

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

INSTITUT DE L'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALES

DEPARTEMENT NAVIGATION AERIENNE

Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en opérations aériennes

Option : Opération aérienne

THEME

***Etude de la tendance du modèle AROME utilisés à l'ONM à prévoir le
cisaillement du vent de basse couche***

Présenté par :

BOUCHEFFA AMEL

Promoteur : Monsieur T.REZOUG

Encadreur : Monsieur M.MOKHTARI

2014/2015

Remerciements

Je tiens à remercier très vivement mon promoteur Monsieur REZOUG pour son soutien et la grande confiance qu'il m'a accordée pour mener à bien mon travail. Je remercie également très chaleureusement mon encadreur Monsieur MOUKHTARI, pour sa disponibilité, son aide ainsi que pour ces conseils et ces encouragements.

J'adresse un remerciement particulier à Monsieur IHADDADEN, le directeur général de l'office national de météorologie et à Monsieur HAMADACHE, le directeur du centre national de la prévision météorologique, pour avoir accepté ma demande de stage ainsi que pour leur chaleureux accueil.

J'adresse un grand merci à tous les membres de l'équipe de la PNT que j'ai eu le plaisir de côtoyer pendant la durée de mon stage à l'office national de la météorologie.

Je tiens à remercier les membres du jury qui me font l'honneur d'assister à ma soutenance.

Un grand merci à mes chères amies , Kenza , Kahina , Soumia , Feroudja pour leurs aimable compagnie ,leur sympathie et pour les échanges toujours intéressants que nous avons pu avoir.

Je souhaite remercier mes parents pour leur soutien sans faille durant ces longues années d'études.

Merci à mes grands parents, à yemma, à papa elhadj ainsi qu'à tous mes oncles et tantes qui ont toujours su me soutenir et encourager dans les moments difficiles.

Je désire enfin remercier mes chères sœurs Lydia, Asma et Khadîdja ainsi que mon fiancé « Sid Ahmed » pour m'avoir encouragé et soutenu pendant toutes ces années.

Etude de la tendance des modèles ALADIN et AROME utilisés à l'ONM à prévoir le cisaillement du vent de basses couches

BOUCHEFFA Amel

Résumé

Les vents du cisaillement sont très dangereux pour l'aviation lorsque l'aéronef est proche du sol à faible vitesse, c'est-à-dire, à l'atterrissage ou au décollage. Cela peut entraîner une perte soudaine de portance, autrement dit provoquer un décrochage de l'avion et le faire s'écraser au sol, si le pilote n'a pas eu le temps de réagir ou si ses manœuvres ont été vaines.

Dans ce mémoire, des différents type de cisaillement du vent ont été calculé, sur l'aérodrome d'Alger, à partir du modèle à haute résolution AROME utilisé en opérationnel à l'Office National de la Météorologie.

Ce nouveau produit, offre une information supplémentaire, pour le prévisionniste, concernant la variation de la force et de la direction du vent sur l'Aérodrome d'Alger. Ceci permettra à terme d'affiner la qualité de la prévision pour cet aérodrome (TAF).

Abstract

Wind shears are very dangerous for aviation when the aircraft is near the ground at weak velocity, during take of or landing stages. That can involve a sudden loss of Lift force, in another words provoke a crash landing, if the pilot did not had enough time to react or his manoeuvres were vain.

In this study, the different types of wind shear were calculated on the airport of Algiers; with the high resolution operational model "AROME" used in the national office of meteorology. This new product gives additional information, for forecasters, about the variation of forces and wind velocities around the airport of Algiers so, it will enable to improve the previsions for this airport (TAF).

ملخص

إن اضطرابات الرياح هي ظاهرة خطيرة في مجال طيران عندما تكون طائرة قريبة من سطح الأرض بسرعة منخفضة أثناء الإقلاع أو هبوط لان ذلك قد يؤدي إلى فقدان مفاجئ قوة الرفع ثم إلى سقوط اصابة اذا كان رد فعل طيار بطيء.

في هذه مذكرة, تم حساب الأنواع الأربعة لاضطرابات الرياح , في نواحي مطار الجزائر, وذلك عبر نموذج جوي عالي دقة AROME مستعمل في ديوان وطني لأرصاد جوية.

هذه عملية تمد نتائج إضافية لمتنبأ فيما يخص الاضطرابات في سرعة و توجه الرياح في مطار الجزائر مما يسمح بتحسين نوعية تنبؤات هذا مطار (TAF) .

Table des matières

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Table des matières.....	IV
Liste des figures	VII
Liste des tableaux.....	XII
Listes des abréviations et acronymes.....	XIII
<i>Introduction générale</i>	1
<i>CHAPITRE I :Le cisaillement de vent de basse couche</i>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition de l’atmosphère.....	4
I.3 Le phénomène de vent	4
I.3.1 La notion du vent synoptique (le vent de gradient)	4
I.3.2 L’équation du mouvement	5
I.3.3 La notion du vent géostrophique.....	6
I.3.4 La notion du vent thermique	6
I.4 Le profil du vent dans les bases couches atmosphérique.....	7
I.4.1 La stabilité atmosphérique au cours d’une journée	8
I.4.2 Le profil du vent dans la couche limite de surface	9
I.4.3 Le profil du vent dans la couche EKMAN.....	12
I.5 Les cisaillements du vent dans la couche limite atmosphérique	12
I.5.1 Définition du cisaillement de vent	12
I.5.2 Intensité du cisaillement du vent	16
I.5.3 Les origines du cisaillement du vent	16

I.5.4	La reconnaissance du cisaillement de vent.....	24
-------	--	----

CHAPITRE II : Le cisaillement de vent et l'aéronautique.

II.1	Introduction.....	25
II.2	Le vent et l'aérodynamique	25
II.2.1	Influence du cisaillement de vent sur l'angle d'attaque de l'avion.....	28
II.2.2	Influence du cisaillement de vent sur la vitesse propre de l'avion	28
II.3	Conséquences du cisaillement de vent sur un avion au décollage.....	29
II.3.1	Les conséquences d'un cisaillement horizontal	29
II.3.2	Les conséquences d'un cisaillement vertical	30
II.4	Conséquences du cisaillement de vent sur un avion à l'atterrissage.....	30
II.4.1	Les conséquences d'un cisaillement horizontal	30
II.4.2	Les conséquences d'un cisaillement vertical	33
II.5	Les systèmes d'alertes (observations)	33
II.5.1	Le système de détection à bord	33
II.5.2	Les systèmes de détection au sol.....	34

CHAPITRE III : Prévion du cisaillement de vent sur l'aéroport d'Alger

III.1	Introduction	35
III.2	Le cisaillement du vent et l'aéroport d'Alger	35
III.2.1	Présentation de l'aéroport de Houari Boumediene d'Alger.....	35
III.2.2	Localisation géographique de l'aéroport	36
III.2.3	Le régime des vents à l'aéroport d'Alger	36
III.2.4	Les cause du cisaillement de vent aux alentours de l'aéroport d'Alger	36
III.2.5	La détection du cisaillement du vent sur l'aérodrome d'Alger	38

III.3	Aperçu sur la prévision numérique du temps	39
III.3.1	Le principe de la prévision numérique du temps	39
III.3.2	Propriétés des modèles numériques de prévision de temps	41
III.3.3	Les modèles de prévision numérique utilisés à L'ONM	42
III.4	Simulations des situations de cisaillement de vent sur l'aéroport d'Alger.....	42
III.4.1	Le choix de la situation atmosphérique	42
III.4.2	Le choix du modèle de simulation	43
III.4.3	Le choix du domaine spatial de simulation	43
III.4.4	L'extraction des données	47
III.4.5	Comparaison entre les observations et les prévisions en surface à (25 m)	48
III.5	Les résultats de simulation	49
III.5.1	Les vents en altitude	49
III.5.2	Les vents en surface à 10 m	51
III.5.3	Les cisaillements horizontaux prévus pour la journée de 10/02/2014.....	51
III.5.4	Les cisaillements verticaux prévus pour la journée du 10/02/2014	59
III.6	Synthèse... ..	62
 <i>CHAPITRE IV : Etude de la situation météorologique du 11/02/2014.</i>		
IV.1	Introduction	63
IV.2	Analyse synoptique de la situation du 11/02/2014	63
IV.3	Le déroulement du crash	67
IV.4	Synthèse.....	69
Conclusions et perspectives.....		70
Liste des références bibliographiques		73

Annexes

Liste des figures

CHAPITRE I : Le cisaillement de vent de basse couche

<i>Figure I.1 :</i> Sens de circulation des vents en fonction de la pression dans l'hémisphère Nord.....	5
<i>Figure I.2 :</i> variation vertical du profil du vent géostrophique.....	7
<i>Figure I.3 :</i> Profil du vent dans la couche limite de surface.....	9
<i>Figure I.3 :</i> Variation verticale des vents horizontaux en absence de turbulence dynamique et thermique.....	10
<i>Figure I.4 :</i> Turbulences thermiques et dynamiques dans la couche limite atmosphérique.....	11
<i>Figure I.5 :</i> Schémas représentatifs de la variation des vents sur une surface.....	13
<i>Figure I.6 :</i> Schémas représentatifs de la variation des vents à des altitudes différentes.....	14
<i>Figure I.7 :</i> Cisaillement horizontal ou vertical du vent horizontal.....	15
<i>Figure I.8 :</i> Cisaillement horizontal ou vertical du vent vertical.....	15
<i>Figure I.9:</i> Effet d'un relief à pente faible (moins de 40°) sur l'écoulement du vent.....	17
<i>Figure I.10 :</i> Effet d'un relief à forte pente (plus de 40°) sur l'écoulement du vent dans le côté face au vent.....	18
<i>Figure I.11:</i> Les turbulences du côté sous le vent du relief.....	18
<i>Figure I.12:</i> Schémas caractérisant le phénomène de foehn et le type de nuages qu'il induit.....	19
<i>Figure I.13 :</i> Brises descendante de montagne.....	20
<i>Figure I.14:</i> Le phénomène de brise de mer.....	21

Figure I.15 : Schématisation des trois phases de formation d'un cumulonimbus.....	23
Figure I.16 : Schéma représentatives des rafales descendantes, des microrafales, des macrorafales et des fronts rafales.....	23

CHAPITRE II : Le cisaillement de vent et l'aéronautique

Figure II.1 : Les forces agissantes sur un avion en montée	25
Figure II.2 : Les forces agissantes sur un avion en phase d'approche.....	26
Figure II.3 : Schémas représentatif de l'influence du vent sur la vitesse propre d'un avion.....	27
Figure II.4 : Variation de la vitesse sol en fonction de gradient de vent.....	29
Figure II.5 : Rencontre d'un cisaillement de vent modéré au niveau de l'outer marker.....	31
Figure II.6 : Rencontre d'un cisaillement de vent modéré au niveau des 500 pieds.....	31
Figure II.7 : Rencontre d'un fort cisaillement de vent après l'outer marker.....	32
Figure II.8 : La rencontre d'une cellule convectif en phase finale.....	33

CHAPITRE III : Prévion du cisaillement de vent sur l'aéroport d'Alger

Figure III.1 : L'emplacement géographique de l'aéroport d'Alger	36
Figure III.2 : Le phénomène de brise qui se produit sur les cotes d'Alger	37
Figure III.3 : Schémas représentatifs du décrochage du flux maritime et de la perturbation des ondes orographique venant du sud	38
Figure III.4 : Emplacement des trois anémomètres disponible sur l'aérodrome et la station météorologique du Dar El- Beida.....	39
Figure III.5 : Le principe de la prévion numérique du temps	39
Figure III.6 : Le découpage en boite de l'atmosphère terrestre.....	41

Figure III.7: Surface à coordonnées hybride (le principe utilisé par les modèles numérique de prévision du temps).....	41
Figure III.8 : Les pics de vent journaliers observés par la station du Dar El-Beida durant le mois de Février 2014.....	43
Figure III.9 : Le domaine AROME choisi pour l'étude.....	44
Figure III.10: La sélection des points de grille à travers lesquels on calculera le cisaillement de vent ; le long des trajectoires d'approche des deux pistes d'Alger.....	45
Figure III.11 : Observations des vents moyens et des rafales de vent de la station du Dar El Beida à 25 m d'altitude pour la journée du 11/02/2014.....	48
Figure III.12 : Prévisions AROME du vent moyen et des rafales de vent sur le secteur du Dar El Beida à 25 m d'altitude pour la situation d 11/02/2014.....	49
Figure III.13: Cartes de prévision d'intensité et de direction de vent en altitude avec le modèle AROME.....	50
Figure III.14 : Carte de prévision des vents moyens en surface et des rafales de vent en surface	51
Figure III.15 : Coupe verticale de la zone A.....	52
Figure III.16 : Résultats de prévision des vents moyens max et des cisaillements des vents horizontaux sur le niveau 200 m.....	52
Figure III.17 : Les directions des cisaillements prévus sur le niveau 200 m.....	53
Figure III.18: Résultats de prévision des cisaillements des vents verticaux sur le niveau 200 m.....	54
Figure III.19 : Les cisaillements calculés sur la zone B.....	54

Figure III.20 : Résultats de prévision des vents moyens max et des cisaillements des vents horizontaux en surface.....	56
Figure III.21: Les directions des cisaillements prévus en surface.....	56
Figure III.22 : Coupe verticale de la zone C.....	57
Figure III.23 : Résultats de prévision des vents moyens max et des cisaillements des vents horizontaux sur le niveau 800 m.....	57
Figure III.24 : Les directions des cisaillements prévus sur le niveau 800 m.....	58
Figure III.25: Résultats de prévision des cisaillements des vents verticaux sur le niveau 1000 m.....	59
Figure III.26 : Les résultats de prévision des vents moyens et des cisaillements verticaux des vents horizontaux sur le niveau 200 m.....	60
Figure III.27: Les résultats de prévision des vents moyens et des cisaillements verticaux des vents horizontaux en surface.....	60
Figure III.28 : Les cartes de prévision des cisaillements verticaux des vents verticaux	61

CHAPITRE IV : Etude de la situation météorologique du 11/02/2014

Figure IV.1 : Géopotential en mgp (traits noir), températures en °c (traits rouges) et humidité en % (en shaded) à 500 hPa pour la journée du 11/02/2014 à 9:00 UTC et 12:00 UTC.....	63
Figure IV.2 : Cartes des vents moyens prévus à 800 m d'altitude par le modèle AROME pour la journée du 11/02/2014 à 9:00 UTC et 12:00 UTC.....	64

Figure IV.3 : Cartes de cisaillement vertical du vent horizontal et de cisaillement vertical du vent vertical prévues avec le modèle AROME pour la situation du 11/02/2014 à 9 :00 UTC et 12 :00 UTC.....65

Figure IV.4 : Cartes de cisaillement vertical de vent horizontal prévues avec le modèle AROME sur les niveaux 600 m et 400 m à 06 :00 UTC et 07 :00 UTC respectivement.....66

Figure IV.5 : Carte de rafale de vent et de cisaillement vertical du vent horizontal prévues en surface à 12 :00 UTC.....67

Figure VI.6 : Coupe verticale sur la longitude 6° des vents moyens prévus avec le modèle AROME à 12:00 UTC de 2 m jusqu'à 1200 m.....68

Figure IV.7 : Coupe verticale de la procédure d'approche aux instruments DVOR/DME de la piste 34 de l'aérodrome de Constantine.68

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1</i> : Forces du cisaillement du vent selon l'OACI.....	16
<i>Tableau I.2</i> : Caractéristiques principales nécessaires à l'apparition de chaque type de cisaillement ainsi que l'ordre de grandeur de leur durée de vie.....	24
<i>Tableau III.1</i> : Caractéristiques de l'aéroport Houari Boumediene d'Alger.....	35
<i>Tableau IV.1</i> : caractéristiques opérationnelles de l'avion militaire Hercules C130.....	69

Liste des abréviations et acronymes

ALADIN	Aire Limite, Adaptation dynamique, Développement International
AROME	Application of Research at Operations to MEscale
ARPEGE	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
DVOR/DME	Doppler VHF Omni Range / Distance Measuring Equipment
FAA	Federal Aviation Administration
GrADS	Grid Analysis and Display System
IAC	Cartes d'approche aux instruments
Méso-NH	Mesoscale Non-Hydrostatic atmospheric model
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OACI	Organisation Internationale de l'Aviation Civile
ONM	Office National de Météorologie

Introduction générale

La météorologie est un élément fondamental de la régulation du trafic aérien sur les zones aéroportuaires. En effet, plusieurs retards sont dus à des phénomènes météorologiques (en vol ou à l'aéroport). De plus, l'augmentation incessante du trafic aérien pose de nombreux problèmes, surtout au niveau de la sécurité (déroutements et d'accidents). Donc, prévoir les phénomènes météorologiques dangereux est considéré comme un enjeu pour la sécurité aéroportuaire.

