ABED	Canicule et Vague de Chaleur en Algérie : Définition – Seuils – Caractéristiques	67-76
S. SAHABI-ABED	Indices Bioclimatiques : Etude du cas de la Vague de Chaleur en Algérie, Dans la Perspective de l'Elaboration de Cartes de Vigilance : Humidex et PET	77-84
K. SOLTANI	Reconstitution des séries mensuelles de températures maximales et minimales sur l'ouest Algérien	85-90
A. ZABOT	Estimation débruitée du Spectre Doppler Météorologique par la Méthode des ondelettes	91-95

Apport du modèle AROME dans la prévision de pluies convectives : « Retour d'expérience »

F. ABANE¹, Hakim ABANE^{1*}, Abdenour AMBAR²

Résumé

Du 18 au 19 octobre 2007, suite à l'épisode de pluies diluviennes qui a affecté le sud-ouest algérien, il a été enregistré 98,1 mm de pluie à la station de Ain-Sefra ; une valeur qui dépasse la normale mensuelle. L'analyse des conditions météorologiques à l'origine de ce temps sévère par le biais du modèle global ARPEGE et le modèle à aire limitée ALADIN-Algérie, montre que les conditions propices au développement d'orages étaient partiellement réunies durant la période mais les deux modèles sous-estiment fortement les quantités de pluies observées. Une simulation avec le prototype AROME-Algérie a montré la capacité de ce dernier à estimer les pluies convectives.

Mots Clés:

ARPEGE — ALADIN Algérie — Prototype AROME Algérie — Pluies convectives

¹ Institut Hydrométéorologique de Formation et de Recherches (IHFR), Oran, Algérie

² Office national de météorologie (CNPM-ONM), Dar El Beida, Alger

*Correspondant: hakim73_a@yahoo.fr

1. Contexte synoptique

Du 2017-10-18 au 2017-10-19, une configuration classique appelée situation en Ω (succession d'Ouest en Est, de type dépression-anticyclone-dépression, les isolignes forment schématiquement un Ω) s'étend entre $30^{\circ}W$ et $30^{\circ}E$ (figures 1-2).

À $500hPa$, un profond thalweg s'étendant du nord de l'Italie vers le sud du Maroc, génère un flux chaud de sud-ouest s'étendant de la région de Tindouf jusqu'aux régions côtières du pays. Cette configuration se retrouve également au niveau $850hPa$, engendrant ainsi une très forte advection d'air chaud sur ces régions. Le système a évolué d'ouest en est tout en s'enfonçant vers le nord de la Mauritanie, ce qui a favorisé l'advection d'air froid relatif vers le Bécharois et l'Atlas Saharien. En surface, un marais barométrique s'étend de la région de Naâma jusqu'au sud de l'Italie.

Ceci, dénote que le forçage dû au relief a joué un grand rôle dans l'amorce de l'instabilité latente qui est relativement forte (-10) (figure 6). De plus, l'advection d'humidité dans les bas niveaux de la couche $1000hPa - 850hPa$, qui était déjà proche de la saturation (figure 3), a d'une part permis le renforcement de l'instabilité latente et a d'autre part permis à la particule d'atteindre son niveau de convection libre. Ces deux effets conjugués ont permis le maintien du flux d'humidité, dans les basses couches, et donc le renforcement des précipitations dues aux cellules orageuses en renouvellement.

Ce type de circulation atmosphérique de grande échelle en Ω est bien connu pour sa stabilité dans le temps (sa durée de vie est de plusieurs jours). Les éléments sont ainsi réunis pour la mise en place d'une situation très favorable à un épisode perturbé [Ducrocq et al. \(2003\)](#).

En surface, le 2017-10-18-00:00 la situation est caractérisée par une sorte de marais barométrique, s'étendant du sud de l'Italie au Maroc voir l'ensemble de la méditerranée occidentale.

L'évolution de la situation en surface ne marque pas de changements importants, le marais barométrique a

constitué la signature des conditions en surface (figure 2).

La vitesse verticale

Au niveau $850hPa$, l'analyse du champ des vitesses verticales synoptiques du 2007-10-18-00:00 (figure 4) montre plusieurs noyaux d'ascendance correspondant au soulèvement en bloc de l'air chaud dans le système orageux, le premier est situé sur le sud-est du Maroc et le sud-ouest de l'Algérie, le second sur le nord du Sahara, et le troisième sur le nord de la Libye, avec un maximum de $-0,4Pa/s$ observé sur le sud-est de l'Algérie. Le 2007-10-18-06:00 les noyaux situés sur la Libye et le sud de l'Algérie se sont renforcés en passant à $-0,8Pa/s$ et ont pris par la suite une extension plus importante en gagnant des régions plus au nord algérien. Les différents noyaux sont séparés par des zones de coupure correspondant à des zones de subsidence sur ces régions.

Au niveau $500hPa$ on retrouve également un certain nombre de noyaux d'ascendance mais ne sont pas tout à fait sur la même zone géographique, le plus marquant c'est celui développé sur le sud du Maroc qui se renforce avec le temps en même temps qu'un autre noyau apparaît sur l'est du pays le 2007-10-18-06:00, l'évolution montre la disparition complète de ces noyaux pour les échéances qui ont suivies jusqu'au 2007-10-19-00:00 où un noyau d'ascendance se forme sur les régions intérieures de l'Algérie en s'intensifiant et se dirigeant plus au nord (figure 5) et se décalant vers l'est.

Instabilité latente et potentielle

Le paramètre INLAT constitue un indice d'instabilité latente utilisant la température potentielle équivalente saturée comme base de calcul. Les valeurs fortement négatives dénotent une instabilité très forte.

Le 2007-10-18-00:00 (figure 6), l'examen du champ de l'INLAT de la couche $1000hPa - 850hPa$ montre une instabilité latente assez forte sur tout le bassin méditerranéen où on observe des valeurs qui varient entre 0 et -5 dénotant ainsi la présence d'une forte instabilité latente dans les bas niveaux.

Cette situation a évolué d'une façon importante à partir du 2007-10-18-06:00, des noyaux présentant des valeurs de l'INLAT de -10 apparaissent sur les régions ouest et est du pays, cette zone d'instabilité a concerné également certaines régions de l'intérieur y compris les régions du sud-ouest algérien. Par la suite, la situation n'a pas beaucoup évolué du point de vue instabilité à part un léger renforcement entre le 2007-10-18-12:00 et 2007-10-18-18:00, on retrouve toujours les noyaux d'instabilité latente mais avec une zone de couverture assez étendue, ceci est à relier à la forte humidité observée à 1000hPa et à 850hPa où elle a bien dépassé 90%, une des causes de l'augmentation de l'instabilité latente.

L'instabilité présente aux bas niveaux ne s'observe pas avec la même ampleur et elle n'est pas centrée sur les mêmes régions dans les couches moyennes.

Analyse du champ de la θ'_w

La valeur de ce paramètre informe sur le caractère chaud et humide de la particule d'air. La valeur est donc d'autant plus élevée que la particule est chaude ou humide [Bergaoui \(2007\)](#).

L'analyse des cartes de la θ'_w à 1000hPa montre des valeurs relativement importantes sur toutes les régions du bassin méditerranéen avec un maximum sur le nord de la Libye, le sud de la Tunisie et le sud-est de l'Algérie. Les noyaux de fortes valeurs continuent à s'advecter vers l'ouest pour atteindre le sud-ouest algérien le 2007-10-18-18:00, elles sont de l'ordre de 16°C voir plus sur Béchar montrant ainsi l'advection d'air chaud et humide (instable) d'après les prévisions ALADIN.

Il est à remarquer que les valeurs de θ'_w supérieures à 16°C sont considérées par les prévisionnistes de Météo-France, comme un seuil de mise en vigilance quant à l'évolution d'une situation orageuse. Mais il faut préciser que ces seuils ont des valeurs subjectives qui dépendent essentiellement de l'expérience des prévisionnistes et des effets locaux de la région considérée [Bergaoui \(2007\)](#).

En considérant le champ de la θ'_w de la couche à la 700hPa et celui de la 500hPa (non montrés), on remarque que les valeurs de la θ'_w sont restées au delà de 14°C, ceci est particulièrement vrai entre 2007-10-18-12:00 et 2007-10-18-18:00.

Pour aller plus loin que les conditions thermiques de basses couches, on a analysé le radiosondage de la même situation (figure 8).

L'examen du radiosondage prévu par ARPEGE (pour l'échéance +12h) montre une structure instable avec un cisaillement vertical en basse couche de l'ordre de 10m/s devenant plus important en altitude. Ce type de configuration est favorable à une structure multicellulaire d'un système orageux. Les valeurs de cisaillement requises pour la formation d'un tel système sont de l'ordre de 10-20m/s sur la couche 0m-3000m. Ainsi, les ascendances vont pouvoir se maintenir plus longtemps [Calas \(2013\)](#).

Analyse des précipitations

Concernant le cumul de précipitations estimé par le modèle ALADIN. Le modèle indique une vaste zone de précipitations faibles et dispersées, affectant le domaine d'intérêt sans être localisée sur la région du sud-ouest algérien.

Les champs de précipitations proposés donc par le modèle à l'échelle synoptique ne reflètent pas une image de la quantité de précipitations observée, ce qui peut laisser penser à une origine de petite échelle des cumuls observés. Le modèle ALADIN arrive à développer des orages violents l'après-midi mais sous-estime les valeurs de pluies. D'où le rôle décisif d'un modèle tel que AROME qui décrit beaucoup mieux les reliefs [Audard-Vincendon \(2010\)](#).

Analyse du champ de la CAPE

La CAPE représente l'énergie potentielle susceptible d'être transformée en énergie cinétique pour les ascendances. L'accélération verticale de la particule est d'autant plus importante que la CAPE est élevée. Notons que les ascendances d'échelle synoptique contribuent à augmenter la valeur de la CAPE [Calas \(2013\)](#).

L'analyse du champ de la CAPE (figure 10) montre des faibles valeurs prévues sur la zone d'intérêt n'excédant pas les 900W/m² à Ain-Sefra alors que les valeurs sont beaucoup plus importantes sur Béchar de l'ordre de 1500W/m². La CAPE a diminué fortement au cours des échéances qui ont suivi.

2. Simulation à haute résolution de l'événement

Simulation AROME

La mise en opérationnel du système de prévision numérique AROME nous a donné l'occasion d'évaluer un tel système de prévision à haute résolution pour la prévision des phénomènes de petites échelles.

La principale différence par rapport aux modèles atmosphériques réside dans le fait qu'AROME est doté de son propre système d'assimilation à méso-échelle et dispose donc a priori de meilleures conditions initiales.

Outre l'aspect temps réel, il était donc aussi pertinent d'évaluer si nos conclusions sur l'évaluation des prévisions d'un modèle atmosphérique à la résolution de quelques kilomètres étaient confirmées [Audard-Vincendon \(2010\)](#) [Domingues Ramos \(2002\)](#).

Précipitations simulées

La figure 9 présente les cumuls des précipitations simulées par le modèle aux mêmes échéances que celle données par le modèle ALADIN, le modèle concorde très bien avec les observations : il indique une zone de précipitations plus au moins vaste avec un caractère dispersé affectant les régions ouest et centre essentiellement celles de l'intérieur, les pluies les plus importantes sont simulées entre 2007-10-18-18:00 et 2007-10-18-21:00 sur la région du sud-ouest avec un cumul dépassant les 60 mm.

Le cumul simulé à l'échéance +21h montre une couverture spatiale plus importante que celle simulée à +18h ce qui peut justifier les cumuls observés sur les régions voisines. La zone la plus active se situe sur la région du relief comme témoigne l'observation.

Le modèle réussit à reproduire l'organisation des précipitations avec une excellente localisation de celle-ci (figure 9).

Le modèle parvient à reproduire le caractère exceptionnel de l'événement, avec un maximum de précipitations simulées dépassant 100mm sur Ain-Sefra. Le cumul le

plus important enregistré par le réseau pluviométrique au cours de l'épisode était de 98.1mm à Ain-Sefra.

Par rapport aux valeurs prévues par les modèles opérationnels, la simulation AROME à haute résolution améliore significativement la prévision des précipitations. En comparant à la même échelle spatiale, la valeur maximale simulée par AROME dépasse largement la valeur maximale simulée par ALADIN.

On constate, d'une façon générale, qu'ils sont bien reproduits par la simulation.

En termes de chronologie, la simulation AROME prévient des précipitations qui ne sont pas du tout détectées par ALADIN.

AROME simule des précipitations avec une structure spatiale qui ressemble beaucoup à celle observée.

Le modèle est capable de localiser les précipitations d'une façon plus réaliste.

La CAPE simulée

Les simulations donnent un bon ordre de grandeur. En outre, les résultats sont très satisfaisants en terme de dynamique : occurrence du pic de ce champ à partir du 18 à 00 heures ce qui apparaît très réaliste mais qui n'a pas duré dans le temps, il n'est observé que pour deux échéances.

Ces résultats démontrent que sur certaines situations, l'utilisation des prévisions AROME conduit à une prévision signalant le risque (figure 10).

On se place dans la configuration simulée, les valeurs données par le champ de la CAPE apparaissent translatées spatialement vers le sud. En utilisant le modèle AROME pour discuter le champ de la CAPE, nous avons certes obtenu une augmentation de la qualité de l'information mais un peu éloignée de l'observation.

La θ'_w simulée par AROME

Le champ de θ'_w à 850hPa simulé par AROME (figure 11) donne une vision assez vaste d'une région fortement instable, une instabilité qui na pas touché seulement les régions sud-ouest mais qui s'est étendue vers le Nord du Sahara.

Notre région d'intérêt observe des valeurs de θ'_w comprises entre 18°C et 20°C, dénotant donc un air fortement chaud et humide au niveau 850hPa, une condition nécessaire pour déclencher une manifestation orageuse.

3. Conclusion

A partir des sorties des modèles opérationnels, nous avons conduit une analyse des conditions météorologiques associées au système convectif. Comme nous allons le détailler, l'étude de cette situation montre que les conditions nécessaires au développement d'un système convectif et stationnaire étaient partiellement réunies dans le sud-ouest de l'Algérie pendant les journées du 18 et le 19 octobre 2007. Ces dernières peuvent être décrites comme suit :

Une circulation d'altitude adéquate : Le système ainsi étudié s'est présenté sous forme ondulatoire d'ouest en est avec une structure allongée qui a stagné sur le sud-ouest pendant plusieurs jours. De plus les ascendances sont renforcées là où on a bien remarqué une vitesse verticale qui croît avec l'altitude.

Une atmosphère faiblement instable : L'examen des champs de l'énergie potentielle convective disponible et de l'instabilité latente indique une atmosphère faiblement instable avec des valeurs de la CAPE pouvant atteindre 1500W/m² mais décalées temporellement, elles n'étaient observées qu'après l'enregistrement des fortes précipitations. et une valeur proche de -10 pour l'INLAT après le passage de l'événement pluvieux, ce qui permet de dire que le maximum d'instabilité a été observé par ALADIN en dehors de la périodes de précipitations importantes.

Une advection d'air chaud et humide en basses couches :

La présence d'air chaud et humide en basses couches, indiqué sur les cartes de géopotential superposées au champ d'humidité constitue un élément moteur qui favorise le déclenchement de l'instabilité convective. Cette zone de forte humidité dépassant dans la plupart des cas les 90% sur le sud - ouest algérien a fait de cette région le siège de formation et du développement de cellules convectives.

Une advection d'air sec en altitude : Une simple comparaison entre le champ d'humidité à 850 hPa et à 700 hPa avec le champ d'humidité à 500hPa montre clairement une diminution nette du taux d'humidité entre les basses couches et les couches moyennes, ceci confirme la présence d'air sec en moyenne troposphère. On peut également déceler la présence d'air sec par la diminution de la theta prime w entre les couches 1000hPa -700hPa et 700hPa - 500hPa.

Une topographie favorable de la région : A toutes ces conditions conjuguées, il faut ajouter la géographie locale et plus précisément le relief. Le relief influe d'une manière importante sur les conditions météorologiques locales. Un des effets les plus marquants de cette influence est le forçage qui déclenche l'ascendance, la distribution spatiale et le renforcement des précipitations.

La simulation AROME : La simulation AROME a montré sa capacité à générer des champs qui reproduisent bien les pluies convectives.

On peut retenir de l'analyse de la situation que les conditions météorologiques régnant au cours de cette période donnent au phénomène un caractère lent et est formé dans une région où l'air chaud et humide de basses couches a rencontré un environnement local favorable constitué par le relief. Le cisaillement du vent observé était suffisant pour permettre la stationnarité des multicellules pendant quelques heures sur la région. Pour ce type d'orage, c'est essentiellement le chauffage des basses couches qui va permettre à l'instabilité convective de se développer. Ce type d'orages s'observe principalement sur le relief dans l'après-midi, s'estompant rapidement au coucher du soleil. Déclenchement dû essentiellement aux convergences créées par les brises de pente et/ou suite à la déviation des vents par le relief.

L'analyse du paramètre θ'_w et des profils verticaux de vent, nous amène à conclure que les conditions perturbées ont été reconnues par les modèles ARPEGE et ALADIN-Algérie sans atteindre l'estimation de l'ampleur de cette manifestation météorologique alors qu'AROME a apporté un plus dans l'estimation des précipitations. De ce fait, l'utilisation conjointe des trois modèles améliore significativement la prévision des pluies.

Références

Audard-Vincendon, B. (2010). *Apport des modèles météorologiques de résolution kilométrique pour la prévision des crues rapides méditerranéennes : vers une prévision d'ensemble des débits en région Cévennes-Vivarais*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.

Bergaoui, K. (2007). Etude de la situation explosive du 13 octobre 2007 et apport du modèle arome.

Calas, C. (2013). *Concepts et méthodes pour le météoro-*

logiste : Les savoirs : modèles conceptuels et données disponibles. Météo-France.

Domingues Ramos, M. H. (2002). *Analyse de la pluviométrie sous des systèmes nuageux convectifs : étude de cas sur des données de la ville de Marseille et de la méthode ISIS de Météo-France*. PhD thesis, Grenoble 1.

Ducrocq, V., Aullo, G., and Santurette, P. (2003). Les précipitations intenses et les inondations des 12 et 13 novembre 1999 sur le sud de la France.

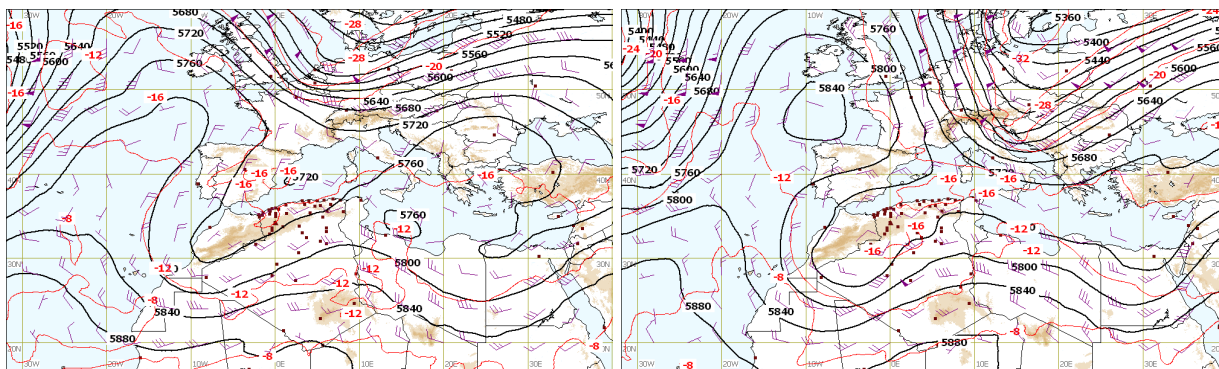


Figure 1. Champ de géopotential à 500 hPa : 2007 – 10 – 18 et 2007 – 10 – 19 à 00 UTC

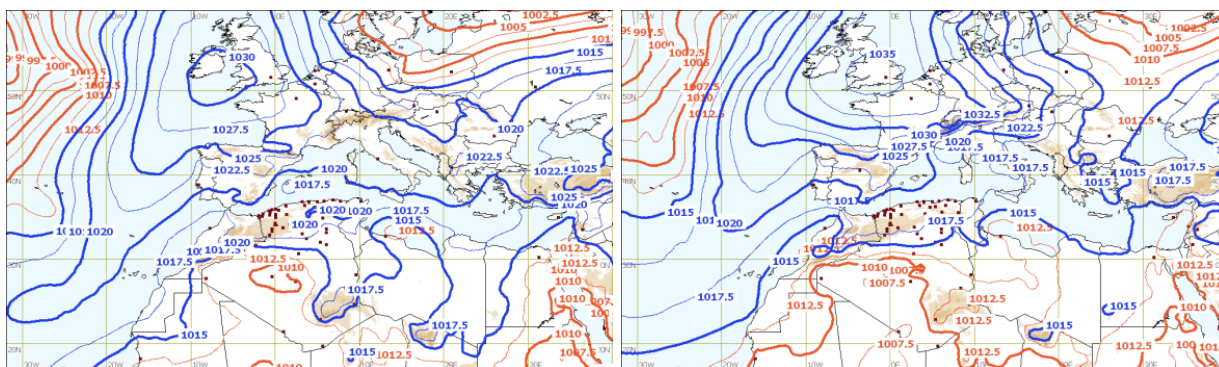


Figure 2. Pression au niveau de la mer (isobares tous les 5hPa) du 18 au 19-10-2007

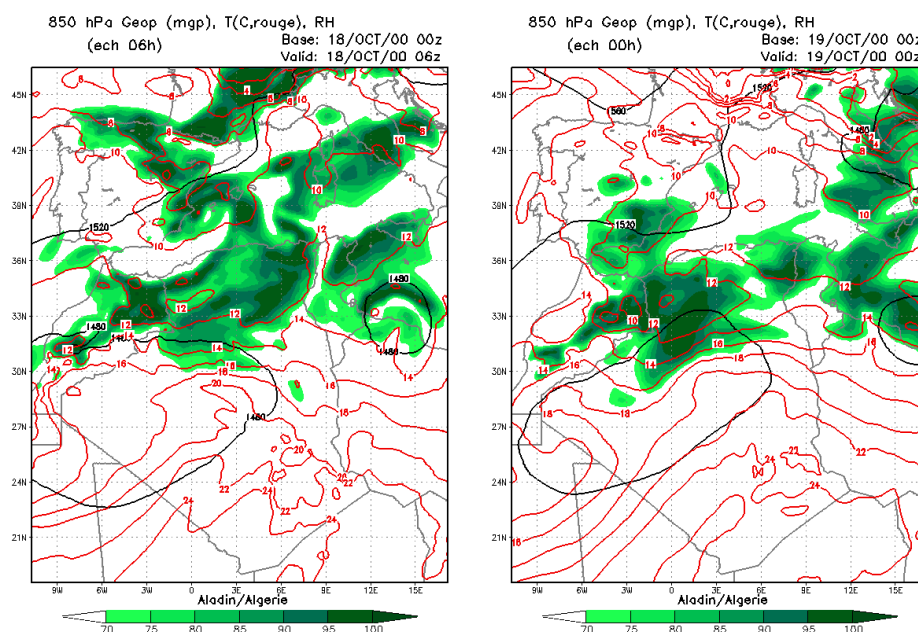


Figure 3. Champ d'humidité, géopotential et température à 850hPa

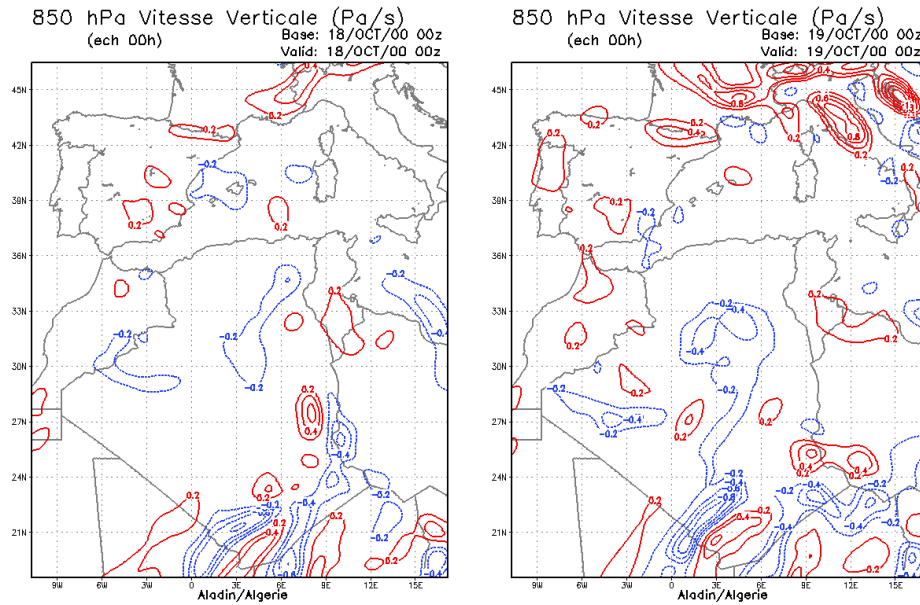


Figure 4. Champ de vitesse verticale à 850 hPa

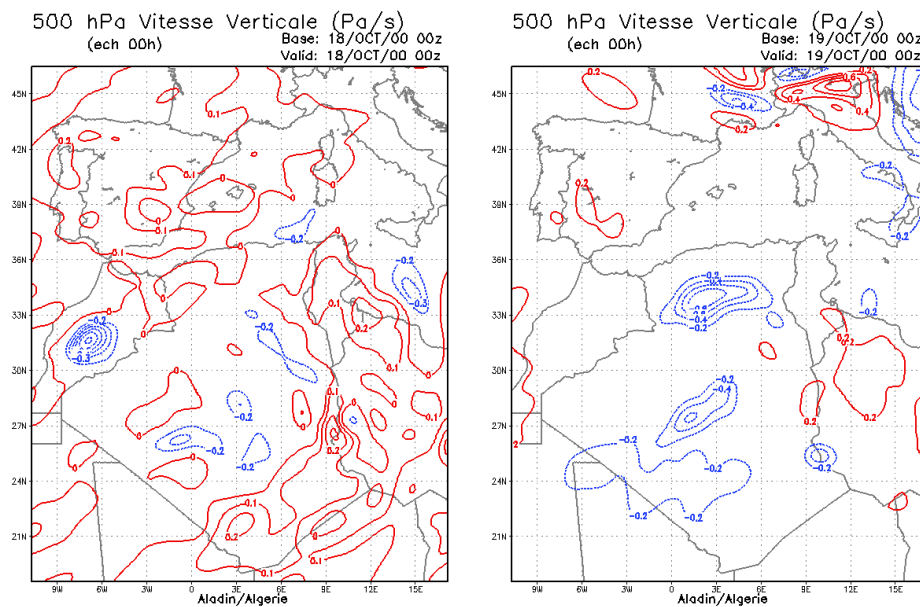


Figure 5. Champ de vitesse verticale au niveau 500hPa

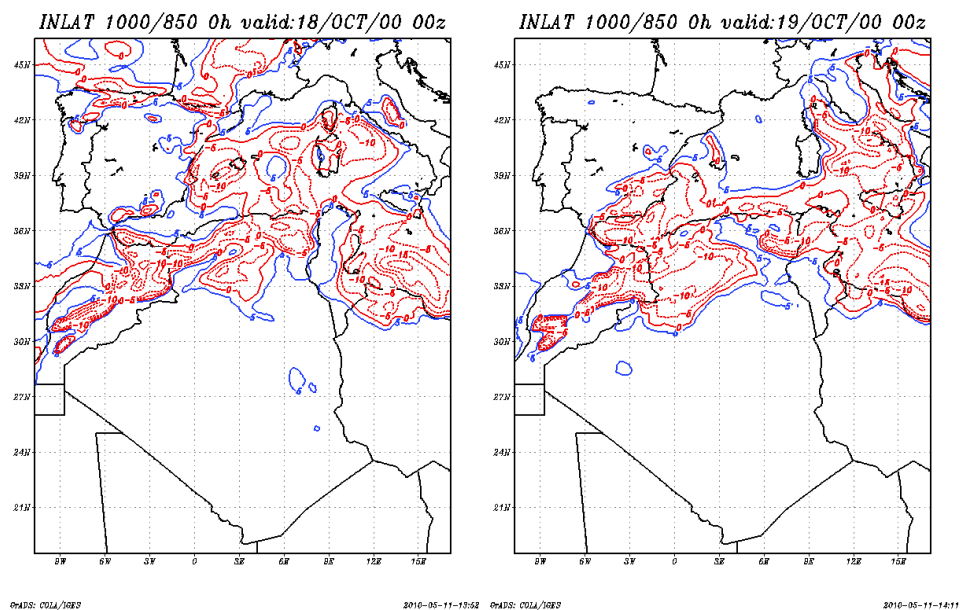


Figure 6. Champ de l'indice d'instabilité latente (INLAT)

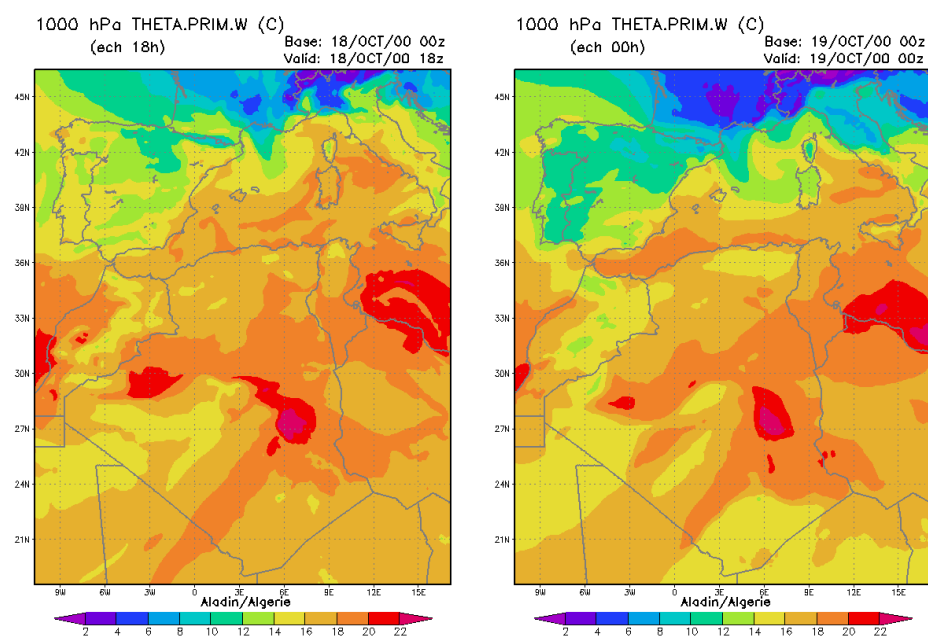


Figure 7. Champ de la θ'_w à $1000hPa$.

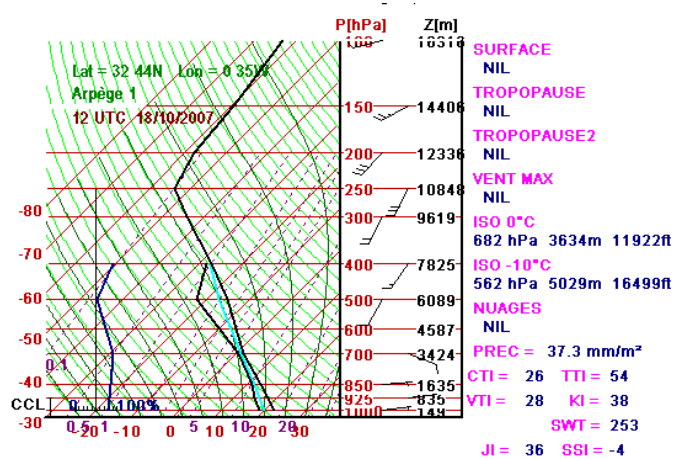


Figure 8. Radiosondage prévu par ARPEGE le 2017-10-18-12:00

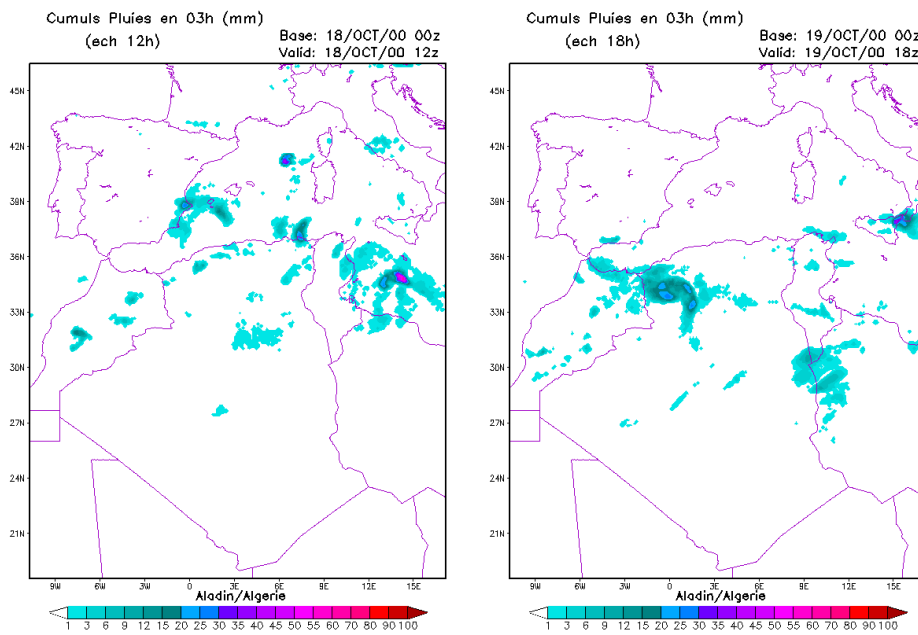


Figure 9. Champ de pluies

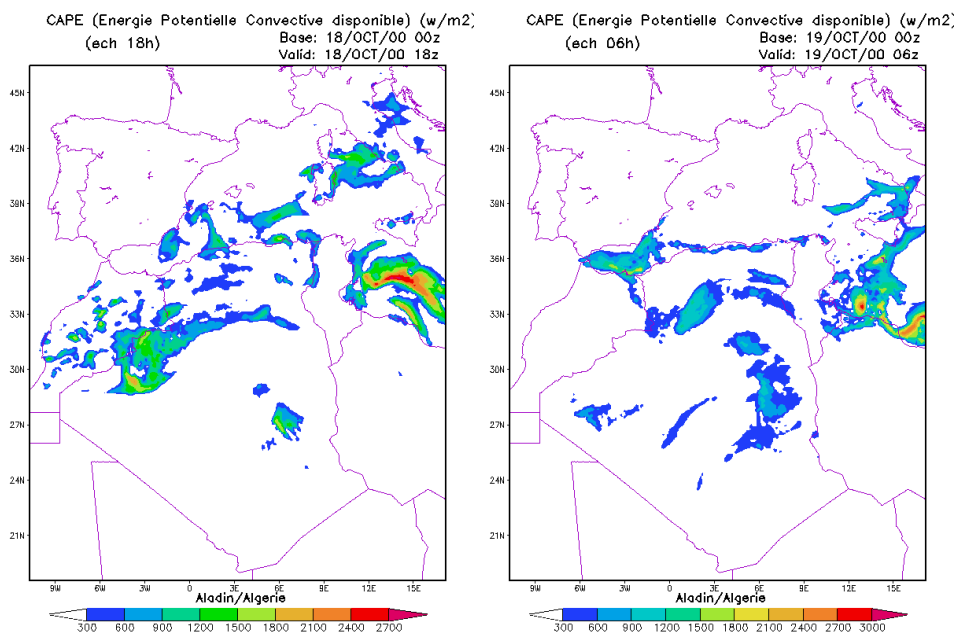


Figure 10. Champ de la CAPE

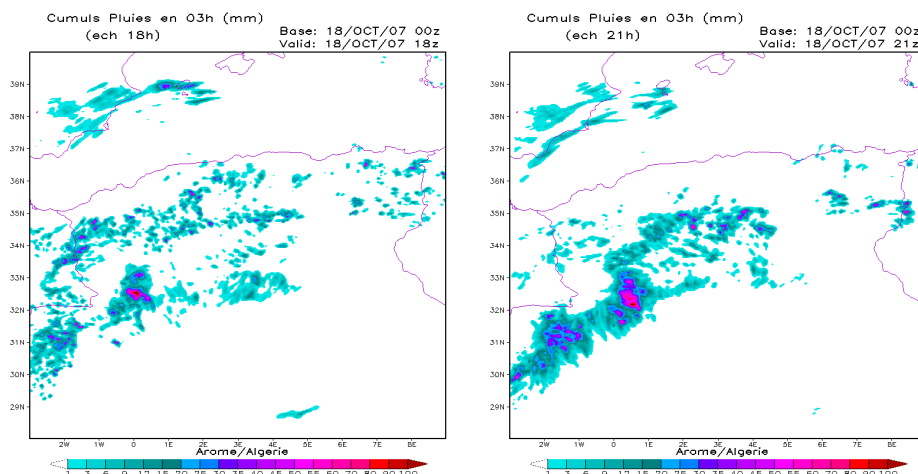


Figure 11. Champ de pluies simulé par AROME

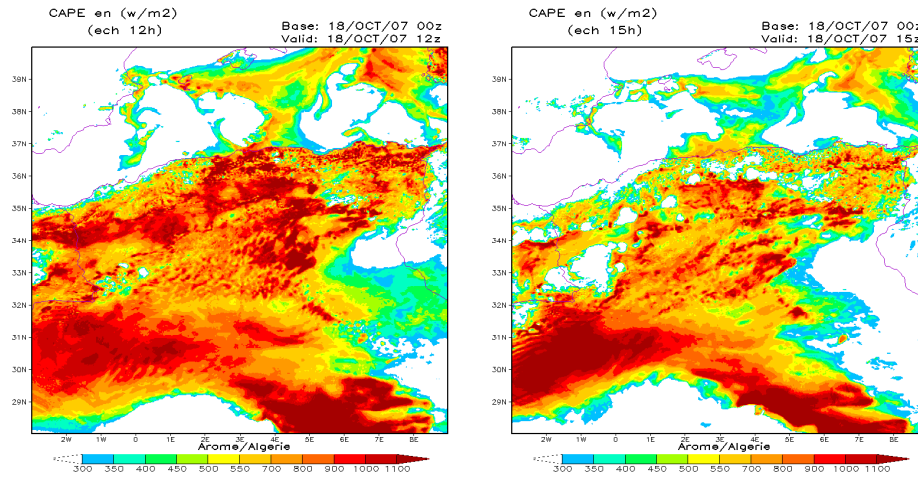


Figure 12. Champ de la CAPE simulé par AROME

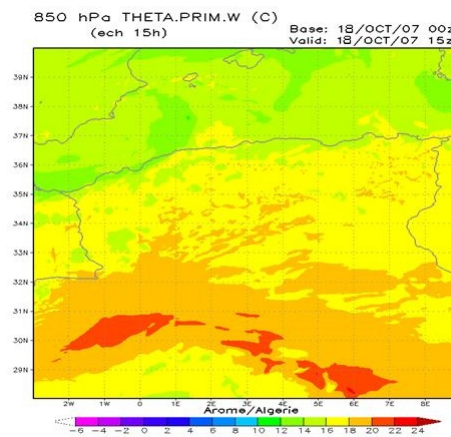


Figure 13. Champ de la θ'_w

Circulations atmosphériques de grande échelle associées aux extrêmes de température (canicules, nuits chaudes et vagues de chaleur) sur l'Algérie

Hakim ABANE ^{1*}, F. ABANE ¹, S. BOUCHERIT ¹, L. BAKHTI ¹

Résumé

Le but de cet article est de répondre au questionnement scientifique suivant : les régimes de circulations à grande échelle constituent-ils une bonne approche pour appréhender l'étude des canicules et vagues de chaleur sur l'Algérie ? Autrement dit : nous cherchions à savoir si à un signal de grande échelle spatiale correspondait une réponse à l'échelle locale. Les situations de grande échelle ont été obtenues à partir des champs de réanalyses ERA intérim fournies par le European Centre of Medium Range Weather Forecasts (ECMWF). Les données ERA intérim sont accessibles via le site: <http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/index.html>. Les données observées des températures maximales proviennent du Centre Climatologique National de l'Office National de la Météorologie (Algérie). Quatre types de temps définis par des conditions barométriques redondantes ont été identifiés. Les régimes de temps associés aux extrêmes étudiés ont été établis en utilisant une analyse composite. Ces derniers mettent en évidence des interactions entre les extrêmes climatiques et la circulation atmosphérique de grande échelle.

Mots Clés:

Circulations atmosphériques de grande échelle — Canicules — Vagues de chaleur — Nuits chaudes — types de temps

¹Institut Hydrométéorologique de Formation et de Recherches (IHFR), Oran, Algérie

*Correspondant: hakim73_a@yahoo.fr

1. Détermination des régimes de temps

La matrice de données issue des ré-analyse ERA-intérim, qui représente les données de la pression réduite au niveau de la mer (PSL) pour les mois de juin, juillet et août, de 1979 à 2015, soit 3404 jours a été compressée par une analyse en composantes principales ACP en 11 composantes principales permettant de représenter 90% de la variance totale. L'ACP permet de filtrer la variabilité de la fine échelle pouvant influencer la circulation de grande échelle.

Les 11 composantes principales sont à leur tour soumises à la méthode des nuées dynamiques afin d'en extraire les classes représentant les types de temps. La méthode de nuées dynamiques est très utilisée comme moyen statistique de classification du fait de sa simplicité de mise en oeuvre. Elle procède à une distribution des données en un nombre de classes défini par l'utilisateur de telle façon que les objets appartenant à la même classe soient aussi proches que possible entre eux et aussi loin que possible des objets des autres classes [Lepinas \(2008\)](#).

Dans un premier temps, on examine les changements moyens de pression réduite au niveau de la mer sur la zone Nord-Atlantique (figure 1).

Ensuite, on décrit les conditions synoptiques véhiculées par chaque type de temps, les anomalies associées à chaque type de temps sont également exposées [Kateřina Goubanova \(2007\)](#).

Ainsi en été, les changements moyens de PSL sont en général caractérisés par une vaste cellule anticyclonique centrée sur l'Atlantique entre 28°N et 42°N, cet anticyclone se prolonge vers l'Europe avec un décroissance de la pression. L'ensemble de l'Europe et le bassin méditerranéen observe des conditions faiblement dépressionnaires générant un flux du Nord-est.

Régime de blocage

Ce régime est caractérisé par une anomalie positive de pression sur l'Europe continentale, le flux perturbé atlantique étant rejeté sur le bassin atlantique nord-est. Les fortes anomalies positives sur le nord de l'Europe limitent la pénétration de l'air marin véhiculé par le flux d'ouest sur le nord de l'Europe. Ce type de temps est nommé "Blocage" [Boulard \(2010\)](#).

Une anomalie négative s'étend des Açores au bassin méditerranéen occidental, tandis qu'une anomalie positive s'étire du Groenland à la mer du Nord.

Régime de NAO- (North Atlantic Oscillation)

Une anomalie négative s'étend des Açores au bassin méditerranéen occidental, tandis qu'une anomalie positive s'étire du Groenland à la mer du Nord [Deschamps \(2011\)](#).

Régime de dorsale Atlantique AR (Atlantique Ridge)

Le régime de dorsale Atlantique s'identifie par un gonflement de l'Anticyclone des Açores recouvrant tout le bassin Méditerranéen, la zone de haute pression subtropicale est rejetée plus au Nord laissant place à l'air froid cyclonique d'origine polaire qui s'enfonce vers l'Europe centrale.

Cette configuration installe un temps sec sur l'Europe occidentale s'humidifiant en direction de l'Europe centrale.

Les anomalies associées à l'Atlantique Ridge sont humides et relativement chaudes au nord et sèches et relativement froides au sud, en particulier sur la péninsule ibérique [Tamara \(2008\)](#).

Régime NAO+ (North Atlantic Oscillation)

Ce régime de temps se présente par des anomalies positives de pression mer aux latitudes subtropicales s'étendant jusqu'à 45°N ; alors qu'une anomalie négative est

repérée sur les parties plus au Nord. Ceci correspond à un renforcement de l'anticyclone des Açores accompagné d'un flux zonal d'ouest sur le bassin atlantique et l'Europe de l'ouest Boe (2007).

Le type NAO+ est associé à un vaste anticyclone centré sur le proche Atlantique et s'étendant jusqu'à l'Europe centrale favorisant un flux général d'ouest. La dépression d'Islande se trouve décalée très au nord. Des pluies fréquentes sur l'Europe du nord, un temps sec sur le bassin méditerranéen et un déplacement vers le nord des couloirs dépressionnaires sont les caractéristiques météorologiques connues de ce type de temps.

2. Les extrêmes des températures

La méthodologie ci-dessous est généralisée à l'ensemble des stations d'observation disponibles. Les variables analysées comprennent la température journalière maximale et la température journalière minimale. Nous rappelons que seule la saison estivale est considérée dans la discussion des journées chaudes, vagues de chaleur et les nuits chaudes. Les résultats sont présentés sous forme de cartes composites et leurs anomalies.

Cartes composites des situations synoptiques expliquant les journées caniculaires

Le 95^e percentile a été retenu pour définir les journées caniculaires sur les séries journalières de températures maximales estivales (celles observées au cours de la période juin, juillet et août) des stations retenues sur la période de 1979-2010.

Le tableau suivant donne les valeurs du 95^e percentile des différentes villes considérées.

Table 1. 95^e percentile de chaque station utilisée dans l'étude. Le percentile est calculé sur les données journalières de tous les jours estivaux de chaque année, entre 1979 et 2010.

Station	Oran	Annaba	Constantine
P 95	36,6	41,6	40,2
Station	DEB	Mascara	Meliana
P 95	37,3	41,13	39,3

Le littoral

Les journées caniculaires sur le littoral algérien sont donc caractérisées par une situation synoptique définie par une zone anticyclonique sur le proche Atlantique qui voit son influence s'étendre jusqu'aux côtes ouest portugaises et françaises. Des conditions faiblement dépressionnaires sont observées sur une très bonne partie de l'Europe et le bassin Méditerranéen oriental, alors que la Méditerranée occidentale se trouve sous l'influence de conditions moyennes normales de pression moyenne proche de 1015hPa avec un flux de nord-est.

Les cartes des anomalies (figure 6) confirment que les journées caniculaires sur le littoral sont associées à des anomalies faiblement positives sur la Méditerranée occidentale et négative sur l'océan Atlantique et l'Europe du nord. On note un gradient barométrique marqué sur le littoral centre du pays.

On observe également un gradient barométrique moyen marqué entre le Portugal et l'Italie de telle façon qu'on

passse des anomalies négatives aux anomalies positives, ceci semble être en liaison avec l'installation des journées caniculaires sur les régions côtières et proches côtières du pays plus particulièrement les côtes centres. Le rôle de l'oscillation OMO n'est donc probablement pas négligeable.

Les régions de l'intérieur

Les caractéristiques météorologiques mises en évidence avec les composites du champ de pression mer et les journées caniculaires sur l'intérieur du pays confirment que les événements représentant des journées caniculaires sont caractérisés par un flux de nord-est tandis que la situation synoptique moyenne montre toujours une dépression de faible activité sur la Méditerranée occidentale. Ces cartes (figure 7) ne montre pas de différences significatives avec celles observées sur le littoral du pays ni sur le champ composite ni sur les anomalies qui restent faiblement positives marquant un gradient barométrique plus accentué sur le centre et l'ouest qu'à l'est.