En aéronautique le vent peut être aussi avantageux qu'inconvenant, particulièrement dans le domaine des opérations aériennes et d'exécutions des vols. Il faut reconnaître que les décollages et les atterrissages sont les phases les plus critiques du parcours en raison de l'atténuation considérable de la vitesse de l'appareil dans ces phases ; car un simple coup de vent peut engendrer des gains ou des pertes brusques de la vitesse, de la portance et ensuite une perte totale du contrôle de l'appareil ce qui conduit à des conséquences catastrophiques. Concernant le phénomène du vent, le risque se présente au moment où une inversion brutale de direction et /ou de vitesse de vent surgit ; c'est-à-dire le moment où le cisaillement du vent se produit.

Nous avons choisi l'aéroport international d'Alger car il est régulièrement soumis à des variations rapides de la direction et de l'intensité du vent selon l'horizontale, du fait de son emplacement géographique qui favorise l'apparition de ce phénomène. Quoiqu'il puisse entraîner de graves conséquences, mais il n'existe aucun moyen d'observation du cisaillement sur cet aéroport.

Le but principal de ce mémoire se rapporte à l'exploitation des moyens utilisés à l'Office National de la Météorologie afin de mettre en œuvre un nouveau produit de prévision des cisaillements de vent de tout type sur un secteur prédéterminé qui recouvre l'aéroport d'Alger ainsi que deux trajectoires d'approches. Nous disposons alors, de deux modèles de prévision du temps AROME et ALADIN, chacun détient ces propres capacités à prévoir les phénomènes météorologiques à partir des conditions initiales domptés par des systèmes d'assimilation de données.

A travers ce mémoire, nous essaierons d'évoquer cette problématique suivant les étapes suivantes :

- Quelles observations sont nécessaires pour détecter les cisaillements de vent dans la couche limite ?
- Comment prendre en compte ces observations pour prévoir tout les types de cisaillement ?
- Quelle est la capacité des deux modèles numériques disponible à simuler des épisodes de cisaillements de vent ?
- Comment peut-on améliorer la prévision des cisaillements de vent sur l'aérodrome d'Alger ?

Ce travail va tenter d'apporter des éléments de réponse à ces questions à travers les quatre chapitres qu'il comporte.

Le premier chapitre décrit le phénomène de cisaillement de vent dans les basses couches atmosphériques, ces différents types, ainsi que tous les phénomènes météorologiques locaux qui participent à son apparition.

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'étude des cisaillements de vent pour l'aéronautique et leur effet sur la vitesse et l'incidence des avions durant les différentes phases de décollage, d'atterrissage et d'approche.

Dans **le troisième chapitre**, nous présenterons la géographie de la zone d'étude : l'aérodrome d'Alger. Nous présumons les origines de provenance des cisaillements dans le secteur étudié puis nous essaierons d'établir une conclusion sur le type de cisaillement dominant, la suite de ce chapitre comporte une brève description du principe de prévision numérique du temps ainsi que les modèles utilisés à l'ONM. Nous allons alors ; justifier le choix du modèle avec lequel on effectuera les simulations après le lancement du programme qui consiste à calculer les différents types de cisaillement dans le domaine choisi. Ensuite, on passera à l'application qui se résume à la simulation de la situation météorologique du 10 février 2014 qui a été sélectionnée d'après l'analyse des observations annuelles des vents en surface sur l'aérodrome d'Alger. Nous allons présenter les résultats d'une manière illustrative aux hypothèses supposées au début de ce chapitre.

Le quatrième chapitre présente une étude météorologique détaillée de la situation du 11 février 2014 dans le secteur de Oum El-Bouaghi, à travers une analyse synoptique de la situation nous allons définir les cas probables de cisaillements qui auraient pu se développer

dans de telles conditions, puis nous appliquerons notre produit de calcul de cisaillement pour ces cas afin de pouvoir en tirer des conclusions sur le déroulement du crash.

Enfin, nous concluons les principaux résultats.

CHAPITRE I

Le cisaillement de vent de basse couche

CHAPITRE III

Prévision du cisaillement de vent sur l'aéroport d'Alger

CHAPITRE II

Le cisaillement du vent et l'aéronautique

CHAPITRE IV

Etude de la situation météorologique du 11/02/2014.

ANNEXE I
Les cartes IAC

ANNEXE II

L'utilisation du logiciel Origin 2015

1.1 Introduction

Ce chapitre présente le contexte physique dans lequel s'effectue cette étude. Il comporte les notions de la physique fondamentales qui régissent l'atmosphère ainsi que tout autre objet en mouvement au sein de ce dernier, la formation et les différentes origines du cisaillement de vent.

1.2 Définition de l'atmosphère

L'atmosphère constitue une énorme couche gazeuse qui enveloppe le globe terrestre, composé d'une importante quantité de vapeur d'eau et d'un ensemble de variété de gaz dont l'azote et l'oxygène sont les plus abondant ainsi que d'autre particule microscopique qui se tient en suspension dans l'air. La structure verticale de l'atmosphère est constituée de plusieurs couches superposées ; chaque couche se caractérise par une température maximale, la densité de l'air et la pression [01, 02].

1.3 Le phénomène du vent

Les mouvements de l'atmosphère sont très complexes car plusieurs contraintes participent à leurs déroulements. Ces mouvements sont généralement exprimés sous le nom de vents.

1.3.1 La notion du vent synoptique (le vent de gradient)

Le vent synoptique se déduit directement des conditions de pression en faisant abstraction des variations locales qui résultent de la rugosité du sol. Le vent idéal synoptique se mesure de préférence le matin très tôt car, à cet instant, il n'est pas encore perturbé par le soleil.

Le vent de gradient est égal au vent géostrophique auquel on ajoute la correction de la courbure.

Dans l'hémisphère Nord, le vent tourne autour des anticyclones dans le sens des aiguilles d'une montre. Les isobares sont desserrées, le gradient est généralement faible. La masse d'air s'affaïsse.

Dans l'hémisphère Sud, le vent tourne autour des dépressions en sens inverse des aiguilles d'une montre. Les isobares se resserrent, le gradient augmente généralement. La masse d'air s'exhausse.

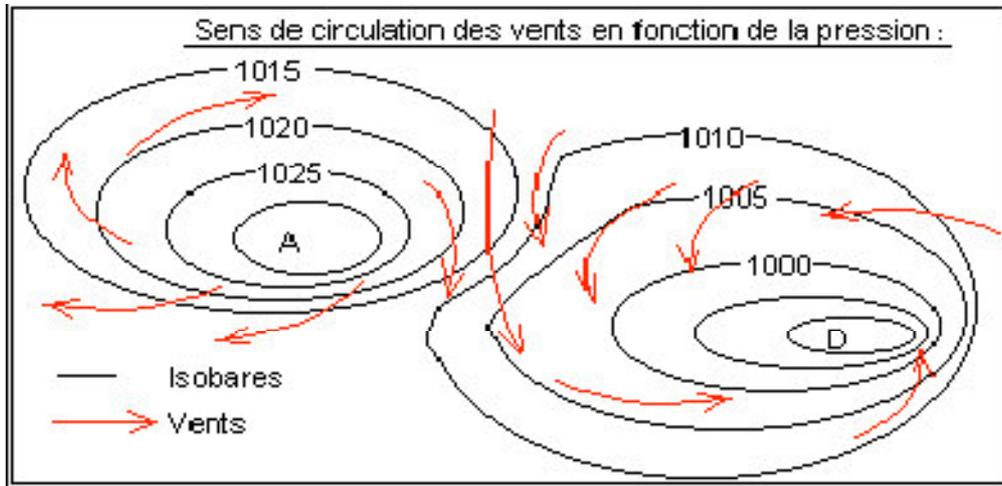


Figure I.1 : Sens de circulation des vents en fonction de la pression dans l'hémisphère Nord [03].

Les flèches représentent la direction du vent. Le centre des zones de haute pression est appelé « anticyclone (A) », le centre des zones de basse pression « dépression (D) ».

I.3.2 L'équation du mouvement

La loi de la dynamique atmosphérique qui est exprimé par : $\sum \vec{F} = m \vec{a}$ montre que le déplacement d'une masse d'air m avec une accélération \vec{a} est proportionnel à la variation de pression entre deux points distincts dans l'atmosphère toute en tolérant le poids, la force de Coriolis et le frottement qui assez important dans la couche atmosphérique avoisinant la surface terrestre.

La loi de la dynamique atmosphérique peut être écrite sous la forme suivante: [04]

$$m \vec{a} = - \frac{m}{\rho} \overrightarrow{grad} p - mg\vec{k} - 2 m (\vec{\Omega} \wedge \vec{V}) + \vec{F}_f \quad (I.1)$$

Ou :

$\frac{m}{\rho} \overrightarrow{grad} p$: Force de pression.

$mg\vec{k}$: Le poids.

$2 m (\vec{\Omega} \wedge \vec{V})$: Force de Coriolis.

\vec{F}_f : Force de frottement.

Cette relation peut être décomposée en un système de deux équations :

- La première équation sera le résultat de la projection sur un plan horizontal ramené à un repère orthonormé absolu fixé sur la terre $(0, \vec{i}, \vec{j})$; c'est l'équation du mouvement horizontal.
- La deuxième équation sera le résultat de la projection sur l'axe vertical $(0, \vec{k})$; c'est donc l'équation du mouvement vertical.

Pour développer ces équations on fixera la masse m à l'unité.

1.2.3 La notion du vent géostrophique

C'est le vecteur de la vitesse horizontale qui résulte de l'équilibre entre les forces de pression et de Coriolis horizontales [05]. On remplacera dans l'équation du mouvement précédente (I.1) les forces de pression et de Coriolis par leurs expressions, on aura [04] :

$$-g \overrightarrow{grad_p} Z - f(\vec{k} \wedge \overrightarrow{V_g}) = 0 \quad (I.2)$$

Ou :

L'expression du vent géostrophique est donnée par :

$$\overrightarrow{V_g} = \frac{g}{f} (\vec{k} \wedge \overrightarrow{grad_p} Z) \quad (I.3)$$

Cette relation nous permet de dire que :

- $\overrightarrow{V_g}$ est perpendiculaire à $\overrightarrow{grad_p} Z$ et orienté à sa droite dans l'hémisphère nord. [06]
- le module : $|\overrightarrow{V_g}| = \left| \frac{g}{f} \frac{\Delta Z}{\Delta l} \right|$.

1.3.4 La notion du vent thermique

C'est la variation verticale du vent géostrophique [06], il est défini pour une tranche d'atmosphère comme étant la différence vectorielle entre le vecteur vent géostrophique sur le niveau de pression supérieur et le vecteur vent géostrophique sur le niveau de pression inférieur. Ce type de vent est directement connu sous le nom de cisaillement vertical du vent horizontal. Il est du, principalement, aux évidentes variations de température en fonction de l'altitude [04, 05]. On peut donc l'exprimer sous la forme suivante :

$$\overrightarrow{V_T} = \overrightarrow{V_{gA}} - \overrightarrow{V_{gB}}$$

Ou :

$\overrightarrow{V_{gA}}$: représente le vent géostrophique au point A situé au niveau de pression A

$\overrightarrow{V_{gB}}$: représente le vent géostrophique au point B situé au niveau de pression B

En remplaçant dans l'équation précédente les formules du vent géostrophique des deux niveaux de pressions on aura [04] :

$$\vec{V}_T = \frac{g}{f} (\vec{k} \wedge \overrightarrow{grad} (Z_A - Z_B)) \quad (I.4)$$

Ou :

g : représente l'accélération de la pesanteur

f : représente le paramètre de Coriolis qui est égale à $2 \Omega \sin \varphi$

Z_A et Z_B : représente les altitudes des points A et B.

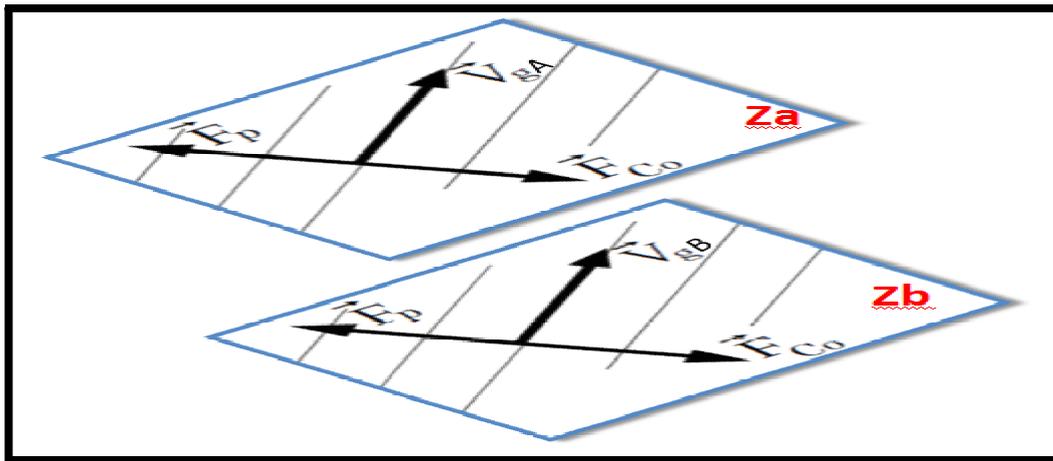


Figure I.2 : variation vertical du profil du vent géostrophique

1.4 Le profil du vent dans les bases couches atmosphérique

Selon le document de l'Organisation de l'Aviation Civil International (OACI) « 9817 », la basse couche atmosphérique qui est située du sol jusqu'à environ 600 m d'altitude est considérée comme la couche la plus vulnérable face aux remarquables changements des profils de vent ; et cela est dû à deux causes principales : les changements thermiques donc barométriques et la rugosité du sol (relief).

La structure verticale de la couche limite atmosphérique s'étendant du sol jusqu'à environ 1000 à 1500 mètres se compose de deux autres couches bien distinctes :

- La couche limite de surface
- La couche EKMAN

Chacune de ces couches développe ses propres caractéristiques concernant l'écoulement d'air, en fonction de la stabilité atmosphérique au fil du temps[07].

1.4.1 La stabilité atmosphérique au cours d'une journée

- ***L'atmosphère stable***

Si l'atmosphère est dite stable, alors : $\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$

θ : représente la quantité de la chaleur transmise.

Cette écriture indique que la quantité de chaleur transmise est effectuée dans le sens sol – air, se produit généralement la nuit est accompagné de vent modéré [08].

- ***L'atmosphère instable***

Si l'atmosphère est dite instable, alors : $\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$

Cette écriture indique que la quantité de chaleur transmise est effectuée dans le sens air– sol, se produit généralement lors du rayonnement solaire intense et accompagné par des vents faible [08].

- ***L'atmosphère neutre***

Si l'atmosphère est dite instable, alors : $\frac{\partial \theta}{\partial z} \approx 0$

Cette écriture indique qu'à ce stade, il n'existe aucun transfert de chaleur entre la terre et l'atmosphère. Cette action se produit généralement lorsque le ciel est couvert de nuage et accompagné par des vents violents [08].

I.4.2 Le profil du vent dans la couche limite de surface

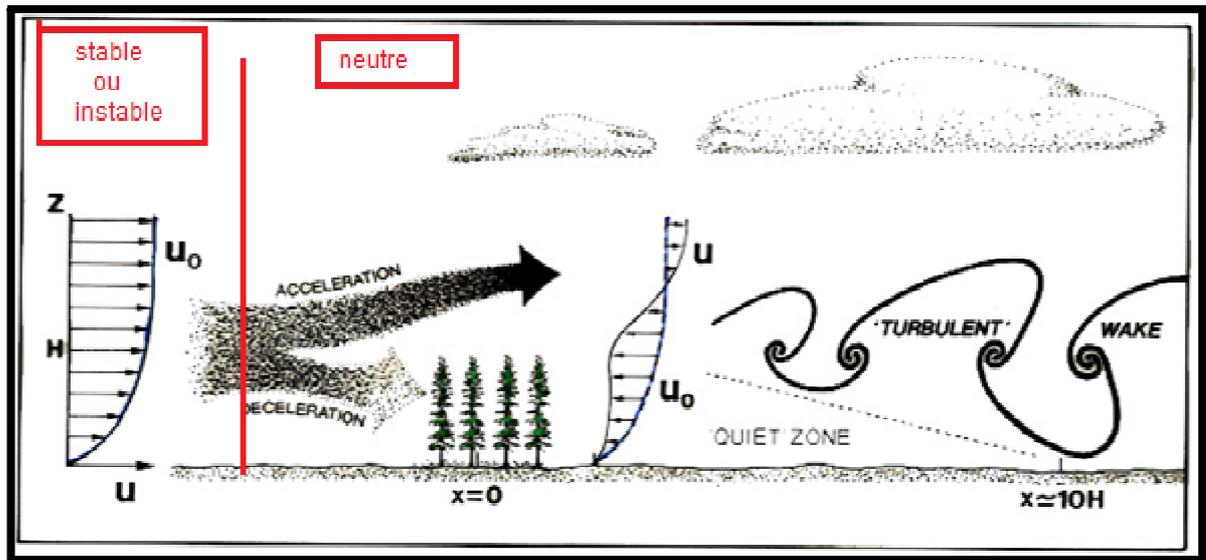


Figure I.3 : Profil du vent dans la couche limite de surface [09].

Sur la figure, on peut remarquer, qu'au niveau de la couche limite de surface qui s'étend du sol jusqu'à environ 100 m d'altitude, le profil de vent (on parle généralement du vent horizontal selon plusieurs niveau d'altitude) varie en fonction de la rugosité (frottement) du terrain qu'il parcourt. A ce stade on observe deux situations spécifiques :

a) *Première situation : faible rugosité du terrain survolé*

La faible rugosité signifie l'absence de reliefs, d'obstacles ou de végétations à la surface du terrain parcouru par le vent ce qui indique l'absence des conditions favorables pour la formation des nuages (pente des reliefs et obstacles qui contribuent au soulèvement des particules d'eau). Donc généralement lorsque la rugosité du terrain est faible, on est dans une atmosphère stable ou instable dans laquelle les vents sont modérés ou faibles. Dans ce cas, on remarque que la variation du profile de vent horizontal selon la verticale est assez régulière comme le montre la figure suivante.

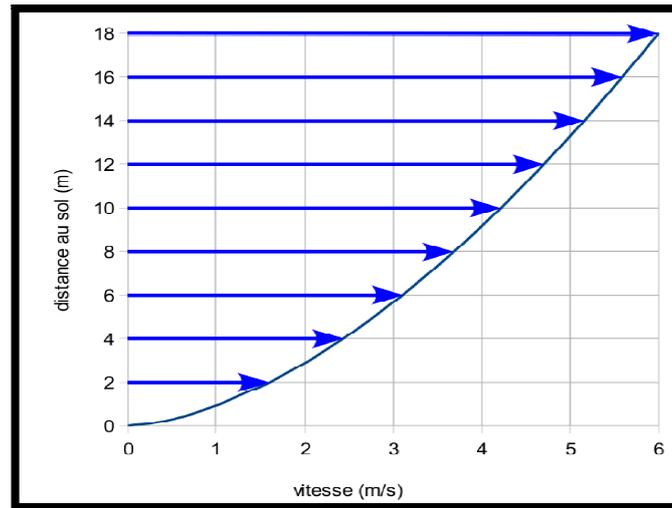


Figure 1.3 : Variation verticale des vents horizontaux en absence de turbulence dynamique thermique [08].

Le model du profile de vent applicable dans ce cas est [08]:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^\alpha \quad (I.5)$$

Ou :

V_1 et V_2 : représentent les profils des vents de surface aux niveaux Z_1 et Z_2 respectivement.

α : représente le coefficient de cisaillement qui varie en fonction de la stabilité de l'atmosphère.

b) Deuxième situation : forte rugosité du terrain survolé

Se sont généralement des zones orographiques ou des agglomérations ; qui favorisent la neutralité de l'atmosphère ; car, la plupart du temps, au dessus de ces zones se développe une couverture nuageuse importante qui empêche les transfères de la chaleur air – sol ; cette dernière est donc emmagasiner dans la couche limite atmosphérique qui subit des évolutions circulaire tout en favorisant la naissance d'une turbulence thermique qui s'additionne à la turbulence dynamique déjà existante.

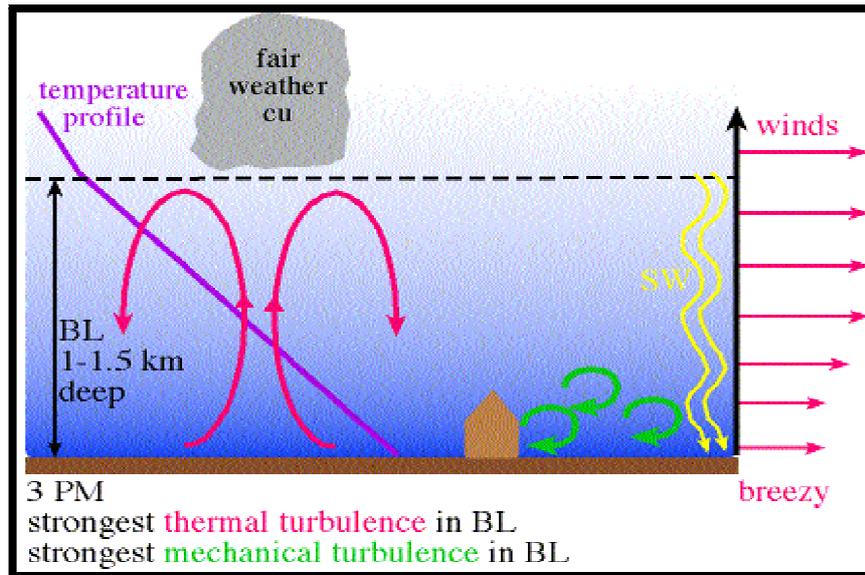


Figure 1.4 : Turbulences thermiques et dynamiques dans la couche limite atmosphérique. [09]

A ce stade, l'atmosphère est dite neutre et c'est ainsi qu'on observe de fort cisaillement de vent. Le model du profile de vent applicable dans ce cas est [02]:

$$V = \frac{U^*}{K} \ln \frac{z}{z_0} \quad (I.6)$$

Ou :

V : Vitesse du vent à l'altitude Z .

U^* : Vitesse de rugosité (frottement).

Z_0 : Longueur de rugosité.

K : Constante de VON KARMAN ($K = 0,4$).

Cette équation représente le profil logarithmique du vent dans la couche limite de surface en conditions atmosphériques neutres qui est dérivée directement des équations de Navier-Stokes. Avec plusieurs hypothèses simplificatrices [10].

1.4.3 Le profil du vent dans la couche EKMAN

Cette couche s'étend au dessus de la couche limite de surface jusqu'à environ 600 mètres d'altitudes et à l'intérieur de laquelle les forces de frottement avec la surface devient négligeable. Une théorie mathématique qui a été développée par EKMAN indique que le profil du vent dans cette portion de l'atmosphère subit des variations de sa direction horizontale selon l'altitude, cette étude est basée sur la notion du vent géostrophique (les gradients de pressions dus aux changements de température en altitude sont à l'origine des vents et plus précisément des cisaillements de vent) [02]. EKMAN a déterminé le profile du vent horizontal comme suit :

$V_h = \sqrt{u^2 + v^2}$ Telle que :

$$u = V_g - V_g \sqrt{2 \sin a e^{-Bz} \cos(Bz + \frac{\pi}{4} - a)}$$

$$v = V_g \sqrt{2 \sin a e^{-Bz} \sin(Bz + \frac{\pi}{4} - a)}$$

Ou :

u et v : Composantes horizontales du vent à l'altitude Z .

V_g : Composante du vent géostrophique.

a : Angle entre le vent géostrophique et le vent synoptique réel.

B : Constante qui exprime la viscosité et le paramètre de Coriolis.

1.5 Les cisaillements du vent dans la couche limite atmosphérique

Suite aux considérables contrastes thermiques, aux grandes variations de pressions atmosphériques à basse altitude ainsi qu'aux caractéristiques des reliefs dominant un étendue géographique ; de remarquable cisaillements de vent sont détectés, observés sous différentes formes dont les conséquences varient selon les propriétés atmosphérique de chaque régions.

1.5.1 Définition du cisaillement de vent

Le cisaillement de vent est défini comme une variation spatiale du vecteur vent. Il occasionne des tourbillons entre deux courants qui diffèrent par leur vitesse ou leur direction, ou par l'une et l'autre en même temps. Le cisaillement peut être associé à un changement de direction du vent, ou au gradient vertical de changement de vitesse du vent, à n'importe quelle altitude.

Nous intéresserons dans ce mémoire aux cisaillements de basses couches ; du sol jusqu'à environ 1500 m ; plus précisément, ce chapitre décrira les différents gradeurs physiques de ce phénomène qui lui permet de le quantifier et de le modéliser et aussi de connaître ses causes d'apparition et ses origines ; afin de pouvoir classer les types de cisaillement de vent selon leurs sévérités.

1.5.1.1 Le cisaillement horizontal du vent

Le cisaillement horizontal est qualifié par la variation (horizontale ou verticale) de l'intensité ou de la direction du vent sur un plan horizontal, exprimé en m/s. Il peut donc y avoir :

- Un cisaillement horizontal du vent horizontal : Se produit lorsque l'on observe une variation du profil de vent horizontal sur deux points A et B très rapprochés situés sur la même surface horizontale.
- Un cisaillement horizontal du vent vertical : Se produit lorsque l'on observe une variation du profil de vent vertical sur deux points A et B très rapprochés situés sur le même niveau.

Le cisaillement horizontal du vent horizontal se traduit par une :

- diminution du vent de face.
- augmentation du vent arrière.
- transformation brutale du vent face en vent arrière.

Le cisaillement horizontal du vent vertical se traduit par une :

- rafale descendante ou ascendante.

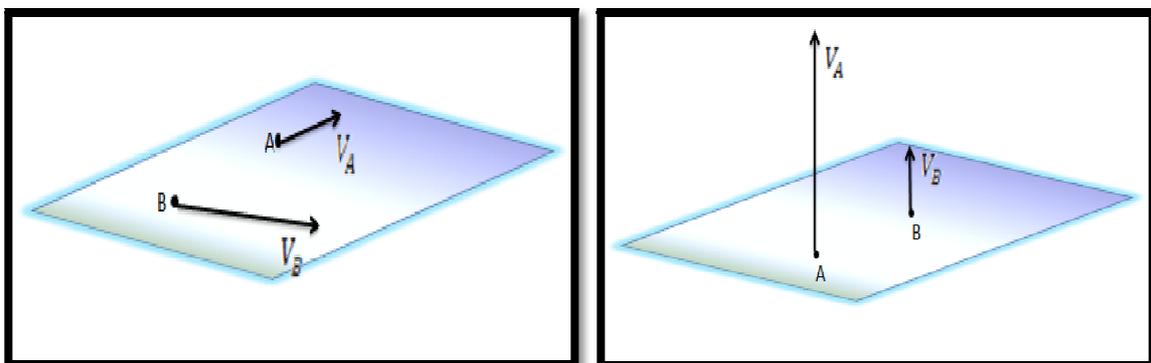


Figure 1.5 : Schémas représentatifs de la variation des vents sur une surface. Le schéma à gauche représente la variation horizontale des vents horizontaux. Le schéma à droite représente la variation horizontale des vents verticaux.

1.5.1.2 Le cisaillement vertical du vent

Ce type de cisaillement est souvent associé à une phase d'approche (montée ou descente) et peut causer de graves répercussions pour les avions [12]. Le cisaillement vertical du vent horizontal ou vertical est défini par la variation de l'intensité ou de la direction du vent sur deux niveaux en altitude, exprimé en m/s.

Il peut donc y avoir :

- Un cisaillement vertical du vent horizontal : Se produit lorsque l'on observe une variation du profil de vent sur deux points A et B très rapprochés situés sur deux niveaux différents.
- Un cisaillement vertical du vent vertical : Se produit lorsque l'on observe une variation verticale du profil du vent sur deux points situés sur deux niveaux différents.

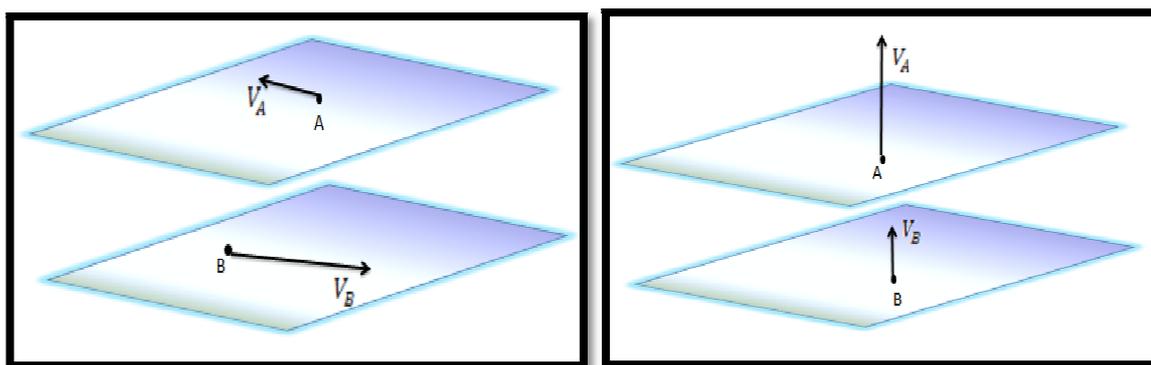


Figure 1.6 : Schémas représentatifs de la variation des vents à des altitudes différentes. Le schéma à gauche représente la variation verticale des vents horizontaux. Le schéma à droite représente la variation verticale des vents verticaux.