Relations statistiques entre la circulation de grande échelle et les journées caniculaires sur le nord du pays

Les types de temps et les situations synoptiques illustrant les journées caniculaires sont maintenant connus, il est nécessaire d'observer d'éventuelles relations entre eux. Pour cela nous allons voir les résultats des relations statistiques dans le tableau ci-après.

Table 2. Corrélations, à partir des données d'anomalies, entre les types de temps et les journées caniculaires (valeurs en gras significatives au niveau $\alpha = 0,05$)

	Blocage	NAO-	Atlantic Ridge	NAO+
Littoral ouest	-0.308	+0.344	+0.256	+0.295
Littoral centre	-0.017	-0.165	-0.180	+0.307
Littoral Est	-0.345	-0.144	+0.573	-0.118
Intérieur ouest	-0.394	-0.116	+0.286	+0.170
Intérieur centre	-0.061	-0.080	+0.097	+0.024
Intérieur Est	-0.185	+0.281	+0.580	-0.590

En ne gardant que les valeurs les plus importantes, trois corrélations ressortent (tableau 2) :

- Corrélations entre le type de temps Atlantic Ridge et les journées caniculaires sur les régions est, aussi bien littorales qu'intérieures, qui sont corrélés positivement à respectivement 0.573 et 0.580
- Corrélation entre le type de temps NAO+ et les journées caniculaires dans les zones intérieures est du pays est négative à -0.590.

Cependant, il est important de souligner que la majorité des types de temps et les journées caniculaires sont corrélées entre elles, mais de façons plus ou moins significatives.

On signale qu'un même type de temps à l'origine des journées caniculaires sur une région donnée, peut ne pas installer un temps caniculaire sur une autre région du pays, c'est le cas par exemple du type NAO+ pouvant donner lieu à des journées caniculaires sur l'ouest du pays alors qu'il favorise un temps doux sur l'Est du pays.

Donc pour les besoins de notre étude, nous ne traiterons que les corrélations les plus significatives. Pour ces relations, on constate que plus la situation synoptique se

rapproche du type de temps Atlantic Ridge, la probabilité d'observer une journée caniculaire sur l'Est du pays augmente, plus le type de temps est de type NAO+, les températures seront douces sur l'Est, alors que le type de temps NAO- conditionne plutôt des températures douces sur l'ensemble du nord du pays.

Cartes composites des situations synoptiques expliquant les vagues de chaleur

On définit une vague de chaleur comme le nombre de jours appartenant à une succession d'un minimum de 3 jours avec une température maximale dépassant le 90^epercentile Deschamps (2011).

Table 3. 90^epercentile de chaque station utilisée dans l'étude. (réalisé sur les données journalières de tous les jours estivaux de chaque année, entre 1979 et 2010.

Station	Oran	Annaba	Constantine
P 90	34.61	40.2	39
Station	DEB	Mascara	Meliana
P 90	35.4	39.8	38.1

En effet, si on regarde les structures synoptiques moyennes représentant les vagues de chaleur sur le Nord du pays (figure 8), on remarque que les vagues de chaleur se produisent sous l'influence d'une très petite dépression voir des conditions moyennes normales de pression, la valeur de la pression moyenne est comprise entre 1014hPa et 1017hPa, le flux ainsi généré est de secteur nord-est. Les anomalies (figure 8) de ces événements mettent en évidence le fait que ces événements sont associés aux situations marquées par un gradient barométrique très important sur le nord du pays s'étendant du littoral et voit son influence s'étendre jusqu'aux régions intérieures. Nous avons également remarqué que, lors des épisodes de vagues de chaleur une transition entre anomalies négatives sur les côtes devenant positive vers l'intérieur.

La comparaison entre les stations examinées révèle une excellente ressemblance et concordance. Il est donc clair que les conditions générant les vagues de chaleur sont reproduites de la même façon sur l'ensemble des régions. Une petite exception est faite sur les anomalies du littoral est pour lesquelles le gradient barométrique est moins accentué avec des valeurs faiblement positives, la zone d'anomalies négatives est rejetée vers l'Europe du Nord.

Relations statistiques entre la circulation de grande échelle et les vagues de chaleur

Pour rechercher une relation statistique entre les types de temps et les conditions météorologiques favorables à l'installation des vagues de chaleur, il est important d'examiner les relations qui les lient. Les résultats sont résumés dans le tableau 4.

La corrélation négative entre le type de temps de blocage et les vagues de chaleur sur le littoral et les régions de l'intérieur ouest montre que ces deux éléments varient de façon opposée (tableau 4).

On peut donc émettre la conclusion suivante : plus la configuration atmosphérique ressemble au type de temps blocage, moins les vagues de chaleur sont présentes, ceci est particulièrement vrai pour le littoral ouest. De même

Table 4. Corrélations, à partir des données d'anomalies, entre les types de temps et les vagues de chaleur (valeurs en gras significatives au niveau $\alpha = 0,05$).

	Blocage	NAO-	Atlantic Ridge	NAO+
Littoral ouest	−0.631	+0.294	+0.778	−0.391
Littoral centre	−0.238	−0.150	+0.032	+0.294
Littoral est	−0.166	−0.441	+0.329	+0.176
Intérieur ouest	−0.086	−0.352	+0.083	+0.267
Intérieur centre	+0.104	−0.681	−0.212	+0.624
Intérieur est	+0.053	+0.005	+0.452	−0.470

que pour le type NAO- , plus la configuration atmosphérique est proche du type de temps NAO-, moins les vagues de chaleurs sont observées sur le littoral centre et est et l'intérieur centre et ouest, avec une augmentation de probabilité pour les régions intérieures centres. A l'opposé, la forte corrélation positive entre le type de temps Atlantic Ridge et les vagues de chaleur sur le littoral ouest, démontre le fort lien entre ces deux phénomènes. Plus la configuration atmosphérique est de la forme Atlantic Ridge, plus les vagues de chaleurs sont observées sur le littoral ouest, d'une façon moins importante sur l'intérieur est.

On signale ainsi la forte corrélation positive entre le régime NAO+ et les vagues de chaleur sur l'intérieur centre, alors que les températures sont beaucoup plus douces sur le littoral ouest et l'intérieur Est.

On peut donc conclure que l'installation de vagues de chaleur sur l'ensemble du nord du pays est fortement influencée par les grands types de temps. C'est-à-dire que la configuration des flux d'air venant de l'océan atlantique influence fortement leurs répartitions.

Cependant pour certains phénomènes, le manque de significativité de leurs relations statistiques avec les grands types de temps démontre que dans ces configurations de vagues de chaleur, les grands types de temps ne sont pas les facteurs principaux. Il y a donc d'autres phénomènes influençant leurs installations.

Cartes composites des situations synoptiques expliquant les nuits chaudes

On définit une nuit chaude comme une nuit dont la température minimale dépasse le 95^epercentile. Le tableau 4 donne les valeurs des 95^epercentiles des différentes stations.

Table 5. 95^epercentile de chaque station utilisée dans l'étude le percentile est réalisé sur les données journalières de tous les jours estivaux de chaque année, entre 1979 et 2010.

Station	Oran	Annaba	Constantine
P 95	23.4	28	22.7
Station	DEB	Mascara	Miliana
P 95	23.6	22.93	27.2

La figure (10) présente les conditions liées aux événements de nuits chaudes dans les différentes régions examinées. De même que pour les vagues de chaleur, la situation synoptique moyenne associée aux nuits chaudes indique une petite dépression localisée sur l'ensemble du pourtour méditerranéen avec un anticyclone en plein océan atlantique qui n'a pas changé de position d'une région à une autre.

Cette situation moyenne ainsi observable ne discrimine donc pas une différence synoptique de manifestations des nuits chaudes sur le nord du pays.

Raisonnant par rapport aux anomalies, il apparaît clairement que les nuits chaudes sur l'intérieur ouest et centre du pays sont associées à un gradient barométrique assez serré et fait toujours un passage des anomalies négatives sur le littoral à des anomalies positives en direction de l'intérieur. Pour l'Est du pays, des anomalies négatives de pression générant un gradient barométrique fort semblent être responsables de l'instauration des nuits chaudes. Alors que les régions du littoral sont plutôt caractérisées par des anomalies faiblement positives avec un gradient barométrique faible sur l'ouest et le centre, plus affaibli sur l'Est.

Relations statistiques entre la circulation de grande échelle et les nuits chaudes

L'objet de cette partie est d'apporter des éléments de réponse quant à la part des régimes de temps dans l'observation des nuits chaudes.

Nous discutons également l'intensité de la relation entre les types de temps et les situations synoptiques favorisant les nuits chaudes.

Table 6. Les corrélations, à partir des données d'anomalies, entre les types de temps et les nuits chaudes (Valeurs en gras significatives au niveau $\alpha = 0,05$).

	Blocage	NAO-	Atlantic Ridge	NAO+
Littoral ouest	+0.003	-0.595	-0.388	+0.811
Littoral centre	+0.275	-0.596	-0.569	+0.741
Littoral Est	+0.290	-0.321	-0.089	+0.071
Intérieur ouest	-0.051	-0.590	-0.193	+0.673
Intérieur centre	+0.013	-0.482	-0.160	+0.451
Intérieur Est	+0.144	-0.166	+0.280	-0.261

Il en ressort que les types de temps NAO-, Atlantic Ridge et NAO+ semblent être en liaison avec l'observation des nuits chaudes sur le nord du pays. Cependant, la comparaison de ces trois types de temps montre des différences significatives pour certaines régions, , mettant ainsi en évidence l'existence de liaisons négatives entre les types NAO- et Atlantic Ridge sur la majorité du nord Algérien autrement dit plus que les conditions synoptiques ressemblent à ces deux régimes moins les nuits chaudes sont observées.

Les différences significatives observées concernent le type NAO + qui présente une corrélation positive significative très importante sur l'ensemble des régions Nord du pays à l'exception de l'intérieur Est.

Il serait donc intéressant de construire une idée qui attribue l'installation des nuits chaudes au régime NAO +.

3. Conclusion

Afin de caractériser les extrêmes climatiques par types de temps, une identification des circulations de grande échelle qui règnent sur l'Atlantique Nord en période estivale a été menée. Les configurations synoptiques correspondantes aux phénomènes extrêmes ont été élaborées.

Afin d'évaluer la relation statistique entre les types de temps ainsi identifiés et les situations représentant les extrêmes, le coefficient de corrélation linéaire a été calculé.

L'influence des régimes sur les conditions locales de température peut être résumée comme suit :

- Le régime zonal (NAO+) de la saison estivale est corrélé positivement aux régimes donnant les journées caniculaires à l'exception de la région est où cette corrélation était négative. Ce même régime de temps peut favoriser des vagues de chaleur sur le Nord du pays d'une façon plus importante sur l'intérieur centre, alors que le littoral ouest et l'intérieur est n'observent pas de vagues de chaleur lorsque le régime de temps s'apparente à du NAO +, les nuits chaudes sont fortement liées dans un sens positif à du NAO + à l'exception de l'intérieur est. Le régime zonal favorise l'apparition des phénomènes : vagues de chaleur, nuits chaudes et journées caniculaires, malgré que sa fréquence d'apparition ne dépasse pas 25%.
- L'Anticyclone du Groenland (NAO-) est relativement non responsable au cours de l'été des journées caniculaires et des vagues de chaleur sur le nord du pays à l'exception des régions intérieures , la plus forte corrélation négative est observée sur le littoral ouest autrement dit, le régime NAO- favorise des journées plutôt douces. Par contre une relation trop faible est observée entre le NAO- et les nuits chaudes sur l'ensemble nord du pays.
- Le Blocage est associé aux événements extrêmes sur toute la zone Nord du pays, il ne favorise pas des journées caniculaires, ni vagues de chaleur ni nuits chaudes.
- La Dorsale Atlantique s'est avérée comme le régime le plus favorable à l'instauration des journées caniculaires et vagues de chaleur sur le littoral ouest, est et l'intérieur est.

Références

Boe, J. (2007). *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France*. PhD thesis, Université Paul Sabatier.

Boulard, D. (2010). *Modes de variabilité des températures de surface océanique du bassin méditerranéen (1989-2008)*. PhD thesis, Université de la Bourgogne.

Deschamps, Q. (2011). *Conditions atmosphériques associées aux précipitations intenses du bassin méditerranéen*. PhD thesis, Université de Bourgogne.

Katerina Goubanova (2007). *Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution future*. PhD thesis, Université Paris6.

Lespinas, R. F. (2008). *Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc*. PhD thesis, Université de Perpignan.

Tamara, S. (2008). *Modélisation multi-échelles de la circulation atmosphérique hivernale sur le bassin rôle des interactions d'échelle*. PhD thesis.

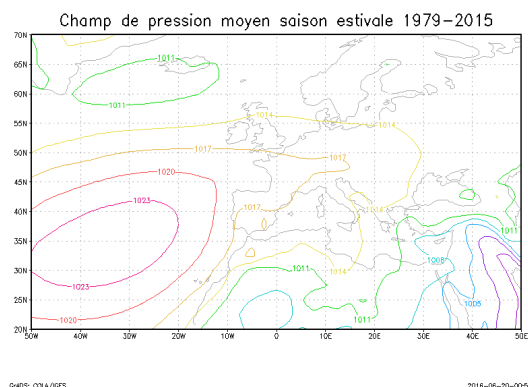


Figure 1. Champ de pressions moyen

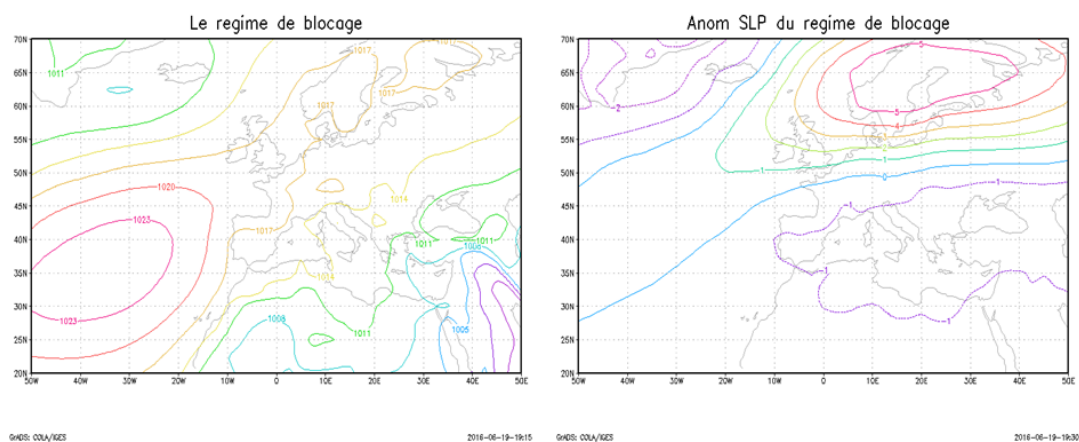


Figure 2. Champ de pressions moyen correspondant au régime de blocage : 24,97%

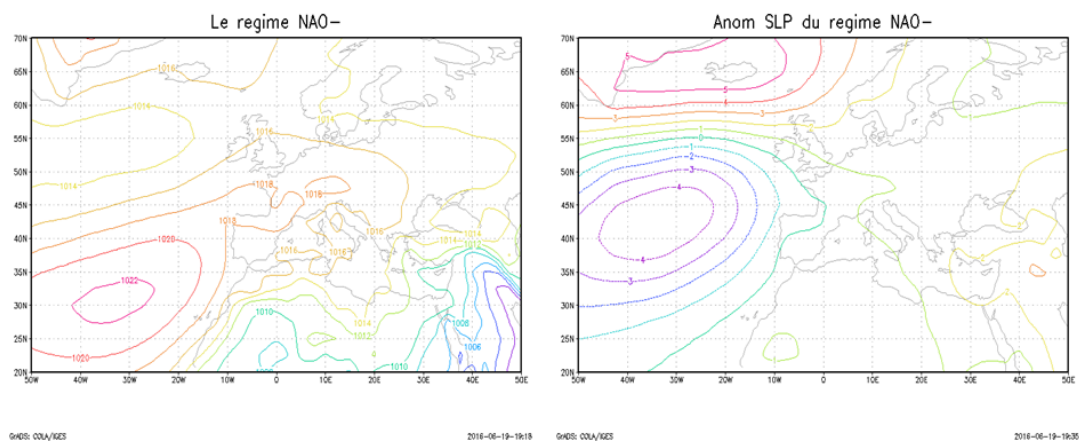


Figure 3. Champ de pressions moyen correspondant au régime de NAO- : 24,65%

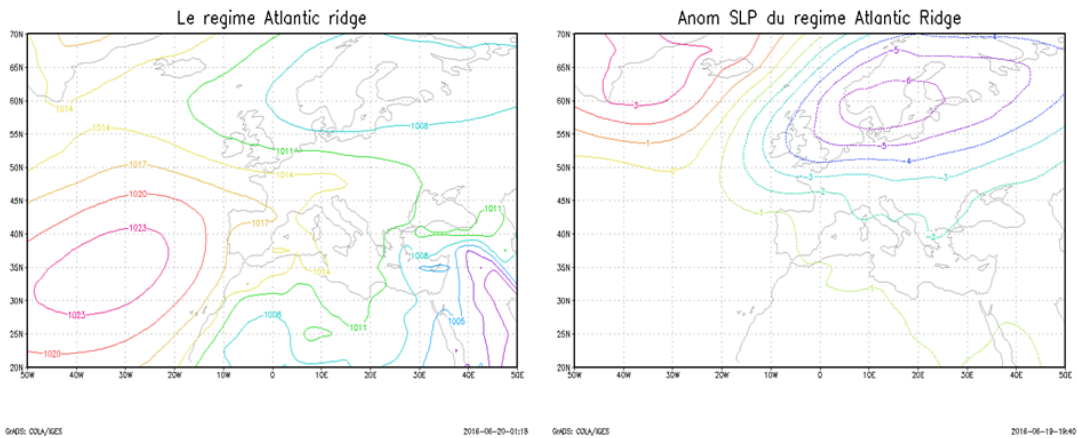


Figure 4. Champ de pressions moyen correspondant à Atlantique Ridge : 18,98%

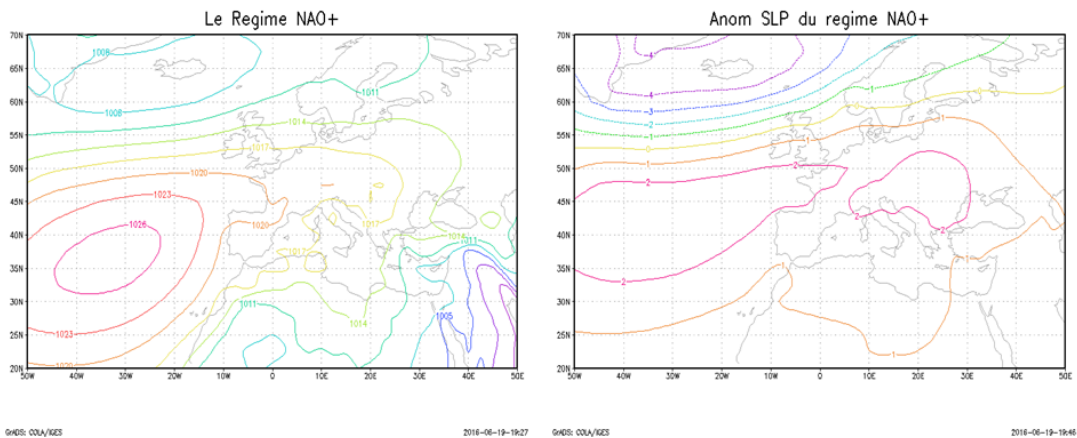


Figure 5. Champ de pressions moyen correspondant à NAO+ : 31,40%

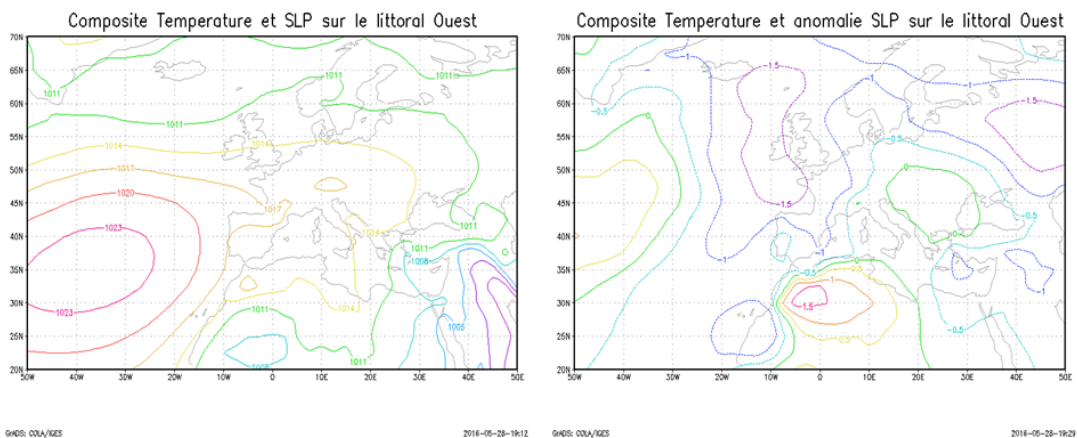


Figure 6. Cartes composites entre SLP et les journées caniculaires sur le littoral

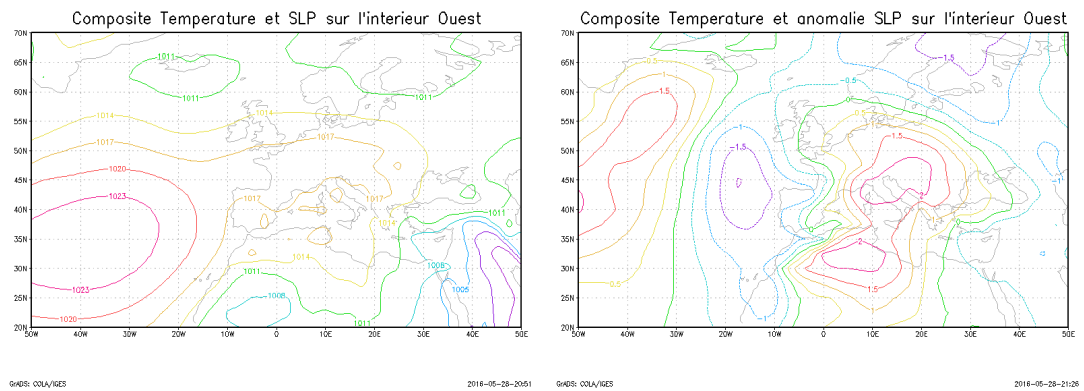


Figure 7. Cartes composites entre SLP et les extrêmes de température : journées caniculaires sur l'intérieur

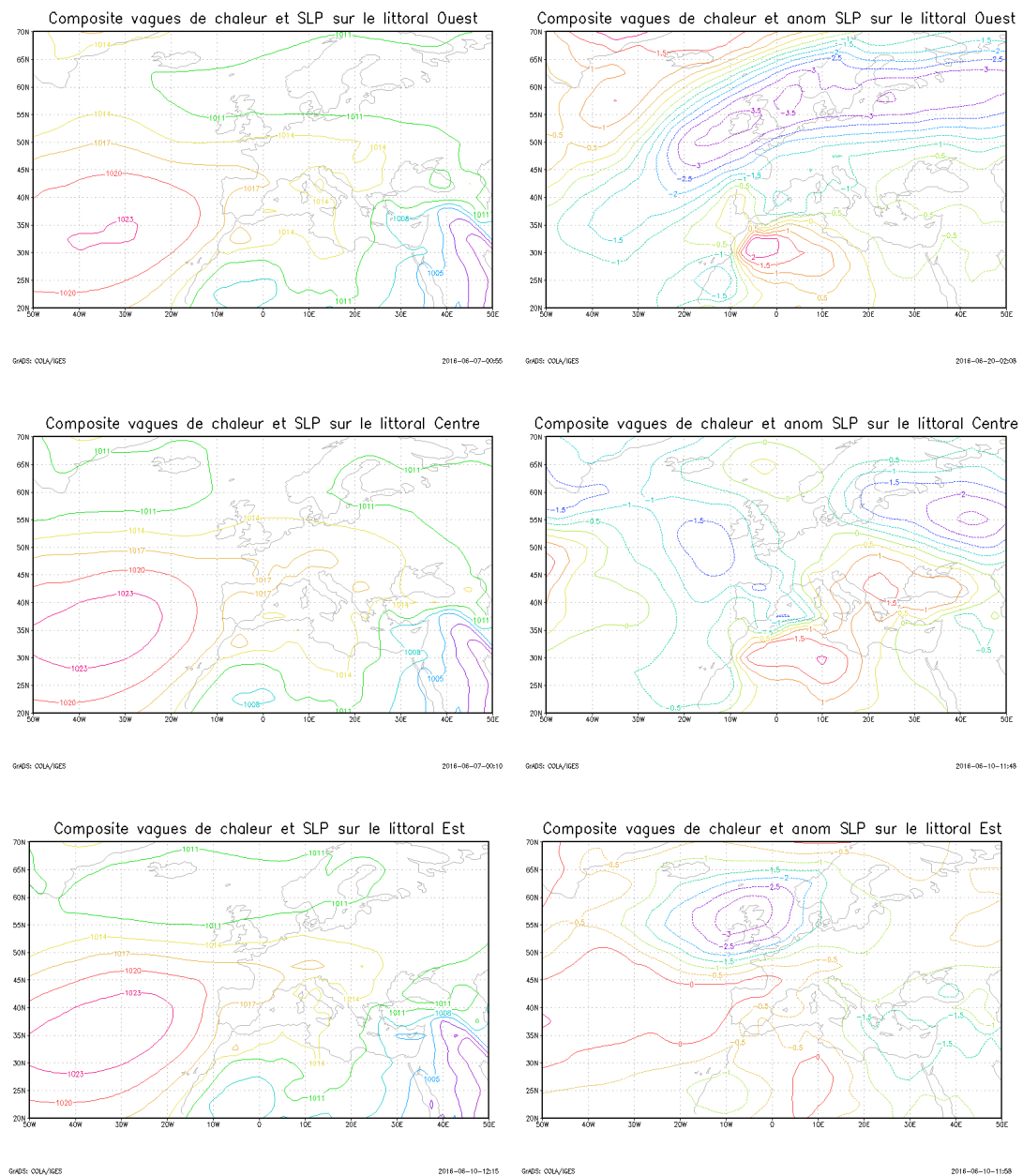


Figure 8. Cartes composites entre SLP et les extrêmes de température : vagues de chaleur sur le littoral

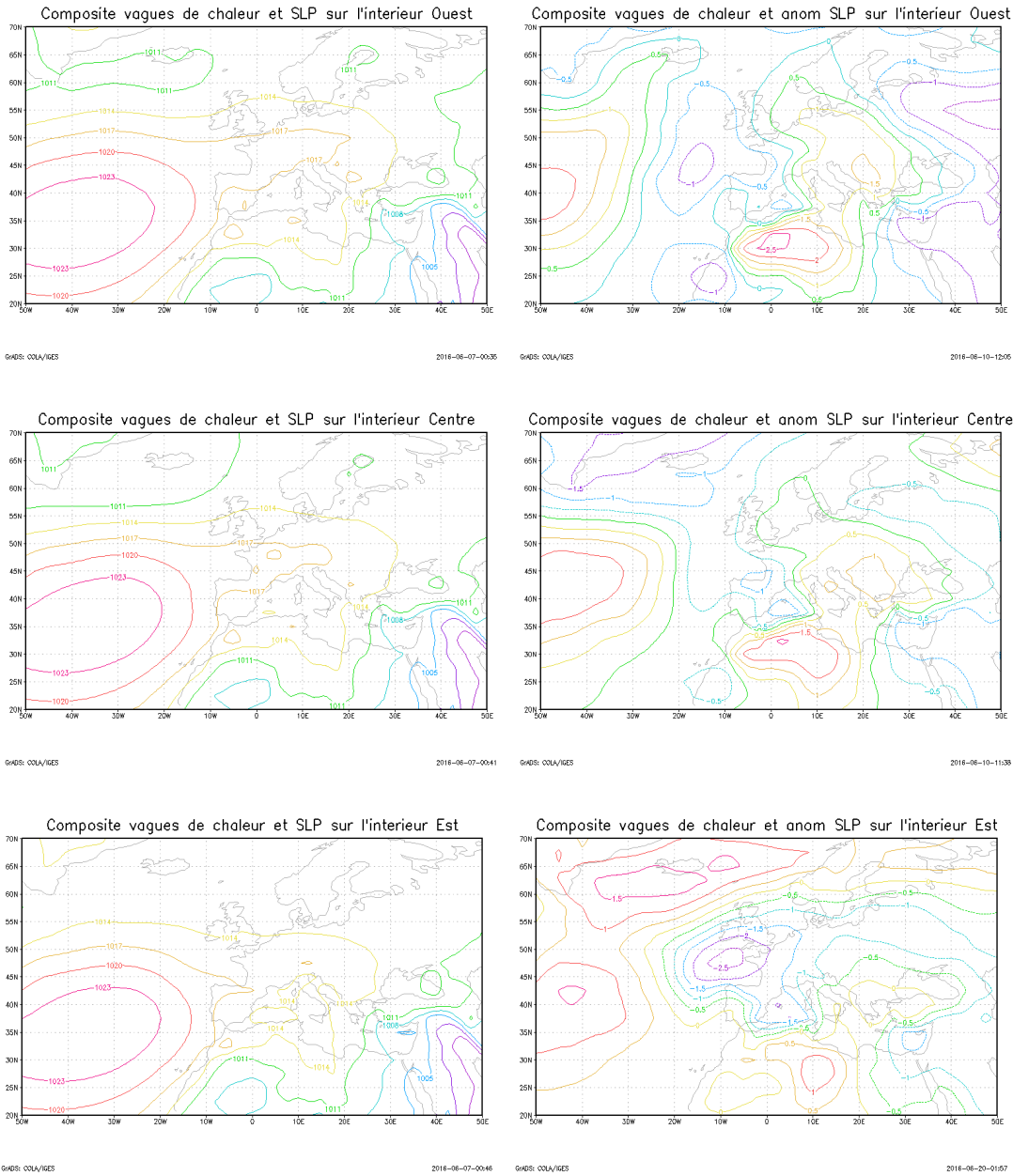


Figure 9. Cartes composites entre SLP et les extrêmes de température : vagues de chaleur sur l'intérieur

Approche Statistique de la modélisation des phénomènes lithométéores

Hakim ABANE ^{1*}, Papa Ngor NDIAYE ¹, Mouhamadou Moustaphaa KAMARA ¹

Résumé

Les lithométéores représentent des types de temps caractéristiques des régions arides et semi-arides. Malgré l'existence d'une typologie variée, l'identification de ces phénomènes reste toujours liée à l'appréciation de l'observateur. Les aérosols, en aggravant les conditions météorologiques, peuvent intervenir dans divers aspects socio-économiques, notamment en nuisant au trafic aérien ou à la télétransmission. Comme la modélisation statistique est un outil contemporain de la prévision ; l'étude menée a permis d'élaborer un modèle statistique de régression logistique binaire dédié à la prévision de l'occurrence ou non des phénomènes lithométéores résultant des émissions d'aérosols désertiques. Les résultats ainsi obtenus expliquent la performance de la méthode utilisée.

Mots Clés:

Phénomènes lithométéores — Modélisation statistique — Régression logistique binaire

¹Institut Hydrométéorologique de Formation et de Recherches, Oran, Algérie

*Correspondant: hakim73_a@yahoo.fr

1. Introduction

Le développement des outils d'aide à la prévision est devenu une nécessité pour remédier aux problèmes dus parfois à la divergence des modèles numériques ou à la complexité du phénomène à prévoir. Le présent article est dédié à l'élaboration d'un modèle statistique qui servira à la prévision de l'occurrence d'un phénomène lithométéore sur la région de Bechar.

2. Données et méthodes

Les données

Ce sont des données quotidiennes de la station d'observation de Bechar, provenant de la banque climatique de l'office national de la météorologie (ONM). Elles couvrent la période 1990-2000, soit 22 mois (juillet et août) de 11 saisons estivales ou ont été extraites, soit un total de 682 relevés journaliers.

Une gestion de données a été menée afin d'aboutir à un seul fichier de forme enregistrement tabulaire. Cette forme est propice pour mettre en œuvre les algorithmes d'apprentissage. Elle permet d'associer la valeur à prédire avec les variables prédictives.

Les paramètres météorologiques utilisés comme prédicteurs sont :

- La température T de l'air à 2m du sol
- La force et la direction du vent à 10m du sol
- La nébulosité N
- La pression à la station

Le prédicteur est l'occurrence de phénomène lithométéore.

A partir de la base de données élaborée, trois échantillons ont été construits

- Echantillon d'apprentissage constitué de 342 jours d'observations, qui va servir par la suite à la sélection des prédicteurs.
- Echantillon test constitué de 278 jours d'observations, qui vont servir à la validation des prédicteurs choisis.

- Echantillon validation constitué de 62 jours pour valider le modèle élaboré.

Description de la Méthodologie

L'approche statistique utilisée consiste à :

- Faire une sélection de variables à la liste de prédicteurs déjà établie pour en choisir les meilleurs
- Utiliser la régression logistique binaire qui consiste à établir une expression de régression entre une ou plusieurs variables indépendantes appelées « prédicteurs » et une variable dépendante dichotomique appelée « prédicteur »
- Chercher à valider ce modèle en soumettant les résultats obtenus aux observations faites à des stations spécifiques

La sélection des variables avec le logiciel R : la stratégie WRAPPER

La sélection de variables est un aspect essentiel de l'apprentissage supervisé. Nous devons déterminer les variables pertinentes pour la prédiction des valeurs de la variable à prédire, pour différentes raisons : un modèle plus simple sera plus facile à comprendre et à interpréter ; le déploiement sera facilité, nous aurons besoin de moins d'informations à recueillir pour la prédiction ; enfin, un modèle simple se révèle souvent plus robuste en généralisation c.-à-d. lorsqu'il est appliqué sur la population.

L'approche WRAPPER utilisée sur R cherche à optimiser un critère de performance pour la recherche du sous-ensemble de prédicteurs pertinents en présentant à la méthode d'apprentissage des scénarios de solutions. Le plus souvent, il s'agit du taux d'erreur. Mais en réalité, tout critère peut convenir par exemple l'introduction d'une matrice de coûts de mauvais classements ; le calcul de l'aire sous la courbe ROC [Didacticiel Tanagra et R \(2009\)](#).

Stratégie de recherche

La stratégie de recherche des solutions joue un rôle très important dans la stratégie WRAPPER. Si l'on s'en tient au taux d'erreur, on pourrait subdiviser les données en

échantillons d'apprentissage et de test : construire le modèle sur les premières données, évaluer les performances sur les secondes, en vue de sélectionner les variables pertinentes. Séduisante a priori, cette approche n'est pas exempte de reproches. L'échantillon test, censé constituer un juge impartial pour l'évaluation des performances, devient partie prenante dans l'apprentissage. Il est explicitement exploité pour choisir la meilleure solution. Il est de ce fait inutilisable pour estimer objectivement l'erreur en généralisation.

Il semble qu'une approche viable serait toujours de subdiviser les données en apprentissage et test, mais de se baser sur une méthode de ré-échantillonnage (la validation croisée la plupart du temps) sur la première partie des données pour évaluer les différentes solutions et sélectionner celle qui paraît la plus pertinente. L'ensemble test ne servira que pour mesurer les performances du modèle finalement sélectionné. Ainsi, il joue le rôle qui lui est normalement dévolu : évaluer objectivement la performance sans prendre part ni à la construction, ni à la sélection des modèles.

La méthode « NAIVE BAYES » (modèle d'indépendance conditionnelle) est utilisée dans le processus de sélection WRAPPER. Elle recherche des causalités entre les variables prédictives et la variable à prédire, plus le nombre de variables retenu est faible, meilleure sera la lisibilité du modèle prédictif. Elle est bien adaptée aux variables prédictives catégorielles, c'est le cas de nos données ; elle n'intègre pas un processus interne de sélection ; et elle est sensible aux variables non pertinentes. Ainsi, l'influence de la sélection de variables sur la performance sera particulièrement visible [Didacticiel Tanagra et R \(2009\)](#).

La Régression Logistique binaire

La Régression Logistique est une technique de modélisation statistique qui, dans sa version la plus répandue, vise à prédire et expliquer les valeurs d'une variable catégorielle binaire Y (variable à prédire, variable expliquée, variable dépendante, attribut classe, variable endogène) à partir d'une collection de variables X continues ou binaires (variables prédictives, variables explicatives, variables indépendantes, descripteurs, variables exogènes).

Elle fait partie des méthodes d'apprentissage supervisé ; elle peut s'inscrire dans le cadre de la régression linéaire généralisée ; elle peut être vue comme une variante de la régression linéaire multiple, bien connue en économétrie ?.

Problématique En apprentissage supervisé l'objectif est de prédire les valeurs prises par la variable aléatoire Y définie dans $\{y_1, y_2, \dots, y_k\}$. Pour la régression logistique binaire Y , prend uniquement deux modalités $\{+, -\}$ ou $\{1, 0\}$.

Nous disposons d'un échantillon Ω de taille n . La valeur prise par Y pour un individu ω est notée $Y(\omega)$. Le fichier comporte j descripteurs $\{X_1, X_2, \dots, X_j\}$. Le vecteur de valeurs pour un individu ω s'écrit $(X_1(\omega), \dots, X_j(\omega))$.

Dans le cadre binaire, pour un individu donné supposé être positif, sa probabilité s'écrit :

$$P[Y(\omega) = +] = p(\omega) \quad (1)$$

Lorsque l'échantillon est issu d'un tirage aléatoire dans

la population, sans distinction des classes d'appartenance, si n_+ est le nombre d'observations positives dans Ω , p peut être estimée par $\frac{n_+}{n}$. La probabilité a posteriori d'un individu ω d'être positif c.-à-d. sachant les valeurs prises par les descripteurs est notée :

$$P[Y(\omega) = +/X(\omega)] = p(\omega) \quad (2)$$

Ce dernier terme est très important. En effet, c'est la probabilité que l'on cherche à modéliser en apprentissage supervisé.

Le LOGIT d'un individu ω s'écrit

$$\ln \left[\frac{\pi(\omega)}{1 - \pi(\omega)} \right] = a_0 + a_1 X_1(\omega) + \dots + a_j X_j(\omega) \quad (3)$$

$a_0, a_1, \dots, a_j$ sont les paramètres que l'on souhaite estimer à partir des données.

Lorsque nous adoptons une écriture matricielle, nous écrirons

$$\ln \left[\frac{\pi(\omega)}{1 - \pi(\omega)} \right] = X(\omega) * a \quad (4)$$

Avec $X(\omega) = (1, X_1(\omega), X_2(\omega), \dots, X_j(\omega))$, la première constante ($X_0(\omega) = 1, \forall \omega$) symbolise la constante ; $a = (a_0, a_1, \dots, a_j)$ est le vecteur des paramètres.

Enfin, toujours pour alléger l'écriture, nous omettons le terme ω lorsque cela est possible.

Nous obtenons une série d'indicateurs lorsque nous le traitons avec le logiciel R. Certaines permettent d'évaluer la qualité globale de la régression, d'autres permettent de juger la contribution individuelle de chaque variable. Expliciter les principes qui régissent la méthode et décrire les formules associées pour que nous sachions lire en connaissance de cause les résultats constituant les objectifs de ce support.

Le modèle LOGIT

La régression logistique peut être décrite d'une autre manière. Pour un individu, on appelle transformation LOGIT de $\pi(\omega)$ l'expression

$$LOGIT = \ln \left[\frac{\pi(\omega)}{1 - \pi(\omega)} \right] = a_0 + a_1 X_1(\omega) + \dots + a_j X_j(\omega) \quad (5)$$

Posons : $C(X) = a_0 + a_1 X_1(\omega) + \dots + a_j X_j(\omega)$

Nous pouvons revenir sur π avec la fonction logistique.

$$\pi = \frac{\exp(C(X))}{1 + \exp(C(X))} = \frac{1}{1 + \exp(-C(X))} \quad (6)$$

Quelques commentaires et remarques

A propos de la fonction de transformation,

- Le $LOGIT = C(X)$ est théoriquement défini entre $-\infty$ et $+\infty$
- En revanche, $0 \leq \pi \leq 1$ issue de la transformation de $C(X)$ représente une probabilité.
- $C(X)$ et π permettent tous deux de "scorer" les individus, et ainsi de les classer selon leur propension à être "positif".
- π représente une probabilité, avec les propriétés inhérentes à une probabilité, entres autres

$$P(Y = +/X) + P(Y = -/X) = 1 \quad (7)$$

- la fonction de transfert logistique est non linéaire, c'est en ce sens que l'on qualifie la régression logistique de régression non-linéaire dans la littérature.

La règle d'affectation peut être basée sur π de différentes manières

- Si $\frac{\pi}{1-\pi} > 1$ alors $Y = +$
- Si $\pi > 0.5$ alors $Y = +$

Elle peut être aussi basée simplement sur $C(X)$ avec :

- Si $C(X) > 0$ alors $Y = +$

Evaluation de la régression

Maintenant que nous avons construit un modèle de prédiction, il faut en évaluer l'efficacité. Nous pouvons le faire de différentes manières :

- Confronter les valeurs observées de la variable dépendante avec les prédictions .
- Comparer les vraies valeurs π avec celles prédites par le modèle . En effet, n'oublions pas que la régression logistique sait fournir une bonne approximation de cette quantité. Elle peut se révéler très utile lorsque nous souhaitons classer les individus selon leurs degrés de positivité ou introduire d'autres calculs ultérieurement [Rakotomalala \(2011\)](#).

La matrice de confusion La matrice de confusion confronte toujours les valeurs observées de la variable dépendante avec celles qui sont prédites, puis comptabilise les bonnes et les mauvaises prédictions. Son intérêt est qu'elle permet à la fois d'appréhender la quantité de l'erreur (le taux d'erreur) et de rendre compte de la structure de l'erreur (la manière de se tromper du modèle).

Table 1. Forme générique de la matrice de confusion

$\hat{Y} \backslash Y$	$\hat{+}$	$\hat{-}$	Total
$+$	a	b	$a+b$
$-$	c	d	$c+d$
Total	$a+c$	$b+d$	$n = a+b+c+d$

Dans un problème à 2 classes (+vs.-), à partir de la forme générique de la matrice de confusion (Tableau1), plusieurs indicateurs peuvent être déduits pour rendre compte de la concordance entre les valeurs observées et les valeurs prédites. Nous nous concentrons sur les ratios suivants :

a sont les vrais positifs c.-à-d. les observations qui ont été classées positives et qui le sont réellement. b sont les faux positifs c.-à-d. les individus classés positifs et qui sont en réalité des négatifs. De la même manière, c sont les faux négatifs et d sont les vrais négatifs. Mais ces termes sont peu utilisés en pratique car les positifs et les négatifs n'ont pas le même statut dans la majorité des études (ex. les positifs sont les fraudeurs que l'on cherche à isoler ; les positifs sont les personnes atteintes d'une maladie que l'on cherche à détecter ; etc.). Le taux d'erreur est égal au nombre de mauvais classement rapporté à l'effectif total c.-à-d.

$$\epsilon = \frac{b+c}{n} = 1 - \frac{a+d}{n} \quad (8)$$

Il estime la probabilité de mauvais classement du modèle. Le taux de succès correspond à la probabilité de

bon classement du modèle, c'est le complémentaire à 1 du taux d'erreur

$$\theta = \frac{a+d}{n} = 1 - \epsilon \quad (9)$$

La sensibilité (ou le rappel, ou encore le taux de vrais positifs [TVP]) indique la capacité du modèle à retrouver les positifs

$$Se = Sensibilite = TVP = rappel = \frac{a}{a+b} \quad (10)$$

La précision indique la proportion de vrais positifs parmi les individus qui ont été classés positifs .

$$precision = \frac{a}{a+c} \quad (11)$$

Elle estime la probabilité d'un individu d'être réellement positif lorsque le modèle le classe comme tel. Dans certains domaines, on parle de valeur prédictive positive ([VPP]) .

La spécificité, à l'inverse de la sensibilité, indique la proportion de négatifs détectés

$$Sp = Specificite = \frac{d}{c+d} \quad (12)$$

Parfois, on utilise le taux de faux positifs ([TFP]) , il correspond à la proportion de négatifs qui ont été classés positifs c.-à-d.

$$TFP = Specificite = \frac{c}{c+d} = 1 - Sp \quad (13)$$

Quelques remarques sur le comportement de ces indicateurs :

Un "bon" modèle doit présenter des valeurs faibles de taux d'erreur et de taux de faux positifs (proche de 0) ; des valeurs élevées de sensibilité, précision et spécificité (proche de 1).

Le taux d'erreur est un indicateur symétrique, il donne la même importance aux faux positifs (c) et aux faux négatifs (b).

La sensibilité et la précision sont asymétriques, ils accordent un rôle particulier aux positifs.

Enfin, en règle générale, lorsqu'on oriente l'apprentissage de manière à améliorer la sensibilité, on dégrade souvent la précision et la spécificité. Un modèle qui serait meilleur que les autres sur ces deux groupes de critères antinomiques est celui qu'il faut absolument retenir ?.

Test de Hosmer-Lemeshow Le test de Hosmer-Lemeshow relève à peu près de la même logique que le diagramme de fiabilité. A la différence qu'au lieu de se baser simplement sur une impression visuelle, on extrait du tableau de calcul un indicateur statistique qui permet de quantifier la qualité des estimations .

La courbe ROC : La courbe ROC est un outil très riche. Son champ d'application dépasse largement le cadre de l'apprentissage supervisé. Elle est par exemple très utilisée en épidémiologie. Pour nous, elle présente surtout des caractéristiques très intéressantes pour l'évaluation et la comparaison des performances des classificateurs :

1. Elle propose un outil graphique qui permet d'évaluer et de comparer globalement le comportement des classifieurs.

2. Elle est indépendante des coûts de mauvaise affectation. Elle permet par exemple de déterminer si un classifieur surpasse un autre, quelle que soit la combinaison de coûts utilisée.
3. Elle est opérationnelle même dans le cas des distributions très déséquilibrées. Mieux, même si les proportions des classes ne sont pas représentatives des probabilités a priori dans le fichier - c'est le cas lorsque l'on procède à un tirage rétrospectif c.-à-d. on fixe le nombre de positifs et négatifs à obtenir, et on tire au hasard dans chaque sous-population - la courbe ROC reste valable.
4. Enfin, on peut lui associer un indicateur synthétique, le critère (aire sous la courbe, en anglais area undercurve), que l'on sait interpréter.