Le cisaillement du vent vertical disparaît en dessous de 500 pieds, puisque le courant d'air descendant se transforme forcément en écoulement horizontal à l'approche du sol. Il ne faut toutefois pas sous-estimer son importance, car il s'accompagne généralement de pluies très fortes qui dégradent les performances aérodynamiques de l'avion, surtout dans les plages de vitesse réduite.

1.5.1.3 Calcul de cisaillement du vent

Le cisaillement de vent représente la variation de profil du vent sur un point ou entre deux points distincts très proches A et B :

- **Calcul de cisaillement horizontal ou vertical du vent horizontal**

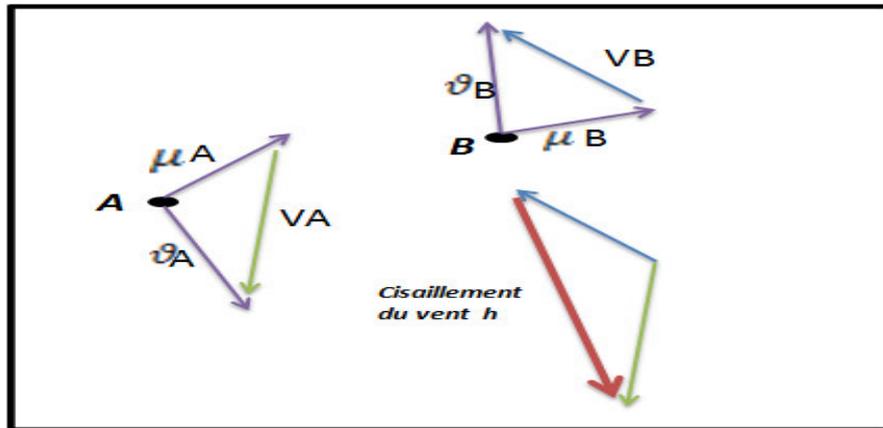


Figure I.7 : Cisaillement horizontal ou vertical du vent horizontal.

La force du vent horizontal sur le point A est donnée par : $V_A = \sqrt{\vartheta_A^2 + \mu_A^2}$

La force du vent horizontal sur le point B est donnée par : $V_B = \sqrt{\vartheta_B^2 + \mu_B^2}$

ϑ et μ : représentent les composantes du vecteur vent horizontal :

La différence entre les deux forces représente l'intensité du cisaillement du vent horizontal:

$$\Delta V = V_B - V_A = \sqrt{\Delta\vartheta^2 + \Delta\mu^2}$$

Telle que : $\Delta\vartheta = \vartheta_B - \vartheta_A$ et $\Delta\mu = \mu_B - \mu_A$

La direction de cisaillement est donnée par: $\alpha = \tan^{-1} \frac{\Delta\mu}{\Delta\vartheta}$

- **Le calcul de cisaillement horizontal ou vertical du vent vertical**

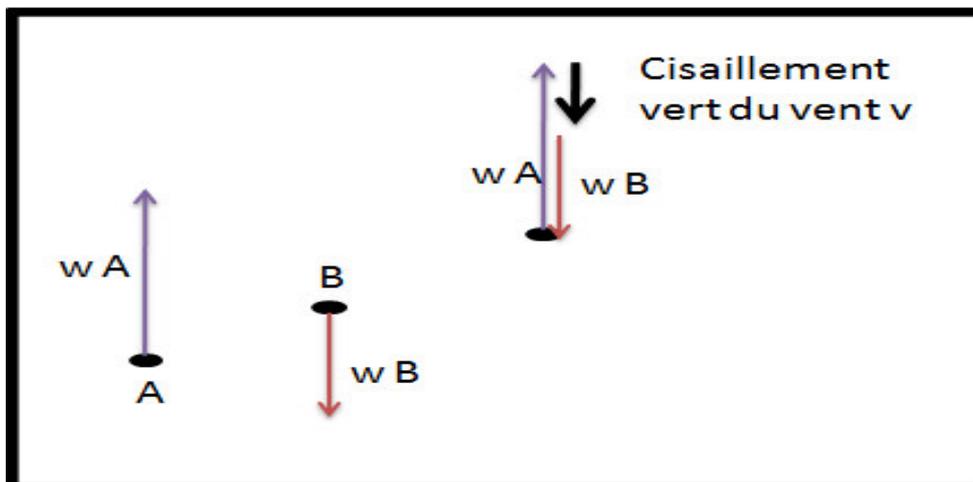


Figure I.8 : Cisaillement horizontal ou vertical du vent vertical

La force du vent vertical sur le point A est donnée par : $V_A = | |\vec{w}_A| |$

La force du vent horizontal sur le point B est donnée par : $V_B = | |\vec{w}_B| |$

w : représente la composante verticale du vent.

La différence entre les deux forces représente l'intensité du cisaillement du vent vertical:

$$\Delta V = V_B - V_A = w_B - w_A$$

La direction de cisaillement selon le signe de ΔV comme suit :

Si $\Delta V > 0$ alors ; les cisaillements sont des vents ascendant

Si $\Delta V < 0$ alors ; les cisaillements sont des vents descendant

1.5.2 Intensité du cisaillement du vent

D'après l'annexe trois de l'OACI, les intensités du cisaillement sont classés comme le montre le tableau suivant [07].

Tableau I.1 : Forces du cisaillement du vent selon l'OACI

Cisaillement du vent	intensité
Légers	Inférieur à 4 Kt
modéré	Entre 5 et 8 Kt
Fort	Entre 9 et 12 Kt
Très fort	Supérieure à 12 Kt

1.5.3 Les origines du cisaillement du vent

1.5.3.1 Le cisaillement du vent d'origine dynamique

Le cisaillement du vent d'origine dynamique provient de la désorganisation de la distribution régulière des vents d'une masse d'air [13]. C'est la variation de l'intensité ou de la direction du vent suite à la rencontre d'obstacles le long de sa trajectoire.

❖ Le cisaillement du vent du aux reliefs

C'est ce qu'on appelle aussi l'effet orographique sur les mouvements horizontaux de vent : les filets d'air ont tendance à épouser le profil du relief de sorte qu'il procure une ascendance dans la zone face au vent du relief suivi d'une descendance dans la zone sous le vent. Cette action perturbatrice est fonction de :

- La forme du relief
- La vitesse du vent

- La valeur de la décroissance de la température en fonction de l'altitude

En prenant en considération l'effet orographique sur l'écoulement juste pour la section face au vent on en déduit les deux cas suivant :

➤ ***Effet d'un relief à faible pente sur les mouvements horizontaux de vent***

La présence d'une chaîne montagneuse à faible pente devant l'écoulement des masses d'air crée une déformation des filets d'air [15]. Le vent adopte la forme du relief qui se manifeste par une ascendance orographique et qui s'achève par un étranglement des filets d'air au sommet du relief. A ce stade l'accélération du vent est maximale. L'accélération de cet écoulement provoque la création d'une dépression dynamique près du sommet donc un fort cisaillement du vent. Ce phénomène peut être assimilé à l'effet de venturi (l'accélération de l'air dans les passages étroits). Sur la figure ci-dessous on peut, nettement, visualiser le cisaillement du vent au sommet du relief qui se caractérise par une variation subite de la vitesse de l'écoulement.

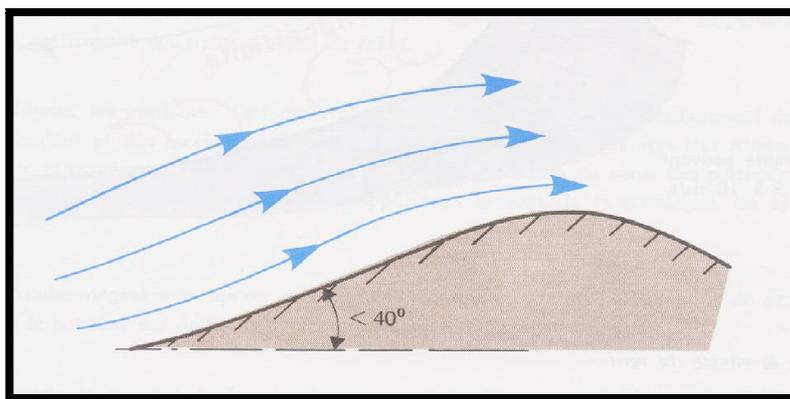


Figure I.9: Effet d'un relief à pente faible (moins de 40°) sur l'écoulement du vent. [15]

➤ ***Effet d'un relief à forte pente sur les mouvements horizontaux de vent***

L'écoulement à travers un relief à forte pente génère des tourbillons à axes horizontaux sur le côté face au vent ; qui représente le siège de fort cisaillements [15].

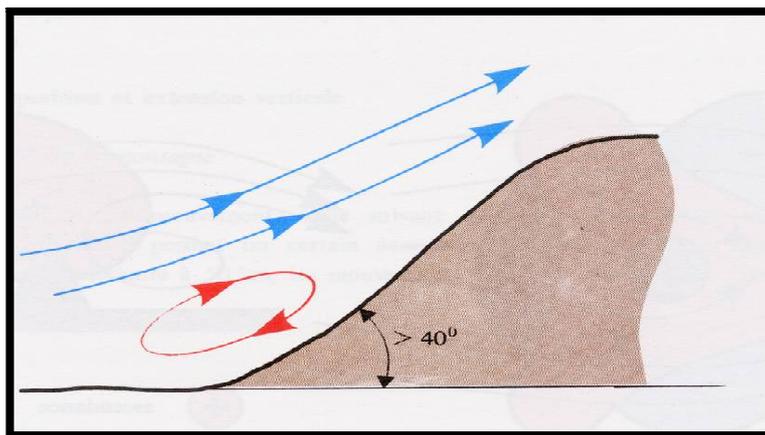


Figure I.10 : Effet d'un relief à forte pente (plus de 40°) sur l'écoulement du vent dans le côté face au vent.

Par contre, la section sous le vent du relief représente le siège d'une turbulence anarchique quelque soit sa pente [15]. L'apparition de nuages lenticulaires est l'un des indices visuels de présence d'un cisaillement de vent.

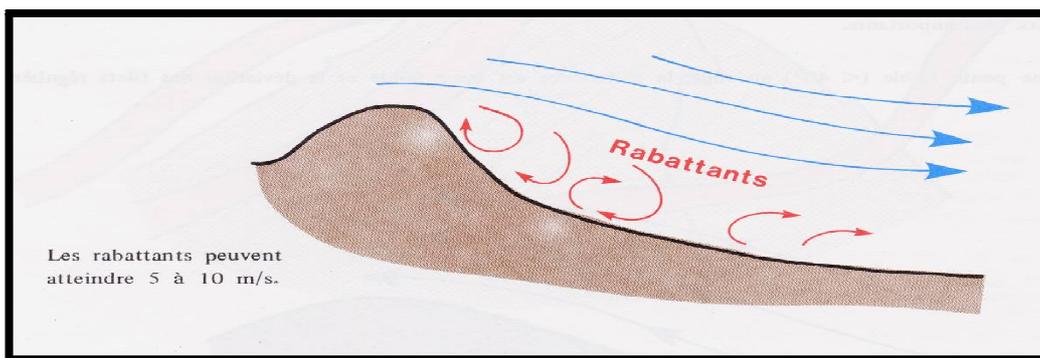


Figure I.11: Les turbulences du côté sous le vent du relief.

Forte présence des rabattants (5 à 10 m/s) et des rotors du côté sous le vent du relief qui favorisent la naissance de nuages lenticulaires.

❖ *Le phénomène de Foehn*

L'effet du foehn est un vent caractéristique des zones montagneuses. Il est donc lié à l'effet orographique sur le mouvement de l'air. A l'origine, ce terme est né d'une terminologie locale autrichienne qui se traduit par un vent fort et sec le long des pentes en aval du relief [16 ,17].

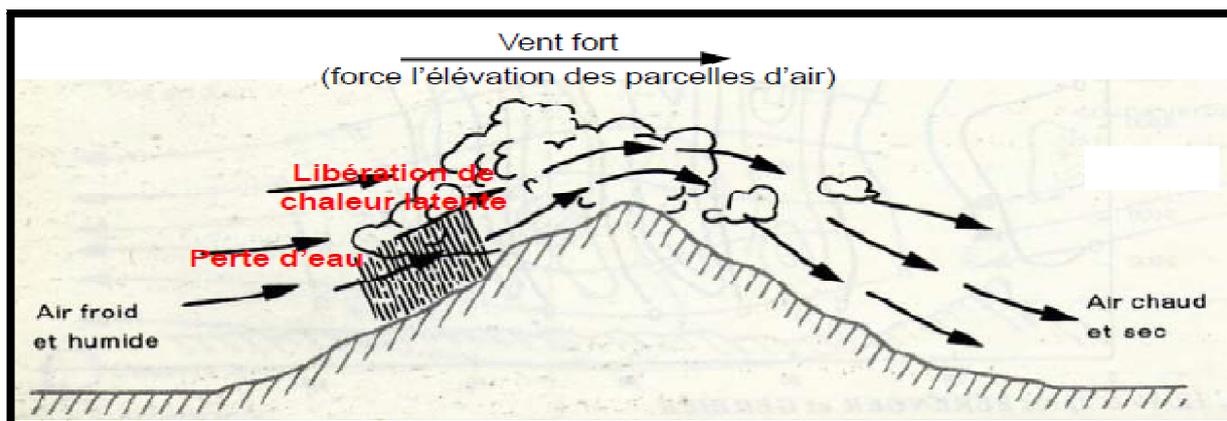


Figure I.12: Schémas caractérisant le phénomène de foehn et le type de nuages qu'il induit [19].

Il existe deux types de foehn :

- a) **Le foehn sec :** C'est le cas le plus classique. Il est dû à l'ascendance de l'air froid et sec le long du relief jusqu'au sommet et qui va ensuite descendre en aval du relief jusqu'à la vallée tout en subissant un réchauffement adiabatique, qui va ensuite créer une zone de fort cisaillements [17].
- b) **Le foehn humide:** C'est la déviation des filets d'air par un profil montagneux qui soulèvent des particules humides formant, ainsi, des nuages accompagnés de fortes précipitations sur le versant face au vent du relief [17]. L'eau perdu par les précipitations n'est plus disponible dans la phase compression du côté sous le vent, et cela se traduit par une compression adiabatique sèche suite au dépassement du point de rosé [18].

1.5.3.2 Le cisaillement de vent d'origine radiative

Il se produit à l'absence du rayonnement solaire (la nuit) sur la surface terrestre. En prenant en considération l'influence des vents synoptique à grande échelles sur les vents locaux on peut distinguer :

- Les brises de terre
- Les brises descendantes de montagne
- Les jets nocturnes à basses couches

Les brises sont des circulations de basses couches qui se mettent en place lors d'un fort contraste thermique **selon l'horizontale** à méso-échelle [17].

❖ *Les brises de terre*

Durant la nuit le continent se refroidit plus rapidement que la mer. Cela induit des pressions élevées sur le continent et une faible dépression sur la mer. Ce gradient de pression génère une circulation horizontale depuis le continent vers la mer [19, 20]. Ce phénomène peut causer des vents très violents en surface qui peuvent atteindre 50Kt en bordure des plateaux continentaux et qui porte le nom de vents catabatiques [15].

❖ *Les brises descendantes de montagne*

Durant la nuit, les flancs de la montagne se refroidissent rapidement tout en réfrigérant l'air à son contact. L'air refroidi est plus dense que l'atmosphère environnante, il glisse alors le long des pentes en formant ainsi une zone de cisaillement [19, 20]. Ces cisaillements sont la plupart du temps à faible intensité de 6 à 8kt [17].