La courbe ROC met en relation le taux de vrais positifs (la sensibilité, le rappel) et le taux de faux positifs dans un graphique nuage de points. Habituellement, nous comparons à un seuil pour effectuer une prédiction. Nous pouvons ainsi construire la matrice de confusion et en extraire les 2 indicateurs précités. La courbe ROC généralise cette idée en faisant varier sur tout le continuum des valeurs possibles entre 0 et 1. Pour chaque configuration, nous construisons la matrice de confusion et nous calculons. C'est l'idée directrice. Elle est un peu lourde à mettre en place. Dans la pratique, il n'est pas nécessaire de construire explicitement la matrice de confusion, nous procédons de la manière suivante :

1. Calculer le score $\hat{\pi}(\omega)$ de chaque individu à l'aide du modèle de prédiction.
2. Trier le fichier selon un score décroissant.
3. Considérons qu'il n'y a pas d'ex-æquo. Chaque valeur du score peut être potentiellement un seuil s . Pour toutes les observations dont le score est supérieur ou égal à s , les individus dans la partie haute du tableau, nous pouvons comptabiliser le nombre de positifs $n_+(s)$ et le nombre de négatifs $n_-(s)$. Nous en déduisons $TVP = \frac{n_+(s)}{n_+}$ et $TFP = \frac{n_-(s)}{n_-}$.
4. La courbe ROC correspond au graphique nuage de points qui relie les couples (TVP, TFP) . Le premier point est forcément $(0,0)$, le dernier est $(1,1)$.

Deux situations extrêmes peuvent survenir. Soit la discrimination est parfaite et tous les positifs sont situés devant les négatifs, la courbe ROC est collée aux extrémités Ouest et Nord du repère. Soit les scores sont totalement inopérants, le classifieur attribue des valeurs au hasard, dans ce cas les positifs et les négatifs sont mélangés. La courbe ROC se confond avec la première bissectrice [Wikipedia](#).

Le critère AUC : Il est possible de caractériser numériquement la courbe ROC en calculant la surface située sous la courbe. C'est le critère AUC . Elle exprime la probabilité de placer un individu positif devant un négatif. Ainsi, dans le cas d'une discrimination parfaite, les positifs sont sûrs d'être placés devant les négatifs, nous avons $AUC = 1$. A contrario, si le classifieur attribue des scores au hasard, il y a autant de chances de placer un positif devant un négatif que l'inverse, la courbe ROC se confond avec la première bissectrice, nous avons $AUC = 0,5$. C'est la situation de référence, notre classifieur doit faire mieux. On

propose généralement différents paliers pour donner un ordre d'idées sur la qualité de la discrimination (Tableau 2).

Table 2. Valeur de l'AUC et qualité de la discrimination

Valeur de l'AUC	Commentaire
$AUC = 0,5$	Pas de discrimination
$0.7 \leq AUC \leq 0.8$	Discrimination acceptable
$0.8 \leq AUC \leq 0.9$	Discrimination excellente
$AUC \geq 0,9$	Discrimination exceptionnelle

Pour calculer l'AUC, nous pouvons utiliser une bête intégration numérique, la méthode des trapèzes par exemple. Au final, il apparaît que le critère AUC est un résumé très commode. Il permet, entre autres, les comparaisons rapides entre les classifieurs. Mais il est évident que si l'on souhaite analyser finement leur comportement, rien ne vaut la courbe ROC.

Tests de significativité des coefficients : L'objectif des tests de significativité est d'éprouver le rôle d'une variable explicative. Formellement, l'hypothèse nulle peut se décliner comme suit : évaluer la contribution individuelle d'une variable

$$H_0 : a_j = 0 \quad (14)$$

Ce test de significativité est systématiquement donné par les logiciels (Tanagra, R). Nous verrons plus loin que seule une de ses formes (test de Wald) est en réalité proposée. L'autre (test du rapport de vraisemblance) est passée sous silence. Or ces approches ne se comportent pas de la même manière. Il faut le savoir pour interpréter les résultats en connaissance de cause.

Tests de Wald :

Matrice de variance-covariance des coefficients :

Matrice Hessienne : Lors de la description de l'algorithme d'optimisation de Newton-Raphson, il a été défini une matrice des dérivées partielles secondes, dite matrice hessienne. Nous en reprenons l'expression matricielle.

$$H = X'VX \quad (15)$$

Où X est la matrice des données, la première colonne correspondant à la constante. Elle est de dimension $n * (j+1)$.

La matrice V est une matrice diagonale de taille $n * n$, composée des valeurs de $\pi(\omega)x(1-\pi(\omega))$ les probabilités $\pi(\omega)$ étant obtenues après estimation des paramètres.

Ainsi, nous pouvons former la matrice hessienne H de taille $(j+1) * (j+1)$, et l'inverse de la matrice hessienne correspond à la matrice de variance covariance des coefficients estimés. En particulier, nous obtenons les variances des coefficients sur la diagonale principale.

Ainsi nous disposons de $\hat{a}$, vecteur des estimations des paramètres de la régression logistique ; nous savons qu'il suit une loi normale multidimensionnelle ; nous disposons de la matrice de variance covariance associée. Tout est en place pour que nous puissions réaliser les tests de significativité [Didacticiel Tanagra et R \(2009\)](#) [Didacticiel Tanagra et R \(2009\)](#).

Tester la nullité d'un des coefficients : Très facile à mettre en oeuvre puisque l'on dispose directement de la variance des coefficients, le test s'appuie sur la statistique de Wald W_j qui, sous H_0 , suit une loi du χ^2 à un degré de liberté.

$$W_j = \frac{\hat{a}_{aj}^2}{\hat{\sigma}_{aj}^2} \quad (16)$$

Où $\hat{\sigma}_{aj}^2$ est la variance du coefficient a_j , lue sur la diagonale principale de la matrice de variance covariance de coefficients.

Le logiciel R, lui, propose la statistique Z_j à la place de W_j , avec :

$$Z_j = \frac{\hat{a}_j}{\hat{\sigma}_j} = \text{signe}(\hat{a}_j) * \sqrt{W_j} \sim N(1,0) \quad (17)$$

Z_j peut prendre des valeurs négatives. Le test étant bilatéral, nous retrouvons exactement les mêmes probabilités critiques p -value qu'avec la statistique de Wald W_j .

Intervalle de confiance de Wald pour un coefficient : a_j suit asymptotiquement une loi normale que l'on soit ou non au voisinage de $a_j = 0$. De fait, nous pouvons construire l'intervalle de confiance au niveau de confiance $1 - \alpha$ pour tout coefficient pris individuellement. Les bornes sont obtenues de la manière suivante

$$\hat{a}_j \pm u_{1-\alpha/2} * \hat{\sigma}_{aj} \quad (18)$$

$u_{1-\alpha/2}$ est le fractile d'ordre $1 - \alpha/2$ de la loi normale centrée réduite.

3. Résultats et discussions

Sélection des variables

La sélection des variables a été effectuée par le package RWeka sur R [Didacticiel Tanagra et R \(2009\)](#) dans lequel est inclus la méthode NAIVE BAYES qui effectue la phase d'apprentissage et le test d'évaluation. Ce dernier révèle un taux d'erreur de 28.4173%.

Une autre phase d'apprentissage est effectuée et les prédicteurs FF , T , et N ont été choisis. Ainsi un nouveau test d'évaluation est fait avec les prédicteurs choisis et le taux d'erreur trouvé est de 28.8561%.

Table 3. Matrice de confusion obtenue sur la base test avec l'ensemble des prédicteurs

Occurrence	absence	présence	total
absence	176	25	201
présence	58	19	77
total	234	44	278

Table 4. Matrice de confusion obtenue sur la base test avec les prédicteurs choisis

Occurrence	absence	présence	total
absence	181	20	201
présence	59	18	77
total	240	38	278

Après cette sélection des variables pertinentes nous allons entreprendre la régression logistique pour établir l'équation et essayer de la valider.

Coefficients de la régression

Table 5. Coefficients issus de modélisation logistique

Coefficient	écart	type	Stat. de Wald	p-value
Intercept	1.80265	1.57535	1.144	0.25250
T	-0.14771	0.04671	-3.162	0.00157 **
N	0.33745	0.05748	5.870	4.35 e-9 ***
FF	0.27128	0.05564	5.876	1.08 e-6 ***

Le tableau ci-dessus résume les coefficients obtenus pour chaque descripteur, y compris la constante, nous avons l'estimation de la valeur du coefficient, son écart type, la statistique de Wald destinée à en évaluer sa significativité et la (p-value) s'y rapportant. Ainsi nous constatons que les variables T , N , FF sont respectivement significatives aux niveaux 0.01, 0.001 et 0.001, mais en revanche la constante Intercept n'est pas significative même à 10%.

Les coefficients associés à chaque prédicteur, coefficients permettant d'établir l'équation de la régression.

Une simulation a été effectuée sur la base d'apprentissage puis en confrontant valeurs observées et valeurs prédites dans un tableau de contingence.

Ainsi la matrice de confusion obtenue permettra de calculer quelques indicateurs concernant notre modèle.

Table 6. Matrice de confusion obtenue par régression logistique

Occurrence	absence	présence	total
absence	419	26	445
présence	135	18	175
total	554	66	620

- Le taux d'erreur « probabilité de mauvais classement du modèle »
- Le taux de succès « probabilité de bon classement »
- Le test statistique de Hosmer Lemeshow effectué montre que la (p -value) = 0.6098 est supérieure au risque usuel de 5%. Donc le modèle est compatible avec les données.

Validation du modèle

Pour la validation, l'équation de la régression logistique binaire établie pour utiliser à trouver l'occurrence ou non des phénomènes lithométéores. Cette validation se fera pour les mois de juillet et août 2000. Ainsi les équations, $LOGIT$ et π , établies sont :

$$\begin{aligned} LOGIT &= \ln \frac{\pi}{1-\pi} \\ &= 1.80265 - 0.14771.T + 0.33745.N + 0.27128.FF \end{aligned} \quad (19)$$

$$\pi = \frac{1}{1 + \exp(-C(X))} \quad (20)$$

Avec :

$$C(X) = 1.80265 - 0.14771.T + 0.33745.N + 0.27128.FF \quad (21)$$

Table 7. Matrice de confusion sur la base de validation obtenue par régression logistique

Occurrence	absence	présence	total
absence	46	4	50
présence	8	4	12
total	54	8	62

A partir de la matrice de confusion les indicateurs suivants sont calculés :

- Le taux d'erreur $\epsilon = 0.19$
- Le taux de succès $\theta = 0.81$
- La sensibilité $Se = 0.33$
- La précision $p = 0.5$
- La spécificité $Sp = 0.92$

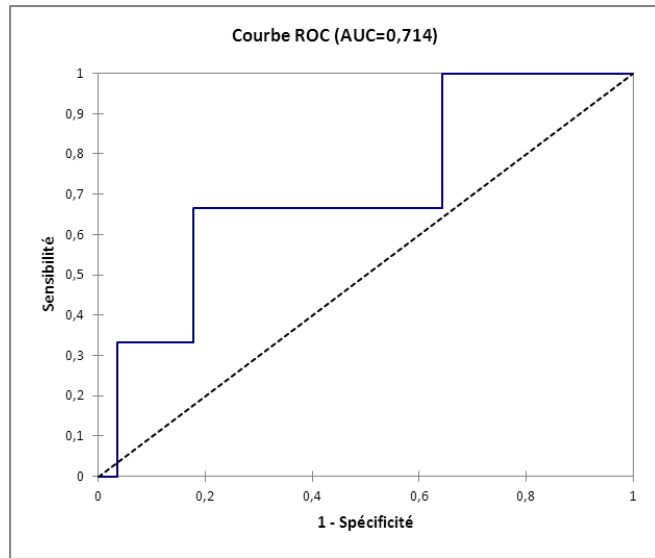


Figure 1. Courbe ROC

La courbe ci-dessus est la courbe ROC, un autre indicateur pour évaluer la régression établie. En se basant sur cette courbe, l'AUC et les indicateurs calculés en haut il peut être affirmé que le modèle statistique est fiable pour la période considérée. Et le test effectué nous donne un taux de succès de 81 .

4. Conclusion

Le taux de succès obtenu nous laisse à penser que des résultats plus optimistes sur des régions où la fréquence d'occurrence du phénomène est plus importante vue la sensibilité de notre méthode statistique sur l'échantillon des deux modalités (présence et absence) peuvent être envisagées.

Références

- Didacticiel Tanagra et R (2009). Stratégie "wrapper" pour la sélection de variables.
- Didacticiel Tanagra et R (2009). Diagnostic de la régression logistique.
- Rakotomalala, R. (2011). Pratique de la regression logistique : Regression logistique binaire et polytomique,. Université Lumière Lyon 2.
- Wikipedia. Regression lineaire — wikipedia, l'encyclopédie libre.

Modélisation des aérosols désertiques dans AROME: Apport du schéma physique à l'échelle convective et impact radiatif

Abdenour AMBAR ^{1*}, Mohamed MOKHTARI ¹

Résumé

Cette étude est dédiée à la modélisation des poussières désertiques dans le modèle à échelle convective AROME (Application à la Recherche Opérationnelle à MEsoéchelle) couplé avec le modèle ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) opérationnel à l'ONM. Pour ce faire, des simulations ont été réalisées avec le modèle AROME-DUST à 3 km de résolution dans l'objectif de prospecter l'apport du schéma physique de ce modèle sur la qualité de la prévision du cycle atmosphérique des poussières désertiques. La situation choisie est celle du 22 Mars 2016 qui est caractérisée par de forts soulèvements de sable au sud de l'Algérie et son transport vers le nord et la méditerranée.

Mots Clés:

AROME-DUST — Aérosols désertiques — Schéma physique — Soulèvements de sable

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

*Correspondant: ambar.abdenour@gmail.com

1. Introduction

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

Trois processus pilotent le cycle de vie des poussières désertiques : le processus de soulèvement, de transport et de dépôt. Le processus de soulèvement des aérosols se produit dans les zones émettrices lorsque la force de friction du vent exercée sur les particules en surface devient supérieure aux forces qui les maintiennent au sol. Le transport des aérosols est principalement géré par la vitesse et la direction du vent. Ces particules peuvent traverser des grandes distances sur les surfaces terrestres mais aussi sur les surfaces marines pour atteindre d'autres régions, comme l'Europe et l'Amérique pour les particules qui proviennent du Sahara Africain. Le processus de dépôt existe sous deux formes : dépôt sec et dépôt humide.

L'intérêt porté à la modélisation du cycle des aérosols désertiques, en Algérie, est important du fait que le désert couvre plus de 75% de la superficie du pays. Cet intérêt est renforcé par le fait que les poussières désertiques ont un impact direct sur l'économie, l'environnement et la santé publique.

Depuis Février 2014, la prévision du cycle atmosphérique des poussières désertiques à l'ONM est basée sur le modèle opérationnel ALADIN-DUST à 14 km de résolution horizontale Mokhtari and al. (2012). Récemment, une configuration AROME-DUST basée sur le cycle 40 a été mise à jour durant le séjour scientifique de Messieurs Mokhtari et Ambar à Météo France. Afin de prospecter l'apport des schémas physiques du modèle AROME, à l'échelle convective, sur la qualité de la prévision du cycle

atmosphérique des poussières désertiques nous avons réalisé des simulations météorologiques. Nous avons choisi pour cette étude la situation du 22 Mars 2016 qui est caractérisée par de fort soulèvement de sable au sud de l'Algérie et son transport vers le nord et la méditerranée. Les champs de poussière sont ensuite confrontés à l'observation puis à ceux prévus par le modèle ALADIN DUST.

Cet article est organisé comme suit : dans la première partie, nous allons présenter un bref aperçu du développement des modules sable dans AROME. Ensuite, nous allons comparer les sorties des modèles AROME-DUST et ALADIN-DUST et par rapport aux observations réelles. Dans la deuxième partie, nous allons étudier l'impact radiatif des poussières désertiques. Pour ce faire, nous avons préparé une version de contrôle AROME-CTL où les poussières désertiques ont été désactivé, puis nous avons effectué plusieurs simulations et comparé les sorties de cette version avec celles de AROME-DUST pour quantifier l'impact radiatif en présence de particules désertiques. Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

2. Méthodologie

Données utilisées

Nous avons analysé les messages METAR (METeoro logical Aerodrome Report) élaborés par les stations météorologiques basées au sud de l'Algérie pour sélectionner les situations caractérisées par la réduction de visibilité. Notre analyse permet de détecter une situation sévère de soulèvement de sable qui est celle du 22 Mars 2016. Les données METAR de cette situation seront aussi utilisées par la suite pour la validation des résultats de prévision obtenus par AROME. Les concentrations des poussières désertiques et les épaisseurs optiques AOD (Aerosol Optical Depth) de la situation ciblée ont été restaurées grâce à la plateforme Worldview de l'agence

américaine NASA disponible en ligne <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>. Nous avons également utilisé les images satellitaires MODIS/AQUA (images prises entre 12h et 13h locale) qui montrent la distribution spatiale des concentrations dans les zones de soulèvements de sable. Ensuite, nous avons superposé les champs de l'AOD, mesurés avec OMI (Ozone Monitoring Instrument), sur ces les images MODIS/AQUA.

Dans le but d'avoir plus d'informations sur cette situation, nous avons utilisé les images satellitaires EU-METSAT (MET10 RGB-Dust) de la journée du 22 Mars 2016 prises à 12h00 et à 15h00. Ces données d'observation sont consolidées par les mesures de l'AOD effectuées à la station de Tamanrasset disponibles sur le réseau de surveillance mondiale AERONET <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>. Ces données seront utilisées pour une validation spatio-temporelle très localisée.

Modèle AROME et modules sable

Le modèle à échelle convective AROME Seity (2011) est opérationnel au Centre National des Prévisions Météorologiques (Algérie) depuis Avril 2014, couvrant la partie nord du pays (Latitude : 28° N - 40° N, Longitude : 3° W - 9° E). Les paramétrisations physiques du modèle sont en majeure partie héritées du modèle de recherche Méso-NH alors que la partie dynamique est une adaptation pour la fine échelle du noyau dynamique d'ALADIN. Les processus d'émission des poussières désertiques sont gérés par le modèle DEAD qui est intégré dans le système couplé AROME-SURFEX par Grini et al. (2006).

Les processus de transports, de dépôt et de lessivage sont gérés par le schéma d'aérosol log-normal ORILAM (Organic Inorganic Log-normal Aerosol Model, Tulet and al. (2010)). Enfin, les interactions avec le schéma radiatif dans l'atmosphère, sont pris en compte par le modèle AROME Grini et al. (2006). Initialement, les poussières désertiques ont été activées dans les configuration ALADIN (cycle 36) Mokhtari and al. (2012) et AROME (cycle 33) Kocha (2011) de manière opérationnelle afin de fournir des prévisions des événements de poussières durant la campagne de mesure FENNEC Chaboureau et al. (2016). En Septembre 2016, une mise à jour de la version AROME-DUST a été faite sur le cycle 40 durant le séjour scientifique de Mokhtari et Ambar à Météo France Mokhtari and Ambar (2016). Désormais, dans le même cadre, une mise à niveau de la version AROME-DUST par rapport à la version ALADIN-DUST a été faite sur la base du cycle 43.

Descriptions des simulations

Nous avons réalisé plusieurs simulations pour mettre en évidence la prévisibilité des poussières désertiques avec un modèle de prévision à l'échelle convective et leur impact radiatif. Le domaine d'intégration est centré sur l'Algérie, il contient 1024 x 972 points et 60 niveaux verticaux avec une résolution horizontale de 3 km (Fig. 1).

Dans un premier temps, nous avons effectué une simulation de référence ou du contrôle (AROME-CTL) : la chaîne AROME a été lancée en débranchant les modules sable. Dans un second temps, nous avons branché les poussières dans AROME pour prévoir leurs concentrations dans l'atmosphère et déduire ainsi l'impact radiatif exercé par ce type d'aérosols par le biais des anomalies de

températures et de rayonnement de surface. Cependant, il est nécessaire de signaler que les simulations AROME-DUST ont été réalisées sur la base de la version DEAD révisée Mokhtari and al. (2012). Pour notre cas d'étude, les simulations ont été lancées 2 jours auparavant pour éliminer ainsi le phénomène de spin-up dû au défaut d'initialisation.

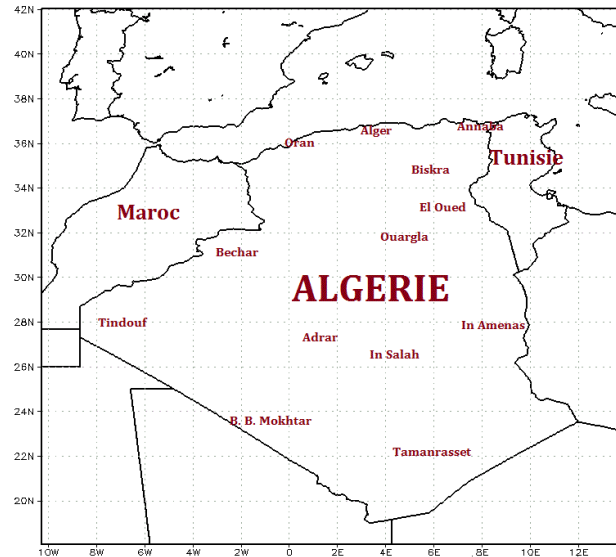


Figure 1. Domaine d'intégration AROME-DUST-Algérie

3. Résultats et discussion

Étude de la situation du 22 Mars 2016

Analyse de la situation

La particularité du modèle AROME réside dans ses paramétrisations physiques conçues principalement pour la détection et le suivi des situations convectives. Afin de mettre en évidence cette particularité, nous avons choisi une situation marquée par un épisode de soulèvement de sable et un important système pluvieux-orageux sur la région du bassin occidental et le nord de l'Algérie, avec le creusement d'une vaste zone dépressionnaire sur la méditerranée centrale (Fig. 2).

Sur la partie Sud de l'Algérie, on observe une activité de nature convective sur un axe allant de Tindouf jusqu'au Nord-est du Sahara, provoquant sur cette région un épisode important de soulèvement de sable, en particulier sur Biskra, El-Oued et les frontières Algéro-Tunisiennes (Fig. 3).

Les épaisseurs optiques obtenues par la combinaison des images satellitaires MODIS/AQUA prises à 12h40 avec la réflectance corrigée Suomi NPP/VIIRS durant la journée ciblée, représentées par la Figure 4, montrent que cette situation était en effet marquée par un épisode important de soulèvement de sable. Les panaches de poussières désertiques peuvent s'observer nettement sur l'image satellitaire MODIS/AQUA, avec des épaisseurs optiques (AOD) élevées sur plusieurs localités du Sud de l'Algérie, avec des valeurs supérieures à 2 sur la région Nord-est du Sahara. Ces AOD élevées enregistrées la journée du 22 Mars sont confirmées par les mesures obtenues sur le site Aéronet de Tamanrasset (Fig. 5).

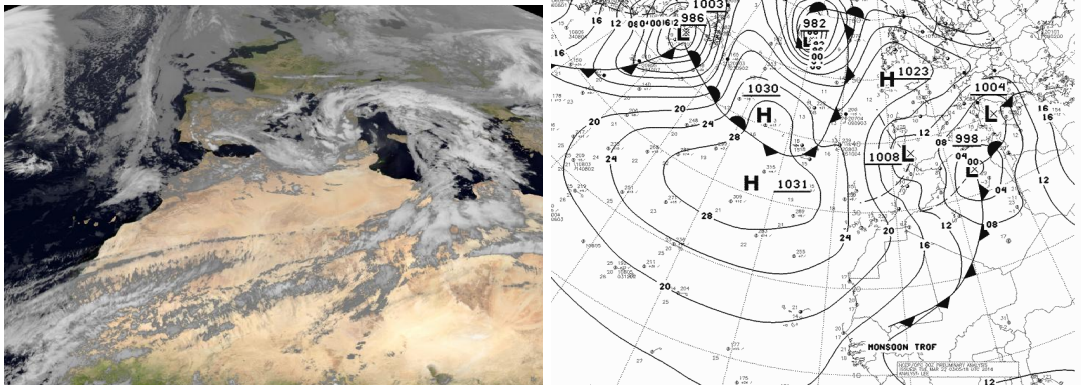


Figure 2. Situation synoptique de la journée du 22 Mars 2016 à 12h.

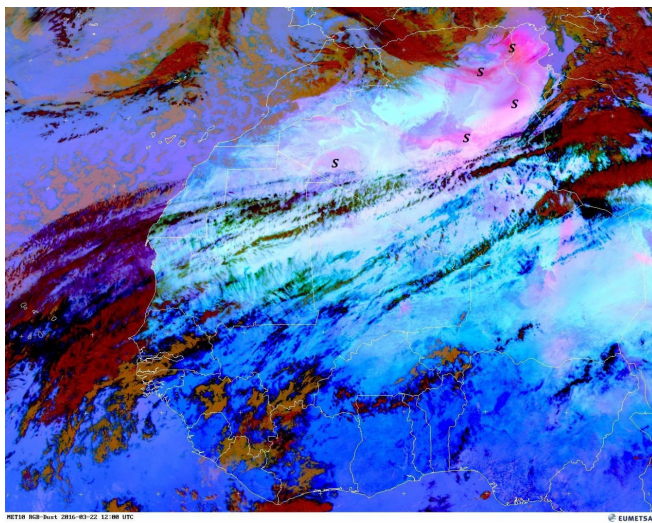


Figure 3. Image satellitaire (EUMETSAT) de la journée du 22 Mars 2016 à 12h.

Simulation de la situation du 22 Mars 2016

Les résultats des simulations seront présentés ci-dessous en termes de concentration de poussières désertiques en surface, de distribution des épaisseurs optiques (AOD) et de visibilité en présence de sable.

La Figure 6 représente les concentrations des poussières désertiques prévues par AROME-DUST et ALADIN-DUST pour la journée du 22 Mars 2016 à 12h, et l'image satellitaire correspondant. La figure montre que les panaches de poussières désertiques ont été très bien reproduit par les deux modèles, en termes de distribution spatiale et temporelle. Cependant, il est bien clair que la configuration AROME-DUST élargi la zone de soulèvement de sable prévue, en particulier sur le Sahara centrale, l'extrême Sud et les frontières Algéro-Tunisienne.

En comparant avec la situation réelle, la configuration AROME-DUST prévoit encore mieux la distribution spatiale des panachés de sable.

Les épaisseurs optiques prévues par AROME-DUST suivent la même allure que les concentrations en termes de distribution spatio-temporelle (Fig.7), mais aussi par rapport aux prévisions ALADIN-DUST qui semblent être sous-estimées face à la situation réelle (Fig. 7).

En termes d'intensité, les deux modèles donnent pratiquement les mêmes valeurs, avec des maximums qui peuvent atteindre 1,8 dans les deux cas, ce qui est très proche de la réalité.

Les champs de visibilité prévus par AROME-DUST

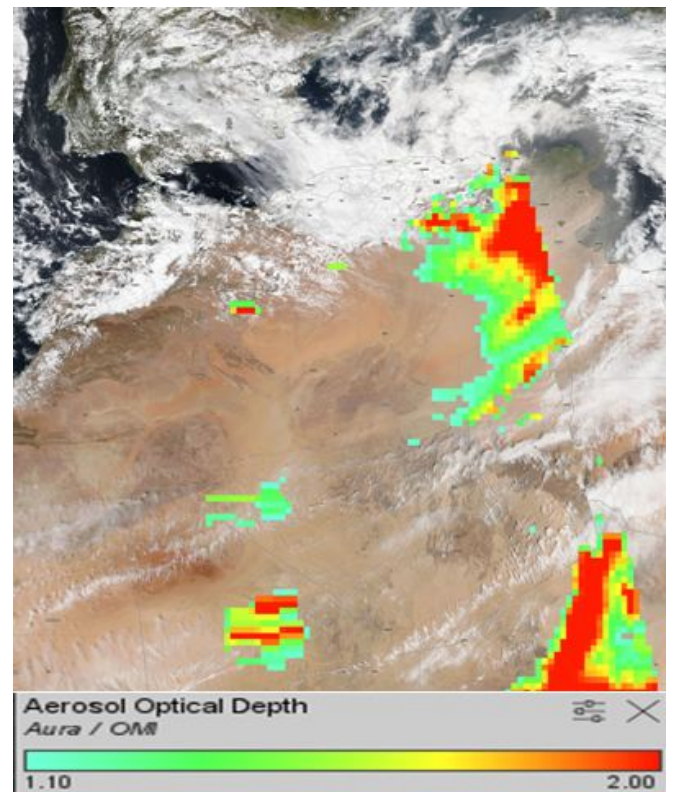


Figure 4. Les épaisseurs optiques AOD obtenues par la combinaison des images satellitaires MODIS/AQUA prises à 12h40 UTC avec la réflectance corrigée Suomi NPP/VIIRS, pour la journée du 22/03/2016.

montrent des valeurs inférieures à 3000m sur toute la région Nord-est du Sahara (Fig. 8), avec localement des valeurs qui sont inférieures à 1000m. Pour les champs prévus par ALADIN-DUST, si l'allure générale de la situation a été reproduite, les plus faibles valeurs ont été rarement inférieures à 1000m.

En consultant les METAR rédigés pour cette situation (22/03/2016 à 12h), sur plusieurs stations d'observations au Sud de l'Algérie, nous avons constaté que l'effet de la résolution (3km de résolution pour AROME-DUST) permet une meilleure prévision des soulèvements de sable en termes de visibilité (Fig. 9).

Sur les six stations choisies pour valider la visibilité par rapport aux simulations, nous avons remarqué que les prévisions AROME-DUST s'approchent plus des valeurs réelles que celles d'ALADIN-DUST.

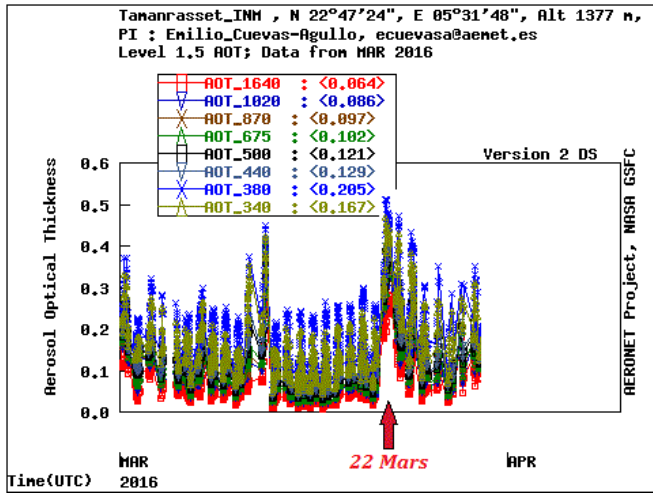


Figure 5. Les moyennes journalières des épaisseurs optiques enregistrées durant le mois de Mars 2016 sur la station de Tamanrasset (Source : <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

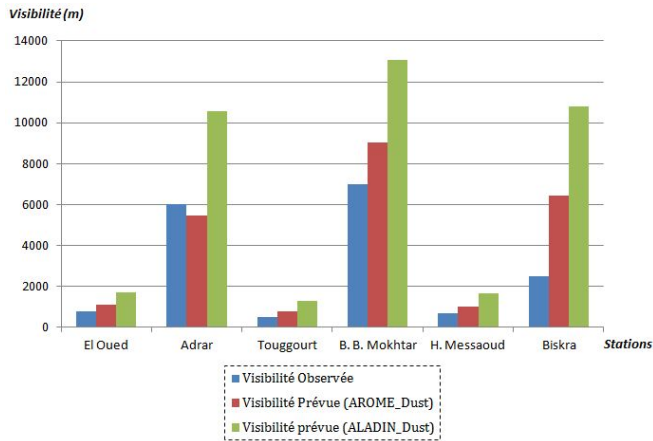


Figure 9. Comparaison entre les visibilités observées sur 6 stations du Sud Algérien et les visibilités prévues par ALADIN-DUST et AROME-DUST pour la journée du 22 Mars 2016 à 12h00.

Forçage radiatif des poussières désertiques

Le rayonnement solaire net est donné par la Figure 10. Cette figure montre que les zones de faibles valeurs de rayonnement dans le Sud correspondent exactement aux zones de fortes valeurs de concentrations des poussières désertiques.

La différence des champs de rayonnement net reçu en surface entre AROME-DUST et AROME-CTL et celle de la température à 2m révèle que la présence des poussières désertiques a provoqué une diminution du flux radiatif net à la surface de 10 à 100W/m².

Parfois, l'impact radiatif atteint 200W/m² dans les zones à fortes concentration de sable (Fig. 11).

En termes de forçage thermique, la présence des poussières désertiques diminue sensiblement les températures à 2m, avec notamment des différences qui peuvent atteindre 1,5 °C (parfois même 2 °C) dans les zones de soulèvements de sables.

4. Conclusion

Ce travail avait pour objectif de montrer l'apport du schéma physique et de l'échelle convective dans la

modélisation du cycle des aérosols désertiques.

Le schéma physique utilisé dans le modèle AROME à été principalement développé au CNRM dans le but de mieux saisir la convection et du coup les updrafts et les downdrafts pour le renouvellement des cellules convectives.

Une meilleure prise en compte de ces derniers à permis d'améliorer la prévision des épisodes de soulèvements de poussières désertiques par la configuration AROME-DUST. De plus, les fortes résolutions horizontales (03 km) et verticales (60 niveaux) du modèle AROME ont fortement contribué à l'amélioration des prévisions.

C'est d'ailleurs ce qui est nettement perceptible en comparant les observations avec les simulations ALADIN-DUST et AROME-DUST, où l'on constate que ce dernier s'approche plus de la réalité en termes d'intensité et de distribution spatiale. La présence des aérosols désertiques influe directement sur le bilan radiatif et diminue sensiblement le réchauffement en surface.

Cependant, la mise en opérationnel de la configuration AROME-DUST sur le calculateur de l'ONM n'est pas possible pour le moment à cause du temps de calcul énorme exigé par cette version (7 à 8 min par échéance sur 16 nœuds).

Références

- Chaboureaud, J., Flamant, C., Dauhut, T., Kocha, C., Lafore, J., Lavaysse, C., Marnas, F., Pelon, M. M. J., Martinez, I. R., Schepanski, K., and Tulet, P. (2016). Fennec dust forecast intercomparison over the sahara in june 2011., *Atmos. Chem. Phys.*, 16 :6977–6995.
- Grini, A., Tulet, P., and Gomes, L. (2006). Dusty weather forecasts using the mesonh mesoscale atmospheric model. *J. Geophys. Res.*, 111.
- IPCC-2001 (2001). *Climate change 2001, the scientific basis. Contribution of working group 1 to the third assessment report of intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York.
- Kocha, C. (2011). *Interactions entre poussières désertiques et convection profonde en Afrique de l'Ouest : observation et modelisation à echelle convective*. PhD thesis, Université de Toulouse 3.
- Mokhtari, M. and al. (2012). Importance of the surface size distribution of erodible material : an improvement on the dust entrainment and deposition (dead) model. *Geosci. Model Dev.*, 5 :581–598.
- Mokhtari, M. and Ambar, A. (2016). Updating and validation of arome dust ; stay report., Technical report, CNRM.
- Seity, Y. (2011). The arome-france convective-scale operational model. *AMS*.
- Tulet, P. and al. (2010). Mixing of dust aerosols into a mesoscale convective system : Generation, filtering and possible feedbacks on ice anvils. *Atmos. Res.*

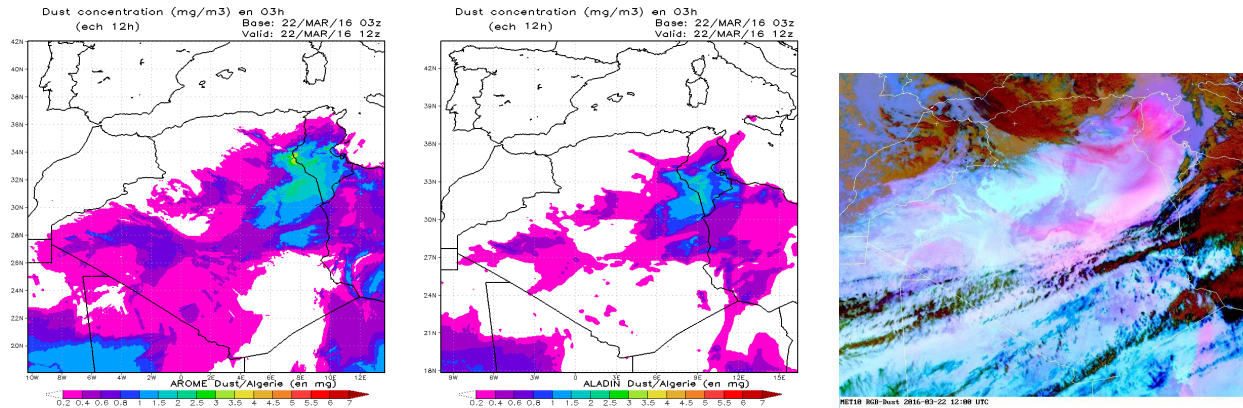


Figure 6. Concentrations des poussières désertiques prévues par AROME-DUST et ALADIN-DUST pour la journée du 22 Mars 2016 à 12h, et image satellitaire correspondant à la même situation.

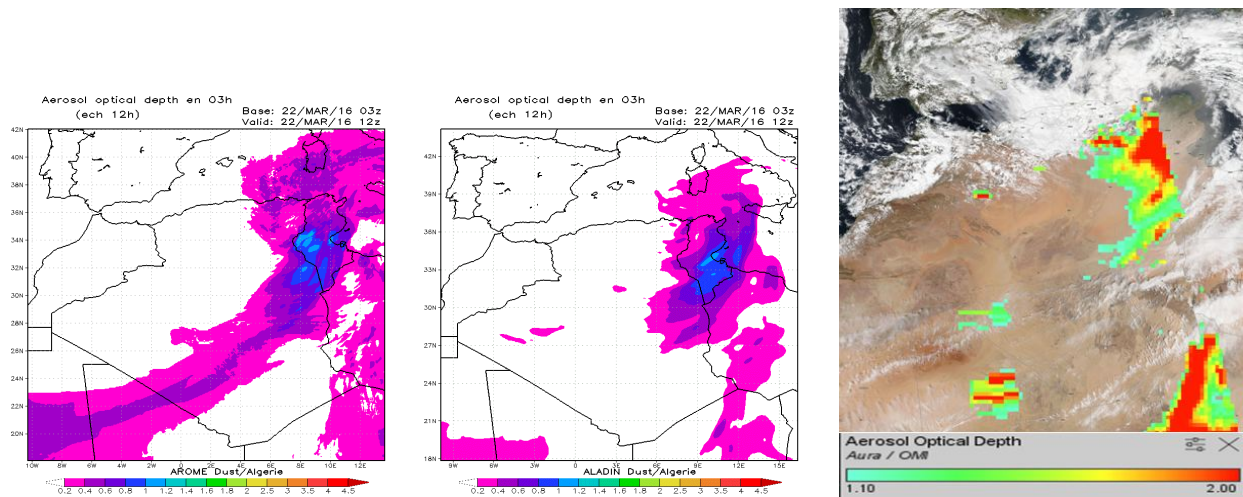


Figure 7. Epaisseurs optiques AOD prévues par AROME-DUST et ALADIN-DUST pour la journée du 22 Mars 2016 à 12h, et image satellitaire correspondant à la même situation.

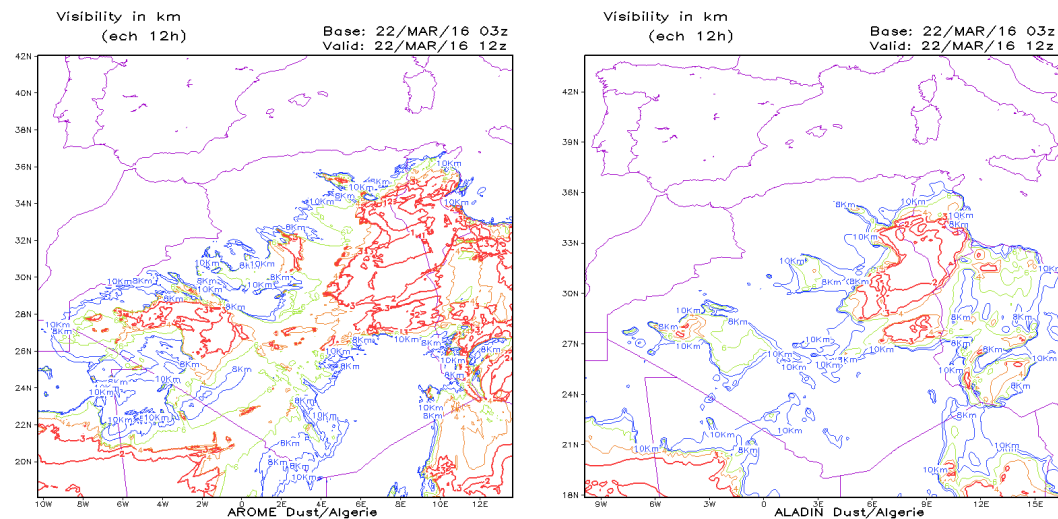


Figure 8. Les visibilités réduites en présence du sable prévues par AROME-DUST et ALADIN-DUST pour la journée du 22 Mars 2016 à 12h.

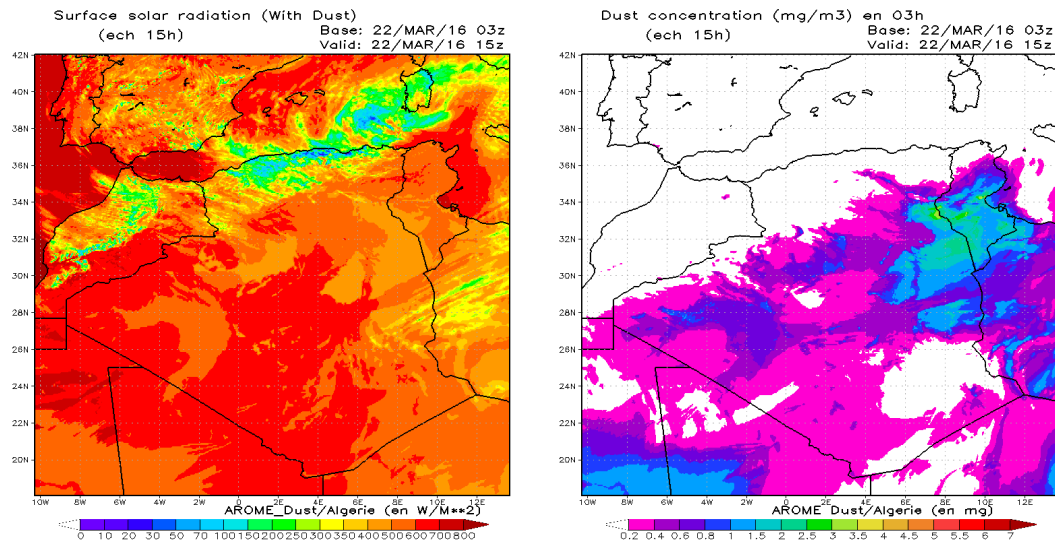


Figure 10. Champs de rayonnement de surface (à gauche) et de concentration du sable (à droite) prévues par AROME-DUST pour la journée du 22 Mars 2016 à 15h.

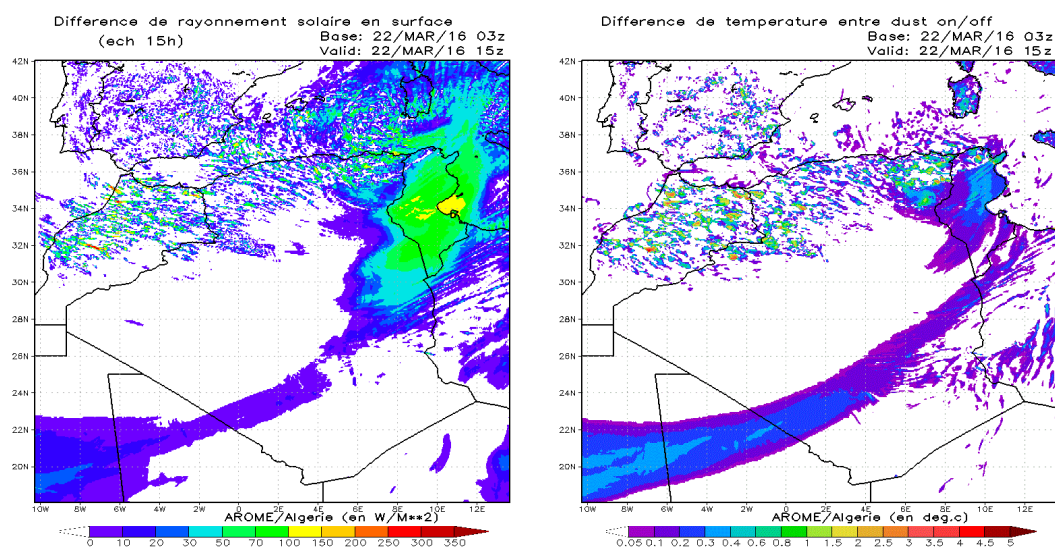


Figure 11. Champs de différence de rayonnement en surface (à gauche) et de différence de température à 2m (à droite) prévues par AROME-DUST pour la journée du 22 Mars 2016 à 15h.

Mise en oeuvre d'une base de données vent ALADIN et réalisation d'une carte de régime des vents dominants en Algérie

Amel BOUCHEFFA ^{1*}, Mohamed MOKHTARI ¹

Résumé

Les simulations des vents moyens en Algérie sont basées sur des données météorologiques tri horaires prévues par le modèle ALADIN pendant une période de cinq ans (2007-2011). Ces données ont permis la production de la carte des vents de l'Algérie, à des altitudes de 10, 20, 40, 50, 60, 70, 80 et 100 mètres du sol. Les cartes élaborées révèlent que les régions les plus ventées sont situées dans les régions du sud du pays avec une multitude de microclimats éparpillés à travers le pays. Enfin, du point de vue développement, cette base de données météorologiques conçue à l'aide des vents ALADIN, sera comparée à la base des données climatiques des vents, afin d'améliorer ce produit.

Mots Clés:

Base de données vents — Vitesse du vent — Carte de vent — Modèle ALADIN

¹Office National de la Météorologie (CNPM-ONM), Dar El Beida, Alger

*Correspondant: amelsid@hotmail.fr

1. Introduction

La production d'électricité éolienne représentait en 2013, pratiquement 3,5% de la production mondiale d'électricité estimée à 21 500 TWh. Il s'agit actuellement de la première source d'énergie renouvelable (hors grande hydraulique) qui intervient dans le mix de production d'électricité, tous pays confondus [Beslin and Multon \(2016\)](#).

L'Algérie est confrontée à des problèmes d'énergie électrique. La puissance fournie ne suffit plus à la demande, elle atteint des pointes de 5100 MW, valeur dépassant de 200 MW sa capacité de production. Il est grand temps de se retourner vers les autres formes d'énergies renouvelables disponibles en grandes quantités dans notre pays comme le vent, qui n'est qu'une forme indirecte de l'énergie solaire. Malheureusement ces ressources sont mal ou peu exploitées. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il faut connaître le potentiel éolien d'une région. Les pays industrialisés possèdent des cartes et des atlas de vents, ce qui n'est pas le cas des pays en voie de développements [Helal and Ghellai \(2003\)](#).

La puissance éolienne totale installée en Algérie est donc actuellement insignifiante. Cependant, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son nouveau programme des Énergies Renouvelables, d'installer d'autres parcs éoliens d'une puissance totale de 1000 MW à moyen terme (2015-2020) pour atteindre 5010 MW à l'horizon 2030. A noter que ce nouveau programme vise aussi bien les installations connectées au réseau électrique que le petit éolien, à l'instar des développements dans le monde où les installations de petites éoliennes ont augmenté ces dernières années. En effet, fin 2012, celles-ci ont atteint le nombre de 806 000, ce qui représente environ 35% de l'ensemble des éoliennes installées. Les petites éoliennes actuelles sont pour la plupart des machines à axe horizontal à 3 pales, équipées d'alternateurs à aimants permanents et d'un dispositif d'orientation passif. Mais on trouve également des aérogénérateurs à axe vertical (2 à 5% des petites éoliennes installées). Ces derniers sont plus adaptés aux installations urbaines où les vitesses

de vent sont faibles et la turbulence importante [Guerra \(2015\)](#).