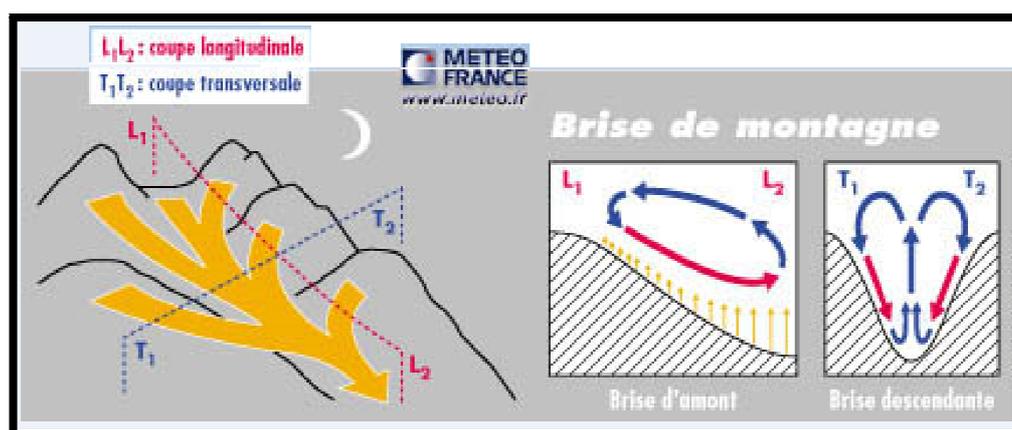


Figure I.13 : Brises descendante de montagne [31].

❖ *Les jets nocturnes de basses couches*

Le jet est un courant quasi horizontal caractérisé par sa grande vitesse et ses gradients transversaux. Les gradients horizontaux moyens sont de l'ordre de 20 à 30Kt par 100 NM et les gradients verticaux moyens de 5 à 7Kt par 1000ft [17]. Les jets nocturnes de basses couches correspondent à un pic de vent sur le profil vertical qui se forme dans les basses couches au niveau de la couche d'inversion nocturne. C'est un vent en surface calme qui se découple de vent de gradient [02].

1.5.3.3 Le cisaillement de vent d'origine convective

Se produit le jour en présence de rayonnement solaire sur la surface terrestre. En prenant en considération l'influence des vents synoptiques à grandes échelles sur les vents locaux on peut distinguer :

- Les brises de mer
- Les brises montantes de vallée
- Les cellules orageuses

❖ Les brises de mer

Durant la journée, le continent se réchauffe plus rapidement que la mer, ce qui induit une faible dépression sur le continent et des pressions plus élevées sur la mer. Ce gradient de pression génère des vents depuis la mer vers le continent, avec une intensité qui varie de 10 à 15Kt. Parfois ces vents atteignent des valeurs très élevées au niveau de la zone de rencontre avec les vents synoptiques.

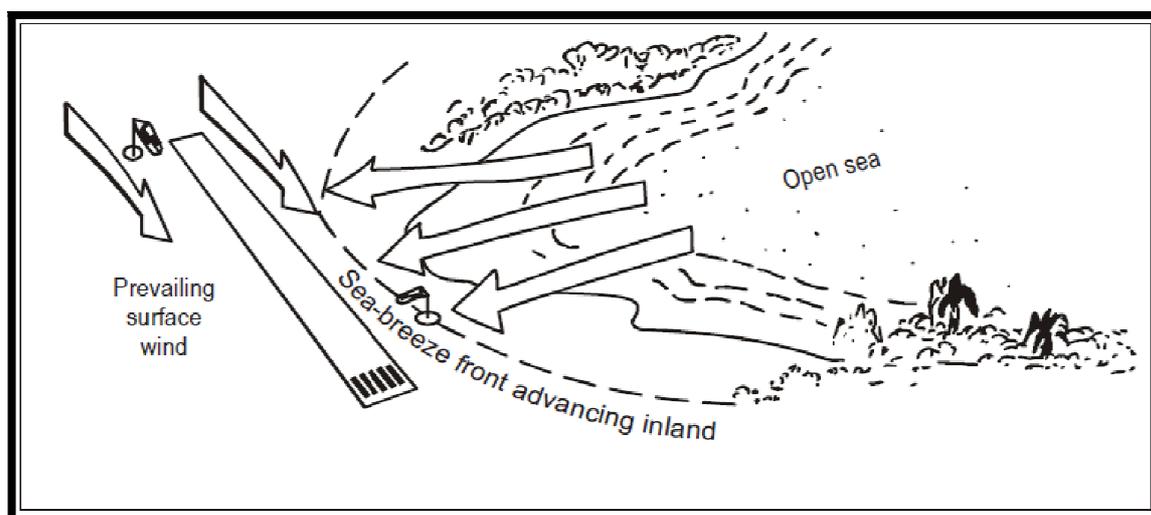


Figure I.14: Le phénomène de brise de mer.[07]

❖ Les brises montantes de vallée

Durant la journée, le rayonnement solaire réchauffe les flancs de la montagne, donc l'air à son contact [19, 20]. L'air réchauffé est moins dense que l'atmosphère environnante. Cet air tend à remonter le long de la pente de la vallée en formant ainsi une zone de cisaillement à une intensité de l'ordre de 8Kt.

❖ *Les cellules orageuses*

Est un ensemble de cellules convectives (cumulonimbus), animées de mouvements ascendants ou descendants rapides [17]. C'est un phénomène de courte durée, de l'ordre de quelques dizaines de minutes. Les orages peuvent être la conséquence de plusieurs événements :

- Orages dus aux effets orographiques : généralement associé au phénomène de foehn comme le montre la figure ci-dessous.
- Orages liées au phénomène de brise, dus à la convergence thermique
- Orages frontales : on distingue les orages de fronts chauds et les orages de fronts froids

Toute cellule orageuse se distingue par le développement d'un nuage convectif à extension verticale : le cumulonimbus, auquel sont associés plusieurs phénomènes caractérisant le cisaillement du vent. Telle que :

- Les microrafales
- Les rafales descendantes
- Les fronts rafales

➤ *La formation d'un cumulonimbus*

Le cumulonimbus peut atteindre 15Km avec une largeur qui varie de 5 à 15Km, son sommet se heurte à la troposphère et s'étale sous forme d'enclume. Au cours de sa vie, le cumulonimbus passe par trois stades :

- ***Le stade de formation :***

A ce stade, l'intérieur de la cellule se caractérise par la manifestation des courants verticaux ascendants qui peuvent atteindre 30 m/s et se traduit par une convergence marquée du vent en surface.

- ***Le stade de maturité :***

Lorsque les précipitations commencent, des courants descendants parviennent à l'intérieur de cette cellule, qui peut atteindre des vitesses de 15 m/s. Ces courants prennent le nom des rafales descendantes. Arrivant près du sol les rafales descendantes s'étalent horizontalement provoquant ainsi des fronts rafales (à la rencontre de l'air environnant) marqués par des divergences horizontales appelées Vortex.

- **Le stade de dissipation :**

Les microrafales finissent par se généraliser et s'affaiblir [20, 21, 22].

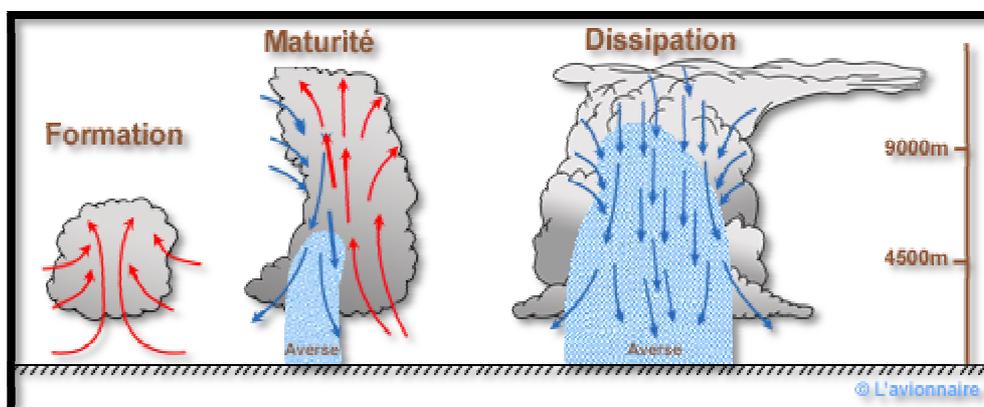


Figure I.15: Schématisation des trois phases de formation d'un cumulonimbus.[21]

- ❖ **Les microrafales :**

Se sont des rafales descendantes qui ne dépassent pas 4Km de prolongement horizontal sous le nuage. Se forment à l'intérieur des nuages au moment où les gouttes d'eau en évaporation créent une poche d'air frais et lourd qui retombe en un puissant courant d'air descendant. La vitesse des vents descendants peut y atteindre 25m/s. Cette poche se vide au moment où elle touche le sol.

Les microrafales sont considérées comme le type de cisaillement le plus dangereux pour l'aéronautique.

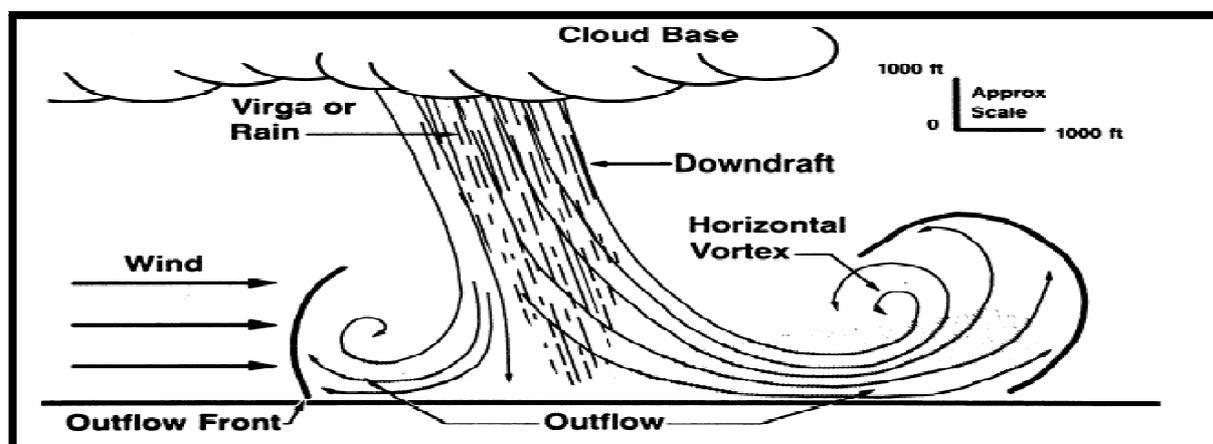


Figure I.16 : Schéma représentatives des rafales descendantes, des microrafales, des macrorafales et des fronts rafales. [23]

1.5.3.4 Récapitulation

Tableau I.2: Caractéristiques principales nécessaires à l'apparition de chaque type de cisaillement ainsi que l'ordre de grandeur de leur durée de vie [17].

Type	Origine	Durée
Brises de mer	Gradient de température terre/mer	Plusieurs heures
Brises de vallées	Gradient thermique induit par le relief	Plusieurs heures
Föhn	Franchissement d'un relief	Plusieurs heures
Downburst	Orage	Quelques minutes
Jets de basses couches	Décroissance de la turbulence due au chauffage diurne	Plusieurs heures
Turbulence derrière obstacles	Bâtiments, montagnes	Quelques minutes Quelques heures

1.5.4 La reconnaissance du cisaillement de vent

Le pilote peut reconnaître le cisaillement à travers la présence de l'un des indices suivant [07].

- Un vent fort sur les aérodromes situé à proximité des reliefs et obstacles ; génère de violent cisaillement.
- Les nuages lenticulaires : qui résultent généralement de la fragmentation d'un bloc nuageux par les cisaillements du vent
- Les nuages en rouleau dans un orage indiquent l'existence d'un front rafale.
- Les cumulonimbus représentent le siège des microrafales (les plus dangereuses pour l'aéronautique)

II.1 Introduction

Sous ces différentes formes, le cisaillement de vent de basses couches est un phénomène très dangereux pour l'aéronautique. C'est dans les 500 premiers mètres qu'ils deviennent nuisibles pour les avions du fait de la vitesse réduite et de la proximité du sol. Un avion doit toujours décoller et atterrir face au vent. Dans les deux configurations d'approche et de décollage, il se retrouve pendant un laps de temps dans un état de vulnérabilité car, à ce moment sa vitesse sera voisine à la vitesse critique de décrochage.

Il est bien évident que tout avion traversant une zone de cisaillement de vent au moment des phases d'approche ou de décollage va rencontrer des difficultés pour maintenir sa stabilité latérale et longitudinale.

II.2 Le vent et l'aérodynamique

Pour mieux comprendre les effets du cisaillement sur les performances d'un avion, il est plus utile de revoir quelque principe de base de l'aérodynamique.

En montée : [22]

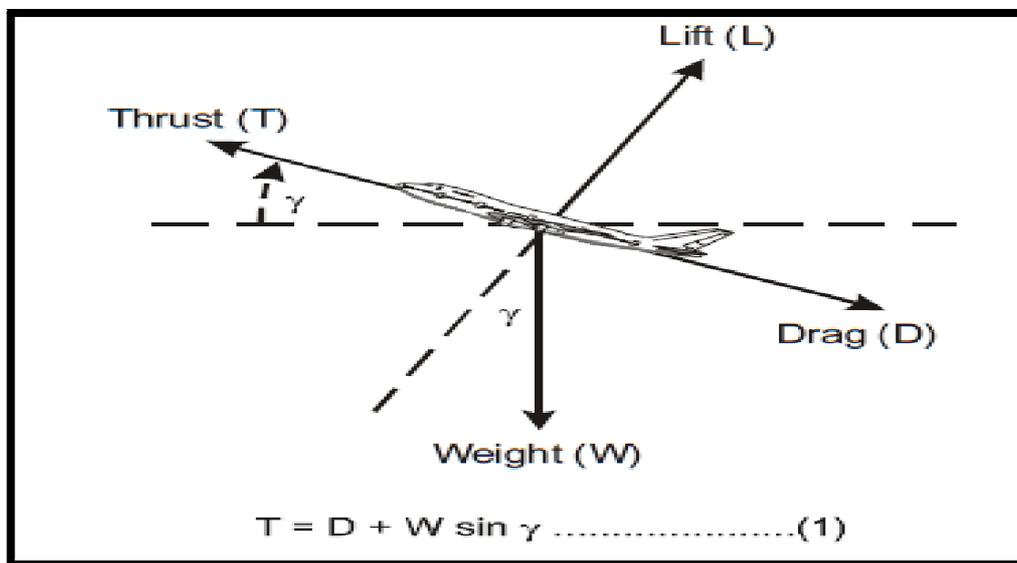


Figure II.1 : Les forces agissantes sur un avion en montée [07].

A cette phase de vol, la poussée T doit aussi équilibrer et compenser une partie du poids de l'aéronef ($w \sin \gamma$), donc au lieu d'écrire : $T = D$

On écrira : $T = D + w \sin \gamma$

Ou :

T : représente la poussée.

D : représente la trainée.

w : représente le poids de l'avion.

γ : représente la pente de montée.

Pour des angles très petit : $\sin \gamma = \gamma$

Donc : $T = D + w\gamma$

$\gamma = \frac{T-D}{w}$: Cette équation signifie que la pente en montée dépend de l'excès de poussée sur la trainée et inversement sur le poids

En descente :

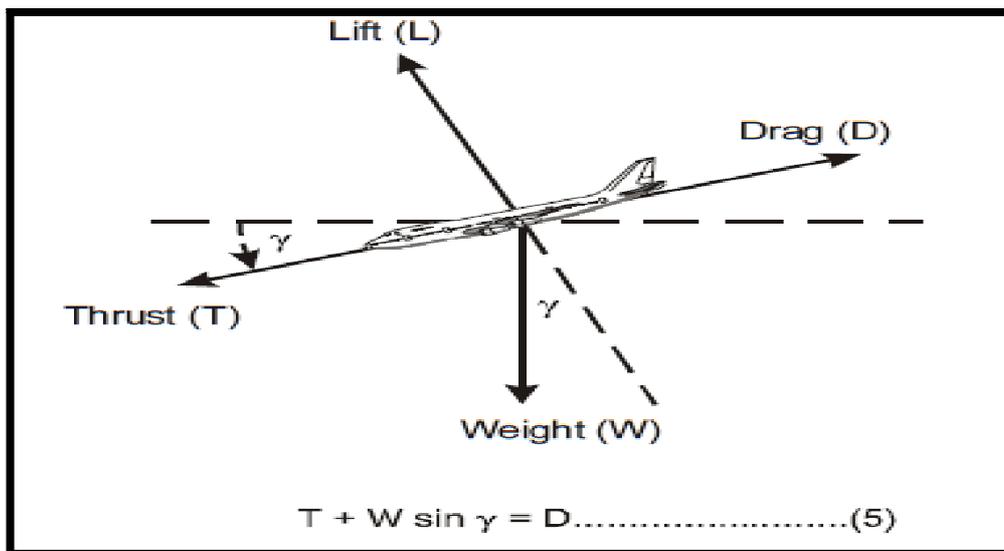


Figure II.2 : Les forces agissantes sur un avion en phase d'approche.[07]

A cette phase du vol, la réduction de la poussée est exigée car une partie du poids agit dans le même sens que la poussée:

Donc : $D = T + w\gamma$

$\gamma = \frac{D-T}{w}$: Cette équation signifie que la pente en descente dépend de l'excès de la trainée sur la poussée et inversement sur le poids [29].

D'après les deux équations qui nous permettent de calculer la pente γ , on peut constater que la rencontre d'un brusque vent de face, vent arrière ou traversier ou même une rafale descendante va directement influencer sur ces trois force (D , T , w); donc sur la pente.

De plus de la notion des triangles des vitesses qui affirme que [11] :

$$V_S = V_p + V_w$$

V_S : représente la vitesse sol.

V_p : représente la vitesse propre de l'avion.

V_w : représente la vitesse du vent .

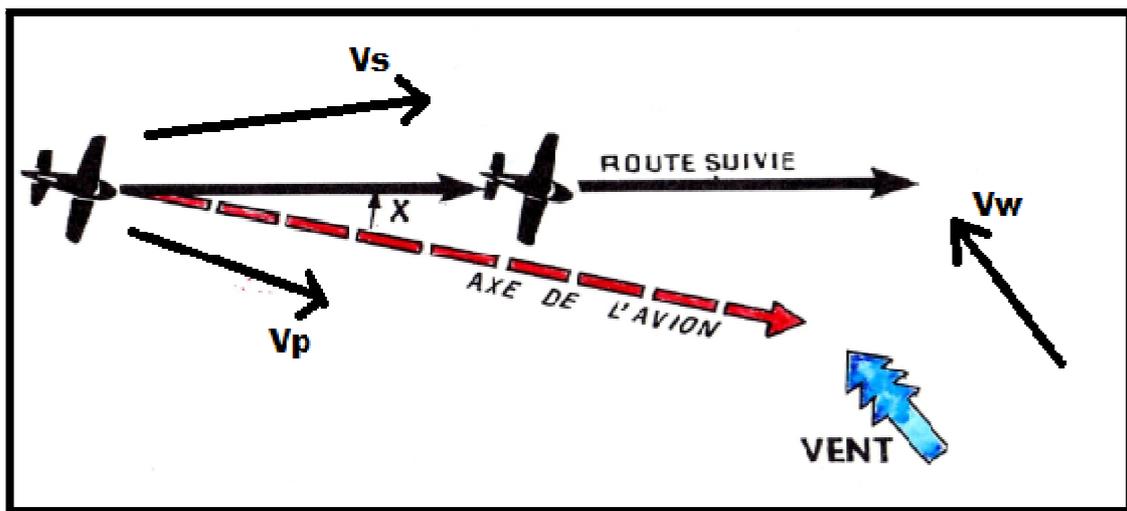


Figure II.3 : Schémas représentatif de l'influence du vent sur la vitesse propre d'un avion

x : représente la dérive par rapport au cap initial (changement de la trajectoire) [35].

En résumé on peut dire que l'influence du cisaillement de vent sur un avion se ramène à son l'angle d'attaque ou l'incidence et à sa vitesse propre. Tout les deux jouent un rôle sur la portance de l'avion.

II.2.1 Influence du cisaillement de vent sur l'angle d'attaque de l'avion

Lorsque les composantes verticales du vent l'emportent sur les composantes horizontales, comme dans le cas des microrafales au dessous d'un nuage convectif, l'angle d'attaque va subir une variation suivant la direction du cisaillement tout en affectant sur la stabilité latérale (incidence) et longitudinale (angle de dérapage) de l'avion [22].

Les dangers majeurs des fluctuations d'incidence se manifestent durant le décollage et l'atterrissage ; car l'avion affiche un angle d'attaque qui se rapproche de l'angle de décrochage lorsqu'un cisaillement se manifeste [26].

II.2.2 Influence du cisaillement de vent sur la vitesse propre de l'avion

Lorsque les composantes horizontales du vent l'emporte les composantes verticales, comme dans le cas des vents de face, vents arrières ou traversiers la vitesse propre va subir des variations :[26]

- A l'atterrissage : le pilote réduit la poussée motrice donc l'avion deviendra vulnérable face aux perturbations causées par le vent horizontal, qui généralement, entraîne une dérivation de la trajectoire.
- Au décollage : la vitesse propre de l'aéronef est à proximité de la vitesse de décrochage, la rencontre subite d'un vent de face, arrière ou traversier peut contribuer à atteindre cette vitesse.

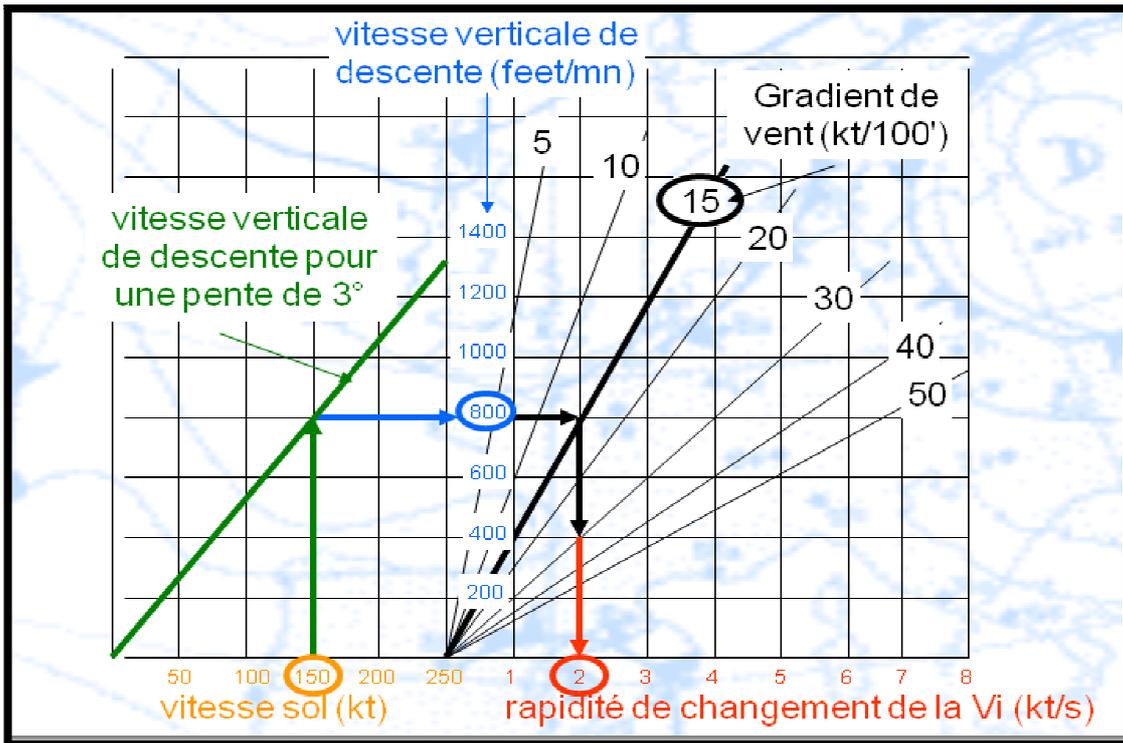


Figure II.4 : Variation de la vitesse sol en fonction de gradient de vent.[27]

A partir d'une pente de descente de 3° avec une vitesse sol de 150Kt qui correspond à une vitesse verticale de 800 feet par minute ; si l'avion rencontre un cisaillement de 15k /100', elle subira alors une perte de vitesse de 2 kt pour chaque seconde.

II.3 Conséquences du cisaillement de vent sur un avion au décollage

II.3.1 Les conséquences d'un cisaillement horizontal

Les conséquences du cisaillement du vent horizontal lors du décollage ne sont pas tragiques. Elles se limitent à des perturbations éphémères de l'appareil. A ce stade, l'avion va subir une diminution ou une augmentation de la vitesse propre suivie : d'une diminution ou augmentation de l'incidence dans le cas d'un cisaillement de vent debout ou arrière respectivement, ou d'une dérive de l'avion dans le sens de cisaillement s'il s'agit d'un vent traversier.

Le rétablissement de l'appareil, lors du cisaillement horizontal, dépend de la qualification et de réflexe du commandant de bord.

II.3.2 Les conséquences d'un cisaillement vertical

- ***Durant le roulage :*** Ralentissement de la vitesse propre de l'appareil qui est du au cisaillement ; ce qui fait que l'avion tardera à atteindre la vitesse de rotation ; probablement l'atteindre vers la fin de la piste [23]. De plus le pilote va probablement rencontrer des difficultés pour afficher l'assiette.
- ***Durant le décollage :*** Perte d'altitude, accompagné d'un décroissement de la vitesse propre de l'appareil qui finira probablement par s'écraser au sol pas très loin de la piste de décollage [23].

II.4 Conséquences du cisaillement de vent sur un avion à l'atterrissage

II.4.1 Les conséquences d'un cisaillement horizontal

On peut analyser trois situations différentes lors de la phase d'approche. On considère qu'un aéronef effectue une approche ILS (dans le but de prendre l'outer marker de ILS comme point de référence pour chaque situation; un marker définit la distance par rapport à la piste ainsi que la pente de descente).

➤ Cisaillement de vent modéré à l'outer marker

Si un avion rencontre un cisaillement de vent modéré résultant d'une décroissance subite du vent debout au niveau de l'outer marker, elle subira une diminution de la vitesse propre suivie d'une perte de portance puis d'altitude. Cette perte est généralement compensable; le pilote doit augmenter la puissance pour corriger sa trajectoire; donc cet avion peut s'échapper au cisaillement en toute sécurité ; car l'altitude à laquelle le cisaillement du vent surgit est suffisamment élevée pour rattraper le plan de descente avant l'atterrissage. [12, 21]

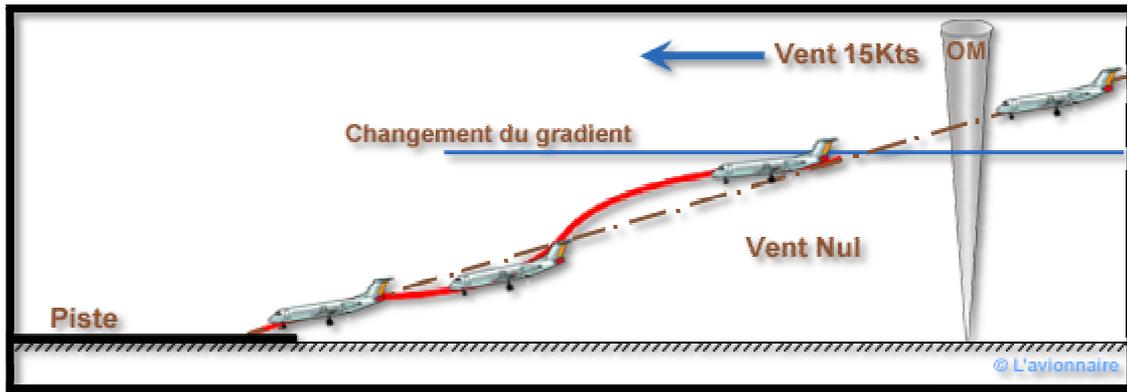


Figure II.5 : Rencontre d'un cisaillement de vent modéré au niveau de l'outer marker.[21]

- Le pilote remarque une diminution de sa vitesse indiquée qui sera équivalente à l'intensité du cisaillement.
- La perte de vitesse est souvent suivie d'une perte de d'altitude, l'avion va alors, se retrouver au dessous du plan de descente autoriser.
- Le pilote augmente le régime et redresse son appareil sur la pente de descente approprié.
- Atterrissage réussit sans difficultés. [12]

➤ ***Cisaillement de vent modéré aux alentours des 500 pieds***

La rencontre d'un cisaillement de vent à cette altitude rend le temps de réaction plus critique ; car l'avion est trop proche du sol. Si le pilote est assez qualifié, il peut réussir à redresser son appareil mais après, l'atterrissage sera long et rapide ; dans le cas où la piste est limitative, une remise des gaz sera obligatoire.

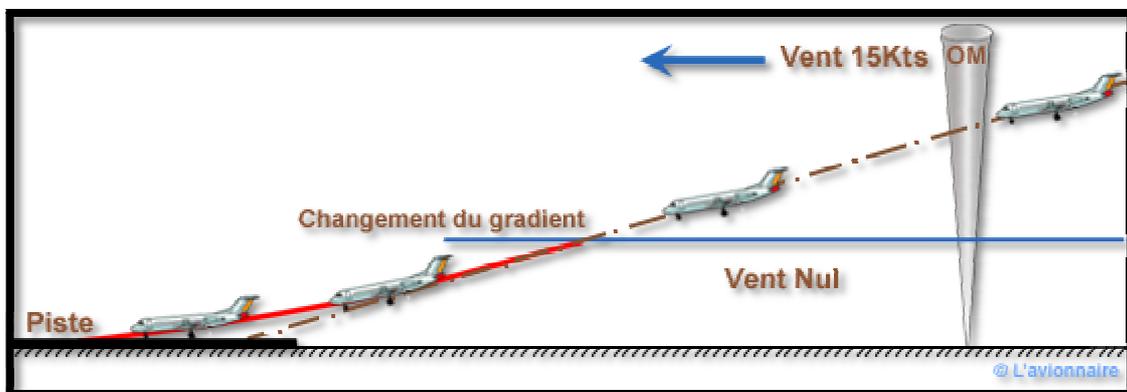


Figure II.6: rencontre d'un cisaillement de vent modéré au niveau des 500 pieds. [21]

- Le pilote remarque une diminution de sa vitesse indiquée qui sera équivalente à l'intensité du cisaillement.
- La perte de vitesse est souvent suivie d'une perte de d'altitude, l'avion va alors, se retrouver au dessous du plan de descente autoriser.
- Le pilote augmente le régime et redresse son appareil sur la pente de descente approprié mais sa vitesse sera trop élevée pour atterrir donc ; il mettra plus de temps pour atteindre la vitesse d'atterrissage convenable.
- après correction : l'atterrissage sera long et rapide, si la piste est limitative une remise de gaz sera nécessaire. [12]

➤ ***Fort cisaillement de vent après l'outer marker***

La rencontre d'un fort cisaillement à cet emplacement conduira à une diminution de la vitesse propre de l'avion suivie d'une perte de portance, cet avion va se retrouver alors, en dessous du plan de descente. Pour rétablir la situation, le pilote prend l'initiative d'augmenter le régime du vol afin de regagner la pente de descente dans les délais.