Cependant, pour qu'une telle installation soit performante, la vitesse moyenne du vent doit être supérieure à 4m/s.

Pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent moyen doivent être supérieures à 6 m/s, la hauteur de référence étant de 10 mètres. Cependant, avoir de grandes vitesses ne suffit pas. En effet, la disponibilité de cette ressource éolienne doit être importante. En d'autres termes, le nombre d'heures pendant lesquelles la vitesse du vent est élevée doit être important sur le long de l'année [Guerra \(2015\)](#).

Selon le premier Atlas Vent de l'Algérie établi par l'ONM en 1990, les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées dans la région d'Adrar. Ces résultats, qui étaient obtenus à partir d'un traitement statistique des données vent couvrant jusqu'à 10 années de mesures, sont la base des cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER (Figure 1) [Daaou et al. \(2003\)](#). Mais récemment, dans le nouvel Atlas éolien établi par l'ONM, l'existence de sites ventés dans d'autres régions du Sud a été mise en évidence. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un potentiel éolien appréciable. A noter que lors de l'élaboration du premier Atlas, seules 36 stations météorologiques existaient alors que pour le dernier Atlas, le nombre de points de mesures est passé à 74. Cependant, étant donnée la superficie du territoire algérien, ce nombre chiffre reste faible. Des stations de mesures éoliennes et autres sont en cours d'installation. Le gisement éolien en Algérie est donc toujours en cours d'évaluation [Guerra \(2015\)](#).

Actuellement l'ONM s'est engagé dans un programme d'action visant à améliorer la qualité de la carte des régimes des vents en Algérie en utilisant les sorties du modèle de prévisions ALADIN dans le but de localiser les sites les plus ventés en Algérie pour de nouvelle plantation d'aérogénérateurs. Dans cette perspective, nous avons développé un programme permettant l'extraction

des données vents à partir des données simulées d'ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International) à différents niveaux sur toute l'Algérie. A partir de ces données, des cartes de potentiel éolien ont été élaborées puis validées par rapport aux données d'observation.

2. Puissance d'une éolienne

A l'échelle locale, la ressource éolienne, notamment la vitesse du vent, est influencée par la topographie : altitude, profil du terrain (plaine, colline, sillon montagneux, etc.) et la rugosité (type de végétation, immeuble, obstacle, etc.). Par ailleurs, la ressource éolienne présente des fluctuations. Il s'agit de variations de la vitesse et de la direction du vent observées sur une échelle de temps (par exemple, de l'année jusqu'à la seconde). Ces variations : fluctuations, turbulences etc. sont plus ou moins importantes en fonction de la saison et du secteur géographique concerné, elles caractérisent une distribution aléatoire communément appelée « aléa éolien ».

Habituellement, lorsque l'on parle de vitesse du vent, sous-entendu instantanée, il s'agit de moyennes sur 10 minutes. Des études ont montré que la vitesse moyenne annuelle permet d'évaluer la productivité annuelle d'un site sans se préoccuper de la variabilité Beslin and Multon (2016) .

Un aérogénérateur est caractérisé par sa courbe de puissance et sa courbe de coefficient de puissance. La première représente la variation de la puissance électrique produite et la deuxième indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité, les deux sont fonction des différentes classes de vitesse du vent. Ces deux caractéristiques sont généralement fournies par le constructeur Jeanmart (2011).

La courbe de puissance est en réalité constituée d'une multitude de points espacés de part et d'autre de la ligne rouge, plutôt qu'une courbe bien définie comme celle du graphe pigmenté en rouge sur la Figure suivante :

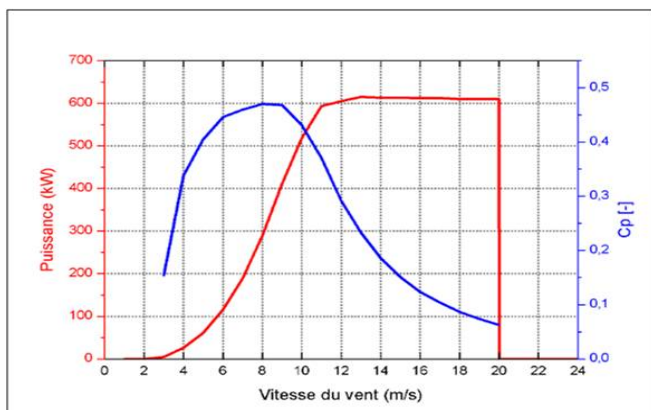


Figure 1. Courbe de puissance et de coefficient de puissance pour une éolienne

En effet, il y aura toujours des fluctuations de la vitesse du vent qui rendront impossible une mesure de façon précise du flux d'air passant à travers le rotor de l'éolienne.

On peut distinguer 4 parties sur cette courbe

- De 0 à la vitesse de démarrage (ici 3m/s) : la puissance de sortie est nulle, le vent n'est pas suffisam-

ment important pour entraîner la rotation du rotor.

- De la vitesse de démarrage à la vitesse nominale (ici 13m/s) : la puissance de sortie augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale (ici 600 kW).
- De la vitesse nominale à la vitesse de coupure (ici 20m/s) : la puissance de sortie est maintenue à la puissance nominale, presque constante grâce au dispositif de régulation.
- Après la vitesse de coupure : l'éolienne est mise à l'arrêt pour protection, la puissance de sortie est nulle (Boudia, 2013), www.energieplus-lesite.be .

Quant à la courbe, du coefficient de puissance, représentée en bleu sur la Figure 3, il est à noter que même si l'efficacité moyenne d'une telle éolienne soit normalement supérieure à 20%, celle-ci varie considérablement en fonction de la vitesse du vent. Le coefficient de puissance tient compte de la limite de Betz. C'est pour cela qu'il sera toujours inférieur à cette limite. Il est de l'ordre de 35% pour une éolienne à axe horizontal mais il ne dépasse pas 10% pour une éolienne à axe vertical Beslin and Multon (2016).

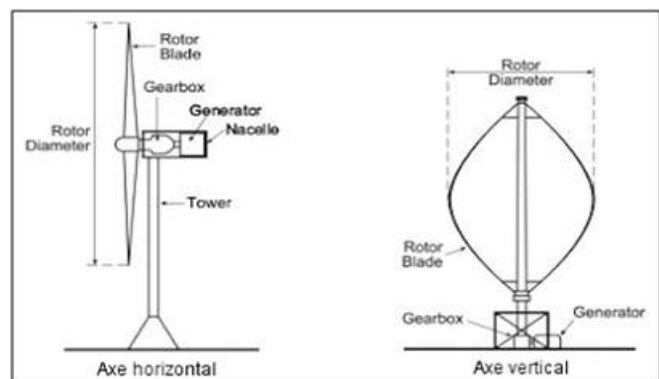


Figure 2. Schéma représentatif d'une éolienne à axe vertical et d'une éolienne à axe horizontal

Afin d'améliorer le potentiel éolien en Algérie ; une actualisation de la carte des vents moyens annuels est nécessaire pour localiser les sites où la vitesse de vent varie entre 6m/s et 10m/s, plage optimale de l'énergie éolienne

3. Les cartes de vent disponible

Une multitude de travaux ont été réalisés dans ce cadre dont l'ensemble des résultats est représenté ci-dessous :

Carte de vitesse du vent établie par CDER

La figure 3 illustre les données des vitesses moyennes annuelles du vent, relatives à 26 stations de mesure, s'étalant sur une période d'une dizaine d'années.

Par ailleurs, afin d'augmenter la densité des points de mesure et afin d'augmenter la fiabilité des résultats, les vitesses moyennes annuelles du vent, produites par l'Office National de la Météorologie, ont été incluses pour l'affinement du tracé des cartes.

Sur la Figure 3, sont représentés tous les points de mesure utilisés pour la production des cartes du vent en Algérie, à une altitude 10 mètres du sol.

A l'aide du logiciel Surfer, une interpolation des points de mesure est effectuée, pour la détermination de vitesses

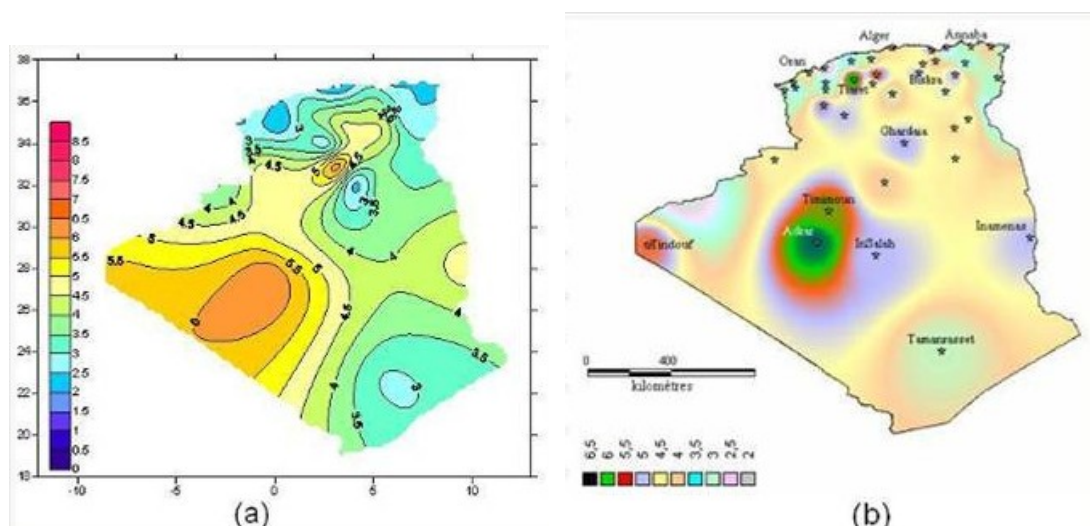


Figure 3. (a) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali, (b) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Kasbadji-Merzouk

du vent à intervalle égal à $0,5^\circ$ de longitude et de latitude Daaou et al. (2003) Merzouk (1999).

Il est à noter que ces méthodes d'interpolations sont à écarter pour des rayons supérieurs à 10 Km autour des stations de mesure Daaou et al. (2003).

Ces cartes de vent sur l'Algérie ont été obtenues par des méthodes d'interpolation. Les résultats obtenus peuvent être erronés notamment dans le cas où une zone intermédiaire (ventée) entre deux zones moins ventées n'a pas été prise en considération. Pour cette raison, une révision et une actualisation de la carte des vents en Algérie semblent indispensables.

Carte de vitesse du vent établie par l'ONM (CCN)

Le Centre Climatologique National (CCN) à l'ONM a développé une carte des régimes de vent en Algérie à partir des sorties du vent du modèle climatologique RegCM qui est actuellement de l'ordre de 20 Km de résolution horizontale pour une période de dix ans soit 2001 à 2010 Halimi.

Quelques résultats de cette étude sont illustrés sur le tableau suivant qui montrent les valeurs des moyennes annuelles du vent observées sur quelques stations ainsi que les valeurs prévues par le modèle RegCM Helal and Ghellai (2003).

Table 1. Vents moyens observés et prévus par RegCM sur quelques stations

Station(10m)	Vent observé	Vent prévu
BISKRA	4.4 - 4.1	5.1
DJELFA	4.2 - 2.7	4.8
EL-BAYADH	3.6 - 3.9	4.8
TOUGOURT	3.4 - 3.3	4.8

A l'intérieur de la couche limite atmosphérique, le régime éolien est directement influencé par la rugosité de la surface, la présence d'obstacles, la topographie. Ces paramètres doivent donc être pris en considération pour l'évaluation des ressources éoliennes disponibles dans un site donné et pour mieux localiser l'emplacement des fermes éoliennes. A cet effet, l'ONM envisage une carte de régime des vents basée sur les prévisions du modèle ALADIN à 12 Km de résolution horizontale archivées sur

une période de cinq ans.

Le but de la présente étude, est d'établir une carte des vitesses de vents moyens prévus par le modèle de prévision de temps ALADIN sur une période de cinq ans pour l'Algérie.

4. Méthodologie

Données et traitement

La collecte des données de prévision ALADIN du paramètre vent sur la période d'étude (janvier 2007 – décembre 2011)

Récupération des fichiers de prévisions du domaine ALADIN de janvier 2007 jusqu'à décembre 2014 (l'ONM dispose d'une base de données de fichiers de prévisions archivés à METEO-FRANCE depuis son adhésion au consortium ALADIN en 2006, d'où l'idée d'élaboration d'une carte de régime des vents sur la période 2007-2011).

Préparation de scripts d'intégrations des données de prévisions en fichiers post-traitement FULLPOS, cette étape permet de convertir les fichiers de prévision du modèle de la projection Lambert en fichiers de prévisions sur une grille régulière LAT-LON sur différents niveaux d'altitudes qui ont été fixés à (10m, 20m, 40m, 50m, 60m, 70m, 80m et 100m) pour la période d'étude.

Extraction des fichiers de prévisions du vent zonal et du vent méridien qui représentent les composantes u et v du vent sur les niveaux d'altitude, déjà cités, sur toute la grille du domaine ALADIN par échéance de trois heures de janvier 2007 jusqu'à décembre 2011.

Ces données de prévision sont ensuite répertoriées dans des dossiers indiquant l'échéance de chaque fichier (base de données).

Élaboration d'un code de calcul en Fortran à partir duquel les paramètres de la vitesse du vent annuel ainsi que la vitesse moyenne du vent annuel seront calculés pour toute la période d'étude sur le domaine ALADIN.

Présentation des résultats sous forme de tableaux numériques contenant les vitesses de vent annuelle moyenne sur toute la grille ALADIN ou bien sous forme de carte météorologique illustrant les vents moyens annuels dominant sur chaque région de l'Algérie.

Méthode de traitement

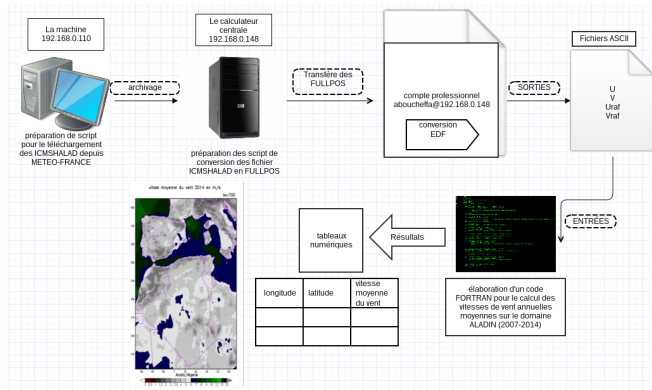


Figure 4. Organigramme du traitement : du téléchargement des fichiers à l'élaboration des cartes de vent

Le téléchargement des fichiers de prévisions est effectué depuis la bases d'archives de météo France jusqu'à celle de l'ONM à travers une machine de liaison, ces fichiers sont ensuite transmutés sur la grille du modèle ALADIN pour extraire les sorties tri-horaire du vent zonal et du vent méridien sur les 75600 points de grille du domaine ALADIN pour les années 2007, 2008, 2009, 2010 et 2011 sur différents niveaux d'altitude. Ces données sont ensuite archivées sous forme d'une bibliothèque de données tri-horaires des composantes du vent d'une grille de 12 km de résolution.

Cette base de données comprend tous les INPUT du programme de calcul des vitesses moyennes annuelles du vent sur la grille du modèle ALADIN.

Atlas préliminaire du vent à 10 mètres

La figure 5 représente la carte des vitesses moyennes annuelles du vent prévus a une altitude de 10 mètres au dessus du sol. Les vitesses prévues par le modèle ALADIN varient de 1.5 à 6.5 m/s.

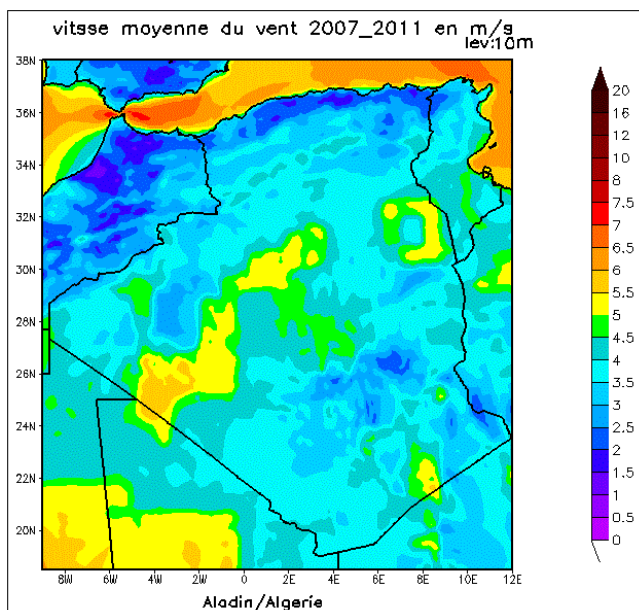


Figure 5. Distribution spatiale des vents moyens annuels à 10 mètres.

On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesse allant de 1.5m/s à 4.5m/s

(faible sur les régions nord du pays et augmente au fur et mesure qu'on se dirige vers les hauts plateaux et le sud saharien). Les vitesses de vent sont maximales dans les régions situées au sud du pays (Adrar, le sud-est de Tindouf, les Ténéré du Hoggar Tassili et sur la région d'El-Oued en allant vers Ouargla) avec une intensité qui varient de 4.5m/s à 6m/s.

On distingue deux microclimats très favorables pour l'installation de parcs éoliens avec une vitesse moyenne de 6.5m/s sur la région ouest de Bordj Badji Mokhtar ainsi que sur la région d'Ain azawa à la frontière Algéro-Nigérienne.

Atlas préliminaire du vent à 20 et 50 mètres

D'après la carte des vents à 10 mètres, les sites susceptibles d'être exploités pour l'énergie éolienne sont rares, en effet cela varie en fonction du type de l'éolienne qui est généralement installée à une hauteur supérieur à 20 mètres. C'est pour cela qu'une étude permettant la détermination de la carte des vents à 20 et 50 mètres à été établie.

La prédominance des vitesses de vent de 5 à 6 m/s, se voit [Merzouk \(1999\)](#) nettement sur la carte des vents à 50 mètres et plus au moins sur celle de 20 mètres.

On remarque au centre du Sahara de large étendus ou la vitesse des vents atteint les 6.5m/s à 7m/s sur la carte de 50 mètres entourant les sites d'Adrar du nord vers l'extrême sud, le sud est de Tindouf ainsi que sur Lehdjira et sur l'est d'El-Oued en allant vers Ouargla(El-Borma) et finalement sur Ain-Azawa à l'extrême sud de Tamanrasset .

Par ailleurs, on distingue un couloir présentant des vitesses variant de 5m/s à 6.5m/s , sur le long des hauts plateaux ouest du pays allant de Biskra jusqu'El-Bayadh en passant par Tiaret et Djelfa.

Enfin, on remarque, un micro climat, où la vitesse est supérieure à 7 m/s, autour de la région (25.7° N - 4° W) Est de Bordj-Badji-Mohktar et Sud-ouest de Reggane.

Au vu de la carte des vents, tracée à des altitudes de 20 et 50 mètres du sol, il est clair que les possibilités d'utilisation du vent à des fins énergétiques deviennent plus prometteuses à 50 mètres d'altitude.

En effet, plus de 80% du territoire national bénéficie d'une vitesse du vent supérieure ou égale à 4m/s , vitesse moyenne à partir de laquelle une éolienne démarre. Toutefois ceci reste valable pour de petites applications nécessitant de faibles puissances. La région de Bordj-Badji-Mohktar offre bien sûr de plus grandes possibilités.

En conclusion, les cartes de la vitesse du vent établies, permettent l'identification des régions prometteuses en matière d'énergie éolienne.

Pour qu'un site soit jugé exploitable avec une petite éolienne, il faut disposer au minimum d'une vitesse de l'ordre de 6m/s . En Algérie, il est clair que ceci devient possible, lorsque les éoliennes sont installées à des altitudes supérieures ou égales à 50 mètres.

Étude comparatives des différents résultats

Afin de valoriser les résultats obtenus dans cette étude, une comparaison avec les études réalisées précédemment a été établie et représenté dans les figures suivantes :

Une comparaison entre les vitesses moyennes annuelles observées et prévues par ALADIN et aussi celles prévues

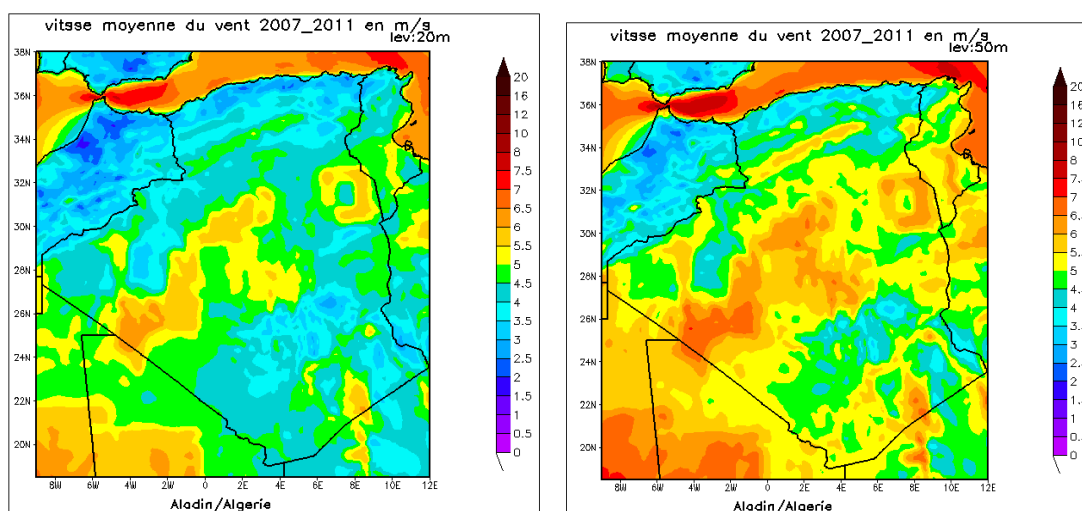


Figure 6. Carte des vents à 20 et 50 mètres

par le modèle climatique RegCM est réalisée.

Les résultats sont illustrés sur l'histogramme ci-dessous.

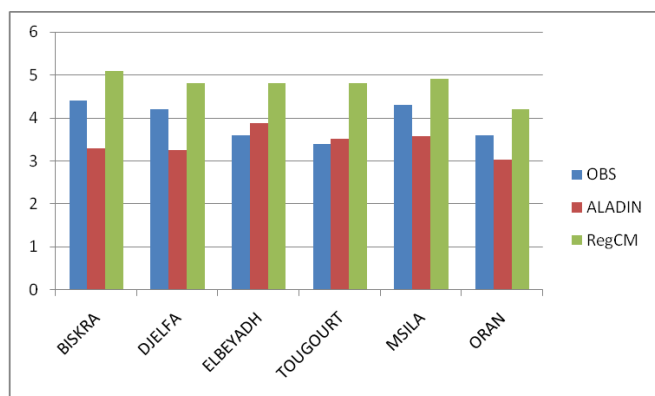


Figure 7. Histogramme représentatif des moyennes des vents observés et prévus sur quelques stations.

On remarque d'après l'histogramme présenté ci-dessus, que le modèle ALADIN prévoit bien les vitesses moyennes sur les stations de Tougourt, El-Bayadh et Oran, et sous-estime les vitesses moyennes du vent au niveau des stations de Biskra, Djelfa et M'sila. On constate que le modèle prévoit des vitesses supérieures à celles observées avec un écart inférieur à 1 m/s .

Une autre étude comparative qui a été établie par Dr N.Kasbadji Merzouk nous a permis d'évaluer le produit du modèle ALADIN.

Le tableau suivant représente les vitesses moyennes annuelles observées de quelques stations d'Algérie durant deux périodes distinctes : 2001/2010 publiée dans l'Atlas Vent produit par l'ONM et 2007/2010 archivée dans la base de données du site web « Réelles prévisions », rp5.lt ainsi que les vitesses moyennes prévues par ALADIN.

La représentation graphique de ce tableau nous permet de bien voir le comportement de chaque prévision par rapport à l'observation.

La figure montre les vitesses de vent enregistrées pendant deux périodes différentes par un ensemble de stations ; on remarque que la moyenne observée pour une station diffère selon la période de son enregistrement et le nombre total d'observations prises en compte. Les vitesses moyennes prévues par ALADIN pour chaque station se comportent assez bien par rapport à l'observation pour

environ la majorité des stations. Les détails de la comparaison établie figure sur la figure 8 aux 3^e et 4^e images.

5. Conclusion

Le travail réalisé dans cette étude a permis l'élaboration d'une base de données sur une période de cinq ans, du paramètre vent à différents niveaux, s'étendant de 20 et 50 mètres du sol. Cette dernière est établie à partir des données simulées par le modèle ALADIN-Algérie.

L'Atlas des vents ALADIN établi, révèle une distribution spatiale des vents moyens différente de celle des Atlas précédents. Comme les sites les plus ventés mis en évidence par cette étude, sont loin des stations d'observations, les prévisions de vents moyens sur les stations elles-mêmes ne s'écartent pas énormément des observations, aussi sur la première période : 2001/2010 que sur la seconde : 2007/2010.

Cependant, on constate que les prévisions ALADIN sont plus proches des observations durant la période 2007/2011 (Fig.8).

En plus de son utilité dans l'estimation du potentiel éolien, ce travail constituerait un outil d'aide à la décision pour les équipes opérationnelles du Centre National des Prévisions Météorologiques, car il permet de cerner le comportement du modèle ALADIN, en ce qui concerne le vent moyen, station par station.

Références

- Beslin, G. and Multon, B. (2016). Production de l'électricité éolienne : de la caractérisation du gisement éolien aux technologies d'aérogénérateurs.
- Daaou, H. N., Haddouche, S., and Merzouk, N. K. (2003). Amélioration de la carte des vents à partir des données interpolées.
- Guerri, O. (2015). Potentiel éolien en algérie.
- Halimi, L. Présentation du réseau d'observation de la météo et du climat en algérie - disponibilité des données observées - description et disponibilité des produits climatiques.
- Helal, M. T. and Ghellai, N. (2003). Le gisement éolien à Beni-Saf région côtière de l'ouest algérien.
- Jeanmart, H. (2011). L'énergie éolienne.

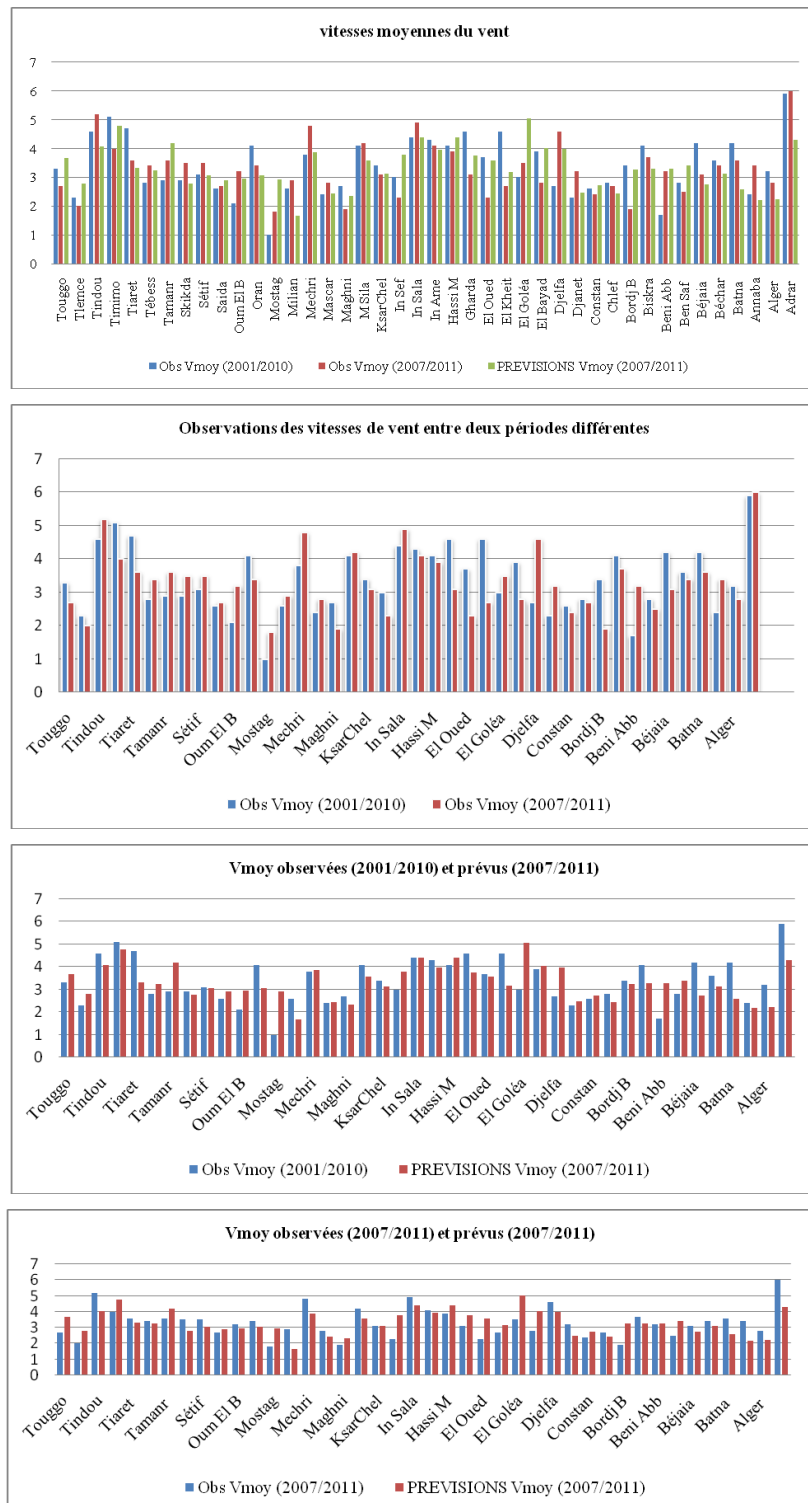


Figure 8. Histogrammes représentatifs des moyennes des vents observés et prévus sur quelques stations

Table 2. Vitesses moyennes observées et prévues sur quelques stations du pays

Station	Obs. V_{moy} 2001-2010	Obs. V_{moy} 2007-2011	Prev. V_{moy} 2007-2011
Touggourt	3.3	2.7	3.68
Tlemcen	2.3	2.0	2.79
Tindouf	4.6	5.2	4.07
Timimoun	5.1	4.0	4.79
Tiaret	4.7	3.6	3.32
Tébessa	2.8	3.4	3.25
Tamanrasset	2.9	3.6	4.20
Skikda	2.9	3.5	2.78
Sétif	3.1	3.5	3.08
Saida	2.6	2.7	2.90
O.E.Bouaghi	2.1	3.2	2.96
Oran	4.1	3.4	3.08
Mostaganem	1.0	1.8	2.93
Miliana	2.6	2.9	1.67
Mechria	3.8	4.8	3.88
Mascara	2.4	2.8	2.45
Maghnia	2.7	1.9	2.34
M'Sila	4.1	4.2	3.58
K.E.Chellala	3.4	3.1	3.12
In Sefra	3.0	2.3	3.78
In Salah	4.4	4.9	4.40
In Amenas	4.3	4.1	3.96
H. Messaoud	4.1	3.9	4.40
Ghardaia	4.6	3.1	3.76
El Oued	3.7	2.3	3.59
El Kheiter	4.6	2.7	3.18
El Goléa	3.0	3.5	5.05
El Bayadh	3.9	2.8	4.03
Djelfa	2.7	4.6	3.98
Djanet	2.3	3.2	2.47
Constantine	2.6	2.4	2.73
Chlef	2.8	2.7	2.44
B.B.Arreridj	3.4	1.9	3.26
Biskra	4.1	3.7	3.29
Beni Abbès	1.7	3.2	3.29
Ben Saf	2.8	2.5	3.40
Béjaia	4.2	3.1	2.75
Béchar	3.6	3.4	3.13
Batna	4.2	3.6	2.58
Annaba	2.4	3.4	2.20
Alger	3.2	2.8	2.24
Adrar	5.9	6.0	4.30

Merzouk, N. K. (1999). Carte des vents de l'algerie - resultats preliminaires.

Évaluation des modèles WW3 et WAM par comparaison avec les données du réseau de bouées REDEXT

Siraj-Eddine BOUZGHAIA^{1*}, Nacer KESSALI¹

Résumé

Ce document présente les résultats de l'évaluation des modèles de prévision marine WavewatchIII (WW3) et WAM en fonctionnement opérationnel dans le service PNT du CNPM. L'évaluation a consisté à comparer les sorties des modèles opérationnels avec les mesures des bouées météorologiques du réseau espagnol REDEXT. L'évaluation a été menée en trois étapes. Dans un premier temps une évaluation sommative a été menée pour connaître la justesse des modèles. Elle a simplement consisté à déterminer si les modèles menaient à des prévisions satisfaisantes. Dans un second temps, une évaluation diagnostique a été effectuée pour analyser plus finement les erreurs commises par les modèles, et déterminer leur fidélité. Dans un troisième temps, la dépendance de la performance des modèles à l'intensité du phénomène enregistré a été considérée. Le travail d'évaluation a permis de mettre en évidence les faiblesses et les forces de chacun des modèles opérationnels. Le projet a en outre été mis en place de manière automatique de manière à permettre un suivi des performances des différents modèles.

Mots Clés:

WW3 — WAM — REDEXT — Evaluation

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

*Correspondant: mbouzghaia@gmail.com

1. Introduction

Présentation des modèles

Les modèles utilisés de manière opérationnelle au sein du service PNT pour la prévision de l'état de la mer sont le modèle WAM [TheWamdiGroup \(1988\)](#) et Wavewatch III [Tolman \(2009\)](#). Le modèle WAM est forcé avec les sorties vent du modèle ALADIN-Algérie, tandis que le modèle WW3 utilise les données GFS (NCEP). Les deux modèles sont lancés à froid, et initialisés à partir des données vent.

Caractéristiques des bouées

L'évaluation des modèles de prévision marine a été effectuée par comparaison avec les données disponibles sur le réseau Eulerian Platforms de l'Ifremer. Cinq bouées du réseau espagnol REDEXT ont été choisies, pour d'une part la qualité et la disponibilité de leurs données sur l'intervalle de temps étudié, et d'autre part leur position privilégiée au sein du domaine de calcul des modèles de prévision marine.

Nous ne présenterons ici que les résultats obtenus au niveau des bouées de Cabo Begur (61196) et de Tarragone (61280). Ces bouées se distinguent essentiellement par leur exposition aux trains d'onde issus du golfe du lion. La première est pleinement exposée à ces phénomènes, on y enregistre fréquemment des hauteurs de vague significative dépassant 2.5m. La première est bien plus abritée, et la hauteur de vague significative n'y dépasse généralement pas 1m. Les trois autres bouées ont des expositions moyennes, et les résultats enregistrés se situent globalement entre ces deux extrêmes.

Période étudiée

L'intervalle d'étude va du 01 août 2016 au 13 septembre 2016. Elle a été marquée par trois épisodes hou-

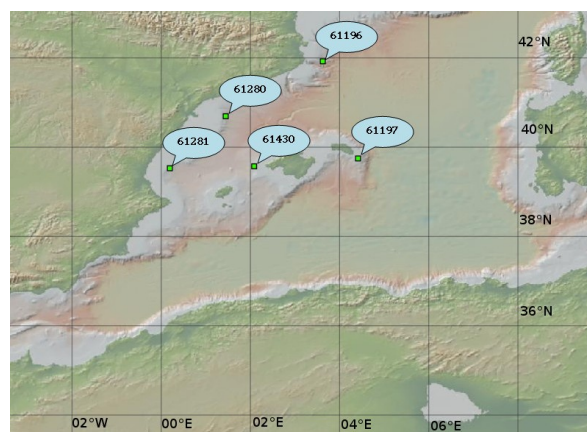


Figure 1. Position des bouées utilisées

leux. Le premier s'est étendu du 04 au 08 août, le second du 09 au 12 août et le troisième du 19 au 22 août. Les trois phénomènes ont été ressentis de manière plus intense à Cabo Begur qu'à Tarragone.

Outils Statistiques

L'évaluation qualitative des modèles a consisté à comparer les sorties tri-horaires des modèles WAM et WW3 avec les mesures des bouées lissées correspondantes de manière qualitative et quantitative. Le seul paramètre considéré dans la présente étude a été la hauteur des vagues significatives.

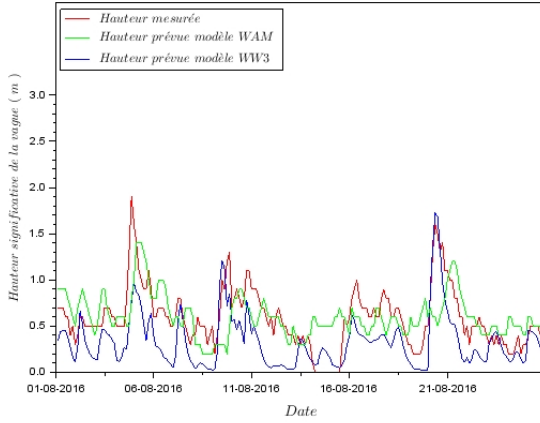
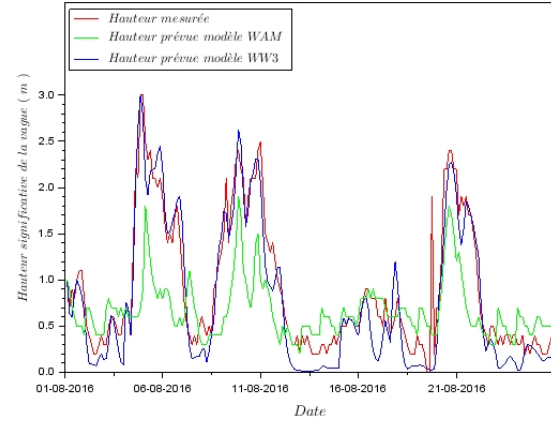
En premier lieu l'évaluation qualitative a consisté à comparer les mesures et les prévisions sur la base de l'échelle de Douglas. Une prévision est alors considérée bonne si la force prévue sur l'échelle de Douglas est égale à la force observée. Elle est considérée moyenne si la force prévue ne s'écarte que d'un seul point de la force observée, et mauvaise sinon.

Table 1. Configuration des modèles opérationnels

Modèle	WAM version 3	Wavewatch III, version 4.18
Equations de base	Conservation de la densité d'action spectrale	Conservation de la densité d'action spectrale
Nombre de directions	24 directions	24 directions
Pas de temps	150 s	900 s
Bathymétrie	Base de données ETOPO2	Base de données ETOPO1
Forçage	Données vents du modèle Aladin de résolution 8km	Données vents du modèle GFS de résolution 25km
Paramétrisation	Paramétrisation pour eau peu profonde	Paramétrisation pour eau profonde

Table 2. Caractéristiques des bouées utilisées

Nom	Cabo Begur	Mahon	Dragonera	Tarragona	Valence
Référence	61196	61197	61430	61280	61281
Longitude	3,65 E	4,42 E	2,10 E	1,47 E	0,21 E
Latitude	41,91 N	39,72 N	39,56 N	40,68 N	39,52 N
Cadence	1h	1h	1h	1h	1h
Profondeur	1200 m	300 m	135 m	688 m	260 m
Date d'ancrage	27-03-2001	29-04-1993	29-11-2006	20-08-2004	15-09-2005
Modèle	WaveScan	WaveScan	WaveScan	SeaWatch	SeaWatch
Distance à la cote	35km	15km	20km	50km	45km
Position	Est de Begur	Sud-Est de Minorque	Ouest de Majorque	Sud de Tarragona	Est de Valence

**Figure 2.** Hauteurs de vague significative mesurées et prévues à Tarragona (61280)**Figure 3.** Hauteurs de vague significative mesurées et prévues à Cabo Begur (61196)

Pour l'évaluation quantitative, les paramètres statistiques étudiés pour comparer les prévisions (série statistique p_i) et les observations (série statistique o_i) sont le biais bi l'erreur quadratique moyenne eq et le coefficient de corrélation de Pearson r Mentaschi et al. (2015) .

$$bi = \frac{1}{n} \sum (p_i - o_i) \quad (1)$$

$$eq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (p_i - o_i)^2} \quad (2)$$

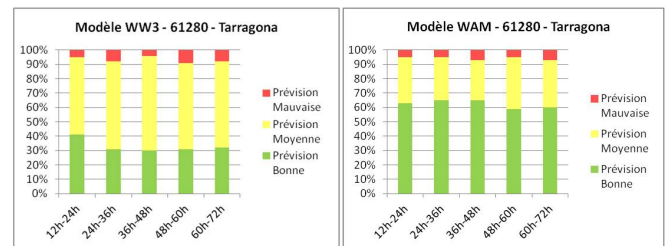
$$r = \frac{\sum (p_i - \bar{p})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum (p_i - \bar{p})^2} \sqrt{\sum (o_i - \bar{o})^2}} \quad (3)$$

2. Résultats et Discussions

Evaluation de la justesse des modèles

Pour évaluer la justesse des modèles, des scores ont été calculés sur 5 tranches de temps de 12h, en calculant le pourcentage de prévisions bonnes, moyennes et mauvaises, réalisés par les modèles sur la tranche de temps considérée.

Le premier point saillant est la rareté des prévisions mauvaises, qui n'ont pas excédés 10 %. De plus certaines

**Figure 4.** Scores des modèles obtenus à Tarragona (61280)

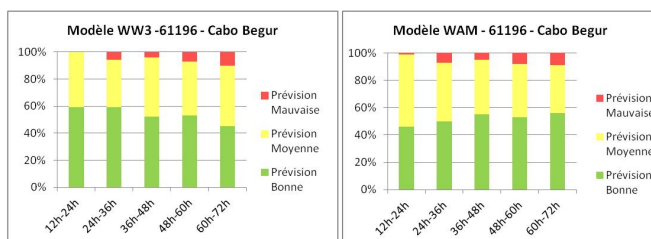
de ces mauvaises prévisions ne sont qu'apparentes, et dues en réalité à de mauvaises mesures (dont la proportion est de l'ordre de 3%). Les deux modèles sont donc apparemment fiables. Le second point ressortant de ces graphiques est que le modèle WAM semble être plus performant au niveau de la bouée 61280, tandis que le modèle WW3 semble l'être au niveau de la bouée 61196. Cette évaluation n'est que superficielle, et ne révèle pas les caractéristiques réelles des modèles. Une étude approfondie est nécessaire.

Evaluation de la fidélité des modèles

L'évaluation de la fidélité des modèles s'est faite en calculant le biais, l'erreur quadratique moyenne et le coef-

Table 3. Echelle de Douglas

Force	Descriptif	Hauteur des vagues significatives (m)
0	Calme	0
1	Ridée	0 – 0.1
2	Belle	0.1 – 0.5
3	Peu agitée	0.5 – 1.25
4	Agitée	1.25 – 2.5
5	Forte	2.5 – 4
6	Très forte	4 – 6
7	Grosse	6 – 9
8	Très grosse	9 – 14
9	Énorme	> 14

**Figure 5.** Scores des modèles obtenus à Cabo Begur (61196)

ficient de corrélation des prévisions vis-à-vis des mesures.

Table 4. Statistiques des modèles

Modèle	Bouée	bi	eq	r
WW3	61280	-0.2064	0.2874	0.7659
WW3	61196	-0.1356	0.2412	0.9470
WAM	61280	+0.0738	0.2793	0.4131
WAM	61196	-0.0568	0.4634	0.6538

Le modèle WW3 présente un biais important, il sous-estime systématiquement de 10 à 20cm la hauteur significative des vagues. L'erreur commise est faiblement dispersée, et le modèle semble présenter une bonne fidélité. Le modèle WAM, au contraire, ne présente pas de biais significatif, mais présente une forte dispersion. Bien que sa justesse soit comparable voire parfois meilleure que celle du modèle WW3, sa fidélité est moindre.

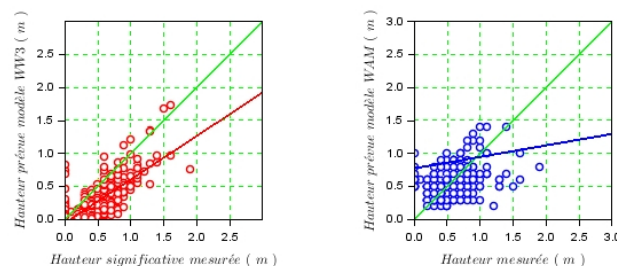
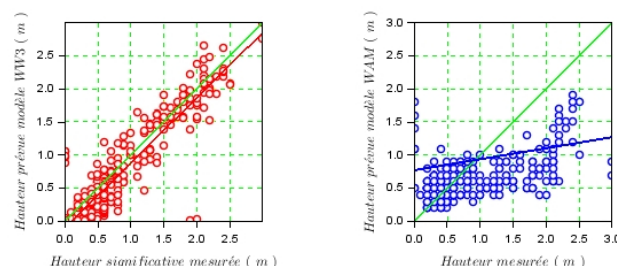
Performances des modèles en fonction de la hauteur de vagues significative

Pour mettre en évidence la sensibilité des modèles à l'intensité des phénomènes observés, la corrélation linéaire entre les prévisions et les mesures a été considérée en traçant les diagrammes de dispersion des prévisions effectuées sur l'intervalle +12h à +36h.

Cela a permis de mettre en évidence l'efficacité de modèle WW3 dans la description des hauteurs de vagues significative enregistrées à Cabo Begur (61196), ce à quoi échouait le modèle WAM. Pour ce qui est de la bouée de Tarragone, les deux modèles ont mal décrit les hauteurs des vagues significatives d'importance (principalement de type houle) qui y ont été enregistrés. Cela indique la faiblesse des modèles pour la description de la houle.

3. Conclusion et Perspectives

Ce travail nous a permis de valider les modèles opérationnels, et de démontrer que les modèles opérationnels

**Figure 6.** Diagrammes de dispersion obtenus à Tarragone (61280)**Figure 7.** Diagrammes de dispersion obtenus à Cabo Begur (61196)

livraient des résultats satisfaisants. Néanmoins une grande marge d'amélioration est possible, en particulier pour le modèle WW3 qui a globalement donné les meilleurs résultats. Cette étude a permis de dégager des axes de développement nécessaires à l'amélioration des prévisions marines, d'une part concernant la routine d'évaluation elle-même, et d'autre part concernant les modèles. Concernant la routine d'évaluation, nous nous fixons les objectifs suivants :

- Extension de la routine d'évaluation à d'autres paramètres caractérisant l'état de la mer : la période moyenne des vagues, et la direction moyenne de propagation.
- Intégration d'un plus grand nombre de bouées à la routine d'évaluation
- Détermination de plus d'indicateurs statistiques

Références

- Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., and Mazzino, A. (2015). Performance evaluation of Wavewatch {III} in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, 90 :82 – 94.
- TheWamdiGroup (1988). The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12) :1775–1810.
- Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III™ version 4.18. Technical Report 276, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

Mise en exploitation du modèle de prévision routière METRo en Algérie.