A ce stade, l'avion se retrouvera dans une situation difficile, car l'augmentation de l'incidence conduit à une augmentation de la traînée ce qui provoquera par suite, une diminution de la vitesse entraînant un taux de chute important, l'avion va alors, s'enfoncer et toucher le sol avant la piste. [12]

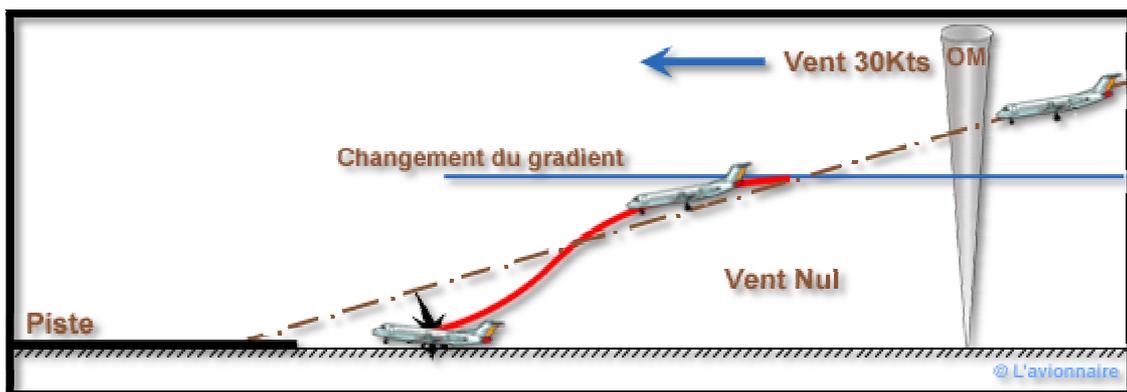


Figure II.7 : rencontre d'un fort cisaillement de vent après l'outer marker. [21]

II.4.2 Les conséquences d'un cisaillement vertical

Un aéronef traversant une cellule convective en phase d'approche rencontrera des courants ascendants et descendants violents (des microrafales). Au début, le pilote remarquera une diminution de sa vitesse propre suivit d'une perte progressive de la portance. Les forces verticales des microrafales l'empêche de redresser son incidence ce qui amène par suite l'avion à toucher le sol avant la piste.

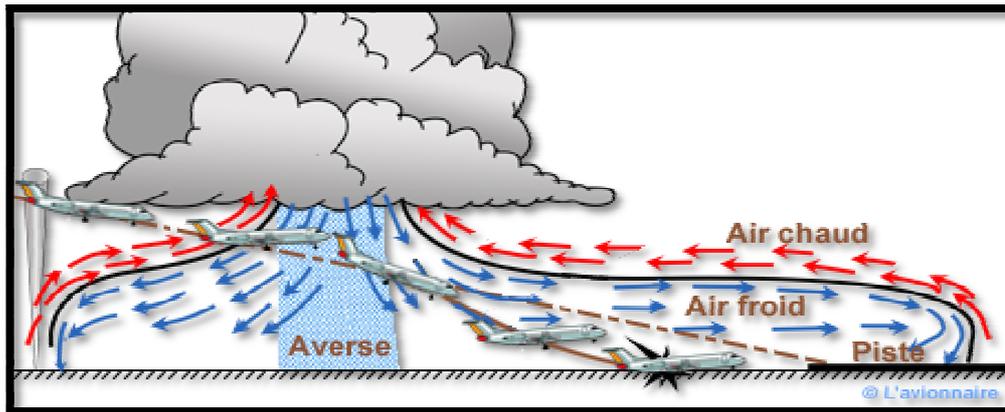


Figure II.8 : la rencontre d'une cellule convectif en phase finale.[21]

II.5 Les systèmes d'alertes (observations)

II.5.1 Le système de détection à bord

Actuellement un avertisseur de cisaillement du vent est disponible presque dans tous les avions modernes. Son principe de fonctionnement est basé sur l'évaluation continue des performances de l'avion en vol (paramètres de vol et l'accélération). L'avertissement est généré lorsque l'énergie produite par l'avion chute du seuil prédéterminé. Il peut détecter et afficher simultanément jusqu'à 8 cisaillements différents du vent [21].

II.5.2 Les systèmes de détection au sol

Plusieurs types d'appareils sont utilisés pour la détection du cisaillement de vent à basses couches aux abords des aérodromes, à ce propos on distingue :

➤ ***LLWAS (Low Level Wind Shear Alert System)***

Est un système de détection des cisaillements de vent horizontal dans les basses couches atmosphériques, développé par la FAA. Ce système été initialement composé d'un réseau d'anémomètre (entre 6 et 32) placés stratégiquement autour de l'aérodrome jusqu'à 3NM le long de la trajectoire d'approche et de départ et sont liés à un ordinateur qui calcule la variation du vent. [17, 21]

➤ ***TDWR (Terminal Doppler Weather Radar)***

Est un système de détection des cisaillements de vent vertical (les microrafales et les fronts rafales) dans les basses couches atmosphériques, développé par la NASA. L'emplacement optimal de ce type de Radar se situe entre 12 et 20Km de l'aéroport et fonctionne selon le principe d'écho sur une longueur d'onde de 3 à 10cm afin de détecter la concentration et le mouvement des hydrométéores dans l'atmosphère. Donc ce radar ne fonctionne que dans de mauvaises conditions météorologiques. [07, 17, 28]

➤ ***LIDAR vent (Light Ranging and Detection)***

Pour renforcer la capacité des radars à détecter le cisaillement de vent dans des conditions atmosphériques dégagées, un système radar appelée LIDAR a été mis au point en 1970. Le LIDAR fonctionne selon le principe (impulsion-réflexion). Il émet une pulsation laser infrarouge sur une longueur d'onde de $2\mu\text{m}$ pour détecter les mouvements des aérosols. Le LIDAR est configuré pour représenter le balayage d'un secteur sur plusieurs angles d'élévation pour contrôler les régimes de vent sur les trajectoires de montée et de descente. [17, 28]

III.1 Introduction

Le secteur de l'aviation constitue un client de premier plan pour la météorologie. La plupart des progrès réalisés dans le domaine de la prévision découle d'une volonté d'améliorer l'assistance météorologique à la navigation aérienne. Puisque le phénomène du cisaillement de vents, est considéré comme étant le plus dangereux pour l'aviation du fait qu'il a été la cause principale de plusieurs catastrophes aériennes à travers l'histoire, la détection; voir la prévision de ce phénomène sont si importantes que les tentatives d'amélioration des systèmes de prévision sont toujours en développement.

Actuellement, les prévisions météorologiques pour l'aéroport de Houari Boumediene sont assurées, régulièrement, par l'Office National de la Météorologie à travers des bulletins de prévision d'aérodrome (TAF). Ces bulletins contiennent des prévisions de plusieurs paramètres météorologiques et en particulier la vitesse et la direction du vent. Par contre ces prévisions ne donnent pas des informations sur le cisaillement horizontal/vertical du vent.

Toutefois ce produit est très important pour le service aéronautique et la sécurité de l'aéronef. Pour cela, dans ce travail, nous allons développer un programme informatique qui permet la prévision des cisaillements du vent sur l'aéroport d'Alger à partir des prévisions du modèle AROME. Ensuite, ce produit sera mis en ligne à la disposition des prévisionnistes de l'ONM afin de les aider dans l'élaboration des bulletins d'alerte pour l'Aérodrome d'Alger. En outre, à travers cette étude ; nous allons mettre en évidence la capacité du modèle AROME de prévoir les cisaillements de vents de tous types et nous allons discuter ses avantages et ses limites.

III.2 Le cisaillement du vent et l'aéroport d'Alger

III.2.1 Présentation de l'aéroport de Houari Boumediene d'Alger

Le tableau (III.1) résume l'ensemble des caractéristiques de l'aéroport international d'Alger [37].

Tableau III.1: Caractéristiques de l'aéroport Houari Boumediene d'Alger

Code OACI	DAAG
Code IATA	ALG
Date d'ouverture	1924
Coordonnées	36° 41' 36''N , 003° 12' 54''E
Altitude	25m (82 ft)
Température de référence	30.6°C
Pistes	RWY 05/23 (3500m) , RWY 09/27 (3500m)

III.2.2 Localisation géographique de l'aéroport

Les deux pistes d'Alger orientées (05/23 et 09/27), se situent sur la région du cap (Sahel Algérois) réputé par son climat méditerranéen (été chaud et sec, hiver doux et humide), entourées par l'ATLAS Blidéen du Sud-Est et de Sud-Ouest et voisinant la baie d'Alger du côté Nord-Est et Nord-Ouest (Figure III.1). Cette situation orographique est la cause principale de la manifestation des cisaillements des vents locaux générés par le système dépressionnaire des brises au alentour de l'aérodrome.



Figure III.1: Emplacement géographique de l'aéroport d'Alger

III.2.3 Le régime des vents à l'aéroport d'Alger

Les régimes de vent dans cette région sont très variables, du fait de sa variabilité orographique. A travers les observations de la station météorologique de Dar El-Beida, il a été constaté que les forces de vents peuvent atteindre 94 Km /h, une force de telle ampleur peut induire de grave répercussions pour les avions en phase d'approche et de décollage

III.2.4 Les causes du cisaillement de vent aux alentours de l'aéroport d'Alger

❖ Les brises de terre et les brises de mer

Le jour, l'air au-dessus de la terre (Sahel Algérois) est réchauffé plus rapidement que l'air au-dessus de la masse d'eau (baie d'Alger). Il s'ensuit que l'air réchauffé s'élève et est remplacé par de l'air plus froid en provenance de la mer.

En fin d'après-midi, au moment où le réchauffement est maximum, la circulation de brise de mer peut avoir une profondeur de 1500 à 3000 pieds; elle peut produire des vents de 10 à 15 nœuds et s'étendre jusqu'à 50NM dans les terres et atteindre ainsi, l'atlas Blidéen.

La nuit, la brise de mer s'estompe. Quand la terre se refroidit, il se forme une brise de terre dans la direction opposée, c'est-à-dire soufflant de la terre vers la mer. Elle n'est généralement pas aussi forte que la brise de mer mais peut parfois souffler en rafales.

Ces deux phénomènes sont à l'origine des cisaillements horizontaux sur l'aérodrome d'Alger.

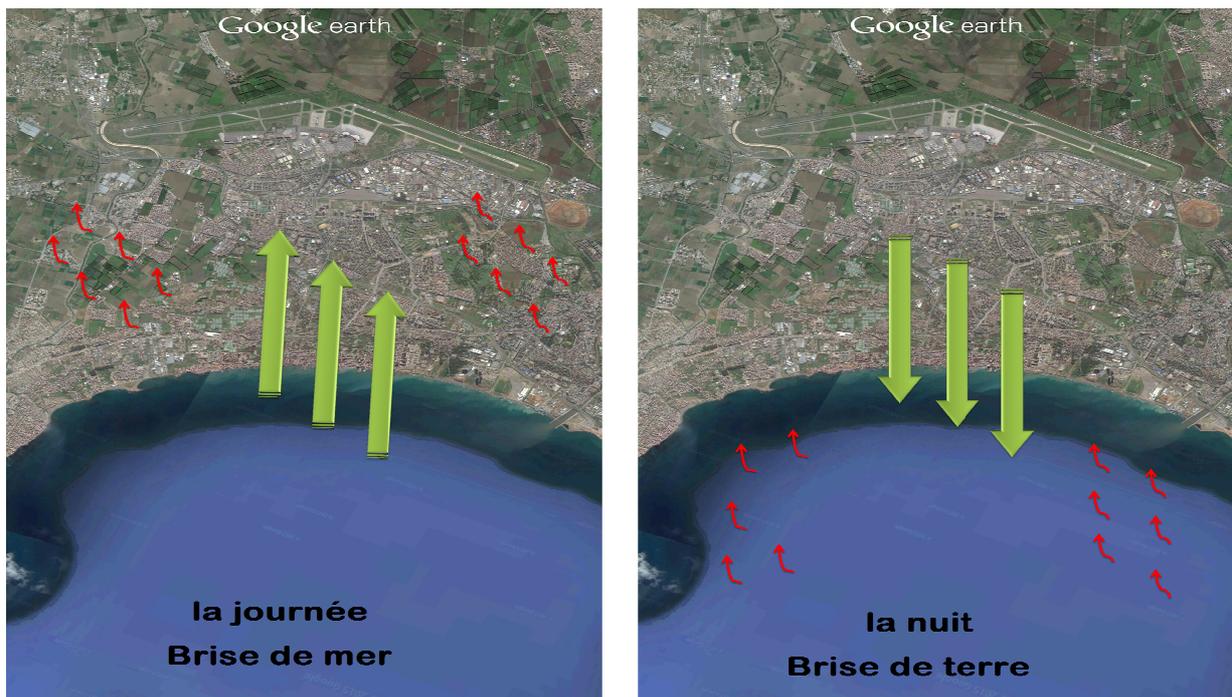


Figure III.2 : Phénomène de brise qui se produit sur les cotes d'Alger.

❖ *Perturbation des ondes orographique venant du sud*

Le vent qui se dirige du sud vers le nord traverse la chaîne montagneuse de l'atlas blidéen. Ce vent est donc perturbé du côté sous le vent d'où la naissance des cisaillements horizontaux au alentour de la région de Dar El-Beida. Ce vent est initialement déplacé vers le haut par les montagnes, redescend brusquement du côté sous le vent puis remonte et redescend en formant une série d'ondes en aval. Ces ondes sont appelées ondes sous le vent et sont des zones particulièrement favorables à la turbulence.

❖ *Le décrochage de flux maritime*

Un autre phénomène orographique qui peut être à l'origine d'un cisaillement du vent aux environs de l'aéroport d'Alger est observé lorsqu'un vent maritime soufflant du Nord, Nord-est ou du Nord-ouest. Ce vent pénètre le sahel algérois et rencontre les reliefs à forte pente générant ainsi, sur la région d'Alger, des tourbillons à axes horizontaux du côté face au vent de relief. Ces tourbillons peuvent s'organiser en vortex, qui domine toute la région du sahel.



Figure III.3 : Schémas représentatifs du décrochage du flux maritime (à gauche) et de la perturbation des ondes orographique venant du sud (à droite).

En résumé, on peut dire que l'aérodrome d'Alger subit généralement des cisaillements horizontaux (renverses) et non pas verticaux en raison de son emplacement géographique.

III.2.5 La détection du cisaillement du vent sur l'aérodrome d'Alger

Malgré que la possibilité qu'un cisaillement horizontal du vent se produit sur l'aéroport d'Alger, soit élevée, Jusqu'à maintenant il n'existe aucun moyen de détection de ce phénomène au niveau de cet aérodrome ; mis à part quelques informateurs visuels quotidiens indiquant la présence de ce phénomène. Les moyens de détection mentionnés dans le chapitre précédent ne sont disponibles que dans les grands aéroports caractérisés par des flux aériens importants ; l'installation d'un radar détecteur de cisaillement sur l'aérodrome d'Alger sera très coûteuse et compliquée car il faudra installer plusieurs radars pour pouvoir détecter tous les types. Les seules observations dont on dispose ; sont celles enregistrées par la station du Dar El- Beida.