Idir DEHMOUS ^{1*}, Mohamed MOKHTARI ¹

Résumé

L'objectif principal de ce travail est la présentation du modèle de prévision routière METRo et son implémentation à l'Office National de la Météorologie (ONM) dans la perspective de sa mise en exploitation en Algérie en collaboration avec l'Agence de Gestion des Autoroutes (AGA). METRo est un modèle développé par les scientifiques de l'Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC). Il est opérationnel au Canada depuis 2001 et il donne des prévisions sur l'état de la route pour une période allant jusqu'à 48 heures. Le modèle METRo a été implémenté à l'ONM et il est validé sur la situation des 24, 25 et 26 janvier 2015. Les données de forçage utilisées pour cette étude sont celles observées à la station d'observation d'Ain Arnet (Sétif) et celles prévues du modèle AROME. L'analyse des sorties de du modèle montre que ce dernier a bien simulé les baisses des températures et les cumuls de neige pour cette situation, car la neige, qui est un bon indicateur du froid, a effectivement été observée à la station d'Ain Arnet.

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

*Correspondant: dehmous86@hotmail.fr

1. Introduction

Durant les périodes d'hiver, de nombreuses régions tempérées sont influencées par des conditions climatiques sévères qui peuvent engendrer des répercussions graves sur les conditions de conduite. Des autoroutes entières sont parfois fermées à la circulation à cause du gel et du verglas ou l'accumulation de neige. De plus, des phénomènes météorologiques telles que la pluie et l'humidité, contribuent parfois d'une façon directe à la dégradation de la chaussée et augmentent les risques d'accidents, notamment lorsque les températures deviennent très basses.

Afin de faire face à ces risques et anticiper des stratégies d'alerte et d'intervention, la communauté scientifique a été mobilisée. A cet effet, plusieurs modèles numériques pour la prévision routière ont été développés [Covert and Hellstrom \(2014\)](#), [Crevier and Delage \(2001\)](#) pour la prévision des conditions de la surface de la route. Ces modèles sont opérationnels dans plusieurs centres météorologiques tels que le Canadian Meteorological Center (CMC) au Canada et au Czech Hydrometeorological Institut (CHMI) en République Tchèque.

En Algérie, malgré la courte durée de la saison d'hiver et le fait que les conditions météorologiques ne sont pas aussi rudes que celles des pays nordiques, les accidents de la route dues aux mauvaises conditions météorologiques représentent tout de même 5% du total des accidents enregistrés chaque année [Azzedine \(2015\)](#). De ce fait, un système de prévision de l'état des routes est nécessaire pour anticiper l'organisation des services d'intervention et de maintenance et réduire le risque d'accident.

Dans ce contexte, nous avons implémenté au Centre National des Prévisions Météorologique (CNPM-ONM) le modèle de prévision routière METRo. Nous avons testé ce système sur les situations des 24, 25 et 26 janvier 2015. Faute de disponibilité des données d'observation sur l'autoroute Est-ouest pour initialiser le modèle, nous avons utilisé celles de la station d'Ain Arnet (Sétif) située à proximité de l'autoroute, tandis que les prévisions du modèle AROME-Algérie sont utilisées comme données de couplage pour pouvoir intégrer dans le temps le modèle

METRo.

Après l'introduction, nous décrirons dans le chapitre 2 le schéma physique du modèle METRo qui est basé sur la résolution de l'équation du bilan énergétique à la surface. Le chapitre 3 sera consacré à la présentation des différentes étapes de la chaîne de prévision du modèle METRo et les données de forçage nécessaires pour exécuter le modèle. Ensuite, nous décrirons, dans le chapitre 4, notre cas d'étude. Le chapitre 5 sera dédié aux résultats de nos simulations et nous terminons par une conclusion.

2. Description du modèle METRo

METRo est un acronyme de «Model of the Environmental and Temperature of the Road » développé et devenu opérationnel au centre de prévisions météorologiques Canadien depuis l'année 2001 ?. Le modèle consiste en la modélisation des trois phénomènes, bilan radiatif à la surface de la route, le transfert de chaleur par conduction au sein du matériau composant la chaussée et le cumul de pluie et de neige sur la surface de celle-ci.

Modélisation du bilan énergétique

La prise en compte des différents flux radiatif présents à la surface est très importante pour prévoir l'état de la chaussée. La relation du bilan énergétique est donnée par [Crevier and Delage \(2001\)](#) :

$$R = (1 - \alpha)S + \epsilon I - \epsilon \sigma T_s^4 - H - L_\alpha E \pm L_f + A \quad (1)$$

Avec :

- R est la somme du flux radiatif solaire net
- S est le flux incident
- α représente l'albédo
- I est la différence en le flux du rayonnement incident absorbé et le flux émis par la surface dans les courtes longueurs d'onde (rayonnement infrarouge)
- σ constante de Stephan-Boltzmann
- T_s température à la surface de la route

- le paramètre $\epsilon I - \sigma \epsilon T_s^4$ représente la différence entre le taux d'absorption du flux incident et celui émis par la chaussée
- H flux turbulent par chaleur sensible
- $L_\alpha E$ flux turbulent par chaleur latente; où L_α est la chaleur latente de vaporisation ou de sublimation et E le flux de vapeur d'eau.
- Le paramètre $\pm L_f P$ est relatif au flux de changement de phase des précipitations, présente à la surface avec P le taux de précipitation et L_f la chaleur latente de fusion ou de la glace, les signes + et - sont intervertis selon qu'il s'agit d'un phénomène de gel ou de fonte de la glace
- A indique le flux anthropogénique, il représente un terme additionnel dû à d'autres paramètres tels que la densité du trafic sur la route, les ombrages et d'autres caractéristiques relatives à la chaussée.

Modélisation du transfert de chaleur par conduction

L'évolution de la température au sein du matériau composant la route est donnée par la résolution de l'équation de diffusion à une dimension :

$$C(z) \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = - \frac{\partial G(z,t)}{\partial z} \quad (2)$$

Avec : $C(z)$ représente la capacité thermique et $G(z)$ le flux de chaleur au sol (suivant la profondeur), qui est donné par :

$$G(z,t) = -k(z) \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \quad (3)$$

$k(z)$: est la conductivité thermique du matériau qui compose la route. Le tableau 1 donne les valeurs de la conductivité thermique et de capacité thermique utilisées dans le modèle METRo pour certains matériaux utilisés dans l'élaboration des routes et des autoroutes.

Table 1. Conductivité et capacité thermique pour certain matériaux utilisés dans METRo

Matériau	Conductivité thermique ($W.K^{-1}.m^{-1}$)	Capacité thermique ($J.K^{-1}.m^{-3}$)
Asphalte	1.80	2.1×10^6
Béton	2.20	2.1×10^6
Pierre concassée	0.95	2.0×10^6

Pour résoudre l'équation de la diffusion, METRo utilise un schéma explicite avec deux différents maillages. Une grille avec une résolution uniforme pour les ponts et les viaducs et une grille à résolution variable pour les routes ordinaires.

Ce type de maillage a été adopté car les ponts sont suspendu en plein air, le profil de température se retrouve affecté non seulement à la surface, mais aussi du côté inférieur de la structure, un maillage uniforme permet de tenir compte des échanges radiatifs de part et d'autre du pont. Contrairement au cas des routes, la température au sol est le paramètre le plus important pour prévoir l'état de la chaussée. C'est la raison pour laquelle, la résolution du maillage est raffinée en surface et décroît à mesure qu'on descend en profondeur.

Le modèle METRo compte en effet 29 niveaux, l'espacement entre eux est de 0.01 m à la surface et 0.05 m

à partir d'une profondeur de 0.5 m. Le dernier niveau se situe à 1.4 m de la surface, 24 niveaux se situe au-dessus de 0.5 m de profondeur.

Par ailleurs, dans le cas des ponts et des viaducs, une grille avec un espacement de 0.01 m et les niveaux y sont uniformément repartis, leur nombre dépend de l'épaisseur du pont.

Modèle pour la prévision des cumuls d'eau et de neige

La troisième partie est un modèle simplifié pour les cumuls d'eau et de neige à la surface de la route, qui tient compte des valeurs des températures selon qu'elles sont supérieures ou inférieures à $0^\circ C$.

3. Processus de prévision dans le modèle METRo

Initialisation

Le modèle METRo a besoin, comme état initial, pour chaque run, d'un profil de température de la surface de la route et ce, i pour perturber le modèle de transfert de chaleur par conduction. METRo utilise, à la fois, les données d'observations recueillies à la surface et en profondeur pour le run prévision. Pour avoir ce type de données, lors des premiers essais de prévisions avec METRo, le centre Canadien de prévisions météorologiques a utilisé des capteurs placé à 0.4 m sous la chaussée [Crevier and Delage \(2001\)](#). Le profil de la température obtenu est exploité comme condition initiale pour la phase de couplage.

Couplage

Durant la phase de couplage, METRo procède à l'adaptation d'une prévision atmosphérique issue d'un modèle de prévision numérique du temps aux observations disponibles. A ce niveau, des valeurs données par le modèle numérique à courte échéance sont remplacées par les valeurs des paramètres observés correspondants. Les paramètres en question sont : la température de l'air, température du point de rosé et le cumul de précipitations. Si l'une des valeurs d'observations est manquante METRo utilise les valeurs données par le modèle numérique.

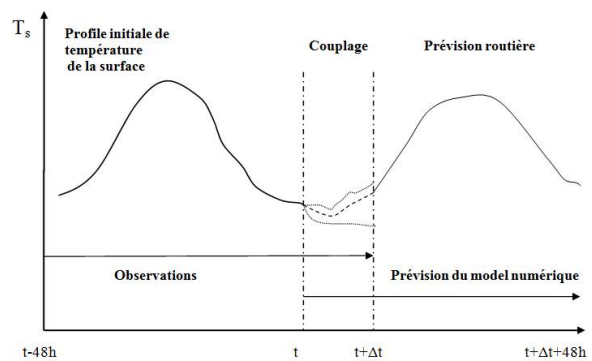


Figure 1. Les trois phases d'une prévision avec METRo

Prévision

A la fin du couplage le fichier d'entrée est modifié par rapport à celui donné par le modèle de prévision atmosphérique, la température T_a , la température du point de rosée q_a , la vitesse du vent V et le taux de précipitations

sont désormais ceux recueillis par les stations. En plus des paramètres relatifs à la prévision routière, METRo donne aussi d'autres paramètres concernant l'état de l'atmosphère. La prévision est effectuée jusqu'à échéance de 48 heures avec des sorties toutes les 20 minutes. Le tableau 2 résume les paramètres de sortie du modèle.

Table 2. Paramètres de sortie du modèle METRo

Nom du paramètre	Notation	Unité
Température à la surface	<i>st</i>	$^{\circ}C$
Température en-dessous de la surface	<i>sst</i>	$^{\circ}C$
Température de l'air	<i>at</i>	$^{\circ}C$
Température du point de rosée	<i>td</i>	$^{\circ}C$
Vitesse du vent	<i>ws</i>	Km/h
Épaisseur de neige sur la route	<i>sn</i>	<i>cm</i>
Taux de précipitations sur la route	<i>ra</i>	<i>mm</i>
Cumul de neige en 1 heure	<i>qp - sn</i>	<i>cm</i>
Cumul de pluie en 1 heure	<i>qp - ra</i>	<i>mm</i>
Le flux solaire	<i>sf</i>	W/m^2
Le flux infrarouge incident	<i>ir</i>	W/m^2
Flux de vapeur	<i>fv</i>	W/m^2
État de la chaussée	<i>rc</i>	Code METRo
Couverture nuageuse	<i>cc</i>	Octat
Chaleur sensible	<i>fc</i>	W/m^2
Effet corps noir	<i>bb</i>	W/m^2
Changement de phase	<i>fp</i>	W/m^2

4. Implémentation du modèle METRo au CNPM

Après l'installation du modèle METRo au CNPM (Centre National des Prévisions Météorologiques), nous avons entamé une étude de validation sur les situations des 24, 25 et 26 janvier 2015. Ces situations sont caractérisées par une baisse sensible des températures et des chutes de neige. Dans ce qui suit, nous allons décrire les données d'entrées utilisées pour initialiser le modèle et notre choix de site.

Données de prévision atmosphérique

Le fichier de prévision atmosphérique a été préparé à partir des sorties du modèle opérationnel AROME, avec une résolution de 3km et une fréquence de sortie (output) de 3 heures. Ce fichier contient les paramètres suivants : la température de l'air à 2m, la température du point de rosé à 2m, les cumuls de pluie et de neige, la vitesse du vent et la pression à la surface. Ces paramètres sont extraits en point de grille du site concerné par la prévision routière. Deux autres paramètres, qui sont en optionnels, peuvent être rajoutés en input au fichier de la prévision. Il s'agit des flux solaire et thermique (infrarouge).

Données d'observations et configuration des stations

Le fichier observation contient les paramètres mesurés au niveau des stations de Road Weather Information Système (RWIS) tels que : la température de l'air, le point de rosée, la vitesse du vent ... Il doit y avoir une observation valide et ce pour chaque champ. Les critères suivants doivent être vérifiés pour que METRo valide le fichier d'observation :

- Au moins une observation doit avoir des valeurs valides pour les paramètres *sst* et *st*.
- L'observation contenant des valeurs valides de *sst* et de *st* doit être suivie dans les 4 heures suivantes d'au moins une valeur valide de *st*.

- Au moins une valeur de *st* doit être disponible au moment ou après la première prévision atmosphérique.

Quant au fichier de configuration des stations, il contient des données relatives aux coordonnées géographiques de la station, son type (selon qu'il s'agit d'une station située sur un viaduc, pont ou une route), ainsi que la description de la nature des matériaux et les épaisseurs des différentes couches qui composent la chaussée (asphalte, gravier, béton, sable). La figure 2 schématise la chaîne de prévision routière avec METRo.

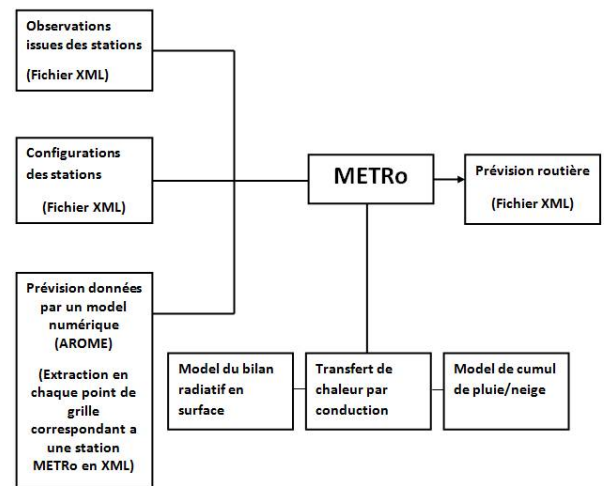


Figure 2. Chaîne d'automatisation de la prévision routière du modèle METRo

Simulation des situations 24 à 26 Janvier 2015

Vu que les routes en Algérie ne sont pas encore dotées du système RWIS, et pour que notre étude soit plus réaliste, nous avons pris une station proche de l'autoroute Est-ouest qui est la station d'Ain-Arnat. Cette station fournit des observations régulières tri-horaires pour les paramètres de la température à 2 mètres, la vitesse du vent et les cumuls des précipitations. Tandis que les paramètres de la température au sol et la température dans le sol (à 40 cm) sont donnés avec une fréquence de trois mesures par jour.

Le fichier de la prévision numérique a été préparé en utilisant la prévision correspondante à la période du 24 et 25 janvier 2015 issue du modèle AROME-Algérie.

Table 3. Paramètres de sortie du modèle METRo

Station	Paramètres fournies par la station
Nom : Ain-Arnat	Température de l'air (<i>ta</i>)
Latitude : 36.16°N	Température du point de rosée (<i>td</i>)
Longitude : 5.32°E	Vitesse du vent (<i>sw</i>)
Élévation : 1015m	Cumul des précipitations pluie/neige (<i>ra/sn</i>)
	Température du sol (<i>st</i>) (min. et max.)
	Température sous le sol (40 cm) (<i>sst</i>)

5. Résultats et discussions

Les résultats représentés dans ce chapitre concernent les paramètres de la température à la surface *st* et les cumuls de neige sur la chaussée prévus pour 48 heures d'échéance.

Le modèle prévoit des températures négatives sur la surface de la route à partir des premières échéances d'intégration (de 00h00 à 08h00 du matin), pour la journée du 25-01-2015 (Fig. 3). Ces températures négatives sont essentiellement dues à l'absence du rayonnement solaire, ce qui affecte considérablement les échanges radiatifs à la surface. Ceci a pour conséquence la diminution de la température à la surface de la route. Pendant la journée, le rayonnement solaire affecte sensiblement la température en surface et provoque une augmentation relativement importante pour les échéances comprise entre 10h00 et 15h00. En comparaison avec les données d'observations, on constate que le modèle a bien simulé les baisses de températures pour cette journée puisque les observations motionnent la présence de la neige sur la station d'Ain-Arnat, qui est un bon indicateur du froid.

En ce qui concerne les cumuls de neige, le modèle METRo prévoit des cumuls atteignant 7 cm d'épaisseur sur la chaussée et ceci pour la nuit du 24 au 25-01-2015 tel que montré sur la figure 4.

Notons que les résultats présentés dans cet article concernent uniquement les prévisions du modèle METRo. En effet, une vérification de l'exactitude des prévisions nécessite la disponibilité de plus d'observations, particulièrement la température à la surface et la température en profondeur du sol. Alors que, la station ne fournit que des températures minimales et maximales et tri-horaires de la température à la surface et de la température dans le sol.

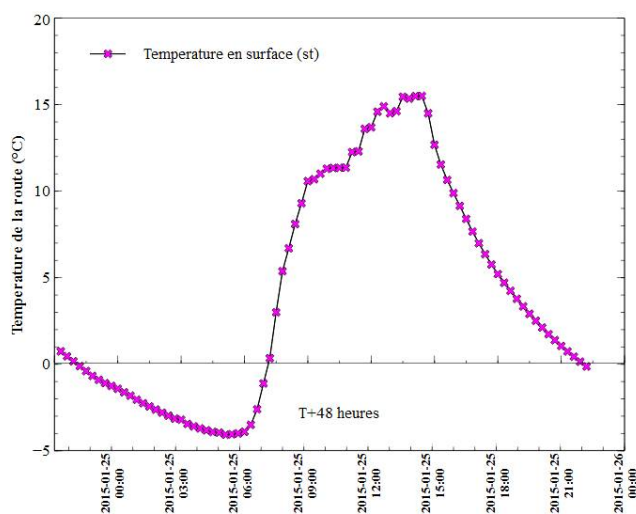


Figure 3. : Profil de la température sur la route (st) prévue par le modèle METRo pour les journées du 24 au 26-01-2015.

6. Conclusion

L'objectif principal de ce travail était l'implémentation et la mise en marche du modèle de prévision routière METRo couplé au modèle opérationnel de prévision AROME-Algérie. Nous avons présenté dans cet article les résultats de notre première expérience en matière de prévision routière avec ce modèle. Ces résultats sont très satisfaisants, puisque le modèle était à la mesure de prévoir les deux

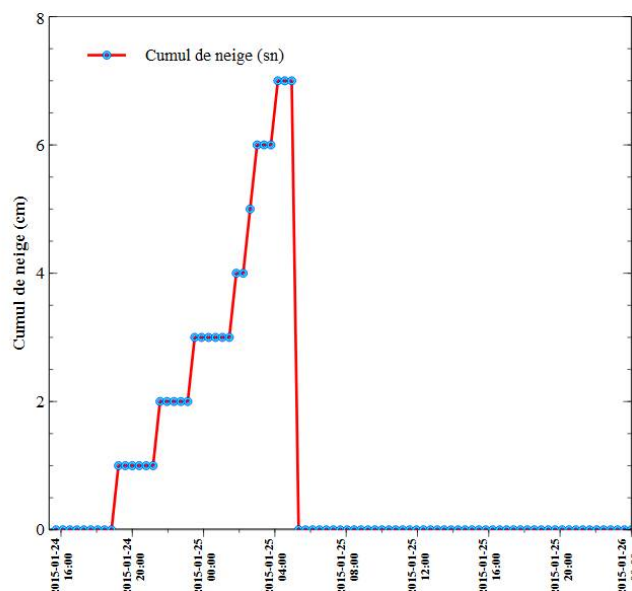


Figure 4. Cumul de neige (sn) prévu par le modèle METRo pour les journées du 24 au 26-01-2015.

phénomènes qui ont caractérisés les situations des 24-26 janvier 2015 qui sont la baisse sensible des températures et la chute de neige.

Cette étude sera plus cohérente et plus complète si des stations RWIS sont disponibles. Ceci peut nous fournir d'avantage d'observations avec des intervalles de temps plus réduits. Cela nous permettra d'avoir un état initial plus proche de la réalité et des données supplémentaires pour la validation de ce modèle.

Par ailleurs, dans le cadre du projet d'installation des stations RWIS le long de l'autoroute Est-ouest par l'AGA en collaboration avec l'ONM, cette étude sera largement améliorée en bénéficiant des avantages de ce projet. Ainsi, l'Algérie bénéficiera à l'avenir d'un système complet fournissant à la fois des prévisions routières et des informations sur l'état de la route en temps réel.

Remerciements

Nous remercions Mr Sahabi et Mr Kerrouch du Centre Climatologique Nationale (CCN) de nous avoir facilité l'accès aux données d'observations utilisées dans cette étude.

Nous remercions Mr Hammouche Rabah, expert CCM, qui nous a suggéré l'idée de l'adaptation de ce modèle.

Références

- Azzedine, M. (2015.). Principales causes des accidents de la circulation routière et les mesures d'atténuation en algérie. *European scientific journal*, Vol 11.
- Covert, J. and Hellstrom, R. (2014). An indirect method for predicting road surface on coastal areas with snow in winter. *Appalachian university*.
- Crevier, L.-P. and Delage, Y. (2001). Metro : A new model for road-condition forecasting in canada. *Journal of Applied Meteorology*, 40(11) :2026–2037.

Disponibilité des jours pour la cuisson solaire à Ain Sefra

Mahmoud HAOUARI ^{1*}, Mokhtar TAHRAOUI ¹

Résumé

En terme de gisement solaire, les produits généralement disponibles aujourd'hui en Algérie, expriment ce gisement dans un pas de temps annuel jusqu'à mensuel. On se propose dans cet article de définir une méthode statistique pour aboutir à un produit permettant d'avoir, avec une probabilité confortable, un certain nombre d'heures d'insolation le matin et le soir et ceci, pour chaque jour de l'année

Mots Clés:

Insolation — Statistique quantiles — Cuisson solaire — Désertification — Ain Sefra

¹Département Météorologique Régional Ouest, Algérie

*Correspondant: mahmoud_haouari@yahoo.fr

1. Introduction

La désertification se définit comme la dégradation des sols dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches. Elle se produit lorsque les sols sont fragiles, le couvert végétal amenuisé et le climat particulièrement impitoyable.

Les principales causes de la désertification sont les variations du climat et les activités humaines, généralement elles agissent de façon combinée :

Variations du climat Lorsque les températures sont élevées pendant plusieurs mois, elles provoquent des sécheresses qui empêchent la végétation de se développer.

Activités humaines Les activités humaines qui entraînent la désertification sont principalement liées à l'agriculture :

- Le surpâturage détruit le couvert végétal qui protège les sols contre l'érosion
- la surexploitation épuise les sols
- le déboisement détruit les arbres qui maintiennent la terre sur le sol. Le bois est la principale source d'énergie domestique (éclairage, cuisson) dans de nombreuses régions arides.

La lutte contre la désertification repose essentiellement sur l'atténuation des causes qui contribuent à la désertification.

La zone ciblée pour cette étude est la partie sud du nord-ouest de l'Algérie. De part sa position géographique, la pluviométrie de cette région dépasse rarement 100 mm. La saison des pluies est très brève et se répartie sur à peine une cinquantaine de jours.

Dans le cadre d'un développement durable de ces zones, à un moment ou à un autre, si l'on veut lutter contre la désertification, le choix de l'utilisation des énergies renouvelables est incontournable. L'utilisation de l'énergie solaire avec des équipements de faible coût, reste une solution viable.

Mais faudra t-il déterminer si les ressources solaires sont suffisantes et également bien distribuées durant la journée d'une part, et durant la succession des jours de l'année d'une autre part.

2. But de l'étude

L'objectif principal de cette étude étant de trouver une méthodologie, sous la forme d'un traitement statistique, pour étudier les séries quotidiennes d'insolation obtenue à la station de Ain Sefra.

Par cette méthodologie, nous voulons aboutir à un calendrier durant l'année donnant la durée d'insolation disponible avec suffisamment de confiance.

Comme nous avons choisis comme application la cuisson solaire, il est important que ce calendrier réponde à la question suivante : quelle est la ressource solaire disponible avec une probabilité confortable, le matin et le soir d'un jour j de l'année ?

3. Matériel et critique des données

A cet effet, nous disposons de séries de données de l'insolation quotidienne, totalisée le matin et le soir dans la station de Ain sefra (latitude : 32 ° 45' Nord, longitude : 00 ° 36' Ouest et altitude : 1058 mètres) de 1977 à 2005

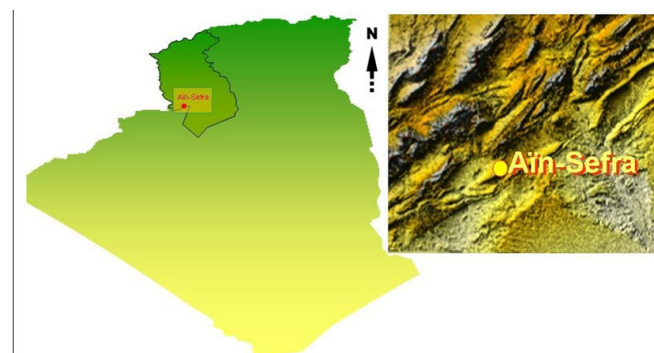


Figure 1. Position géographique de la station de Ain Sefra

Les mesures héliographiques ont débuté avec la réouverture de la station d'Ain Sefra en 1977. Elles sont faites à l'aide d'héliographe de Campbell-Stokes, de fabrication Casella (Figure 2).

Le dépouillement des diagrammes (Figure 3) d'insolation est effectué manuellement par l'observateur à la station d'observation. Pour être validée, une mesure journalière doit être inférieure ou égale à la durée du jour.



Figure 2. Héliographe

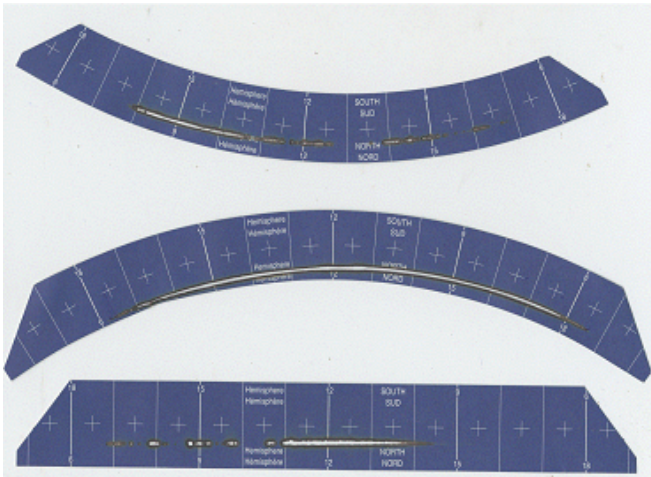


Figure 3. Diagrammes d'insolation

L'analyse fréquentielle des données d'insolation (Figure 4) montre que le pourcentage des journées sans soleil est presque nul en été et ne dépasse pas 2% pendant la saison hivernale. La zone est très propice pour la cuisson à l'énergie solaire. En effet, à l'exception des mois de décembre et janvier, la durée de l'insolation moyenne dépasse 4 heures aussi bien le matin que le soir.

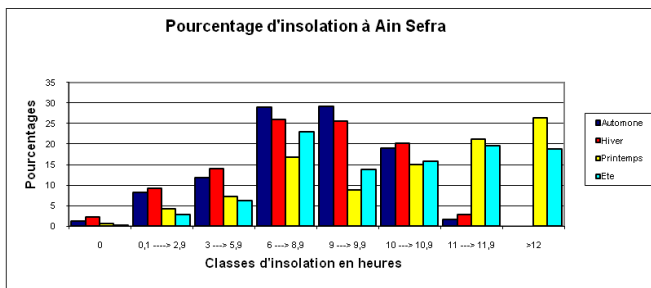


Figure 4. Pourcentage d'insolation à Ain Sefra (1977-2005)

4. Choix de la méthodologie adoptée

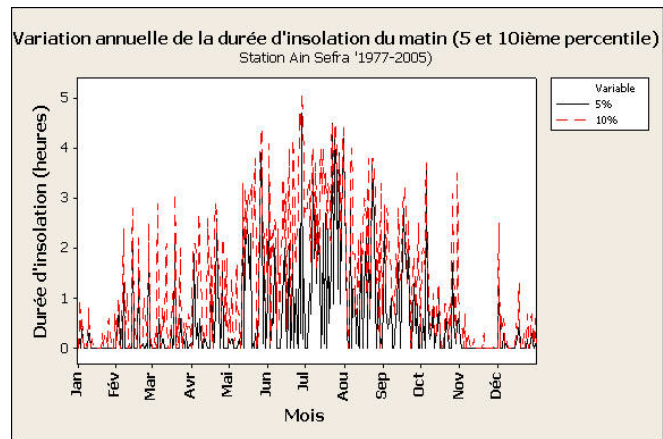
La méthodologie qu'on adoptera est décrite dans Stern et al. (2006). Elle a été utilisée pour les données de précipitations, mais peut être utilisée pour d'autres données

climatiques de disposition circulaire.

Pour par exemple le matin, nous disposons de 366 variables (jours de l'année) de 29 observations (1977-2005) sauf pour la variable 60 représentant le 29 février. Il s'agit de calculer le point de pourcentage 10% qui représente une probabilité confortable, puisque il est égalé ou dépassé 9 années sur 10.

Distribution libre

En premier lieu, nous calculons pour chaque jour le 10ième percentile par une distribution libre. La figure 5 montre que la variation annuelle est trop variable pour une utilisation sous forme de calendrier ; les estimations sont affectées par beaucoup de bruit.

Figure 5. Variation annuelle des 5^e et 10^e percentile de l'insolation du matin à Ain-Sefra (1977-2005)

Ajustement par une loi de probabilité

Vu que la distribution libre nous ne permet pas d'avoir des estimations correctes du 10^e percentile, on a fait appel à des lois de distribution statistiques dont les paramètres sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance Venables and Ripley (2002) Delignette-Muller and Dutang (2015). Cinq lois sont testées sur les données journalières (matin et soir) de l'insolation, le tableau 1, qui résume les résultats que nous avons obtenus sur les 366 variables, donne le niveau de signification du test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov (K-S) pour une variable de chaque saison Conover (1971) Marsaglia et al. (2003). Les résultats indiquent qu'au niveau de 0.05, aucune loi continue ne semble ajuster correctement nos séries quotidiennes (les $\alpha_{calculées}$ sont généralement inférieurs à $\alpha_{critique} = 0.05$).

Cette constatation est due principalement, pour un jour j de l'année, à la variabilité inter-annuelle de l'insolation et à la présence de valeurs nulles.

Analyse des données pentadaires

Devant cette difficulté d'ajuster correctement les séries quotidiennes, nous envisageons de les résumer sur un pas de temps supérieur au pas quotidien mais qui reste assez précis pour ne pas gommer la précision de la variabilité d'un jour à l'autre.

Le pas de temps, qui nous semble le plus raisonnable étant la pentade. A partir des 366 variables quotidiennes, nous calculons les moyennes pentadaires effectuées sur un pas de temps de 5 jours. On aboutit ainsi à 73 variables circulaires.

Table 1. Niveau de Signification du test de K-S d'ajustement de 5 lois continues des données journalières d'insolation. Station Ain-Sefra (1977-2005)

Lois	$\alpha_{calculée}$ 1er janvier		$\alpha_{calculée}$ 1er avril		$\alpha_{calculée}$ 1er juillet		$\alpha_{calculée}$ 1er octobre	
	Matin	Soir	Matin	Soir	Matin	Soir	Matin	Soir
Normale	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Bêta	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Gamma	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Weibull	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Exponentielle	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01

L'ajustement des séries pentadaires donne de bons résultats avec le choix de la loi Gamma. Le tableau 2 montre les résultats du test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov, dont les niveaux de signification dépassent largement la valeur critique de 0.05.

Table 2. Niveau de Signification du test de K-S d'ajustement de 5 lois continues des données journalières d'insolation. Station Ain-Sefra (1977-2005)

Loi gamma	1 ^{re} pentade		2 ^e pentade	
	Matin	Soir	Matin	Soir
$\alpha_{calculée}$	0.65	0.36	0.42	0.35
Loi gamma	3 ^e pentade		4 ^e pentade	
	Matin	Soir	Matin	Soir
$\alpha_{calculée}$	0.36	0.71	0.29	0.90

Pour ajuster obtenir les meilleures estimations afin de répondre à nos objectifs, nous testons 4 méthodes d'estimation du 10^epercentile :

Méthode 1 : Utilisation uniquement d'une distribution libre.

Méthode 2 : Ajustement des séries pentadaires par la loi Gamma.

Méthode 3 : Ajustement des séries pentadaires par la loi gamma avec lissage des résultats par la moyenne mobile sur trois valeurs en attribuant respectivement les poids 0.25, 0.5 et 0.25.

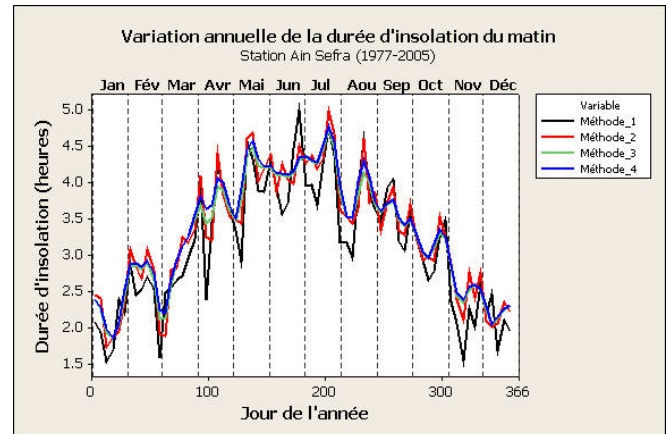
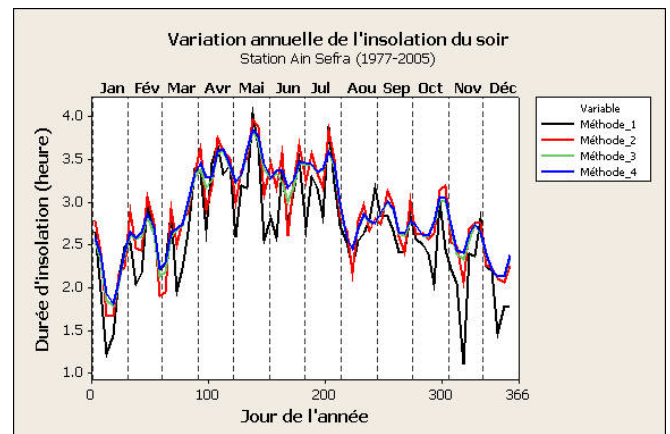
Méthode 4 : Ajustement des séries pentadaires par la loi gamma avec lissage des 2 paramètres de la loi par la moyenne mobile sur trois valeurs en attribuant respectivement les poids 0.25, 0.5 et 0.25.

Les figures de 6 et 7 montrent que seules les méthodes 3 et 4 donnent de très bons estimations du 10^epercentile. Bien que la méthode 4 soit beaucoup plus gourmande en calcul, elle n'apporte pas beaucoup de précision par rapport à la méthode 3. Toutefois, il est préférable d'utiliser la méthode 4, car aujourd'hui le coût de tels calculs est négligeable.

5. Résultats

Les résultats de nos traitements sont exposés dans la Figure 8 pour l'insolation disponible le matin et dans la Figure 9 pour celle disponible le soir.

En remarque tout de suite que l'insolation disponible le matin est nettement supérieure à l'insolation disponible le soir. Cette anomalie peut s'expliquer par la position géographique de la station de Ain Sefra. Sur la Figure 1, on remarque que le côté est de la station est dégagé, par contre sur le côté ouest se dresse une imposante barrière

**Figure 6.** Variation annuelle du 10^epercentile de l'insolation du matin à Ain Sefra (1977-2005)**Figure 7.** Variation annuelle du 10^epercentile de l'insolation du soir à Ain Sefra (1977-2005).

de montagne. Cette barrière constitue un obstacle naturel à l'insolation en fin d'après-midi. A cela, il faut ajouter le développement d'orages en fin d'après-midi en été

Si l'on considère que nous avons besoin d'au moins 3 heures pour cuire un repas grâce au four solaire, cela est possible de la mi-mars à la mi-octobre pour le matin et de la fin mars à la fin de juillet pour le soir.

Pour plus de confiance, nous avons voulu calculer le point de pourcentage de 5% qui constitue une confiance confortable pour d'autres utilisateurs.

6. Conclusions

Cette étude nous a montré que la modélisation statistique qui prenne en compte des données climatiques d'échelle temporelle fine, c'est-à-dire de l'échelle quotidienne à l'échelle horaire reste difficile à mettre en œuvre et utilise des concepts avancés en statistique inférentielle.

Les résultats de cette étude montrent que la position

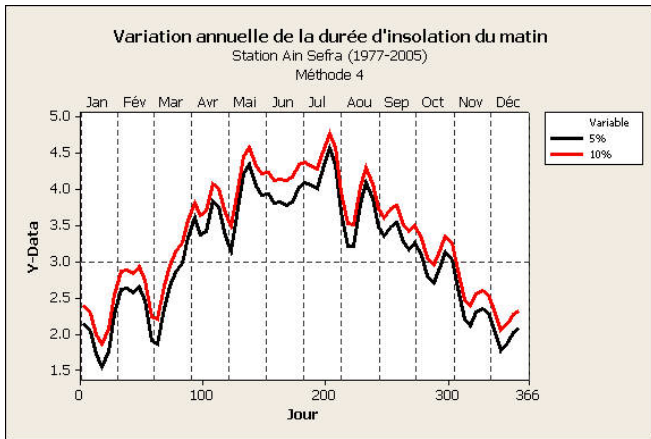


Figure 8. Variation annuelle des 5^e et 10^e percentile de l'insolation du matin à Ain-Sefra (1977-2005) Méthode 4.

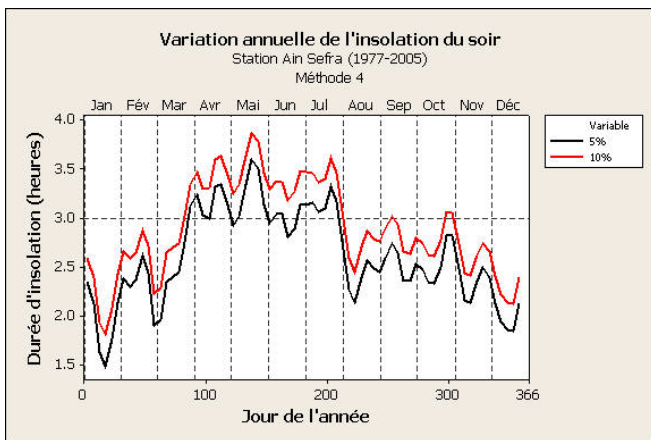


Figure 9. Variation annuelle des 5^e et 10^e percentile de l'insolation du soir à Ain Sefra (1977-2005) Méthode 4.

géographique de la zone d'utilisation de l'information compte énormément et qu'il est difficile d'extrapoler des données du gisement solaire sans prendre en compte le relief.

Enfin, un tel calendrier peut être utilisé par beaucoup d'autres utilisateurs de l'énergie solaire et peut être personnalisé suivant leur besoin d'une part, et leurs risques d'une autre part.

Références

- Conover, W. J. (1971). *Practical Nonparametric Statistics*. John Wiley & Sons.
- Delignette-Muller, M. L. and Dutang, C. (2015). fitdistrplus : An r package for fitting distributions. *Journal of Statistical Software*.
- Marsaglia, G., Tsang, W. W., and Wang, J. (2003). Evaluating kolmogorov's distribution. *Journal of Statistical Software*.
- Stern, R., Rijks, D., Dale, I., and Knock, J. (2006). *Instat Climatic Guide*.
- Venables, W. and Ripley, B. (2002). *Modern applied statistics with S*. Springer, New York.

Development of a high-resolution nearshore wave forecasting system for the Algerian coasts

Nasser KESSALI ^{1*}

Abstract

This paper describes a research aimed to the development of a high-resolution nearshore wave forecasting system for the Algerian coasts. The model uses the results of the large scale meteorological forecasting system named ALADIN/AROME managed by the numerical weather prediction group (P.N.T) at the Algerian Met Office (ONM), as wind input for WW3 (Wave Watch 3 model) and SWAN models. The traditional technique One way is used for different grid points on the bay of Algiers. One intermediate SWAN grid and two nested grids have been used.

Keywords:

Wave Forecasting — Nearshore — WW3 — SWAN — Algerian coasts

¹Office National de la Météorologie (CNPM-ONM), Dar El Beida, Alger

*Corresponding Author: n.kessali@meteo.dz

1. Introduction

Wave predictions in deep waters have experienced significant developments during the last few decades and the skill of the state of the art models has been shown to be generally improving.

However, the predictions are very sensitive to the used wind fields, as demonstrated by various authors [Teixeira et al. \(1995b\)](#) [Holthuijsen et al. \(1996\)](#). Wave predictions near the coasts are subjected to more complicated physics than in deep water, due to the greater influence of bathymetry and breaking processes near the shore, which, combined with the uncertainty from wind models, make wave modelling in coastal waters as a challenge.

Many meteorological centers produce wave forecasts for the Mediterranean Sea. Most of these tend to underestimate the wind velocity and consequently the wave height. The reason is that global meteorological models have poor spatial resolutions for restricted seas such as the Western Mediterranean Sea. Cavaleri and Sclavo ([Cavaleri and Sclavo \(2006\)](#)) have shown that the results can be highly improved using nested models with high resolution. This motivated the implementation of Limited Area Models over the Mediterranean Sea as the one used in this work. High quality wind data from the ALADIN and AROME models are used in this study.

However, while it is generally accepted that wind predictions can improve using higher resolution models, it is not clear if the grid resolution does play an important role in wave prediction modules. In deep waters areas, where the water depth is larger than 100 meters, it is unlikely that a better description of the bathymetry, that could be achieved using high resolution models, can give significant improvements. On the contrary in shallow waters regions as those near to coasts, it is reasonable to expect that nested small scale grids can give better results than coarse ones.

The key point of this work is that a new high-resolution wave forecasting system, based on multi-nested on-way chains of WW3/SWAN models [Holthuijsen et al. \(1989\)](#), running on one near shore grids covering the bay of Algiers has been applied. The boundary conditions for the SWAN finer grids are obtained using the results of the

larger scale runs based on the WW3 model in the Mediterranean Sea, while the wind field is that produced on the large scale at 08 km resolution by ALADIN for the coarse grid and on the high resolution at 03km by AROME for the Intermediate grid Swan.

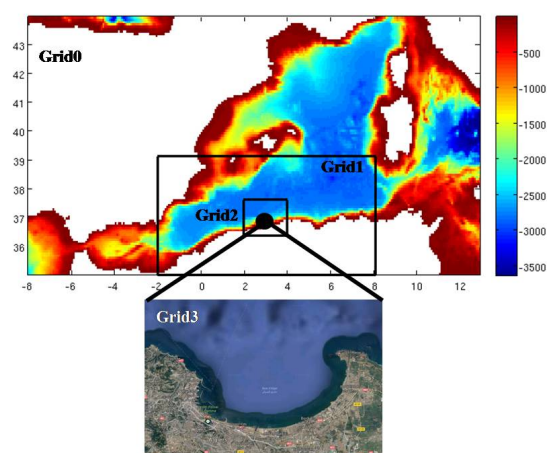


Figure 1. Location of the areas and bathymetry (Grid0), resolution 1/12 degree used for WW3 model.

The forecasting models

The forecasting system is composed by a sequence of numerical atmospheric and oceanographic models. The limited area meteorological model used in the system are called ALADIN (Aire limitée Adaptation dynamique Développement International) and AROME (Application de la Recherche à l'Opérationnel à Meso-Echelle). It is composed by two high-resolution and very-high-resolution meshes, one coupled into the other one-way. The run with the coarsest resolution, 08km, is called ALADIN, the run with the finest resolution, 03km, is called AROME. It is nested on the grid of the previous run and it covers part of the Mediterranean Sea. Its outputs temporal resolution is 3 hours.

Winds resulting from these models are then used as inputs for WW3 Wave Model [Tolman et al. \(2014\)](#) and SWAN model [Teixeira et al. \(1995a\)](#) to predict wave fields in the Mediterranean Sea (Figure 1). The grid resolution

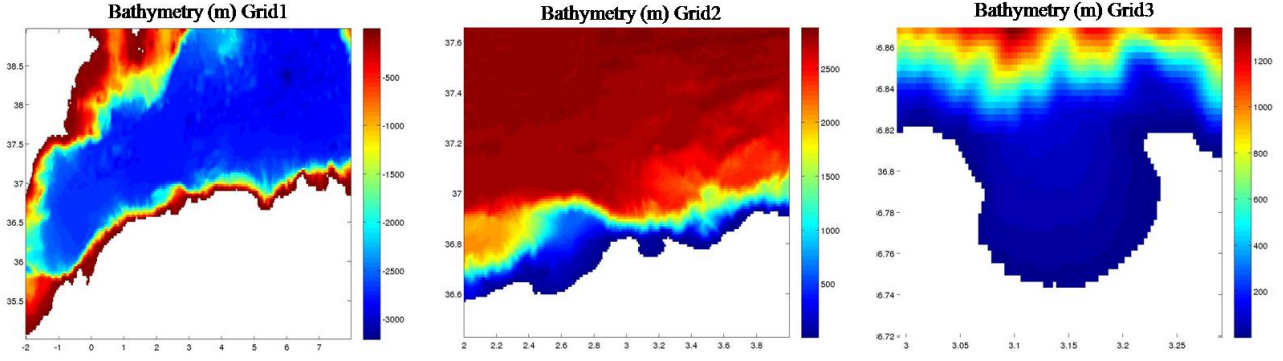


Figure 2. Bathymetry: Intermediate grid Swan(Grid1, $\frac{1}{133}^\circ$) - Nested grid (Grid2, $\frac{1}{100}^\circ$) - Nested grid (Grid3, $\frac{1}{333}^\circ$).

is of 08 km and the outputs temporal resolution is 3 hours. Wave forecasting is run every 24h with a 72 hours advance forecasting.

It is underlined that the spatial resolution of the available WW3 model is not suitable when studying near shore processes, because in this case a resolution of the order of at least 400 m is required, allowing to evaluate with more accuracy wave generation and propagation as well as shoaling and refraction. In order to overcome this problem the SWAN model (Simulating WAVes Nearshore) is used in this work. It is a non-stationary third-generation wave model [Holthuijsen et al. \(1989\)](#) aimed to obtaining realistic estimates of wave parameters in coastal areas, lakes and estuaries from given wind, bottom and current conditions. However, SWAN can be used on any scale relevant for wind-generated surface gravity waves. It uses both frequency and directional spectra and it is based on the wave action balance equation with sources and sinks. The model can simulate wave propagation in time and space, shoaling, refraction due to currents and depth. It also considers several sources and sinks: wave generation by wind, dissipation due to white capping, bottom friction and depth-induced breaking, reduction of spectral energy due to non-linear interactions (three and four wave interactions). Diffraction and reflection are not modelled by SWAN, so the accuracy of the model near obstacles or inside harbours is poor.

The two dimensional wave spectrums can be described by the spectral action balance equation as follows:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Where N is the action density spectrum, which is equal to the energy density spectrum divided by the relative frequency. In this equation, σ and θ are wave relative frequency and wave direction, respectively. The first term in the left-hand side of the above equation represents the local rate of change of wave action density spectrum in time. The second and third terms represents propagation of wave action in geographical space with velocities c_x and c_y in x and y directions, respectively. The fourth term represents shifting of the relative frequency due to variations in depths and currents with propagation velocity c_σ in σ -space. The fifth term represents depth-induced and current-induced refraction with propagation velocity c_θ in θ -space. The expressions for all of propagation velocities are taken from linear wave theory. The term at

the right-hand side of the wave action balance equation is the source term of energy density representing wave generation, energy dissipation and non-linear wave-wave interactions.

SWAN has been used in one configuration in the Algiers Sea, couples SWAN with 3km resolution, serial run of WW3 model, considering at the boundary the waves calculated by the WW3 and also the wind evaluated by AROME as a source. This procedure allowed us to implement a forecasting system of waves near the coast that needs to be validated and improved.

2. The Algiers Sea

Wave propagation in the Agiers Sea has been studied applying a chain of SWAN runs nested on four different grids (Figure 2). The largest one, grid 0, covers the whole Mediterranean Sea and two in the Algiers Sea.

The coarsest grid has a resolution of $1/12$ degree and the coordinate system used is spherical. The finest domains have a resolution of $1/33$, $1/100$ and $1/333$ degrees, corresponding to 03, 01 km and 300 m.

The bathymetry has been interpolated on the 2 grids using Etopo1 (1 Arc-Minute Global Relief Model) provided by the National Geophysical Data Center (NGDC), an office of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), and for the third and fourth grid by GMRT (The Global Multi-Resolution Topography) provided by the IEDA/NSF Interdisciplinary Earth Data Alliance funded by the US National Science Foundation which deliver bathymetry data (100-m resolution) near the coast. In figure 3 it is possible to observe the increase of resolution of the four grids for the Mediterranean Sea.

The WW3 model, with a resolution of $1/12$ degree, has been used covering all the Mediterranean Sea to provide the boundary conditions for the intermediate grid SWAN with a resolution of $1/33$ degree, the second step consists on the nesting the third grid point to the intermediate one with a resolution of $1/100$ deg and the last step consists on the nesting of the coastal grid point (grid3) to the nested one (grid2) with a resolution of $1/333$ deg. Concerning the coastal grid points the SWAN model was used to simulate nearshore processes.

The scheme used for wave generation- whitecapping is the quasi-saturation scheme proposed by Van der Westhuysen [van der Westhuysen et al. \(2007\)](#). This scheme was developed in order to improve the SWAN results when sea-waves and swell are both present in the propa-

gation process, which is useful when analyzing areas with long fetches, as for the Algerian coasts.

3. Results of forecasting

The results of the coupling SWAN-WW3 with 03km of resolution (Fig.5) and the results of the simulations produced by the WW3 model (Figure 4) does not differ from the values of H_s (significant wave height) and his direction, against the descent of scale at 1km shows a difference in the East of Algiers Bay , $H_s = 0.7-0.8m$ near the coast (Fig. 6) , and $H_s = 0.3-0.4m$ (figure 5) this is due to the physical parameterization of the model Swan which takes into account the near-shore physical processes. The last grid point with a very high resolution (figure 7) doesn't present any difference from the previous two grids points, the system should be tested with different atmospheric situations to check the behavior of the forecasting system.

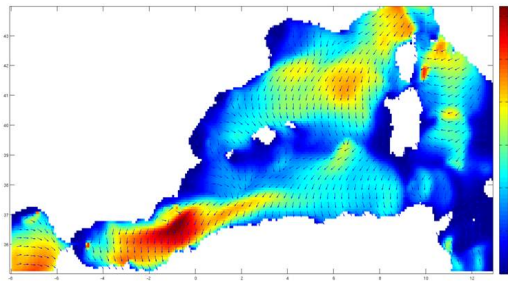


Figure 3. Forecasted H_s by WW3 model on the 15 SEP 2016 at 12:00

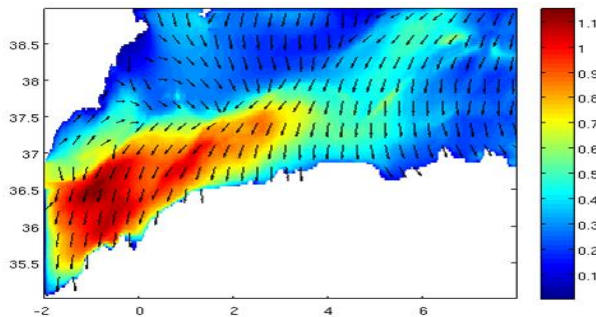


Figure 4. Forecasted H_s by SWAN model (Intermediate Grid 03km) on the 15 SEP 2016 at 12:00

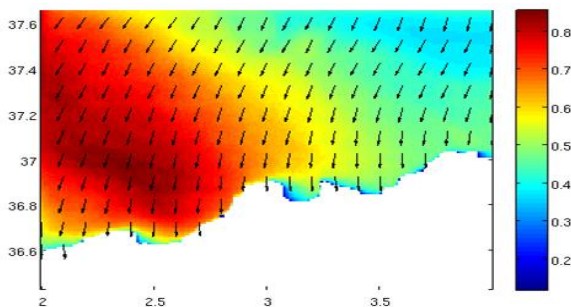


Figure 5. Forecasted H_s by SWAN model (Nested Grid 1km) on the 15 SEP 2016 at 12:00

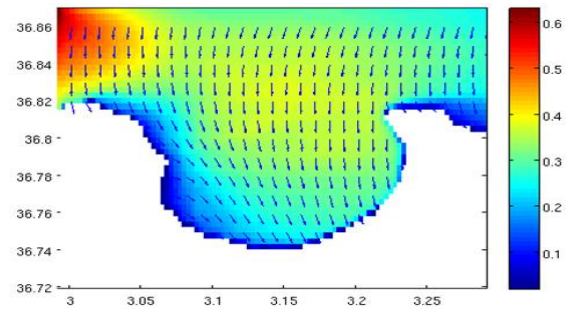


Figure 6. Forecasted H_s by SWAN model (Nested Grid 300m) on the 15 SEP 2016 at 12:00

4. Conclusion and perspective

This forecasting system needs to be validated by the observed data in-situ or by satellite data, to evaluate its performances.

So, the next step is to collect the observed data in one or more points on the used experimental field to validate this system.

The second step is to couple nearshore model (SWAN) with till shore model (SWASH) for increasing the accuracy of hydrodynamic parameters in the harbour areas.

This study showed that it is possible to increase the resolution from the regional scale to the local scale by coupling WW3 and SWAN models.

This work shows also the applicability of a high-resolution nearshore wave forecasting system for a selected coastal sea area on the Algerian coasts.

References

- Cavaleri, L. and Sclavo, M. (2006). The calibration of wind and wave model data in the mediterranean sea. *Coastal Engineering*, 53(7):613 – 627.
- Holthuijsen, L., Booij, N., and Herbers, T. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering*, 13(1):23 – 54.
- Holthuijsen, L. H., Booij, N., and Bertotti, L. (1996). The propagation of wind errors through ocean wave hindcasts. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 118(3):184–189.
- Teixeira, J., Abreu, M., and Soares, C. G. (1995a). *SWAN Technical Manual, SWAN Cycle III version 41.10*.
- Teixeira, J. C., Abreu, M. P., and Guedes Soares, C. (1995b). Uncertainty of ocean wave hindcasts due to wind modeling. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 117(4):294–297.
- Tolman, H. L. et al. (2014). User manual and system documentation of wavewatch iii tm version 4.18. *Technical note, MMAB Contribution*, 276:220.
- van der Westhuysen, A. J., Zijlema, M., and Battjes, J. A. (2007). Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in {SWAN} for deep and shallow water. *Coastal Engineering*, 54(2):151 – 170.

Canicule et Vague de Chaleur en Algérie : Définition - Seuils - Caractéristiques

Salah SAHABI-ABED ^{1*}, Mehdi KERROUCHE ¹

Résumé

Ce travail vise en premier lieu à aider le service de prévision du temps (PNT) de l'Office National de la Météorologie à déterminer de façon objective et sur une base scientifique reconnue les seuils pour lesquels il peut anticiper le lancement d'un bulletin d'alerte destiné au grand public et aux différents usagers et clients pour la déclaration d'une journée prévue à risque de canicule, voire même surveiller les vagues de chaleur et annoncer au préalable leurs durées probables et leurs intensités. Cette information qui s'avère capitale aidera indubitablement les différents services du pays notamment le secteur de la santé, les forêts, le tourisme ainsi que les autorités locales et eu-égard à son importance, à instaurer un système d'alerte - vigilance de canicule/vague de chaleur dans leurs plans d'intervention et chacun en ce qui le concerne, et ce, à fin de définir les actions destinées à prévenir ou à limiter l'impact des épisodes de fortes chaleurs sur leurs secteurs respectifs. Comme il n'existe pas de définition commune et universelle de la vague de chaleur applicable pour tous les pays du monde, nous proposerons une méthodologie pour la détermination des seuils pour le cas de l'Algérie et pour l'ensemble des wilayas et dont le principe a été également utilisé et validé en partie par le Maroc, comme dans d'autres pays. L'avantage de cette méthode réside dans son applicabilité en longueur de l'année, permettant ainsi le service la prévision de l'ONM de suivre quotidiennement l'évolution de la vague de chaleur. Nous proposerons plus tard une seconde étude ayant trait à l'élaboration d'un système de vigilance spécifique au secteur de la santé basé sur des indices bioclimatiques (deuxième article). Pour ce cas d'étude, nous mettrons en exergue et à titre d'illustration une analyse d'un cas de vague de chaleur enregistrée sur le Maghreb arabe durant la période allant du 22 au 25 Mars 2001.

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

*Correspondant:

1. Introduction

Le rapport spécial sur les extrêmes https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf élaboré par le groupe d'Experts sur la Détection du Changement Climatique et les Indices (ETCCDI) du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a révélé que les trois dernières décennies ont été successivement plus chaudes à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850. Les années 1983 à 2012 constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1400 ans et qu'il est très probable que le nombre de journées et de nuits froides a diminué et que le nombre de journées et de nuits chaudes a augmenté à l'échelle du globe.

La communauté scientifique internationale accorde de plus en plus d'intérêts aux études des phénomènes météorologiques extrêmes en raison de leurs incidences marquées sur les secteurs qui sont étroitement liés au climat tels que la santé, les ressources en eau, l'agriculture et la production alimentaire, la foresterie et le tourisme. Les dernières années ont été marquées par une mobilisation de la communauté internationale eu-égard aux conséquences dramatiques liées à la manifestation de certains extrêmes climatiques affectant notamment la santé de l'homme. Parmi ces extrêmes dévastateurs, on citera les canicules et les vagues de chaleurs. La canicule de 2003 qui a touché un bon nombre de pays européens et qui a engendré 70.000 morts dont 15.000 uniquement en France, a marqué à la fois les esprits des populations et des décideurs politiques. De même, en fin juin à début août 2015, la France a été de nouveau affectée par d'importantes vagues de chaleur comparables à la canicule de 2003, de nombreux

records de température ont été battus et plus de 3.300 personnes en sont mortes <http://www.notre-planete.info/actualites/4302-canicule-France-juillet-2015>.

Le professeur Besancenot a affirmé, dans un article de référence publié dans la revue « Environnement, risques et santé », que « l'intensité d'une vague de chaleur ne doit pas s'apprécier au regard du niveau absolu des températures, mais au regard de l'écart par rapport aux températures habituelles. Ainsi, nous constatons une surmortalité à partir de 27 à 28 degrés en Belgique et de 41 à 42 degrés dans le sud de l'Espagne. A l'évidence, il y a une adaptation biologique et comportementale des individus. En particulier, l'architecture joue un grand rôle. » Letard et al. (2004).

En effet, en raison des impacts des vagues de chaleur sur l'homme, et notamment les personnes les plus vulnérables (personnes âgées, malades chroniques, nourrissons ...) les services sanitaires et les services météorologiques dans beaucoup de pays collaborent ensemble pour la mise en œuvre du plan d'alerte et de vigilance qui définit les actions destinées à prévoir ou à limiter l'impact des épisodes de vague de chaleur sur la santé. Dans ce contexte, des indices bioclimatiques s'appuyant sur des seuils critiques ont été ainsi élaborés reposant sur l'évaluation du risque en fonction de l'ampleur de la vague de chaleur et qui feront l'objet d'une seconde publication.

2. Quelques définitions de vague de chaleur dans le monde

IL n'existe cependant pas de définition universelle de la vague de chaleur. Cette définition reste propre à chaque pays et elle se trouve fortement dépendante du climat local.

En Australie par exemple, chaque état possède sa propre définition. A Adelaïde la vague de chaleur est définie comme étant 5 jours consécutifs où la température est restée au-dessus de 35°C ou bien quand la température est restée supérieure à 40°C pendant trois (03) jours consécutifs.

En Belgique, une vague de chaleur est définie comme une période d'au moins trois jours consécutifs avec une température moyenne minimale (moyenne sur les trois jours et non par jour) de plus de 18.2°C et une température moyenne maximale supérieure à 29.6°C , valeurs relevées à Uccle [Cuypers](#).

L'Institut Royal Météorologique des Pays-Bas définit une vague de chaleur lorsque la température maximale quotidienne atteint ou dépasse 25°C pendant une durée de cinq (05) jours (jours estivaux) et atteignant en outre au moins 30°C pendant trois (03) jours (jours tropicaux) au cours de cette période. Une vague de chaleur est donc une série de cinq (05) jours estivaux dont au moins trois (03) sont des jours tropicaux.

Météo France définit la vague de chaleur comme une période au cours de laquelle la température maximale dépasse 30°C . Cependant, depuis la canicule de 2003, des recherches ont été lancées en France afin de trouver des seuils liant les conditions météorologiques à la mortalité. Le principe du système d'alerte était de définir un indicateur météorologique associé à un pic de surmortalité, afin de prévenir des vagues de chaleur pouvant avoir un impact épidémique de grande ampleur [Laaidi and al \(2006\)](#). A cette époque, quatorze (14) grandes agglomérations réparties sur l'ensemble du territoire français et ayant des caractéristiques climatiques variées ont été identifiées comme les villes pilotes du système. L'indicateur le plus performant - compte tenu des valeurs prédictives positives et de la sensibilité obtenues était la combinaison des températures minimale et maximale (Tmin et Tmax) moyennées sur trois jours, cet indicateur est appelé IBM. L'IBM est le couple (IBMn, IBMx), où l'IBMn est la moyenne glissante sur trois jours des températures minimales, et l'IBMx la moyenne glissante sur trois jours des températures maximales [Laaidi and al \(2006\)](#) [Wagner et al. \(2006\)](#).

Aux Etats Unis, et même au Canada, il s'agit d'une période au cours de laquelle la température maximale dépasse 32.2°C pendant trois (03) jours consécutifs. Le National Service of Meteorology américain propose toutefois une autre définition, basée sur un indice de chaleur (qui tient non seulement compte de la température mais aussi de l'humidité atmosphérique). Il s'agit des indices bioclimatiques comme l'indice Humidex et l'indice de chaleur ou bien Heat Index.

Des indices climatiques extrêmes ont été également développés par la commission de climatologie de l'Organisation Météorologique Mondiale (CCI, OMM) dans le cadre du projet CLIVAR (Climate Variability and Predictability Project, CCI/CLIVAR/JCOMM) et sont recommandés par l'OMM avec comme principal objectif la focalisation sur les extrêmes pour démontrer le changement dans l'intensité, la fréquence et la durée des événements. Ces indices sont souvent utilisés pour mettre en évidence les changements dans les extrêmes climatiques.

Dans le but de l'élaboration d'un guide de bonne

pratique dans le domaine du temps et des extrêmes climatiques la commission de climatologie de l'OMM (CCI) a créé vers 2010 l'équipe d'experts chargé de la définition des événements extrêmes météorologiques et climatiques (TT-DEWCE). Dans son rapport intitulé « Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events » élaboré en décembre 2015 [TT-DEWCE \(2015\)](#), l'OMM et le TT-DEWCE recommandent l'utilisation pratique et qualitative de la définition de la vague de chaleur comme « Une canicule inhabituelle marquée (max, mini et moyenne quotidienne) sur une région, persistant pendant au moins deux jours consécutifs durant la période chaude de l'année basée sur les conditions climatiques locales avec des conditions thermiques enregistrées au-dessus d'un certain seuil ».

Cette même équipe définit également une canicule ou un épisode chaud comme un temps anormalement chaud persistant, définit au moyen du 90^e ou 95^e percentile de la température maximale, sévissant souvent pendant la période froide de l'année et non pas pendant la période climatologique chaude.

3. Définition de la canicule et vague de chaleur en Algérie

En Algérie, le service de prévision de l'Office National de la Météorologie continue jusqu'à l'heure d'émettre un Bulletin Météorologique Spécial (BMS) de canicule/vague de chaleur basé sur des critères arbitraires. En effet, ce type de BMS est émis quand la température estivale prévue atteindra ou dépassera sur deux (02) jours consécutifs 40°C dans les régions côtières et 44°C sur les régions intérieures et Hauts plateaux. Il est émis pour les régions sahariennes, quand cette température atteindra ou dépassera 48°C sur une (01) journée. Ces critères restent par conséquent valables uniquement durant la période estivale, ce qui ne peut guère permettre la détection de ce phénomène qui sévit souvent dans les périodes hors saison estivale et qui ne peut être sans conséquence. A ce titre, l'histoire avait montré que l'on a connu des épisodes de canicules en dehors de la saison estivale (i.e. cas d'étude présenté dans ce document illustrant une vague de chaleur intense en Mars 2001 touchant le Maghreb). Dans quelques pays, on a pu établir des seuils de canicule sur la base d'un indicateur biométéorologique qui lie le pic de surmortalité à un certain nombre de paramètres météorologiques, issus de tests statistiques robustes. Devant la difficulté de retrouver des statistiques fiables sur le taux de mortalité attribuée directement aux effets de la chaleur, de nombreux pays se contentent de calculer des seuils sur la base d'indicateurs météorologiques ou bioclimatiques.

Pour le cas de l'Algérie, nous proposons une définition de la vague de chaleur valable sur l'ensemble du territoire du pays et sur toute l'année, basée essentiellement sur la durée, l'ampleur et l'écart par rapport à la normale climatologique, dont le principe est resté similaire à l'indice de durée de la vague de chaleur ou le « HWDI » (Heat Wave duration Index) préétablie par l'ETCCDI ainsi que de l'expérience de quelques pays dans ce domaine.

Beaucoup de pays établit le principe de la détection des vagues de chaleur sur une comparaison de la température maximale quotidienne à sa normale climatologique.

De ce fait, pour nous permettre de détecter les vagues de chaleur hors saisons chaudes (cas assez récurrent ces dernières années), voire même sa précocité, nous optons pour le choix d'une normale climatologique décadaire, car celle-ci est plus représentative et plus significative qu'une normale mensuelle. Pour la détection des vagues de chaleur en région saharienne et en été, nous appliquerons une seconde méthode développée par [Radinovic and Curic \(2014\)](#), basée sur la distribution des fréquences standards pour les extrêmes des températures quotidiennes. [Radinovic and Curic \(2011\)](#) [Radinovic and Curic \(2014\)](#) du département de la météorologie de l'Université de Belgrade (Serbie) avaient mis au point cette méthode qui utilise des échelles de classes basées sur des unités d'écart-types pour les paramètres de températures extrêmes et celles des déciles pour les précipitations et la vitesse du vent (voir méthodologie plus loin).

En effet, une vague de chaleur est due à un réchauffement important de l'air atmosphérique ou une advection d'une couche d'air chaud sur une région donnée, pendant quelques jours ou quelques semaines, pour cela, le choix de comparer la température maximale quotidienne avec celle de la normale climatologique décadaire est justifié par le fait que l'on recherche à déterminer un phénomène climatologique exceptionnel résultant d'une situation météorologique de la méso-échelle/ synoptique et dont l'échelle spatio-temporelle est relativement importante. Par conséquent, il s'avère que la normale décadaire capte bien la persistance du phénomène comme celui de la vague de chaleur, alors que l'échelle temporelle mensuelle risque de le biaiser. Pour rappel, l'approche adoptée dans cette étude, a été également utilisée par Dr. Bari et al. [Bari et al. \(2006\)](#) de la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc pour l'élaboration des seuils de vague de chaleur utilisée actuellement dans son pays et validée par de nombreux experts. Pour notre cas, nous appliquerons cette méthode pour la région Nord du pays, du littoral jusqu'aux hauts plateaux en passant par les régions intérieures. La définition des vagues de chaleur pour les régions sahariennes se fera par la méthode des percentiles qu'on développera plus tard.

On définit ainsi une vague de chaleur pour les régions non-sahariennes, comme la période au cours de laquelle la température quotidienne maximale est restée supérieure ou égale à sa normale décadaire de (N1) degrés pendant au moins (N2) jours consécutifs. Dans cette définition, on tiendra compte pour le cas de l'Algérie de la combinaison des effets de la répartition des écarts des températures maximales aux normales décadaires et de l'altitude.

Définition de la canicule et vague de chaleur en Algérie

En Algérie, le service de prévision de l'Office National de la Météorologie continue jusqu'à l'heure d'émettre un Bulletin Météorologique Spécial (BMS) de canicule/vague de chaleur basé sur des critères arbitraires. En effet, ce type de BMS est émis quand la température estivale prévue atteindra ou dépassera sur deux (02) jours consécutifs 40°C dans les régions côtières et 44°C sur les régions intérieures et Hauts plateaux. Il est émis pour les régions sahariennes, quand cette température atteindra ou dépassera 48°C sur une (01) journée. Ces critères restent par conséquent valables uniquement durant la période estivale, ce qui ne peut guère permettre la détection de

ce phénomène qui sévit souvent dans les périodes hors saison estivale et qui ne peut être sans conséquence. A ce titre, l'histoire avait montré que l'on a connu des épisodes de canicules en dehors de la saison estivale (i.e. cas d'étude présenté dans ce document illustrant une vague de chaleur intense en Mars 2001 touchant le Maghreb). Dans quelques pays, on a pu établir des seuils de canicule sur la base d'un indicateur biométéorologique qui lie le pic de surmortalité à un certain nombre de paramètres météorologiques, issus de tests statistiques robustes. Devant la difficulté de retrouver des statistiques fiables sur le taux de mortalité attribuée directement aux effets de la chaleur, de nombreux pays se contentent de calculer des seuils sur la base d'indicateurs météorologiques ou bioclimatiques.

Pour le cas de l'Algérie, nous proposons une définition de la vague de chaleur valable sur l'ensemble du territoire du pays et sur toute l'année, basée essentiellement sur la durée, l'ampleur et l'écart par rapport à la normale climatologique, dont le principe reste similaire à l'indice de durée de la vague de chaleur ou le « HWDI » (Heat Wave duration Index) préétablie par l'ETCCDI ainsi que de l'expérience de quelques pays dans ce domaine.

Beaucoup de pays établissent le principe de la détection des vagues de chaleur sur une comparaison de la température maximale quotidienne à sa normale climatologique. De ce fait, pour nous permettre de détecter les vagues de chaleur hors saisons chaudes (cas assez récurrent ces dernières années), voire même sa précocité, nous optons pour le choix d'une normale climatologique décadaire, car celle-ci est plus représentative et plus significative qu'une normale mensuelle. Pour la détection des vagues de chaleur en région saharienne et en été, nous appliquerons une seconde méthode développée par [Radinovic and Curic \(2014\)](#), basée sur la distribution des fréquences standards pour les extrêmes des températures quotidiennes. [Radinovic et Curic](#) [Radinovic and Curic \(2014\)](#) [Radinovic and Curic \(2011\)](#) du département de la météorologie de l'Université de Belgrade (Serbie) avaient mis au point cette méthode qui utilise des échelles de classes basées sur des unités d'écart-types pour les paramètres de températures extrêmes et celles des déciles pour les précipitations et la vitesse du vent (voir méthodologie plus loin).

En effet, une vague de chaleur est due à un réchauffement important de l'air atmosphérique ou une advection d'une couche d'air chaud sur une région donnée, pendant quelques jours ou quelques semaines, pour cela, le choix de comparer la température maximale quotidienne avec celle de la normale climatologique décadaire est justifié par le fait que l'on recherche à déterminer un phénomène climatologique exceptionnel résultant d'une situation météorologique de la méso-échelle/ synoptique et dont l'échelle spatio-temporelle est relativement importante. Par conséquent, il s'avère que la normale décadaire capte bien la persistance du phénomène comme celui de la vague de chaleur, alors que l'échelle temporelle mensuelle risque de le biaiser. Pour rappel, l'approche adoptée dans cette étude, a été également utilisée par Dr. Bari et al. de la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc pour l'élaboration des seuils de vague de chaleur utilisée actuellement dans son pays et validée par de nombreux

experts. Pour notre cas, nous appliquerons cette méthode pour la région Nord du pays, du littoral jusqu'aux hauts plateaux en passant par les régions intérieures. La définition des vagues de chaleur pour les régions sahariennes se fera par la méthode des percentiles qu'on développera plus tard.

On définit ainsi une vague de chaleur pour les régions non-sahariennes, comme la période au cours de laquelle la température quotidienne maximale est restée supérieure ou égale à sa normale décadaire de (N1) degrés pendant au moins (N2) jours consécutifs. Dans cette définition, on tiendra compte pour le cas de l'Algérie de la combinaison des effets de la répartition des écarts des températures maximales aux normales décadaires et de l'altitude.

Modélisation du transfert de chaleur par conduction

Les températures maximales quotidiennes enregistrées dans 68 stations d'observation météorologique du réseau de l'Office National de la Météorologie et bien réparties sur le territoire national ont été utilisées. Pour donner plus de signification aux résultats, nous avons retenu dans cette étude uniquement les séries temporelles des stations couvrant une période minimale supérieure à 15 ans et dont le volume des données manquantes n'excède pas 10% du volume total des données disponibles.

L'objectif principal de telle étude étant d'aboutir à l'instauration d'un système d'alerte de canicule et de vague de chaleur efficace adapté au contexte bioclimatique algérien et qu'il soit en même temps fiable et anticipatif, car une alerte ne sera efficace que si elle est lancée suffisamment tôt pour permettre des mesures préventives. En raison de la diversification bioclimatique du pays (Région côtière méditerranéenne, zone des hauts plateaux et montagneuses, zone saharienne) et de son vaste étendue, il ne serait guère possible d'élaborer une définition commune de la vague de chaleur valable pour l'ensemble du pays. De ce fait, nous avons opté pour la méthode de classification hiérarchique automatique afin de déterminer les zones homogènes de l'Algérie nord (à l'exception de la zone saharienne) basée sur le calcul des indices normalisés du 90^e percentile des températures maximales quotidiennes (car ce qu'on recherche est un phénomène climatologique rare) ainsi que de l'altitude.

L'avantage des percentiles est de prendre en compte les particularités du climat local et de la perception de la chaleur. Ainsi, cette méthode s'appuie sur un seuil relatif [Koppe et al. \(2004\)](#) [Anderson and Bell \(2011\)](#).

Nous avons séparé la zone saharienne de celle du nord en raison du régime climatique qui caractérise cette région et qui se trouve beaucoup moins perturbé et donc, il n'est pas régi par les mêmes mécanismes. Les indices servant à la régionalisation au nord de l'Algérie sont définis comme suit :

L'indice normalisé des températures maximales et l'indice normalisé de l'altitude sont respectivement définis par :

$$(IndiceTx90)_i = \frac{[(Tx90)_i - Moy(Tx90)]}{ET(Tx90)} \quad (1)$$

$$(IndiceAlt) = \frac{[(Alt)_i - Moy(Alt)]}{ET(Alt)} \quad (2)$$

Où $(Tx90)_i$ et $(Alt)_i$ sont respectivement le 90^e percentile des températures maximales et de l'altitude pour une station donnée (i).

ET : l'écart-type

A l'issue de cette classification, quatre régions sont ainsi mises en évidence, les principales stations des villes de ces régions sont indiquées ci-après :

Région I ou région côtière : Arzew, Ghazouet, Skikda, Dellys, Bejaia, Tenes, Jijel, Oran, Benisaf, Jijel, Annaba, Alger, Mostaganem, Tlemcen (Zenata).

Région II ou région des hauts plateaux élevée : El Bayadh, Médéa, Sétif (aéroport), Djelfa, Batna, Tébessa, Oum El Bouaghi, Bordj Bouarerridj, Khenchela, Tiaret, Mecheria, Naama, El Kheiter, Ain Sefra, Saida, Ksar Echallala.

Région III ou zone de l'Intérieur : Tizi-Ouzou, Guelma, Bouchegouf, Chlef, SoukAhras, Miliana, Constantine, Mascara, Sidi-Bel-Abbès, Maghnia, Bouira, Msila, Barika.

4. Détermination des seuils

Le centre de prévision de l'ONM s'appuie sur les sorties des modèles de prévision du temps dans la prévision des températures maximales journalières prévues de moyenne et longue échéance. Cette prévision reste déterministe pour une durée de 3 jours. Afin de permettre au centre de prévision le lancement d'alerte canicule ou vague de chaleur, nous nous sommes fixés comme objectif la détermination des seuils de deux (02) jours consécutifs pour l'alerte canicule, trois (03) et quatre (04) jours consécutifs et plus pour la vague de chaleur. Du fait que l'on recherche à détecter un phénomène rare et exceptionnel, le critère statistique d'un seuil relatif à la vague de chaleur se fera à travers le calcul du décile. Après l'analyse des données, les seuils ainsi obtenus pour chaque région sont illustrés dans le tableau suivant :

Table 1. Seuils d'anomalies de températures maximales relatifs à 2, 3 et 4 jours

Région	Seuils : 2 J	Seuils : 3 J	Seuils : 4 J
Région I	10	10	10
Région II	10	10	9
Région III	10	10	9

A l'issue de ces résultats, on peut énoncer les deux définitions suivantes : Une journée caniculaire est une journée au cours de laquelle la température quotidienne maximale dépasse sa normale décadaire de 10°C pour l'ensemble des wilayas du pays à l'exception de la région saharienne.

Une vague de chaleur est une période d'au moins 3 jours consécutifs caniculaires.

5. Définition de la vague de chaleur pour la région saharienne

Il s'agit de la région IV qui regroupe les villes du Sud et de l'extrême sud, on citera à ce titre : Ouargla, Hassi Messaoud, Touggourt, El Oued, Biskra, Adrar, In Salah, Timimoun, Bordj Badji Mokhtar, In Guezzam, Tindouf, Beni Abbes, Illizi, El Golea.

Région IV : villes du Sud et de l'Extrême Sud

En raison de la particularité du climat de cette zone (plus ou moins stationnaire) et vu que la variation de la température intra-mensuelle notamment en été est moins importante dans cette région, nous avons opté pour la détermination des seuils propres à cette zone basés sur la distribution des fréquences qui considère que la température maximale suit une loi normale de Gausse [Radinovic and Curic \(2011\)](#) [Radinovic and Curic \(2014\)](#). Comme, le groupe d'experts sur la Détection du Changement Climatique et les Indices (ETCCDI) avait défini comme situation d'extrêmes chaud de la température maximale quotidienne équivalente au 90^ecentile tout comme de nombreux pays qui ont défini un jour caniculaire ainsi, nous nous sommes servis à notre tour du calcul de ce 90^epercentile pour déterminer le seuil de base pour un jour caniculaire au Sahara. Par ailleurs, et en se référant à la méthode développée par [Radinovic and Curic \(2014\)](#) (tableau 2) pour l'établissement des classes et les travaux de [Gay and Airasian \(2003\)](#), il a été démontré ainsi qu'il est possible de qualifier l'ampleur de la vague de chaleur à partir du 97.71^epercentile comme très au-dessus de la normale et du 99.86^epercentile comme extrêmement au-dessus de la normale (figure 1). Cette classification permettra plus loin de dresser un niveau de vigilance selon l'ampleur prévue de la vague de chaleur.

Pour notre cas et pour la région du sud, on présentera le seuil relatif à la situation caniculaire ainsi que de vague de chaleur sur la base du 90^epercentile. On déterminera ainsi et pour chaque mois calendaire la valeur de ce seuil pour chaque station Saharienne ou proche saharienne sur la base de la différence entre la valeur de la normale climatologique d'un mois donné qui représente la moyenne mensuelle sur toute la période de l'étude disponible avec celle du 90^epercentile, puis du 97.71^epercentile et enfin le 99.86^epercentile. Les seuils mensuels définis pour chaque station du Sahara utilisée dans l'étude et pour des raisons de confidentialité restent disponibles au niveau du Centre Climatologique National de l'ONM.

Les classes attribuées avec leurs équivalences en centiles sont résumées dans le tableau suivant :

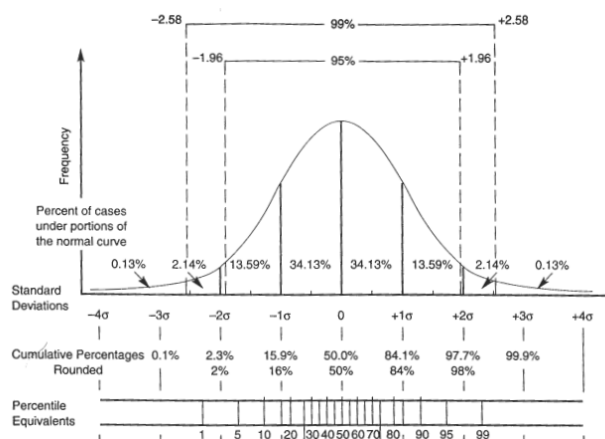


Figure 1. Relation entre les différents paramètres statistiques pour une courbe Gaussienne. [Gay and Airasian \(2003\)](#)

6. Propriétés de la vague de chaleur : Cas général

Les paramètres suivants sont souvent utilisés pour caractériser une vague de chaleur :

- La date : jour de début et de fin la vague de chaleur ou canicule
- La durée : le nombre de jours de la vague de chaleur ou canicule.
- Le poids : en degrés jours exprimant le surplus de chaleur par rapport à la normale décadaire. Il s'agit de la somme de ces degrés jours pour toute la période répondant à la définition de vague de chaleur. Il s'exprime ainsi par la formule :

$$Poids = \sum_{i=1}^n ((Tx)_i - (Norm.Decad)_i)$$

Où $(Tx)_i$ désigne la température maximale enregistrée au cours de la journée (i) et $(Norm.Decad)_i$ représente la normale décadaire correspondante à cette journée.

- L'intensité : égale au rapport du poids à la durée : car on peut rencontrer des vagues de chaleur longues et modérées, ou bien parfois courtes mais intenses. Ce paramètre nous permettra d'avoir un indicateur intéressant à ce niveau.
- La température maximale enregistrée durant cette vague de chaleur.
- Le record : la température maximale enregistrée au cours de cette vague de chaleur.
- La date du record enregistré.

7. Application sur le cas de l'Algérie : Cas de la canicule de 2001

La canicule de 2001 marque toujours les esprits des algériens en raison non-seulement qu'elle a été enregistrée en pleine saison printanière mais également de son étendue et de son intensité (ampleur). En effet, on a enregistré du 21 au 25 Mars 2001 c'est-à-dire en espace de cinq (05) jours des températures maximales records dépassant nettement les 10°C (seuils qu'on vient d'élaborer pour la région nord du pays) leurs normales climatologiques décadaires dans une large partie du territoire algérien pour atteindre parfois presque 19°C de différence, d'où l'importance de son poids et de son intensité.

Comme on a pu observer la même situation dans la région du Sahara. Les seuils relatifs à la région saharienne sont basés sur la méthode décrite plus haut [Radinovic and Curic \(2011\)](#), c'est-à-dire la classification à partir du 97.71^epercentile et du 99.86^epercentile.

Cette vague de chaleur a persisté dans quelques wilayas et restée jusqu'au 25 mars 2001. Le tableau 3 résume les caractéristiques de cette vague de chaleur qui a sévi dans les principales villes du pays (voir annexe pour le reste). On peut déduire que cette vague de chaleur avait débuté à l'ouest et l'intérieur du pays pour s'étendre ensuite au centre et l'Est sur les villes côtières et les hauts plateaux et même vers les régions du Sahara.

D'après les cartes d'évolution de la vague de chaleur des journées allant du 21 au 25 mars 2001, (figures 1-5), cette vague a persisté sur les régions Est et s'est intensifiée

Table 2. Classes sous la distribution normale des fréquences en unités d'écarts-types Radinovic and Curic (2011)

Ecart-Type	Pourcentage de Fréquences	Classe
$> -3\sigma$	0 – 0.15	Extrêmement en-dessous de la normale
$-3\sigma \rightarrow -2\sigma$	0.16 – 2.30	Très en-dessous à la normale
$-2\sigma \rightarrow -\sigma$	2.31 – 15.85	En-dessous à la normale
$-\sigma \rightarrow +\sigma$	15.86 – 84.15	Normale
$+\sigma \rightarrow +2\sigma$	84.16 – 97.70	Au-dessus de la normale
$+2\sigma \rightarrow +3\sigma$	97.71 – 99.85	Très au-dessus de la normale
$> +3\sigma$	99.86 – 100.00	Extrêmement au-dessus de la normale

plus particulièrement sur la région du littoral Est où la température maximale enregistrée à Skikda par exemple était de 38.2°C dépassant de 19°C sa normale décadaire.

Vers le 24 mars, la vague de chaleur s'est répandue sur tout le Sahara, le mercure avait affiché 34.6°C à Bechar et 35.4°C à Ghardaia, c'est à dire respectivement de plus de 12.3°C et 13.1°C que la normale mensuelle du mois de mars dans ces deux villes, dépassant ainsi ou avoisinant le 99.86^epercentile, ce qui laisse dire que cette canicule est classée extrêmement au-dessus de la normale (d'après la classification de Radinovic et al.) . Vers le 25 mars, la Sahara continuait à subir l'influence de cette vague de chaleur, en effet, sept (07) wilayas du sud ont enregistré ce jour-là des températures supérieures à leurs 99.86^epercentiles (correspondant à la classe extrêmement au-dessus de la normale), l'écart record entre la température maximale enregistrée et celle de la normale du mois de mars a été observé à Touggourt et à El Oued avec $+16.5^{\circ}\text{C}$. Dans cette même journée du 25 mars 2001, six (06) autres wilayas du sud ont vu leurs températures maximales dépassant leurs seuils du 97.71^epercentile (correspondant à la classe très au-dessus de la normale), comme pour le cas de Timimoun où la température maximale a atteint 38.2°C , c'est à dire de $+12.2^{\circ}\text{C}$ que la normale climatologique du mois de mars dans cette wilaya, et à Hassi Messaoud la température maximale a dépassé les 40°C .

Comme il n'existe pas de données climatologiques de certaines stations pour l'année 2001 (cas de Relizane ouverte en 2004, Blida ...), on n'a pas pu matérialiser cette vague au-dessus de ces villes sur ces cartes.

On peut lire à travers la carte illustrant le nombre de jours caniculaires générés par la vague de chaleur couvrant la période allant du 20 au 25 Mars (carte 6) que la durée de celle-ci était à dominance d'une période de deux (02) jours sur la partie ouest du territoire algérien et de trois (03) jours sur les villes situées au centre de la région des hauts plateaux et du Sahara central, et a persisté pendant 5 à 6 jours sur l'intérieur Est. Cette carte renseigne alors sur la durée de la vague de chaleur qui a sévi sur le territoire algérien en dehors de la saison estivale, ce qui met en évidence son importance. Le poids de cette vague de chaleur informe sur l'excès de chaleur ramené ce qui revêt d'une importance capitale pour plusieurs secteurs vitaux du pays.

8. Perspectives : Elaboration de Bulletin de Prévision, Alerte Vigilance canicule/vague de chaleur

L'utilité fondamentale de telle étude est d'arriver à suivre en pratique et quotidiennement l'évolution chronologique de la vague de chaleur. Mieux encore, grâce à la

méthodologie développée dans cette étude, le centre de prévision pourrait au moyen des données de températures maximales prévues à une échéance de 72 heures (03 jours) dresser une carte de prévision similaire à celle de la carte 6. Cette dernière pourrait servir pour l'instant comme carte d'alerte vigilance destinée à un large éventail d'utilisateurs que ce soit le public, les médias, les professionnels de la santé, de l'agriculture, et des forêts. Nous développerons plus tard un modèle de carte de vigilance basée sur des indices bioclimatiques.

9. Analyse Synoptique durant la vague de chaleur du 21 au 25 Mars 2001

L'analyse de la distribution du champ de pression moyen au niveau de la mer obtenu par le modèle Era-intérim <http://climexp.knmi.nl/> sur la région montre que les conditions atmosphériques très favorables à une situation de réchauffement de l'air vers le 21 mars ont commencé à s'installer sur tout le Maghreb (carte 7). En effet, deux masses d'air d'origine différentes générant un champ de pression réduite au niveau de la mer de signes opposés avec l'existence de deux centres d'action dynamiques, de minimum creux (dépression) atteignant moins de 970hPa s'étalant sur l'Atlantique à l'Ouest de l'Europe et un anticyclone puissant couvrant tout le Nord du Maghreb, où l'on a enregistré une pression au centre anticyclonique de l'ordre de 1017hPa . Cette situation favorise l'advection d'air chaud et sec en provenance du Sahara vers les régions nord du Maghreb. La pression au-dessus de l'Algérie (comme pour les autres pays du Maghreb) s'est renforcée davantage les 22 et 23 mars 2001 où l'air chaud alimenté par l'anticyclone centré sur le Maghreb s'est répandu sur toute la zone. A partir du 24 mars, la situation s'est améliorée sur les régions ouest et centre de l'Algérie par suite de l'étalement progressive de la dépression sur ces zones côtières rétablissant la situation vers la normale saisonnière. En ce même moment, la stagnation de l'air chaud sur les régions Est a contribué à la persistance de la vague de chaleur dans cette région jusqu'au 25 mars 2001. Cette vague de chaleur montre bien le rôle que joue l'indice d'Oscillation Nord-Atlantique et la dépression Saharienne et leurs impacts sur le développement et l'amplification des extrêmes climatiques sur la région. Cette configuration du champ de pression met en exergue un type de temps assez particulier pour la région qui suscite un intérêt important pour la prévision.

10. Conclusion

Dans cette étude, on peut dire que nous avons pu mettre en exergue et pour la première fois et sur une base scientifique robuste l'ensemble des outils pouvant

SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA VAGUE
DE CHALEUR EN ALGERIE
DATE: 21/03/2001

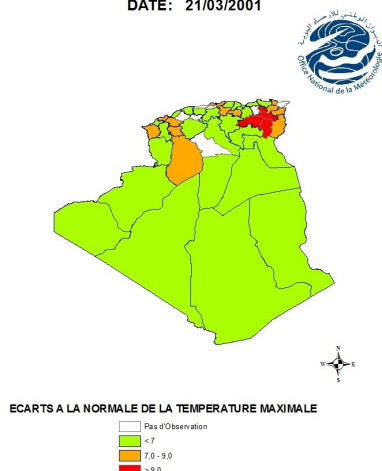


Figure 2

SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA VAGUE
DE CHALEUR EN ALGERIE
DATE: 22/03/2001

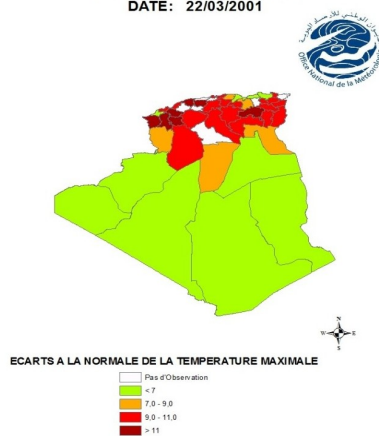


Figure 3

SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA VAGUE
DE CHALEUR EN ALGERIE
DATE: 23/03/2001

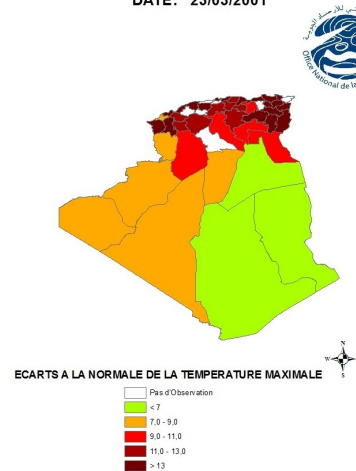


Figure 4

SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA VAGUE
DE CHALEUR EN ALGERIE
DATE: 24/03/2001

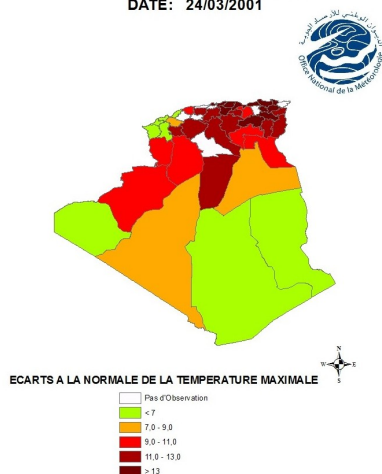


Figure 5

SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA VAGUE
DE CHALEUR EN ALGERIE
DATE: 25/03/2001

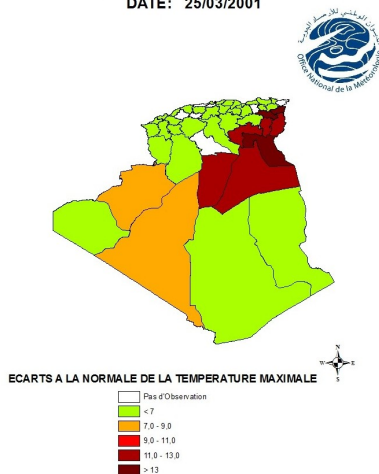


Figure 6

DUREE DE LA VAGUE DE CHALEUR EN ALGERIE
DU 21 AU 25/03/2001

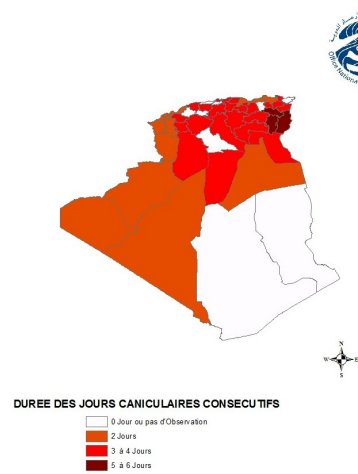


Figure 7

Table 3. Propriétés de la vague de chaleur ayant touché l'Algérie au niveau de quelques stations du réseau : Période du 20 au 25 mars 2001

Station	Début	Fin	Durée	Poids	Intensité	Record Max	Date du record
Alger	21/03/01	24/03/01	4	50	12,5	36.3	24/03/01
Annaba	21/03/01	24/03/01	4	54	13,5	36.8	23/03/01
Guelma	21/03/01	24/03/01	4	47	11.8	34.7	24/03/01
Bouira	22/03/01	24/03/01	3	38	12.7	32.0	24/03/01
Constantine	21/03/01	24/03/01	4	49	12.3	32.1	23/03/01
O.E.Bouaghi	20/03/01	25/03/01	6	73	12.2	32.2	25/03/01
SoukAhras	22/03/01	25/03/01	4	51	12.8	30.6	25/03/01
Chlef	22/03/01	24/03/01	3	37	12.3	36.0	23/03/01
Miliana	22/03/01	24/03/01	3	39	13	31.0	23/03/01
Medea	22/03/01	24/03/01	3	36	12	28.0	24/03/01
B.B.Arréridj	22/03/01	24/03/01	3	34	11.3	28.9	24/03/01
Batna	20/03/01	24/03/01	5	59	11.8	31.6	23/03/01
Tebessa	21/03/01	25/03/01	5	59	11.8	31.7	23/03/01
Khenchela	20/03/01	25/03/01	6	70	11.7	31.2	23/03/01
Mascara	22/03/01	24/03/01	3	35	11.7	34.0	23/03/01
Tiaret	22/03/01	24/03/01	3	36	12	30.0	24/03/01
Maghnia	21/03/01	23/03/01	3	37	12.3	35.2	23/03/01
Biskra	22/03/01	25/03/01	4	43	10.8	35.7	25/03/01
Djelfa	22/03/01	24/03/01	3	34	11.3	29.3	24/03/01
Saida	22/03/01	24/03/01	3	37	12.3	32.6	24/03/01
Touggourt	22/03/01	25/03/01	4	50	12.5	39.8	25/03/01
El Oued	22/03/01	25/03/01	4	50.4	12.6	39.6	25/03/01
Ghardaia	22/03/01	25/03/01	4	48.7	12.2	37	25/03/01
Ouargla	22/03/01	25/03/01	4	44.1	11.0	40	25/03/01
H.Messaoud	23/03/01	25/03/01	3	37.9	12.6	40.2	25/03/01
Adrar	23/03/01	25/03/01	3	31.1	10.4	38.9	23/03/01
Bechar	22/03/01	25/03/01	4	39.8	10.0	34.6	24/03/01
Tindouf	23/03/01	24/03/01	2	18.6	9.3	37.0	23/03/01
In Salah	23/03/01	25/03/01	3	29.5	9.8	39.3	25/03/01

aider les prévisionnistes à anticiper l'émission d'un Bulletin Météorologique Spécial d'une journée caniculaire ou d'une vague de chaleur et pour chaque wilaya. L'approche adoptée dans la définition de ces seuils qui repose sur la comparaison des températures maximales avec leurs normales climatologiques décennales pour la région nord du pays montre encore une fois l'intérêt d'utiliser une échelle temporelle comparable à la durée du phénomène étudié. Comme nous avons pu mettre en œuvre les seuils relatifs à la région saharienne du pays. Le centre de prévision de l'Office National de la Météorologie grâce à ces seuils prédéfinis pour chaque ville, pourrait aisément quantifier le surplus de chaleur que provoquera la vague, ce qui lui permettra de prévoir en plus de sa durée, son intensité qui est un paramètre crucial pour la prise de décision pour bon nombre de secteurs et usagers. Un seuil global de 10°C d'écarts par rapport à la normale climatologique décennale reste valide pour l'ensemble des wilayas du nord du pays pour la prévision d'un (01) ou de deux (02) jours caniculaires ou d'une vague de chaleur de trois (03) jours. Au-delà de trois (03) jours, ce seuil de 10°C reste toujours valable pour les villes côtières et celles de l'intérieur et du Sud élevées; il devient de 9°C pour le reste du pays. Pour les villes sahariennes, les seuils sont préétablis pour chaque mois calendaire de l'année. Cependant, pour mettre en opérationnel ce modèle, le Centre Climatologique National devrait régulièrement fournir au centre de prévision les normales climatologiques décennales et mensuelles actualisées de chaque wilaya. Ce système de veille ou de vigilance tient également son importance grâce à son applicabilité tout au long de l'année, ce qui nécessiterait par conséquent son automatiser. Ce système se considère dans beaucoup de pays comme une valeur ajoutée pour la sauvegarde

des vies humaines, ce qui exige incontestablement une coordination des services météorologiques avec l'ensemble des services concernés directement ou indirectement par ce phénomène. L'objectif assigné dans la création d'un système de veille permanent de vigilance est de déclencher des actions au moment opportun afin de minimiser les impacts.

On a pu également montrer grâce à l'analyse de la vague de chaleur du mois de mars 2001, l'importance du rôle que joue l'Oscillation Nord Atlantique (centres d'action dynamiques, dépression d'Islande et l'Anticyclone des Açores) ainsi que la dépression saharienne dans l'intensification de cette vague et de sa persistance. Le suivi de l'évolution de tels champs par les prévisionnistes s'avère alors capital pour prévoir et caractériser les types de temps extrêmes en Algérie. Il serait également utile d'investiguer d'autres approches entre autres, les indices bioclimatiques qui s'adaptent mieux à d'autres types d'usages et qui répondent à des besoins spécifiques comme pour le cas du confort humain et de la santé.

Enfin, L'équipe du Centre Climatologique National développera très prochainement une autre étude permettant d'élaborer des cartes de vigilance spécifiques, basées sur les indices bioclimatiques.

Remerciements

Les auteurs remercient particulièrement et vivement Dr. Bari Driss de la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc ainsi que le Professeur Mladjen Curic de l'Institut de la Météorologie à l'Université de Belgrade (Serbie) pour leur assistance et leurs précieux conseils. Comme, ils tiennent à présenter leurs gratitude à Monsieur le Directeur Général de l'ONM, Mr. Brahim IHADADENE pour son soutien permanent, son appui et ses encouragements

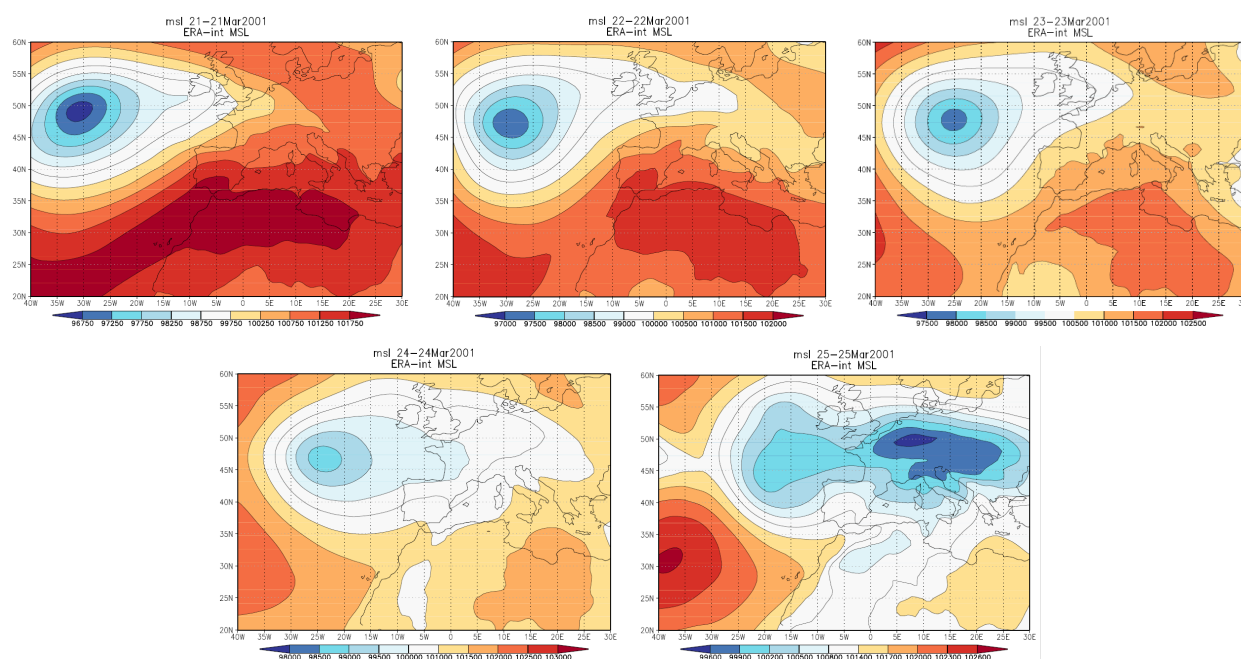


Figure 8. Distribution du champ de pression moyen au niveau de la mer sur la région pour la période de la vague de chaleur du 21 au 25 Mars 2001

ayant facilité la réalisation de ce travail.

Références

- Anderson, G. B. and Bell, M. L. (2011). Heat waves in the united states : mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 us communities. *Environmental Health Perspectives*.
- Bari, D., Chekroun, H., and Madani, A. (2006). Vagues de chaleur et de froid au maroc : Definitions et caractéristiques, document interne. *DMN- Casablanca, Maroc*.
- Cuyppers, D. Vague de chaleur et pic d'ozone. *Revue PF Sante publique, Securite de la Chaîne alimentaire et Environnement, Belgique*.
- Gay, L. and Airasian, W. (2003). Educational research : Competencies for analysis and applications. *Merrill/Prentice Hall*.
- Koppe, C., Jendritzky, G., Kovats, R. S., and Menne, B. (2004). Heatwaves : impacts and responses. *WHO, Copenhagen*.
- Laaidi, K. and al (2006). Systeme d'alerte canicule et sante 2006 (sacs 2006). rapport operationnel du systeme d'alerte canicule 2006. *Institut de Veille Sanitaire*.
- Letard, V., Flandre, H., and Lepeltier, S. (2004). Annexe au proces-verbal de la seance du 3 fevrier 2004, rapport d'information, fait au nom de la mission commune d'information « la france et les, francais face a la canicule : les lecons d'une crise». *N 195, SÉNAT SESSION ORDINAIRE DE 2003-2004*.
- Radinovic, D. and Curic, M. (2011). Criteria for heat and cold wave duration indexes. *Theor Appl Climatol*.
- Radinovic, D. and Curic, M. (2014). Measuring scales for daily temperature extremes, precipitation and wind velocity. *Meteorological Applications*.
- TT-DEWCE, W. (2015). Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events.
- Wagner, V., Tertre, A. L., and Laaidi, K. (2006). French heat health watch warning system : Validation of temperature thresholds. *Institut de veille sanitaire, Departement sante environnement, Saint-Maurice, France*.

Indices Bioclimatiques : Etude du cas de la Vague de Chaleur en Algérie, Dans la Perspective de l'Elaboration de Cartes de Vigilance : « Humidex » et « PET »

Salah SAHABI-ABED ^{1*}, Mehdi KERROUCHE ¹

Résumé

Nous essaierons de mettre en œuvre dans ce travail de recherche deux types d'indices bioclimatiques reconnus par les spécialistes comme des indices pertinents, mettant en évidence les conditions météorologiques extrêmes et leurs impacts probables sur la santé et le confort humains. Il s'agit en effet de la température équivalente physiologique (PET) et de l'indice Humidex (H) mis au point par les météorologistes canadiens. Nous présenterons ici, le cas d'étude de la canicule du mois de mars 2001 qui a sévi sur l'ensemble du territoire algérien. L'utilisation du (PET) est très reconnue dans le domaine de la santé et du tourisme, puisqu'il permet de localiser les zones offrant un confort propice pour le corps humain et pour des conditions météorologiques bien déterminées au cours de l'année. Il est même utilisé dans le domaine de l'architecture servant aux choix de la géométrie des espaces publics ouverts sur le microclimat afin d'assurer un meilleur confort [Kedissa and Outtas \(2010\)](#). Dans le domaine de la santé, beaucoup d'études ont montré que la surmortalité liée aux conditions climatiques extrêmes présente une bonne corrélation avec le PET [Urban and Kysely \(2014\)](#). Le second indice qui est l'indice Humidex, (H) est très utilisé par les services sanitaires, et les entreprises ayant un personnel exposé longuement au soleil (travaux à l'extérieur des abris). L'utilisation de cet indice dans beaucoup de pays (Canada particulièrement) permet grâce aux données prévues de température et d'humidité de déclencher le système d'alerte qui peut aller jusqu'à préconiser l'arrêt de travail dans de nombreux domaines. L'Humidex est actuellement élaboré par beaucoup de services météorologiques dans le monde (Canada, France, Europe ...). Nous présenterons ici les deux indices PET et Humidex, comme nous illustrons leurs évolutions pendant la période caniculaire du mois de mars 2001.

¹ Office National de la Météorologie, Dar El Beida, Alger

*Correspondant:

1. Introduction

Plusieurs indices et modèles ont été développés par de nombreux chercheurs afin d'évaluer l'impact du stress thermique dû aux effets combinés de plusieurs paramètres météorologiques sur le corps humain. Si on veut évaluer l'influence du climat sur l'organisme humain, Il est nécessaire d'évaluer les effets non seulement d'un seul paramètre mais de toutes les composantes thermiques, ce qui nous conduit à la modélisation de l'équilibre de chaleur de l'homme [Buttner \(1938\)](#) [Matzarakis \(2007\)](#).

On notera l'existence d'un ensemble d'applications typiques sur le calcul d'indices de confort entre autres, la température effective standard (SET) la température perçue (PT) ainsi que la température équivalente physiologique (PET). Tous ces indices thermiques sont bien documentés et incluent des paramètres météorologiques et thermo-physiologiques importants [Matzarakis \(2007\)](#).

L'avantage de ces indices thermiques, c'est qu'ils nécessitent presque tous les mêmes paramètres de la composante météorologique du système comme la température de l'air, humidité de l'air ou la tension de vapeur, la vitesse du vent ainsi que ceux relatifs aux flux de rayonnement de courtes longueurs d'ondes.

Vers les années soixante [Thom \(1959\)](#) a mis en oeuvre l'indice de confort bioclimatique « THI » qui combine la température, l'humidité et le vent.

Fanger en 1970 a conçu le 1^{er} modèle de l'équilibre énergétique du corps humain, qui a ensuite été modifié

par Jendritzky ([Baltazar \(2014\)](#) [Höppe \(1997\)](#)) en incluant les paramètres évaluant le flux radiatif permettant ainsi son application dans l'environnement extérieur.

Parmi les modèles bioclimatiques et de flux de rayonnement développés récemment, on citera le modèle « RayMan » qui calcule les flux radiatifs déterminant ainsi la température équivalente physiologique (PET) [Matzarakis et al. \(2007\)](#) [Matzarakis et al. \(2010b\)](#). Le modèle Rayman développé suivant le guide 3787 de la société d'ingénierie allemande VDI (1998), calcule le flux de rayonnement dans un environnement simple et complexe sur la base de plusieurs paramètres, tels que la température de l'air, humidité de l'air, le degré de couverture nuageuse, heure du jour et année, l'albédo des surfaces environnantes [Gulyas and Matzarakis \(2009\)](#).

Le PET est un indice thermique universel s'exprimant en °C. Pour l'obtenir, il faut déterminer les paramètres atmosphériques influençant l'équilibre des échanges de chaleur du corps humain tels que le vent, l'humidité, la température de l'air et la température moyenne radiante de l'environnement [Matzarakis et al. \(2007\)](#).

2. Intérêt des indices (PET) et l'Humidex dans les secteurs du tourisme et de la santé

Urban et Kysely [Urban and Kysely \(2014\)](#) ont étudié la relation du nouvel Indice « UTCI » (Universal Thermal Climate Index) et l'ont comparé avec l'indice « (PET) » dans l'analyse des effets de la chaleur et du Froid sur

la mortalité cardio-vasculaire en deux régions différentes (urbaine et rurale) en République Tchèque pendant seize (16) années (1994–2009). Ces deux chercheurs ont conclu que le PET se montre un prédicteur plus universel dans la relation de la mortalité avec la chaleur et le froid que l'indice UTCI et pour les deux environnements urbain et rural, d'où son intérêt pour les services sanitaires, notamment les urgences médicales.

Dans beaucoup d'études, on a pu montrer également l'utilité de l'utilisation du PET dans le domaine du tourisme. En effet, lorsque les touristes sont exposés à une condition thermique extérieure qui provoque le stress thermique, c'est-à-dire les températures extrêmement élevées ou basses, leur santé pourrait être négativement affectée. A l'inverse, lorsque les touristes se retrouvent dans des conditions thermiques qui sont proches de leurs zones de confort thermique, le nombre de touristes qui visitent les stations balnéaires à titre d'exemple ou bien les sites touristiques exposés en plein air peut augmenter [Lin \(2009\)](#), d'où l'intérêt économique. Comme un indice thermique issu de l'équilibre de l'énergie humaine, la température équivalente physiologique (PET) demeure par conséquent bien adaptée à l'évaluation de la composante thermique dans les différentes situations climatologiques.

L'Humidex est un indice qui combine à la fois la température réelle et le niveau d'hygrométrie (ou taux d'humidité) de l'air, il reflète en quelque sorte la température ressentie. Ces deux paramètres météorologiques sont déterminants pour le confort humain pendant la saison estivale particulièrement. Le corps humain a en effet tendance à davantage ressentir la chaleur lorsque l'air est plus humide. Sous certaines conditions de travail, l'Humidex pourrait servir en tant qu'indice de l'inconfort dû à une exposition prolongée à la chaleur. Dans le monde, cet indice est destiné au grand public.

Les spécialistes en biométéorologie et les médecins spécialisés confirment que puisque Le corps tente de se maintenir à une température interne constante de 37°C , il cherchera à s'adapter à la canicule, pour cela, il met en action des mécanismes de régulation thermique par transpiration et respiration éliminant ainsi la chaleur via l'eau et la vapeur d'eau rejetées.

L'évaporation s'arrête même complètement lorsque l'humidité relative atteint environ 90%. Dans ce cas, la température du corps augmente et il y a risque de maladie.

Plus loin encore, l'intérêt que revêt cet indice ne se limite pas uniquement à ces deux secteurs. En effet, et en date du 20 Juin 2016, la Fédération Québécoise de Soccer-Football (FSQ) avait adressé un communiqué intitulé « Canicule 30°C et plus avec un facteur Humidex : Pause d'Eau Supplémentaire ». Dans ce communiqué, la fédération avait demandé aux arbitres d'être permissifs quant à l'attribution de pauses d'eau dans toutes les catégories et au milieu de chaque mi-temps sans toutefois dépasser les deux minutes.

3. L'indice PET : Définition

La température équivalente physiologique (PET) utilise le modèle d'équilibre énergétique de Munich pour les individus (MEMI) (figure 1), qui est un modèle d'équilibre de chaleur thermo-physiologique. Cet équilibre est défini par l'équation [Taleghani et al. \(2016\)](#) :

$$S + W + R + M + C + E_{re} + ED + E_{sw} = 0 \quad (1)$$

Où :

S	Stockage de la chaleur du corps
W	Travail physique dégagé
R	Rayonnement net du corps
M	Taux du métabolisme (production énergétique interne par le corps)
C	Flux de la chaleur convective
E_{re}	Tous les flux de réchauffement et d'humidification de l'air inspiré.
ED	Flux de chaleur latente pour l'évaporation de l'eau diffusée à travers la peau du corps
E_{sw}	Flux de chaleur latente due à l'évaporation de la sueur

Pour calculer le PET, il est nécessaire de déterminer toutes les variables météorologiques qui sont importantes pour l'équilibre de l'énergie humaine à une hauteur biométéorologique significative.

L'indice utilise quatre paramètres météorologiques et deux paramètres thermo-physiologiques, il s'agit de : la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$), la température moyenne radiante ($^{\circ}\text{C}$), l'humidité relative (%), la force du vent (m/s), la résistance thermique de l'habillement ($Clo = 0.155 \text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$) et le niveau d'activité de l'homme (W).

Le métabolisme dépend également des attributs personnels tels que la taille, le poids, l'âge et le sexe. L'isolation des vêtements (exprimée en unité de Clo) dépend de l'échange de chaleur entre le corps humain avec son environnement, elle prend la valeur 0 pour une personne nue et 1,5 pour une personne portant des vêtements d'hiver lourds. Quant à l'activité de l'homme, elle varie entre 40W (personne endormie) à 410–505W au moment d'une activité de lutte par exemple (exercice de sport...) ([Daneshvar et al. \(2013\)](#)).

Les paramètres humains influençant le PET sont habituellement normalisés dans le modèle MEMI car l'accent est mis non pas sur les caractéristiques individuelles de l'homme, mais sur les conditions climatiques à différents endroits [Matzarakis et al. \(2010a\)](#). Afin de quantifier la perception des ambiances thermiques par des humains, des valeurs seuils du PET ont été développés, indiquant les différents niveaux de stress thermique sous la forme d'un index gradué (tableau 1). Dans ce tableau, les valeurs seuils du PET pour différentes perceptions thermiques et des niveaux de stress thermiques, associés à un taux métabolique de 80W (marche à pied) et une résistance de transfert de chaleur d'habillement 0,9Clo (habillement d'été) sont indiquées. Les hypothèses suivantes ont été faites pour le climat intérieur de référence dans le calcul du PET.

La température moyenne radiante équivalente à la température de l'air ($T_{mrt} = Ta$), la vitesse de l'air fixée à 0,1m/s, la tension de vapeur d'eau à 12hPa (équivalente à un taux d'humidité relative de 50% à $Ta = 20^{\circ}\text{C}$), [Mayer and Höppe \(1987\)](#) [Höppe \(1999\)](#).

Les valeurs calculées du PET utilisées dans notre étude, sont basées sur des conditions standards relatives à une personne exposée au soleil ayant les caractéristiques suivantes :

— taille= 1,75 m

- poids = 75 kg
- sexe = mâle
- âge = 35 ans

Ces valeurs sont rendues constantes dans le calcul du PET afin de définir un index indépendant des comportements individuels (Tableau 1).

Lorsque le PET s'élève à 29°C et plus, le stress thermique devient préoccupant pour la santé, ce stress deviendra dangereux à partir d'un PET équivalent à 35°C .

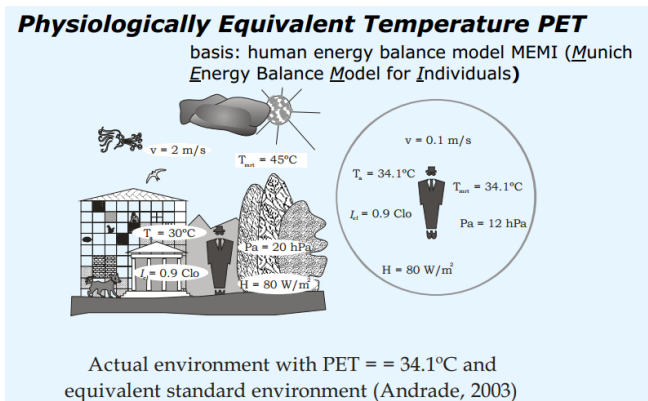


Figure 1. Composantes du Modèle MEMI servant à la détermination de l'indice PET Matzarakis (2007)

4. Calcul de l'Indice PET pour le cas de la canicule du mois de Mars 2001 en Algérie

Nous nous sommes intéressés à la détermination du PET durant la période caniculaire qui a sévi en Algérie entre le 21 et le 25 mars Sahabi-Abed and Kerrouche (2017).

L'objectif principal étant de procéder à l'élaboration de la carte PET (carte de vigilance) qui revêt d'une importance capitale pour différents secteurs, notamment celui du tourisme et de la santé.

Données utilisées

Les données météorologiques utilisées sont celles relevées à 12h00 TU (13h00 locale). Le choix de cet horaire est dicté par le fait, qu'à cette heure, les conditions extrêmes de température et d'humidité, qui risquent d'influencer fortement le corps humain et par conséquent la sensation thermique provoquant le stress physiologique maximal défavorable, ont de forte chance d'être enregistrées. Les données quotidiennes relevées à 12h00TU en provenance de 41 stations synoptiques du réseau de l'Office National de la Météorologie (O.N.M) des 41 wilayas couvrant le territoire national ont été utilisées. Pour des raisons liées à cette étude, et pour des raisons de non disponibilité de stations dans les chefs lieux des wilayas, la station de Dellys Afir a servi pour représenter la wilaya de Boumerdes, et celle de BeniSaf, la wilaya d'Ain-Témouchent (choisies pour leur proximité). Les données quotidiennes utilisées sont : la température moyenne, l'humidité relative, la vitesse du vent et la nébulosité.

Nous avons utilisé le modèle « RayMan version 1.2 » de l'institut Météorologique de l'université de Freiburg d'Allemagne pour le calcul de la PET. Le modèle "Ray-Man" calcule les flux radiatifs et les effets des nuages sur les flux radiatifs de courtes longueurs d'ondes, à l'issu des

quels il déterminera la température radiante nécessaire dans l'équation d'équilibre énergétique du corps humain.

Les valeurs calculées du PET utilisées dans notre étude, sont basées sur des conditions standards (par défaut) relatives à une personne exposée au soleil avec une légère activité liée à la marche (80W) ayant les caractéristiques suivantes (figure 1) :

- taille = 1,75 m
- poids = 75 kg
- sexe = male
- âge = 35 ans

Les résultats de l'indice PET relatif à chaque station et pour chaque journée couvrant la période caniculaire sont reproduits sur des cartes (figures 2-6).

Traçage des cartes PET

Nous avons élaboré des cartes d'indice PET pour toute la période couverte par la canicule ayant fait l'objet d'une étude antérieure Sahabi-Abed and Kerrouche (2017) et ayant couvert l'Algérie du 21 au 25 mars 2001. Nous viserons à travers ceci, la réalisation d'une carte de vigilance mettant en exergue le degré du stress thermique pouvant être généré par les conditions météorologiques extrêmes ayant été enregistrées pendant ces journées caniculaires. Le suivi de l'indice PET du 21 au 25 mars 2001 montre bien l'évolution du stress de chaleur en fonction de l'évolution des conditions météorologiques.

En date du 21 mars 2001, quatre wilayas ont observé un stress de chaleur fort à extrême, il s'agit de Tlemcen et Béchar ayant enregistré un PET de 43°C , Ain-Temouchent de 40°C et Illizi de 37°C . Le reste des wilayas ont observé une situation de confort ou bien de stress de chaleur léger ou modéré (figure 2). Dans la journée du 22 mars, le stress de chaleur extrême s'est répandu sur l'ensemble des wilayas de l'ouest et le centre du Sahara ainsi que quelques villes au centre et l'est. Six wilayas de l'ouest du pays ont connu un PET supérieur à 41°C , comme à Béchar et Tlemcen où le maximum a été observé avec 49°C au même moment, Tizi-Ouzou et Bouira avaient relevé respectivement 42°C et 43°C . Dans cette même journée, Neuf (09) autres villes ont enregistré des PET supérieures à 35°C , se trouvant ainsi dans une situation de stress fort (figure 3).

La canicule qui semble avoir couvert l'ensemble du territoire le 23 mars 2001 a mis en évidence des PET assez élevés dans la plupart des villes. Trente-cinq (35) wilayas du pays ont connu des PET supérieurs à 29°C c'est-à-dire allant d'un degré de stress de chaleur modéré à extrême. Parmi ces wilayas, onze (11) ont enregistré un niveau de stress physiologique extrême, le record étant enregistré à Alger avec plus de 54°C (figure 4). En date du 24 mars 2001, le stress de chaleur extrême s'est maintenu particulièrement dans les régions sahariennes. Seize (16) wilayas avaient enregistré des indices PET supérieurs à 35°C dont (06) sont restées dans la classe d'un stress de chaleur extrême, le record étant observé à Ouargla avec 55°C (figure 5). Vers le 25 mars, six (06) wilayas sont restées sous un stress de chaleur fort à extrême (maximum observé à Ouargla avec 45°C) et huit sous un stress de chaleur modéré (figure 6).

Table 1. Seuils et degrés de sensation relatifs à l'indice PET

PET (° C)	Sensation Thermique	Niveau du Stress Physiologique
< 4	Très froid	Stress de froid extrême
4 – 8	Froid	Fort stress de froid
8 – 13	Frais	Stress de froid modéré
13 – 18	Légèrement frais	Stress de froid léger
18 – 23	Confortable	Pas de stress thermique
23 – 29	Légèrement chaud	Stress de chaleur léger
29 – 35	Chaud	Stress de chaleur modéré
35 – 41	Très Chaud	Stress de chaleur fort
> 41	Extrêmement chaud	Stress de chaleur extrême

5. l'Indice Humidex (H) : Définition

L'Humidex fut crée par les météorologistes canadiens en 1965. Il indique de quelle manière le temps chaud et humide est perçu par une personne moyenne. La relation entre l'Humidex et le bien-être reste toute fois subjective. Elle varie largement selon les individus. L'Humidex tient de l'effet combiné de la température et de l'humidité pour mesurer le confort et la sensation d'une personne. C'est un nombre qui décrit l'intensité de chaleur ressentie par les personnes, tout comme le facteur de refroidissement éolien qui décrit l'intensité du froid ressenti par les gens. Cet indice mesure par conséquent le degré de la chaleur perçue résultant de l'effet combiné de l'humidité excessive et d'une température élevée.

Un taux d'humidité élevé donne l'impression de faire plus chaud que durant une journée plus sèche. Par temps chaud, l'organisme produit de la sueur pour rafraîchir le corps par évaporation. La transpiration qui sert à abaisser notre température corporelle ne peut s'évaporer aussi facilement dans l'air très humide. L'évaporation s'arrête même complètement lorsque quand l'air renferme un taux d'humidité trop élevé ou devient complètement saturé, ce qui fait augmenter la température du corps provoquant ainsi des maladies dangereuses.

L'humidex fut modifié par [Masterton and Richardson \(1979\)](#). Il permet alors de décrire la chaleur et l'humidité ressentie et s'utilise essentiellement en milieux chauds. Il regroupe la température de l'air (T) et la Tension de la vapeur d'air (« e » en hPa) ; il est sans dimension. Le degré de confort associé aux valeurs de l'humidex est présenté dans le tableau 2 et tableau 3.

La formule de l'humidex utilisée au Canada est :

$$H = (0.5555) \times (e - 10.0) \quad (2)$$

Avec e la pression partielle de vapeur (hPa) donnée par :

$$e = 6,11 \times \exp \left[5417,7530 \times \left(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{T_d} \right) \right] \quad (3)$$

Avec :

- T_d : Température du point de rosée (K)
- 5417,7530 : Constante arrondie basée sur le poids moléculaire de l'eau, sur la chaleur latente d'évaporation et sur la constante des gaz parfaits.

Ainsi, on peut écrire :

$$Humidex = t_{air} +$$

$$0.5555 \times \left[6.11 \exp \left[5417.7530 \left(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{T_d} \right) \right] - 10 \right] \quad (4)$$

Table 2. Calcul de l'indice humidex en fonction de la température et de l'humidité relative.

		Relative Humidity (%)																
		100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%	45%	40%	35%	30%	25%	20%
Temperature (°C)	21°C	29	29	28	27	27	26	26	24	24	23	23	22					
	22°C	31	29	29	28	28	27	26	26	24	24	23	23					
	23°C	33	32	32	31	30	29	28	27	27	26	25	24	23				
	24°C	35	34	33	33	32	31	30	29	28	28	27	26	26	25			
	25°C	37	36	35	34	33	33	32	31	30	29	28	27	27	26	25		
	26°C	39	38	37	36	35	34	33	32	31	31	29	28	28	27			
	27°C	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	28		
	28°C	43	42	41	41	39	38	37	36	35	34	33	32	31	29	28	28	
	29°C	46	45	44	43	42	41	39	38	37	36	34	33	32	31	30		
	30°C	48	47	46	44	43	42	41	40	38	37	36	35	34	33	31	31	
	31°C	50	49	48	46	45	44	43	41	40	39	38	36	35	34	33	31	
	32°C	52	51	50	49	47	46	45	43	42	41	39	38	37	36	34	33	
	33°C	55	54	52	51	50	48	47	46	44	43	42	40	38	37	36	34	
	34°C	58	57	55	53	52	51	49	48	47	45	43	42	41	39	37	36	
	35°C		58	57	56	54	52	51	49	48	47	45	43	42	41	38	37	
	36°C			58	57	56	54	53	51	50	48	47	45	43	42	40	38	
	37°C					58	57	55	53	51	50	49	47	45	43	42	40	
	38°C							57	56	54	52	51	49	47	46	43	42	40
	39°C									56	54	53	51	49	47	45	43	41
	40°C										57	54	52	51	49	47	44	43
Humidex		Degree of Discomfort																
20 - 29		No discomfort																
30 - 39		Some discomfort																
40 - 45		Great discomfort, avoid exertion																
46 +		Dangerous, possible heat stroke																

Humidex	Degree of Discomfort
20 - 29	No discomfort
30 - 39	Some discomfort
40 - 45	Great discomfort, avoid exertion
46 +	Dangerous, possible heat stroke

6. Calcul de l'Humidex : Cas de la canicule de mars 2001 en Algérie

Les données quotidiennes de température et d'humidité relative relevées à 12h00 TU (13h00 heure locale) et en provenance des mêmes stations synoptiques du réseau de l'Office National de la Météorologie ayant servi à calculer l'indice de température équivalente physiologique ont été utilisées pour le calcul de l'indice Humidex pendant la période caniculaire qui a touché le pays du 21 au 25 mars 2001. Nous visons à travers ceci, l'élaboration de la carte Humidex relative à cette situation, ce qui permettra par la suite de voir quelles auraient été les conditions de confort qui régnaient sous ces conditions météorologiques si le service météorologique avait à l'époque procéder à son élaboration. Cette démarche permettra également de comparer si l'Humidex fera ressortir des degrés de confort comparables à ceux dégagés par l'indice PET déterminés précédemment.

D'après l'analyse des cartes, il semblerait que l'Humidex suivait de près l'allure du PET à compter du 22 mars 2001. Dans la journée du 21 mars, l'Humidex était

Table 3. Valeurs de l'indice Humidex et degrés de confort associés.

Valeur de l'Humidex	Degré de confort
< 15	Sensation de frais ou de froid
15 → 19	Peu de gens sont incommodes
20 → 29	Sensation de bien-être
30 → 34	Sensation de malaise plus ou moins grande
35 → 39	Sensation de malaise assez grande. Prudence : ralentir certaines activités en plein air.
40 → 45	Sensation de malaise généralisée. Danger : éviter les efforts.
46 → 53	Danger extrême : Arrêt de travail dans de nombreux domaines.
> 54	Coup de chaleur imminent Danger de mort

globalement inférieur à 30 (figure 7). Par contre, dans le reste des journées, on a observé des indices d'Humidex supérieurs à 30. En date du 22 mars 2001, dix (10) wilayas ont vu leurs indices équivalents ou supérieurs à 30 et se trouvaient par conséquent dans une situation de sensation de malaise plus ou moins grande, le maximum étant observé à Ouargla avec une valeur de 33 (figure 8). Dans la journée du 23 mars, vingt-trois (23) villes étaient au niveau supérieur à 30, notamment au centre et à l'Est où l'Humidex a dépassé le seuil de 35 pour atteindre la valeur 37 à Alger et 35 à Annaba, Skikda et Oran (figure 9). L'Humidex de la journée du 24 mars 2001 semble se renforcer dans l'Est du pays, plus particulièrement dans la région du littoral où l'on a observé cette fois-ci un Humidex de 40 à Jijel, ce qui montre que l'on se trouvait dans une situation de malaise généralisée et de danger (Figure 10). En cette journée, avec de telles valeurs prévues de température et d'humidité, l'Humidex nous aurait permis de lancer un appel au grand public et d'alerter les services concernés (sanitaire notamment) afin de prendre les dispositions nécessaires.

Neuf (09) wilayas majoritairement du Sud ont enregistré des valeurs d'indice Humidex supérieures à 30 le 25 mars, c'est-à-dire se trouvaient dans une situation de sensation de malaise plus ou moins grande à assez grande. On notera cependant à leur tête la ville de Ouargla avec une valeur de 36 (figure 11).

7. Conclusion

Nous avons pu mettre en exergue la possibilité de l'élaboration de cartes de vigilance relatives à la sensation thermique et au confort humain ainsi que les effets négatifs probables qui peuvent y être engendrés par suite des conditions météorologiques extrêmes. Des cartes de ce type prévues et élaborées sur la base de données météorologiques prédites pourraient à l'avenir sans doute servir à lancer une alerte précoce que ce soit au grand public (par des bulletins simples comme pour l'Humidex) ou bien aux différents usagers spécifiques par le biais de cartes PET et Humidex. Comme, on a pu montrer que ces indices biométéorologiques ou physiologiques deviennent de plus en plus des outils incontournables dans la prise de décision dans le monde, et ce, que ce soit dans le secteur du travail, le tourisme ou même dans les activités sportives.

On a pu également montrer que certains secteurs dans le monde s'appuient sur des indices de type Humidex (H) ou bien la température équivalente physiologique pour l'élaboration de leurs plans d'alerte et de vigilance sanitaire, voire même lancer des communiqués et des aver-

tissements. Ces indices biométéorologiques de confort se montrent de plus en plus pertinents dans la lutte contre le déclenchement soudain de plusieurs types de maladies liées notamment à la chaleur ou le froid, entre autres, les maladies cardio-vasculaires et respiratoires. Comme l'Humidex associe l'effet combiné de la température avec l'humidité, ce dernier demeure un indicateur potentiel notamment aux sujets vulnérables (personnes âgées, malades chroniques, enfants,...).

Nous recommandons enfin d'introduire ce type de cartes dans le proche avenir en opérationnel dans le service de prévision météorologique de l'Office National de la Météorologie après une coordination avec les utilisateurs concernés.

Références

- Baltazar, S. (2014). New bioclimatic maps of Lisbon. Spatial modelling of physiological equivalent temperature. *Finisterra - Revista Portuguesa de Geografia*, pages 81 – 94.
- Buttner, K. (1938). *Physikalische bioklimatologie. Akademische, Verlagsgesellschaft Leipzig.*
- Daneshvar, M. R. M., Bagherzadeh, A., and Tavousi, T. (2013). Assessment of bioclimatic comfort conditions based on physiologically equivalent temperature (pet) using the rayman model in iran. *Central European Journal of Geosciences*, 5(1) :53–60.
- Gulyas, A. and Matzarakis, A. (2009). Seasonal and spatial distribution of physiologically equivalent temperature (pet) index in hungary. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*.
- Höppe, P. (1997). Aspects of human biometeorology in past, present and future. *International Journal of Biometeorology*, 40(1) :19–23.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2) :71–75.
- Kedissa, C. and Outtas, S. (2010). Strategies pour un refroidissement passif des espaces extérieurs. In *5eme congrès international sur les énergies renouvelables et l'environnement, communication personnelle, Sousse, Tunisie.*
- Lin, T.-P. (2009). Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Building and Environment*, 44(10) :2017 – 2026.
- Masterton, J. and Richardson, F. (1979). *Humidex : a method of quantifying human discomfort due to exces-*

- sive heat and humidity*. Downsview, Ont. : Atmospheric Environment.
- Matzarakis, A. (2007). Assessment method for climate and tourism based on daily data. *Developments in tourism climatology*, (12).
- Matzarakis, A., Rudel, E., Zygmuntowski, M., and Koch, E. (2010a). Bioclimatic maps for tourism purposes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(1-2) :57 – 62. Bio-, Agro, and Urban Climatology.
- Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the rayman model. *International Journal of Biometeorology*, 51(4) :323–334.
- Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H. (2010b). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments : basics of the rayman model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2) :131–139.
- Mayer, H. and Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1) :43–49.
- Sahabi-Abed, S. and Kerrouche, M. (2017). Canicule et vague de chaleur en algerie : Definition — seuils — caracteristiques. *Journal Algerien de Meteorologie Appliquee*.
- Taleghani, M., Sailor, D., and Ban-Weiss, G. A. (2016). Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a los angeles neighborhood. *Environmental Research Letters*, 11(2) :024003.
- Thom, E. C. (1959). The discomfort index. *Weatherwise*, 12(2) :57–61.
- Urban, A. and Kysely, J. (2014). Comparison of utci with other thermal indices in the assessment of heat and cold effects on cardiovascular mortality in the czech republic. *J. Environ. Res. Public Health*.
- VDI (1998). Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning. *Climate. VDI Guidline 3787. Beuth, Berlin*.

Température Equivalente Physiologique (PET)
Date: 21 Mars 2001

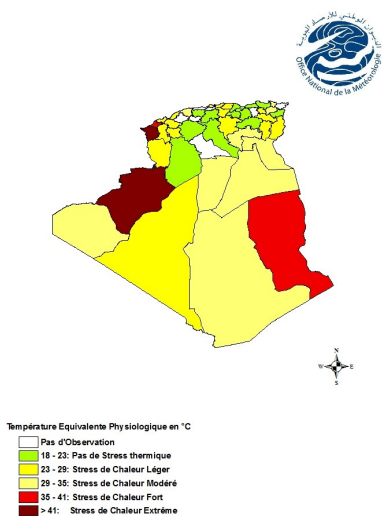


Figure 2

Température Equivalente Physiologique (PET)
Date: 22 Mars 2001

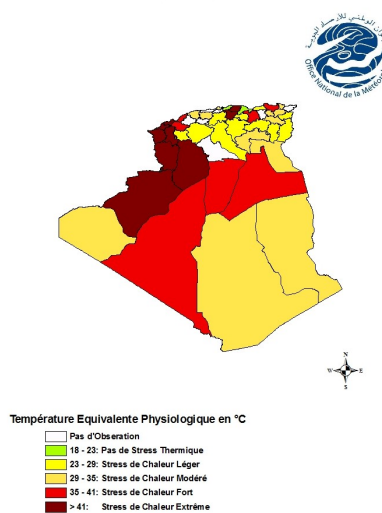


Figure 3

Température Equivalente Physiologique (PET)
Date: 23 Mars 2001

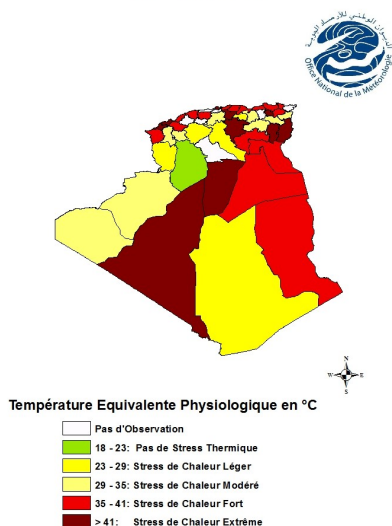


Figure 4

Température Equivalente Physiologique (PET)
Date: 24 Mars 2001

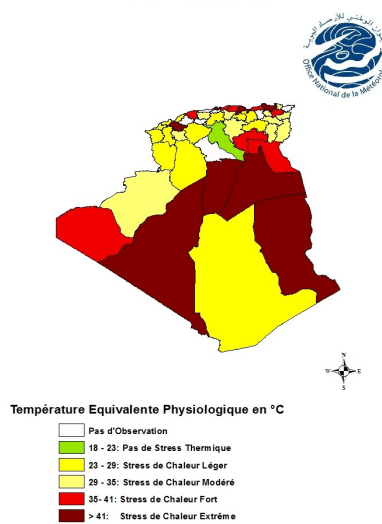


Figure 5

Température Equivalente Physiologique (PET)
Date: 25 Mars 2001

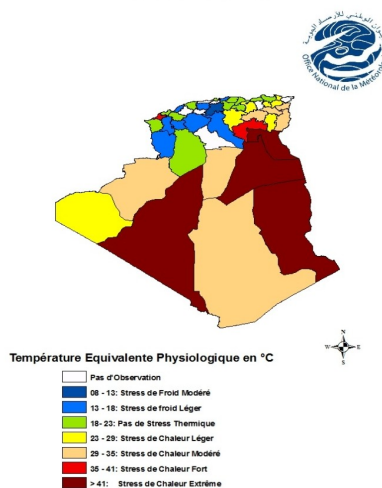


Figure 6

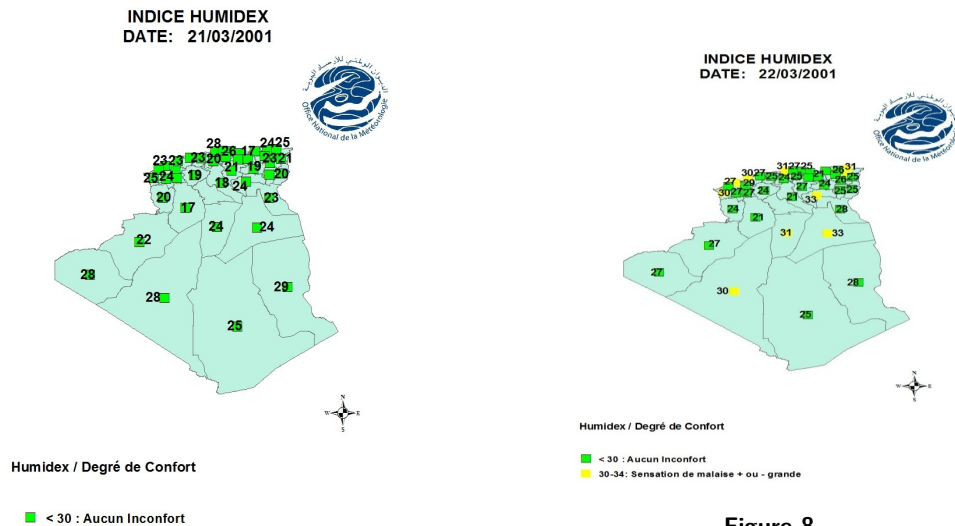


Figure 8

Figure 7

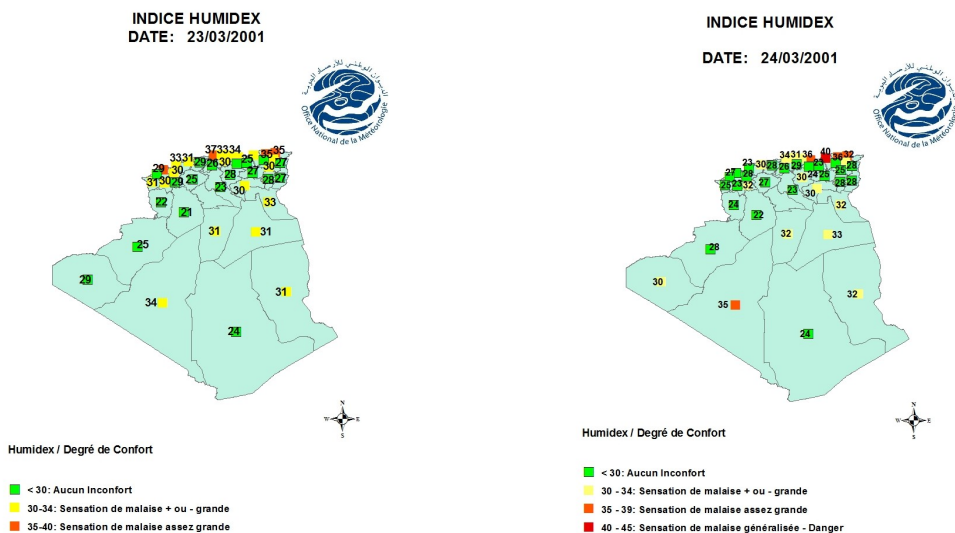


Figure 10

Figure 9

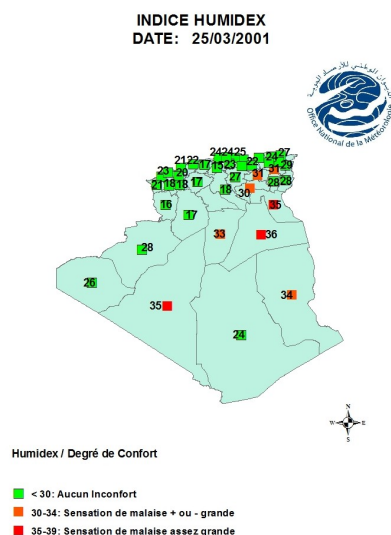


Figure 11

Reconstitution des séries mensuelles de températures maximales et minimales sur l'ouest Algérien

Karima SOLTANI ^{1*}, Mahmoud HAOUARI ¹

Résumé

¹Département Météorologique Régional Ouest (ONM, Algérie)

*Correspondant: kari.mekki@yahoo.com

1. Introduction

Toutes les études relatives au changement climatique et à la variabilité climatique nécessitent de longues séries climatologiques d'une très bonne qualité. Dans notre pays, malgré que les premières observations météorologiques aient débutées vers 1850 au port d'Alger, il n'en demeure pas que ces séries présentent beaucoup de lacunes et d'incohérences. Il est temps pour l'ONM de se pencher sérieusement sur cet aspect de sa banque de données pour entamer la lourde tâche de construire les plus longues séries des paramètres climatologiques importants (température, précipitation, pression atmosphérique ...).

Aujourd'hui, le software existe en open source sous R [Team \(2014\)](#) pour effectuer l'ensemble de ces tâches fastidieuses, qui nous étaient inaccessibles sans l'aide de pays très avancés dans ce domaine. Les meilleurs programmes d'imputation des données manquantes et d'homogénéisation des séries climatologiques existent par dizaines en libre utilisation.

C'est dans ce cadre, que s'inscrit ce modeste travail pour montrer à nos collègues de l'ONM, les possibilités qui s'offrent maintenant pour nous pour relever certains défis, que nous seuls pouvons relever pour la sauvegarde du patrimoine climatique de notre pays.

2. Objectif

Jusqu'à présent dans tout l'ouest Algérien, l'ONM ne dispose que d'une seule série d'Oran Es-sénia, de température mensuelle de 1936 à nos jours qui est complète et de bonne qualité. Toutes les autres séries sont lacunaires. Ces lacunes, comme le montre le tableau 1, sont imputées à la période post coloniale de 1962 jusqu'à la fin des années 70. Après cette période, le réseau professionnel s'est largement étoffé pour reprendre l'exploitation des anciennes stations et d'en ouvrir d'autres.

Il s'avère que la seule série disponible d'Oran Es-Sénia est très insuffisante pour caractériser l'évolution des températures dans l'ouest Algérien, car elle n'est représentative que du climat du littoral.

Depuis déjà, un certain temps que nous réfléchissons à constituer d'autres séries assez complètes pour enrichir nos connaissances, mais malheureusement, le rattrapage des données manquantes était impossible avec une seule station.

Récemment l'idée nous a venu d'utiliser les champs analysés des températures de surface du projet ERA40 du centre météorologique européen ECMWF [Uppala et al.](#)

(2005). Ces champs s'échelonnent de 1958 à 2002, ce qui nous convient parfaitement parce qu'ils couvrent notre période lacunaire.

Enfin, à partir de ces hypothèses, l'idée de constituer des séries mensuelles de températures maximales et minimales du tableau 1, était devenue plus claire.

Table 1. Fonctionnement des stations utilisées dans l'étude

Station	Période des séries	Arrêts de fonctionnement
Oran (Es-sénia)	1936-2013	aucun
Mascara (Ghriss)	1958-2013	09/1959 à 06/1983
Sidi bel abbes	1957-2013	04/1964 à 12/1984
Tlemcen Zenata	1958-2013	11/1962 à 09/1980
El kheiter	1942-2013	11/1962 à 02/1978
Mecheria	1958-2013	11/1962 à 10/1979
El bayadh	1948-2013	07/1962 à 09/1971

3. Matériel et méthodes

Exposé de la méthode théorique d'imputation

Les méthodes d'imputation des données manquantes se divisent généralement en trois groupes

- Méthodes d'imputation simple
- Méthodes d'imputation multiple
- Méthodes basées sur le maximum de vraisemblance

Les méthodes basées sur le maximum de vraisemblance (likelihood-based methods) peuvent cependant être aussi bien utilisées en simple qu'en multiple imputation.

Dans ce travail, nous utiliserons une méthode d'imputation simple par Analyse en Composante Principale.

On peut définir l'ACP comme une projection orthogonale des données dans un sous espace linéaire (espace principal) dans lequel la variance des données est maximisée, c'est-à-dire qui préserve le maximum d'informations.

On peut montrer que la projection optimale dans le sous espace de k dimensions ou l'on a choisit k vecteurs propres $\{w_j\}, j = 1, \dots, k$ de la matrice de covariance S correspondent aux k plus grandes valeurs de valeurs propres $(\lambda_1, \dots, \lambda_k)$.

La matrice de covariance est donnée par

$$S = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})(x_n - \bar{x})^T \quad (1)$$

Maintenant, la transformation linéaire de la matrice des données x_n dans le sous-espace principal définit par les k vecteurs propres est simplement :

$$z_n = W^T(s_n - \mu) \quad (2)$$

Où z_n est la matrice des composantes principales, W^T est la transposée de la matrice formée par les k vecteurs propres et μ est le terme biais qui représente la moyenne des données.

Une autre propriété de l'ACP est qu'elle donne une représentation linéaire des données en k dimensions, de telle sorte que l'erreur quadratique des données reconstituées par $\hat{x}_n = Wz_n + \mu$ est minimale.

Enfin, l'analyse en composante principale probabiliste (PPCA) [Vatanen \(2012\)](#) permet de contourner la limitation de l'analyse en composante principale classique en introduisant la notion de distribution de probabilité en ajoutant à l'équation (1) un terme ϵ_n représentant le bruit :

$$x_n = Wz_n + \mu + \epsilon_n \quad (3)$$

C'est cette dernière méthode qui est utilisée dans notre cas.

Toutes les méthodes d'analyse factorielle peuvent s'écrire comme une analyse en composantes principales (ACP) ou une décomposition en valeurs singulières d'un tableau de données particulier. L'ACP est donc au cœur de ces méthodes. L'approche classique pour gérer les données manquantes en ACP consiste à minimiser la fonction de coût (l'erreur de reconstitution) sur tous les éléments présents. Ceci peut être effectué à travers un algorithme d'ACP itérative (aussi appelée expectation maximisation PCA, EM-PCA) décrit dans [Kiers \(1997\)](#). Celui-ci consiste à attribuer une valeur initiale aux données manquantes, effectuer l'analyse (ACP) sur le jeu rendu complet, compléter les données manquantes via la formule de reconstitution pour un nombre d'axes ou composantes fixé, et recommencer ces deux étapes jusqu'à convergence. Les paramètres (axes et composantes) ainsi que les données manquantes sont de cette manière simultanément estimés. Par conséquent cet algorithme peut être vu comme une méthode d'imputation simple. Il souffre cependant d'un problème de sur-ajustement qui peut être contourné grâce à une version régularisée de cet algorithme [Josse and Husson \(2010\)](#), [Ilin and Raiko \(2010\)](#).

Description des données utilisées

Les données utilisées sont en fait une combinaison entre les données de 07 stations professionnelles de la région ouest sur la période 1958-2000 (voir tableau 1) et les points des champs analysés de température sur 100 points de grille de ERA-40 sur la même période, couvrant un domaine s'étalant de -10° à 12.5° de longitude et de 17.5° à 40° de latitude. Ce domaine couvre toute l'Algérie et permet ainsi de couvrir un champ de température et de produire un nombre importants de points de grille (100) qui ont une influence sur la méthode d'imputation. En fait, chaque point de grille est considéré comme une station de mesure. En outre, comme les champs mensuelles sont disponibles que pour la température moyenne, il était impossible pour nous de les utiliser pour rattraper les températures minimales et maximales. Pour cela, nous avons produit des champs mensuels de la température minimale à partir de la moyenne des champs quotidiens du réseau de 06 heures, et les champs mensuels de la

température maximale à partir de la moyenne des champs quotidiens de la température du réseau de 12 heures. On a admis ainsi, que la température minimale s'approchait de la température à 06 heures et que la température maximale s'approchait de la température à 12 heures.

Nous constituons une matrice de données sur la période 1958-2000 qui est le résultat d'une fusion entre les données des 07 stations professionnelles et les points de grilles. Les stations sont positionnées à l'intérieur de la matrice suivant leurs coordonnées géographiques.

Logiciels utilisés

L'ensemble du travail a été effectué sous R version 3.1.0 avec trois « packages » essentiels :

- La « package » reshape [Wickham \(2007\)](#) pour toute la gestion des données et leur mise en forme
- Le « package » ggplot2 [Wickham \(2009\)](#) pour la production des graphiques
- Et enfin, le « package » PCAMethods [Stacklies et al. \(2007\)](#) pour l'imputation des données manquantes

4. Stratégies pour la mise en oeuvre et pour la validation de la méthode

La disposition des données manquantes au sein de la matrice des données et leur pourcentage sont très importants dans le processus d'imputation des données manquantes. Plus leur pourcentage est faible et plus elles sont distribuées aléatoirement, plus le modèle convergera vers des estimateurs précis. Il faut rappeler une chose importante ici, est que ce processus ne donne pas la vraie valeur, mais seulement une estimation de cette valeur.

On distingue trois cas de distribution des valeurs manquantes au sein d'une matrice de données :

- La probabilité qu'une donnée soit manquante ne dépend ni des valeurs observées ni des valeurs manquantes (Missing completely at random (MCAR))
- La probabilité qu'une donnée soit manquante dépend des valeurs observées mais pas des valeurs manquantes (Missing at random (MAR))
- La probabilité qu'une donnée soit manquante dépend des valeurs manquantes (Missing not at random (MNAR))

Pour tester notre méthode sur nos données, nous choisissons une période où la matrice est complète entre 1990-2000. Notre stratégie étant d'enlever aléatoirement ou non un certain pourcentage de données, dans la sous matrice constituée par les 07 stations professionnelles, de cette matrice complète et de les ré-estimer par la méthode :

- En faisant varier le pourcentage des valeurs manquantes de 5% à 50% distribuées complètement aléatoirement (MCAR) (voir figure 1)
- Et enfin, en créant des blocs non aléatoires totalisant 24% de valeurs manquantes (MNAR) (voir figure 1).

On calcule à chaque fois une erreur relative moyenne donnée par l'expression suivante

$$ER = \frac{\sum_1^n (\text{valeur observée} - \text{valeur rattrapée})^2}{\sum_1^n (\text{valeur observée})^2} \quad (4)$$

Table 2. Algorithme d'imputation par ACP

Pour une matrice de données X incomplète, avec les éléments observés X_{obs} et les éléments manquants X_{mis} pour aboutir à une matrice complète X_{imp} , on réalise les étapes suivante.	
Etape 1	Initialiser les éléments manquants X_{mis} par les moyennes des lignes de X_{obs} $X_{mis} \leftarrow \text{moyenne}(X_{obs})$ pour donner matrice complète X_{imp}
Etape 2	Ré-estimer le terme biais en utilisant la matrice imputée X_{imp} par $\mu \leftarrow \text{moyenne}(X_{imp})$
Etape 3	Résoudre le système des k vecteurs propres de W par la méthode choisie, dans notre cas PPCA
Etape 4	Ré-estimation des valeurs manquantes par $X_{mis} \leftarrow WW^T(X_{imp} - \mu) + \mu$
Etape 5	Confirmer la convergence de X_{imp} ou $Z = W^T(X_{imp} - \mu)$. Si la convergence n'est pas atteinte, revenir à l'étape 2

n : étant le nombre de données manquantes

Ce sont les résultats de cette méthode de validation qui vont nous conforter sur le choix de la méthodologie adoptée, pour imputer les valeurs manquantes sur la période 1958-2000.

5. Mise en œuvre et résultats

Les résultats de la validation réalisée sur les températures mensuelles maximales puis minimales sur la période sans lacunes de 1990-2000 synthétisées dans le tableau 3 :

Table 3. Erreurs quadratiques moyennes en fonction des pourcentages des données manquantes pour les températures mensuelles maximales et minimales (1990-2000)

Fraction et Nbre de données manquantes	Erreur relative moyenne des T_{max}	Erreur relative moyenne des T_{min}
5% $\rightarrow n = 46$	0.001912756	0.007389077
10% $\rightarrow n = 92$	0.001464459	0.007404838
15% $\rightarrow n = 138$	0.001342940	0.006791503
20% $\rightarrow n = 184$	0.001352023	0.007041436
25% $\rightarrow n = 231$	0.001403525	0.007102064
30% $\rightarrow n = 277$	0.001577780	0.007274591
50% $\rightarrow n = 462$	0.001870231	0.007914006

Il est évident que les résultats du test de validation effectué en créant artificiellement différents pourcentages de données manquantes d'une façon aléatoire sont excellents. En effet, l'erreur quadratique reste très faible de l'ordre de 0,007 même avec un pourcentage de valeurs manquantes de 50%!

Comme nos données manquantes ne sont pas disposées aléatoirement dans la période 1958-2000 (voir figure 2), il nous a paru prudent d'estimer encore une fois l'erreur quadratique moyenne dans le cas où les données sont retirées en blocs sur la matrice test de 1990-2000 (voir figure 1 en bas à droite), avec un pourcentage de 24%. Encore une fois, les résultats sont excellents puisque l'erreur quadratique moyenne s'est avérée très faible pour les températures maximales (égale à 0.0018) et pour les températures minimales (égale à 0.0061).

Confortés par ces résultats, nous avons appliquée l'imputation des données sur la période 1958-2000 pour combler les lacunes pour les 07 stations professionnelles. Mais cette fois-ci comme nous ne disposons pas des valeurs vraies pour calculer les erreurs quadratiques moyennes, nous nous sommes contentés à repérer le nombre de valeurs « anormales » comprises entre $[\bar{T} - 2\sigma, \bar{T} + 2\sigma]$ et

$[\bar{T} - 3\sigma, \bar{T} + 3\sigma]$, à chaque fois $\bar{T}$ représente la température moyenne maximale ou minimale calculée sur la période 1990-2000 et σ son écart type.

Encore une fois, les résultats (voir tableau 4) sont très satisfaisants à excellents, car aucune valeur n'est vraiment anormale.

Table 4. Nombre de valeurs « anormales » et leur écart maximal par rapport à la normale des données imputées sur la période 1958-2000.

Intervalle	Température max. mensuelle	
	Nbre de valeurs	Ecart max. ($^{\circ}C$)
$> \bar{T} + 2\sigma$	7	0,39
$< \bar{T} - 2\sigma$	19	-1,67
$> \bar{T} + 2\sigma$	0	/
$< \bar{T} - 2\sigma$	0	/

Intervalle	Température min. mensuelle	
	Nbre de valeurs	Ecart max. ($^{\circ}C$)
$> \bar{T} + 2\sigma$	4	0,77
$< \bar{T} - 2\sigma$	3	-0,13
$> \bar{T} + 2\sigma$	0	/
$< \bar{T} - 2\sigma$	0	/

Toutes ces validations nous ont permis de reconstituer les séries des 07 stations sur la période de 1958 à 2013. Les résultats sont illustrés sur les graphiques 3 et 4.

6. Conclusions et perspectives

Les bons résultats obtenus dans cette modeste étude nous permettent d'ouvrir le grand chantier de la constitution des longues séries des principaux paramètres climatologiques dans notre pays. Ce chantier est devenu aujourd'hui possible grâce à la disposition du langage R et ses différents « packages » ainsi que des données des champs ré-analysés.

Dans le choix de la méthode d'imputation, notre choix s'est porté sur PCAmethode, méthode développée par des bio-informaticiens, malgré la disponibilité d'une dizaine d'autres méthodes sous R comme Amelia, MissMDA, mice ... qui sont techniquement plus précises (imputation multiple), mais les erreurs quadratiques moyennes obtenues par la méthode utilisée nous ont surpris par leur faiblesse, qu'on peut considérer globalement comme négligeable.

Le travail n'est pas encore fini, car il reste maintenant la lourde tâche d'homogénéiser ces séries.

Il est très possible d'étendre cette étude à toute l'Algérie.

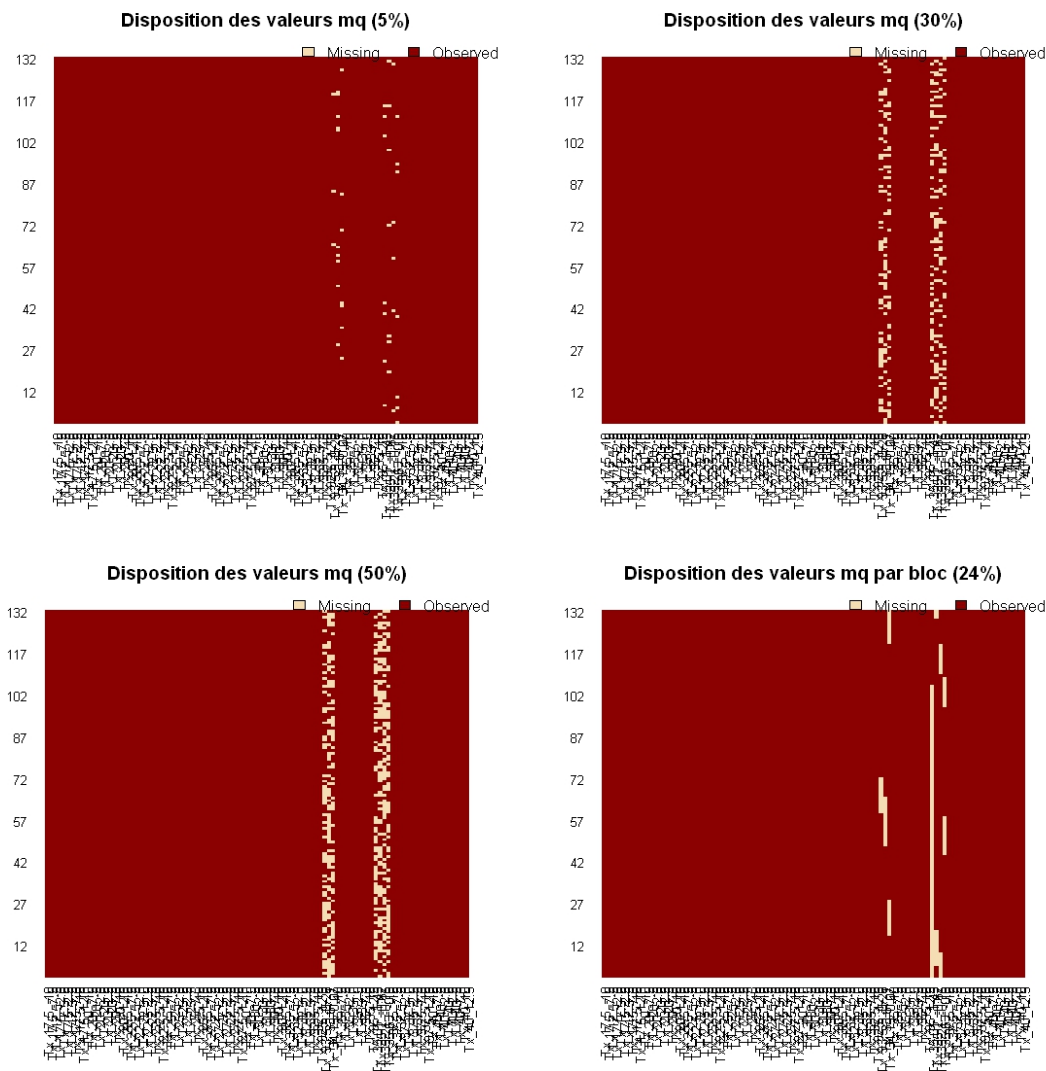


Figure 1. Disposition des valeurs manquantes au sein de la matrice de données test 1990-2000. L'axe X = stations+points de grilles et l'axe Y = chronologie (mois)

Remerciements

Ce travail est dédié à la mémoire de notre maître et collègue monsieur Mohamed SENOUCI, qui nous a transmis sa passion de chercher.

Références

- Ilin, A. and Raiko, T. (2010). Practical approaches to principal component analysis in the presence of missing values. *J. Mach. Learn. Res.*, 11 :1957–2000.
- Josse, J. and Husson, F. (2010). Gestion des données manquantes en Analyse en Composantes Principales. In *Séminaire de laboratoire de mathématiques*, Bordeaux (FR), France.
- Kiers, H. A. L. (1997). Weighted least squares fitting using ordinary least squares algorithms. *Psychometrika*, 62(2) :251–266.
- Stacklies, W., Redestig, H., Scholz, M., Walther, D., and Selbig, J. (2007). pcamethods—a bioconductor package providing pca methods for incomplete data. *Bioinformatics*, 23(9) :1164.
- Team, R. C. (2014). R : A language and environment for statistical computing.
- Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D. C., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., Berg, L. V. D., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, I., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J. (2005). The era-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612) :2961–3012.
- Vatanen, T. (2012). Missing value imputation using subspace methods with applications on survey data. Master's thesis, Aalto university school of science.
- Wickham, H. (2007). Reshaping data with the reshape package. *Journal of Statistical Software*.
- Wickham, H. (2009). *ggplot2 : elegant graphics for data analysis*. Springer.

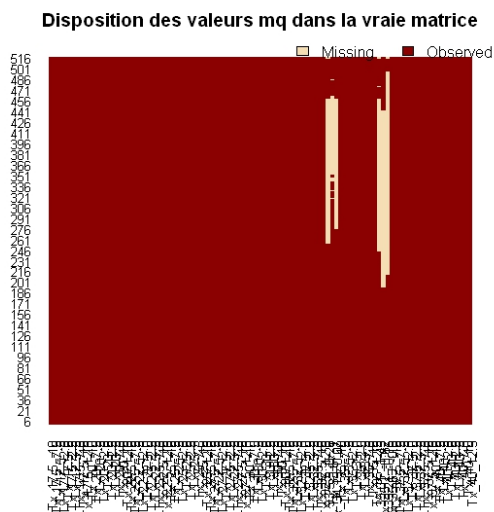


Figure 2. Disposition des valeurs manquantes au sein de la matrice de données 1958-2000. L'axe X = stations+points de grilles et l'axe Y = chronologie (mois)

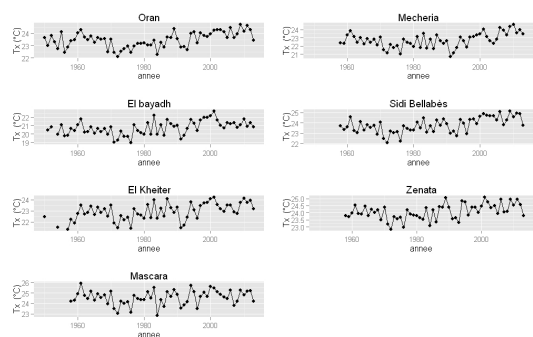


Figure 3. Evolution de la température maximale annuelle sur 07 stations de la région ouest

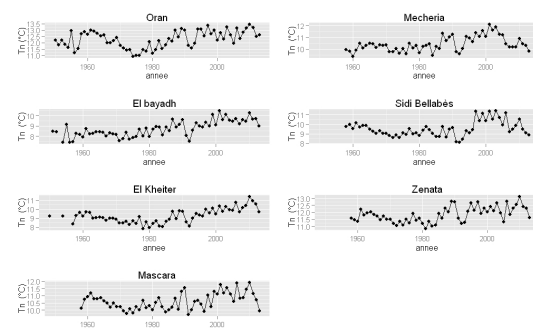


Figure 4. Evolution de la température minimale annuelle sur 07 stations de la région ouest

Estimation débruitée du Spectre Doppler Météorologique par la Méthode des ondelettes

A. Zabot¹, Z. Benchebha¹, M. Lagha^{1*}, M. Tikhemirine¹

Résumé

Dans ce travail, on applique le seuillage de la méthode des ondelettes, pour éliminer automatiquement l'effet des échos fixes du sol et intermittents sur les signaux utiles des radars météorologiques. Cette méthode est appelée aussi méthode de débruitage. Elle est utilisée en traitement du signal pour mieux estimer le spectre Doppler et ses paramètres (vitesses moyennes, variances, ...). On utilise des données réelles provenant d'un radar pulse Doppler météorologique de type (WSR 88-D) NCAR-USA. Les résultats de la méthode multi résolution spectrale des ondelettes seront comparés à ceux de l'algorithme classique pulse-pair et Fourier, ceci dans un souci d'estimer et de prévenir à temps et éviter aux aéronefs les phénomènes dangereux tels que les cisaillements de vents, torrents et/ou d'autres phénomènes sévères.

Mots Clés:

Traitement du signal — Radar météorologique — Débruitage des signaux — Transformée en ondelettes — Estimation du spectre Doppler — Estimation des moments spectraux

¹Laboratoire des Sciences Aéronautiques, Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales, Université SAAD DAHLAB Blida1, BP. 270, Route de Soumaa, Blida, Algérie

*Correspondant: lmohand@yahoo.fr

1. Introduction

Le radar météorologique est un outil de détection, utilisé pour prévenir et éviter les phénomènes météorologiques dangereux. Pour cela il a été développé dans les années soixante-dix [Skolnik \(1990\)](#) [Zrnic' and Lee \(1982\)](#) [Lehmann and Teschke \(2001\)](#). En aéronautique, comme dans d'autres secteurs (agriculture, économie ...), ce dernier système de détection a été développé afin d'éviter les phénomènes hasardeux et sévères, ce qui permettra de connaître à temps la vitesse et d'autres paramètres dynamiques du signal reçu au niveau du radar. Les paramètres principaux sont : la vitesse moyenne, la variance et la largeur spectrale. En aviation civile, les phénomènes comme les vents de cisaillements, les micro-rafales qui sont caractérisés par des changements rapides en intensité de vitesse et/ou en direction, nécessitent un matériel sophistiqué, [Doviak and Zrnic \(1993\)](#) [Keeler and Passarelli \(1990\)](#), capable de mesurer la vitesse et ainsi que d'autres paramètres dynamiques.

La FAA (Federal Aviation Administration), dans les années 80 et précisément en 1988 a recommandé l'utilisation d'un radar de type Doppler pulsé [Skolnik \(1990\)](#) ; [Doviak and Zrnic \(1993\)](#). Ce matériel connu sous l'abréviation de WSR-88D1 (Weather Surveillance Radar 1988 Doppler), [Skolnik \(1990\)](#) [Doviak and Zrnic \(1993\)](#) [Lehmann and Teschke \(2001\)](#). La FAA a recommandé l'utilisation de cet outil, qui a été développé dans la décennie précédente. Elle a recommandé l'année 1993 comme date butoir. Cette date coïncida avec l'utilisation des avertisseurs d'anticollisions de deuxième génération TCAS II, [Doviak and Zrnic \(1993\)](#).

Dans cet article on s'intéresse à des données réelles, qui sont prélevées avec un radar pulse Doppler WSR-88D, détectant une tempête de pluie torrentielle à l'état de Memphis USA-1997 [Keeler and Passarelli \(1990\)](#), [Lagha and Bensebti \(2008\)](#). Ces radars ont une propriété de plus par rapport aux radars hydrologiques classiques. Cette propriété permet de déceler le changement en fréquences,

entre le signal émis et reçu appelée aussi fréquence Doppler ($f = -v \cdot f_t / C$), avec f_t : fréquence du signal transmis et v est la vitesse radiale de la perturbation météorologique détectée, [Lagha and Bensebti \(2008\)](#) [Doviak and Zrnic \(1993\)](#) [Lehmann and Teschke \(2001\)](#).

Le but principal dans ce travail est celui d'estimer les trois premiers moments des échos radar météorologiques, à savoir le moment d'ordre zéro (puissance moyenne du signal reçu), le moment d'ordre 1 (vitesse moyenne) et le moment d'ordre 2 (variance). Ces signaux radar reçus sont supposés être des processus aléatoires stationnaires ayant une distribution Gaussienne [Lagha and Bensebti \(2008\)](#) [Doviak and Zrnic \(1993\)](#). Cette propriété de stationnarité est assumée dans un intervalle de temps court (quasi-stationnarité), [Skolnik \(1990\)](#) [Doviak and Zrnic \(1993\)](#) [Lehmann and Teschke \(2001\)](#). Chaque processus est ainsi complètement décrit par sa fonction d'autocorrélation ou son spectre Doppler. L'estimation des moments spectraux qu'on va faire dans deux domaines différents ; premièrement dans le domaine temporel avec l'algorithme pulse-pair (pp) [Lagha and Bensebti \(2008\)](#) [Keeler and Passarelli \(1990\)](#) [Lehmann and Teschke \(2001\)](#). Puis dans le domaine des fréquences avec l'algorithme FFT et ainsi que la transformée en ondelettes.

La question de la stationnarité des signaux radar météorologiques est à plus d'un titre théoriquement intéressante, car la contribution des échos fixes intermittents est connue pour être non stationnaire (transitoire), même sur un intervalle de temps réduit [Spi \(2003\)](#) [Lehmann and Teschke \(2001\)](#). De ce fait, la transformée de Fourier n'est pas capable de résoudre les fréquences transitoires. L'estimation des moments spectraux Doppler ne sera plus donc réalisable.

Plusieurs méthodes de filtrages et de débruitage des signaux radar sont proposées dans les travaux de [Doviak and Zrnic \(1993\)](#) [Keeler and Passarelli \(1990\)](#) [Zrnic' and Lee \(1982\)](#). Dans ce travail on proposera la méthode des ondelettes. Dans les travaux de [Lehmann and Teschke](#)

(2001), la méthode de résolution multi spectrale de Fourier ou des ondelettes a été utilisée sur des données provenant des profileurs de vents RWP (Radar Wind Profiler). Cette méthode a donné des résultats satisfaisants. De plus les méthodes autorégressive AR et Fourier FFT n'ont pas pu résoudre le problème des échos intermittents, [Skolnik \(1990\)](#) [Lagha and Bensebti \(2008\)](#). D'où l'intérêt de l'utiliser dans le cas des radars pulse Doppler de type WSR-88D.

La section 2 présente la théorie d'estimation des moments spectraux en général et celle des estimateurs pulse-pair (pp). La section 3, présente le développement de la méthode débruitage des signaux radars par la méthode des ondelettes. La section 4 présente les résultats des trois estimateurs utilisés pour l'estimation du spectre Doppler de données réelles. Ces données proviennent d'un radar de type WSR-88D [Keeler and Passarelli \(1990\)](#) [Lagha and Bensebti \(2008\)](#). En fin, dans la section 5 des conclusions seront tirées.

2. Estimation des moments spectraux Doppler

Au niveau du récepteur radar, les échos reçus génèrent deux tensions (voltages), une en phase I et une autre en quadrature de phase Q , notée aussi sous forme complexe $Z(I, Q) = I + jQ$. Ce signal complexe généré au niveau du radar est provoqué par les réflexions individuelles des volumes de réflexions. Ces volumes de réflexions représentent les perturbations météorologiques, [Skolnik \(1990\)](#) [Doviak and Zrnic \(1993\)](#).

Dans ce qui suit on résume l'essentiel du calcul des moments spectraux des signaux radar météorologiques reçus. Ces calculs sont dans le domaine continu. Le spectre Doppler représente la densité spectrale du signal reçu pour un volume de détection bien déterminé. De plus, ne considérant que le signal utile, i.e. en ne tenant pas compte du bruit contaminant, la puissance totale de l'écho météorologique est donné par l'équation (1) du moment spectral d'ordre zéro, [Skolnik \(1990\)](#) [Lagha and Bensebti \(2008\)](#) :

$$P = \int S(\nu) d\nu \quad (1)$$

On s'intéresse dans notre étude aux moments d'ordre 1 et 2. La vitesse moyenne du vent ou bien le moment d'ordre 1 normalisé par la puissance est donné par, [Skolnik \(1990\)](#) [Spi \(2003\)](#) :

$$\bar{\nu} = \frac{1}{P} \int \nu S(\nu) d\nu \quad (2)$$

La largeur du spectre appelée aussi, déviation moyenne du spectre Doppler est donnée par la racine carrée du moment centré d'ordre 2, [Skolnik \(1990\)](#) [Doviak and Zrnic \(1993\)](#) :

$$\sigma_\nu^2 = \frac{1}{P} \int (\nu - \overline{\nu})^2 S(\nu) d\nu \quad (3)$$

Le graphe représentant le spectre Doppler noté $S_z(f)$ est obtenu par $S_z(f) = TF(Z(I, Q))$, avec $TF(.)$ dénote la transformée de Fourier. Ce spectre peut être représenté en fonction des vitesses Doppler, ceci dit en prenant en considération la relation entre les vitesses et les fréquences

Doppler, avec λ est la longueur du signal émis, [Keeler and Passarelli \(1990\)](#) :

$$\nu = \frac{\lambda}{2} f \quad (4)$$

De la même manière, le même graphe peut être représenté en fonction de la largeur spectrale (w), où encore en fonction de l'étendue du spectre σ_f , soit par la relation, [Skolnik \(1990\)](#) [Doviak and Zrnic \(1993\)](#) :

$$w = \frac{\lambda}{2} \sigma_f \quad (5)$$

L'estimation des moments spectraux présentés ci-dessus est dans le cas continu. C'est une estimation générale. Concrètement il faut digitaliser les signaux et faire ainsi des estimations à des rangs bien déterminés, soit un ou deux rangs de développement des signaux radar en séries de Mc-Lauren. Dans la section qui suit on développera l'estimateur temporel se basant l'auto-corrélation des signaux radar.

3. Estimation spectrale par ondelettes

Position du problème

L'estimation du spectre Doppler des signaux radar, doit se faire en considérant la phase de filtrage de ces mêmes signaux. Les radars météorologiques utilisent des filtres elliptiques IIR d'ordre 4, [Spi \(2003\)](#). Cet ordre des filtres a été prouvé comme suffisant pour réduire le niveau des échos non météorologiques présent dans les signaux I et Q .

Le but ici est de faire un débruitage robuste des signaux et d'estimer une fonction $f(.)$ à partir des données reçues (y_n). Pour notre cas d'étude ces mesures consistent dans les signaux I et Q . le modèle des signaux qu'on utilise est donné par :

$$y_n = f(t_n) + e_n \quad (6)$$

Avec en représente un signal bruit de distribution gaussienne, t_n signifie que les échantillons sont équidistants.

Débruitage des signaux par ondelettes

Dans notre cas d'étude, on veut éliminer les parasites, ou autrement dit les signaux provenant des objets fixes, appelés aussi échos fixes. En d'autres termes reconstituer les signaux utiles I et Q . Soit à partir des mesures $Y_1, \dots, Y_n$, on veut estimer la fonction figurant dans le modèle donné ci-dessous :

$$Y_j = f(t_j) + \epsilon_j \quad (7)$$

Typiquement, t_j sont des ordonnées équidistantes, $n = 2^m$ et ϵ_j est un bruit identiquement distribué de moyenne nulle et de variance σ .

L'idée de base est de proposer une méthode d'identification d'une fonction observée avec bruit par une méthode similaire à celle de régularisation par splines de lissage, mais en les adaptant à des fonctions moins lisses.

Ainsi, pour identifier la fonction f à partir des observations et/ou mesures bruitées Y_j , les algorithmes de régularisation par splines de lissages sont basés en la minimisation de la fonction coût, [Aalfs et al. \(1993\)](#) [Keeler and Passarelli \(1990\)](#) soit :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(t_i))^2 + \lambda \int (f^{(m)}(x))^2 dx \quad (8)$$

λ est un paramètre de lissage et f est une fonction qui appartient à l'espace de Sobolev w_p^m .

En procédant par l'utilisation des ondelettes, on aura l'avantage d'appréhender des fonctions moins lisses et spatialement hétérogènes, pour $f \in L_2([0, 1])$ et $J_0 \in \mathbb{N}$, on a :

$$f = \sum_{k=0}^{2j_0-1} \alpha_{j_0} \phi_{j_0,k} + \sum_{j \geq j_0} \sum_{k=0}^{2j-1} \beta_{j,k} \psi_{j,k} \quad (9)$$

Les méthodes usuelles de débruitage par décompositions en ondelettes reposent sur le fait que pour plusieurs type de signaux leur représentation dans le domaine des coefficients d'ondelettes est creuse. Ce qui signifie qu'on n'a besoin d'estimer que quelques grands coefficients pour bien estimer la fonction.

Le schéma usuel du débruitage par ondelettes est le suivant :

- Développement du signal observé en série d'ondelettes.
- Extraction des coefficients "significatifs" par méthodes de seuillage ou de rétrécissement.
- Reconstruction de la fonction par synthèse des coefficients débruités.

Le seuillage ou le rétrécissement permet un bon compromis entre erreur d'approximation et variabilité du résultat, l'erreur globale étant mesurée par une moyenne de la norme L_P , $P \geq 1$ de l'erreur d'identification. Malgré leur efficacité asymptotique les estimations non linéaires fondées sur les décompositions en ondelettes, les résultats par ce type de méthodes sont souvent moins bons dans le cas d'un nombre modéré d'observations (le seuillage est trop "brutal").

Ceci est principalement dû au fait que l'on ne tient pas compte des informations éventuelles disponibles sur le type de fonctions à débruiter. L'ensemble des méthodes non linéaires existantes sont du type :

$$\frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (z_i - \theta_i)^2 + \sum_{i \geq i_0} P(|\theta_i|) \quad (10)$$

z_i est i^e ligne de $z = WY_n$, P est une fonction pénalité. L'idée du seuillage peut être résumée, par les étapes suivantes :

- Transformer les données bruitées via la transformée DWT : $\hat{\theta} = W.Y$.
- Pour séparer le signal du bruit, et faire le seuillage des coefficients : poser $\hat{\theta}_{j,k} = \hat{\theta}_{j,k}$ est grand, 0 sinon.
- Estimer le signal par : $\hat{f} = W^{-1}.\hat{\theta}$

4. Résultats et discussions

Les données utilisées

Les données utilisées proviennent du radar de l'état de Memphis Tennessee – USA, de type WSR-88D (Weather Surveillance-1988 Doppler), en date du 13/07/1997. Ces données incluent les paramètres suivants : les échantillons I et Q , l'azimut du balayage radar, l'élévation, le temps

entre impulsions PRT et le temps UNIX de calcul des machines.

Ces données représentent une perturbation météorologique de pluie torrentielle, détectée près de l'aérodrome de l'état de Memphis.

Commentaires des calculs et résultats

On a représenté les échantillons des signaux complexes $Z(I, Q)$ (appelées parfois aussi séries complexes), respectivement, la voie en phase I dans la figure (1), et la voie en quadrature de phase Q dans la figure (2). Sur ces mêmes figures on a représenté également les signaux débruités par la méthode des ondelettes. Ce débruitage a été effectué par un seuillage minimax dur de niveau 5. On a reporté sur la figure (3) les spectres Doppler des signaux reçus filtrés par les filtres IIR et ondelettes, pour les cellules de distance $n^\circ 1$ et $n^\circ 8$. Les trois méthodes (pulse-pair, FFT, et ondelettes), utilisées pour l'estimation des paramètres du spectre Doppler de la perturbation du vent donnent les résultats représentés sur les figures Fig. 4 et Fig. 5.

La méthode basée dans le temps (pp), est très simple à programmer, car c'est une méthode qui considère seulement les autocorrélations des signaux météorologiques radar pulse-pair $Z(iT_S)$. Il a un temps de calcul très bas comparativement aux méthodes spectrales (FFT, AR, ARMA), [Lagha and Bensebti \(2008\)](#).

Les estimations de la vitesse moyenne du vent faites par cet algorithme sont très proches de celles fournies par les écrans PPI [Keeler and Passarelli \(1990\)](#). L'estimation de la variance et de la largeur spectrale w , faites par la méthode pulse-pair sont faibles par rapport à ceux de la méthode de Fourier FFT et du seuillage de la méthode des ondelettes. Cette méthode possède un inconvénient lié à difficulté d'interprétation des résultats, car elle emploie des auto-corrélations, contrairement aux méthodes travaillant dans le domaine des fréquences (AR, ARMA, FFT) et tout dernièrement la méthode RFT.

Les résultats obtenus par la méthode des ondelettes sont très nettement meilleurs que ceux de l'estimateur classique FFT. Notant que après manipulation de plusieurs types d'ondelettes (seuillages). On a choisi le débruitage des signaux I et Q par l'ondelette minimax avec multi niveaux d'estimation de la déviation standard du bruit. Afin de montrer l'efficacité du débruitage par seuillage minimax de la méthode des ondelettes, en comparaison avec les filtres classiques IIR. On a reporté sur la Fig. 3.a et Fig. 3.b, les spectres Doppler des signaux radar I et Q , filtrés respectivement par un filtre IIR et de seuillage minimax des ondelettes de niveau 5, pour les cellules de distances $n^\circ 1$ et $n^\circ 8$.

5. Conclusion

Ce papier présente l'utilisation d'un algorithme d'analyse multi résolution et non linéaire de la théorie d'estimation dans le but de réduire et de séparer le spectre Doppler d'un signal radar TDWR en présence de signaux de bruit contaminants (bruits internes et externes). Ce travail traite la comparaison des performances de l'algorithme des ondelettes avec celui des algorithmes pulse-pair et FFT, ceci dans le but de séparer au mieux le signal écho radar météorologique des échos contaminants (échos fixes).

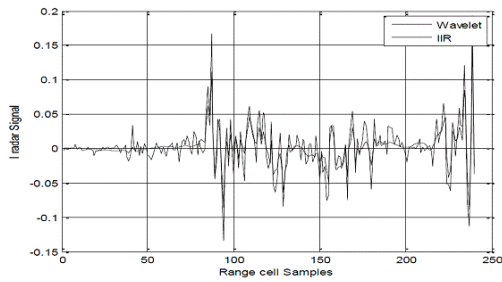


Figure 1. Signaux radar I filtrés. (a) Signaux débruités par un filtre classique IIR, (b) signaux débruités par ondelettes (lev=5), pour la cellule de distance n 1

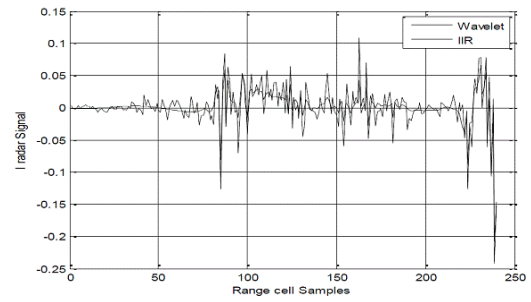


Figure 2. Signaux radar Q filtrés. (a) Signaux débruités par un filtre classique IIR, (b) signaux débruités par ondelettes (lev=5), pour la cellule de distance n 1.

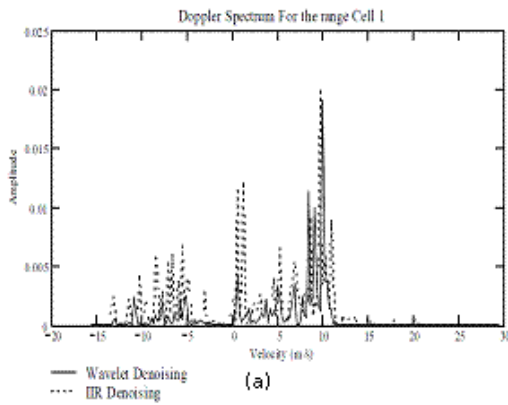


Figure 3. Spectre Doppler des signaux radar I&Q (a) cellule de distance n ° 1 (b) cellule de distance n ° 8

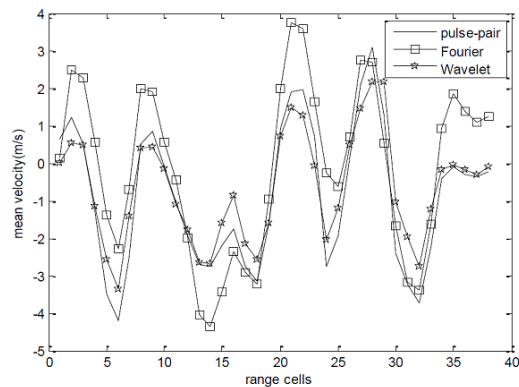


Figure 4. Vitesse moyenne estimée à partir des spectres des signaux radar reçus. Comparaison des trois algorithmes pulse-pair, FFT et ondelettes (lev=5)

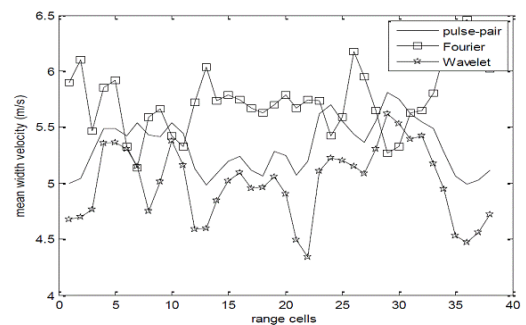


Figure 5. Largeur spectrale de vitesse moyenne estimée à partir des spectres des signaux radar reçus. Comparaison des trois algorithmes pulse-pair, FFT et ondelettes (lev=5)

En utilisant des données simulées et des données réelles (WSR-88D Memphis 1997) d'un radar pulse Doppler météorologique. Nous avons pu démontrer que le seuillage de la méthode des ondelettes est adéquat, pour éliminer et réduire l'effet du bruit et des échos fixes sur les signaux radar $I&Q$ d'intérêt. L'algorithme de seuillage doux minimax est tout fait efficace car il prend en considération la réduction de l'erreur minimum quadratique lors de la reconstruction et de la reconstitution du signal I et Q d'origine, par le biais des coefficients de la transformée en ondelettes. Toutefois il faut prendre en considération l'effet du seuillage adéquat pour chaque cas de figure ($\text{lev}=5$), car un seuillage excessif conduit à un filtrage excessif, donc par voie de conséquence à la détérioration du signal utile I et Q . Ceci induira une perte d'information nécessaire à l'estimation du spectre Doppler.

Une implémentation sous circuit électronique est recommandée, pour tester l'efficacité de cette méthode sur des données quantitativement importantes. Ce dernier test doit être fait en comparaison avec celui de pulse pair classique en temps réel.

Références

- (2003). *Proceedings of SPIE*.
- Aalfs, D., Baxa, E., and Bracalente, E. (1993). Signal processing aspects of windshear detection. *Microwave Journal*.
- Doviak, R. and Zrnic, D. (1993). *Doppler radar and weather observations*.
- Keeler, R. J. and Passarelli, R. E. (1990). *Signal Processing for Atmospheric Radars*, pages 199–229. American Meteorological Society, Boston, MA.
- Lagha, M. and Bensebti, M. (2008). Performances comparison of pulse-pair and 2-step prediction algorithms for the doppler spectrum, multidimensional systems and signal processin. *Multidimensional Systems and Signal Processing*.
- Lehmann, V. and Teschke, G. (2001). Wavelet based methods for improved wind profiler signal processing. *Annales Geophysicae*, 19(8) :825–836.
- Skolnik, M. I. (1990). *Radar Handbook*.
- Zrnic', D. S. and Lee, J. T. (1982). Pulsed doppler radar detects weather hazards to aviation. *Journal of Aircraft*, 19(2) :183–190.