La figure III.4 montre la position des trois anémomètres installés le long des deux pistes de l'aéroport d'Alger et la station météorologique de Dar El-Beida.

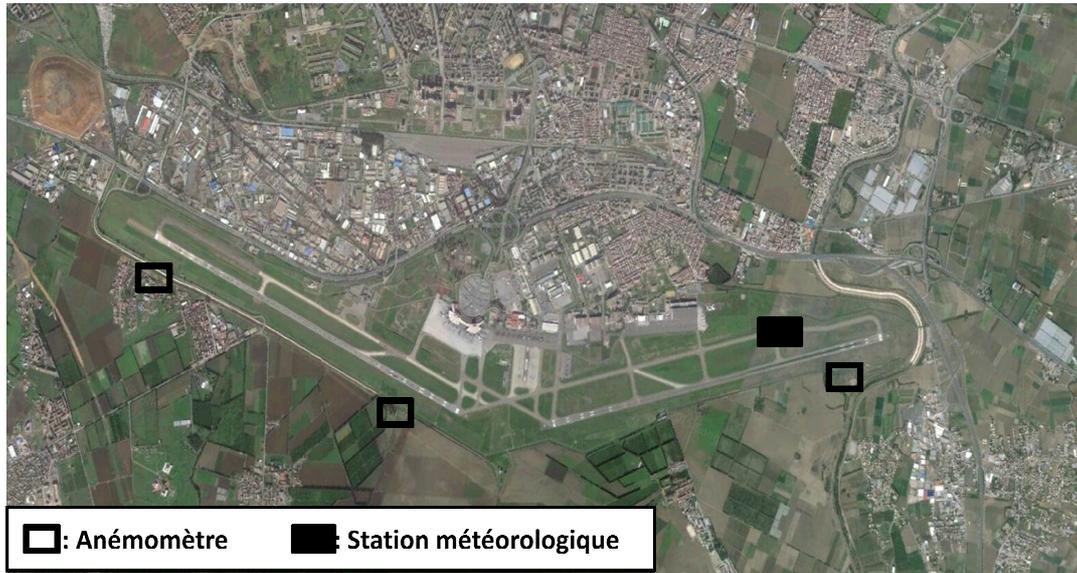


Figure III.4: Emplacement des trois anémomètres disponible sur l'aérodrome et la station météorologique du Dar El- Beida.

III.3 Aperçu sur la Prévision Numérique du Temps

III.3.1 Le principe de la Prévision numérique du temps

Le principe de la prévision numérique du temps est de simuler sur un ordinateur l'évolution de l'atmosphère de manière réaliste, plus vite qu'elle ne se déroule dans la réalité [32]. Le logiciel mettant en œuvre cette simulation est appelé un modèle de prévision numérique du temps. Le principe de la PNT est schématisé dans la figure (III.6)

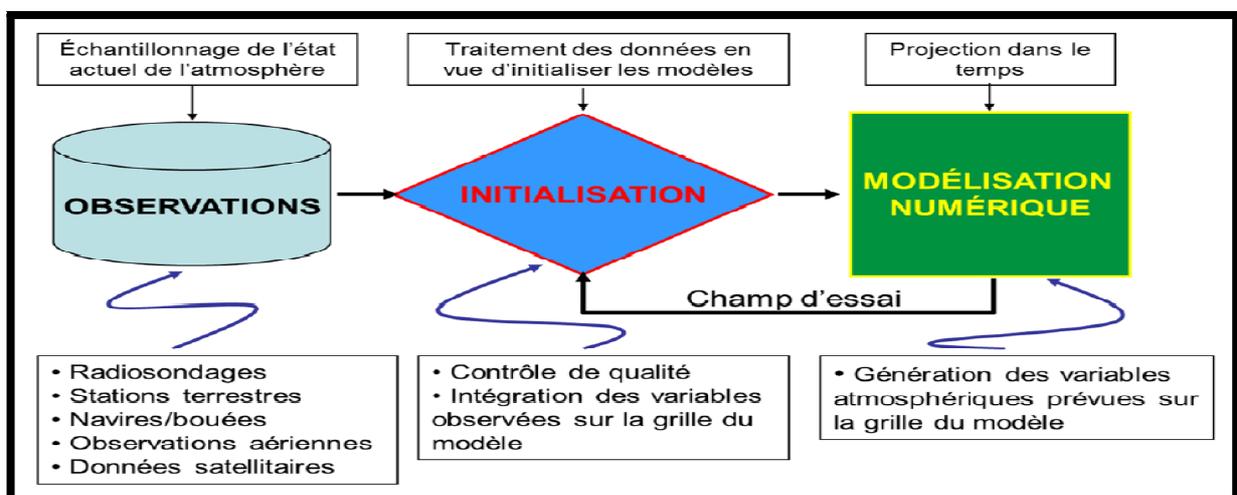


Figure III.5 :Principe de la prévision numérique du temps

- **Observations** : Les données d'observation proviennent de toutes les sources disponibles à l'échelle du globe. Elles représentent des échantillons de l'état actuel de l'atmosphère. Il faut en effet bien comprendre que l'atmosphère est un continuum et que les observations ne constituent que des échantillons de ce continuum. Par conséquent, les données d'observations ne peuvent fournir qu'une approximation de l'état actuel de l'atmosphère à un temps donné.
- **Initialisation et assimilation** : Les observations de l'atmosphère provenant de toutes les sources disponibles à l'échelle du globe devront être soumises à une assimilation des données qui consiste le processus d'estimation des conditions initiales des prévisions par une prise en compte optimale des données d'observation en tant que sources d'information [17]. Le processus d'assimilation des données a pour objectif d'intégrer les données inégalement réparties dans l'espace et dans le temps sur une grille régulière au temps voulu. Pour ce faire, des champs d'essai sont nécessaires. Sur une fenêtre d'assimilation on cherche un état initial qui conduise à une évolution du modèle passant au plus près de toutes les observations disponibles sur la période de temps considérée. Ainsi on compare les observations et l'état du modèle au temps d'observation et les équations d'évolution du modèle permettent de "convertir" l'innovation au temps d'observation en une correction de l'état du modèle au début de la fenêtre d'assimilation.
- **Modélisation numérique** : Tout d'abord, il faut établir des hypothèses cohérentes sur la nature du milieu atmosphérique et les principales interactions en jeu dans son évolution. Ensuite donner un modèle mathématique cohérent à ces hypothèses. On obtient ainsi un système d'équations différentielles non-linéaires aux conditions initiales. Les solutions du système sont des solutions approchées. On utilise alors, la numérisation qui consiste à remplacer les équations portant sur des variables continues par des équations portant sur des variables discrètes et dont les solutions sont obtenues à l'aide d'un algorithme approprié (la discrétisation). La numérisation des équations peut être effectuée en utilisant un modèle en point de grille. Le modèle en point de grille correspond à la division de l'espace en boîtes définies par une grille horizontales et par un nombre de niveaux verticaux comme le montre la figure suivante :

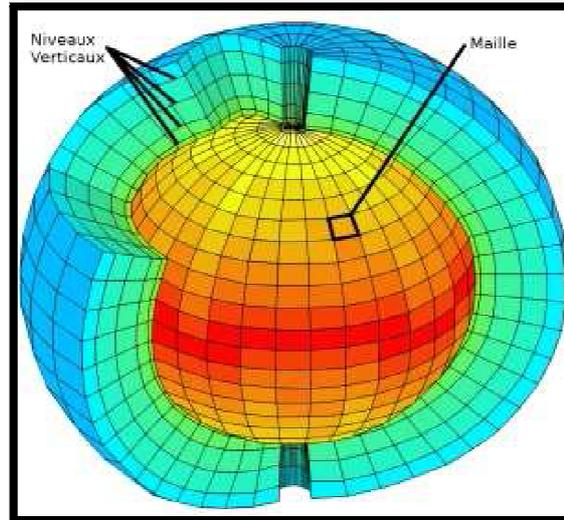


Figure III.6 :Le découpage en boîte de l'atmosphère terrestre [31].

III.3.2 Propriétés des modèles numériques de prévision de temps :

Un modèle d'atmosphère consiste en un programme informatique qui implémente un système d'équations qui sont l'expression des lois physiques régissant le comportement de l'atmosphère.

- Ce modèle est basé sur les lois de la mécanique des fluides.
- La résolution numérique par discrétisation de l'espace (mailles ou point de grille) et du temps (pas du temps).
- Les modèles utilisent les coordonnées hybrides et non pas les coordonnées de hauteur.

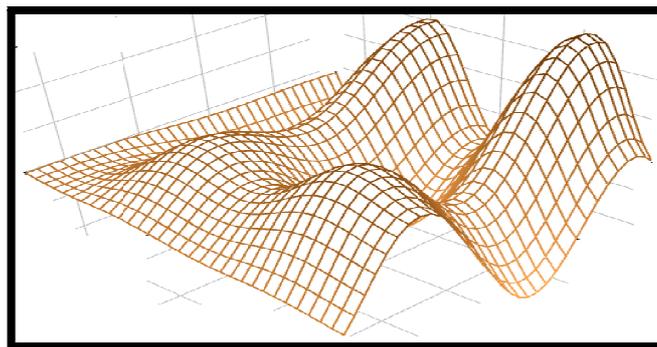


Figure III.7:Surface à coordonnées hybride (le principe utilisé par les modèles numériques de prévision du temps).

III.3.3 Les modèles de prévision numérique utilisés à L'ONM

- **Le modèle AROME**

Le modèle AROME (Application of Research to Operations at MEsoscale), est le modèle qui est utilisé pour la modélisation à échelle fine avec une résolution horizontale de l'ordre de 3 km et peut aller jusqu'à 41 niveaux en altitude ; le premier niveau est situé à 10 mètres. AROME est couplé au modèle ALADIN toutes les heures afin de lui attribuer les conditions aux bords. Ce modèle est caractérisé par sa capacité à simuler les processus physiques qui se produisent au sein des cumulonimbus, nuages à l'origine des orages [31].

- **Le modèle ALADIN**

La version opérationnelle ALADIN-Algérie couvre toute l'Algérie. Elle a une résolution horizontale de 12 km x 12 km et une résolution verticale de 70 niveaux. Le premier niveau est situé à 17 mètres et le dernier niveau à 65 kilomètres. Alimenté par les simulations d'ARPEGE. Il permet de prévoir le temps sur l'Algérie à 48 heures d'échéance. Il est couplé au modèle ARPEGE toutes les 3 heures afin de lui fournir les conditions au bord.

- **Le système d'équation à résoudre**

Equation de conservation de la masse ou équation de continuité :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

Equation de conservation de la chaleur :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = -P \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu_{\theta} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Equation du mouvement :

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x}}_{\text{Pression}} + \underbrace{\mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)}_{\text{Viscosité}} - \underbrace{2\rho\omega(w \cos\varphi - v \sin\varphi)}_{\text{Coriolis}} \\ \rho \frac{dv}{dt} &= - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial y}}_{\text{Pression}} + \underbrace{\mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)}_{\text{Viscosité}} - \underbrace{2\rho\omega u \sin\varphi}_{\text{Coriolis}} \\ \rho \frac{dw}{dt} &= \underbrace{\rho g}_{\text{Pesanteur}} - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial z}}_{\text{Pression}} + \underbrace{\mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)}_{\text{Viscosité}} - \underbrace{2\rho\omega u \cos\varphi}_{\text{Coriolis}} \end{aligned}$$

[31]

III.4 Simulations numériques des situations de cisaillement de vent sur l'aéroport d'Alger

III.4.1 Le choix de la situation météorologique

Puisque nous ne disposons d'aucune donnée concernant le cisaillement de vent, nous allons utiliser, à la place, les données de vent moyen en surface observées à la station de Dar El-Beida pour détecter les épisodes du vent fort pour l'année 2014. L'analyse de ces

données nous permet de choisir la situation météorologique du 10 Février 2014 pour cette étude. En effet, le vent maximal enregistré à la station de Dar El-Beida pour cette journée avoisine 26 m/s (Figure III.8).

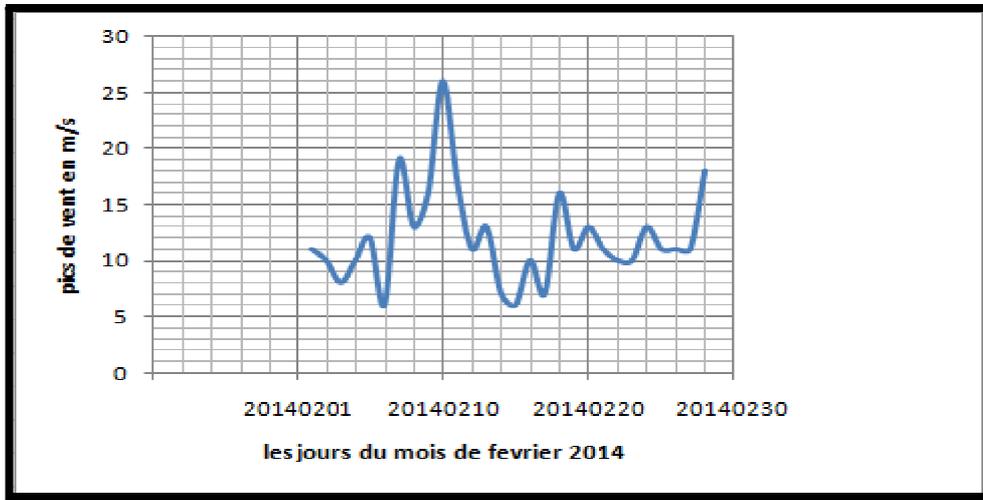


Figure III.8 : Pics de vent journaliers observés par la station du Dar El-Beida durant le mois de Février 2014.

III.4.2 Le choix du modèle de simulation

Pour notre cas d'étude, la prévision des cisaillements de vent sur le secteur de l'aéroport d'Alger se fera par le modèles AROME.

Le choix du modèle de simulation a été effectué suite aux raisons suivantes :

- **La résolution spatiale :** AROME dispose d'une maille de 3 km, soit une résolution horizontale quatre fois plus fine que celle d'ALADIN. A cette échelle, nous pouvons décrire les processus de surface et les phénomènes météorologiques de fine échelle mieux que le modèle ALADIN. En effet augmenter la résolution du modèle conduit à multiplier le nombre de points, le volume de données et les temps de calcul donc, une meilleure prévision.
- **La physique du modèle AROME :** Le modèle AROME utilise une physique plus développée et plus adapté à des phénomènes météorologique à petites échelles que le modèle ALADIN. En effet, AROME dispose de la dynamique ALADIN et la physique du modèle Méso-NH.

III.4.3 Le choix du domaine spatial de simulation

Le domaine d'étude a été choisi selon un critère très important qui est, la prise en considération des points de début d'approche initiale vers les deux pistes de l'aéroport d'Alger et nous nous sommes servi des deux cartes IAC2 et IAC3. Le secteur décrété est défini entre les latitudes 36.6850° et 36.8050° Nord et les longitudes 2.7750° et 3.6150° Est sur la grille AROME (Voir la figure III.9). A l'intérieur de ce secteur se situent les deux balises de ZEMMOURI et de MARMORA au-dessus desquelles la procédure d'approche initiale débute ; à environ 1200m d'altitude.

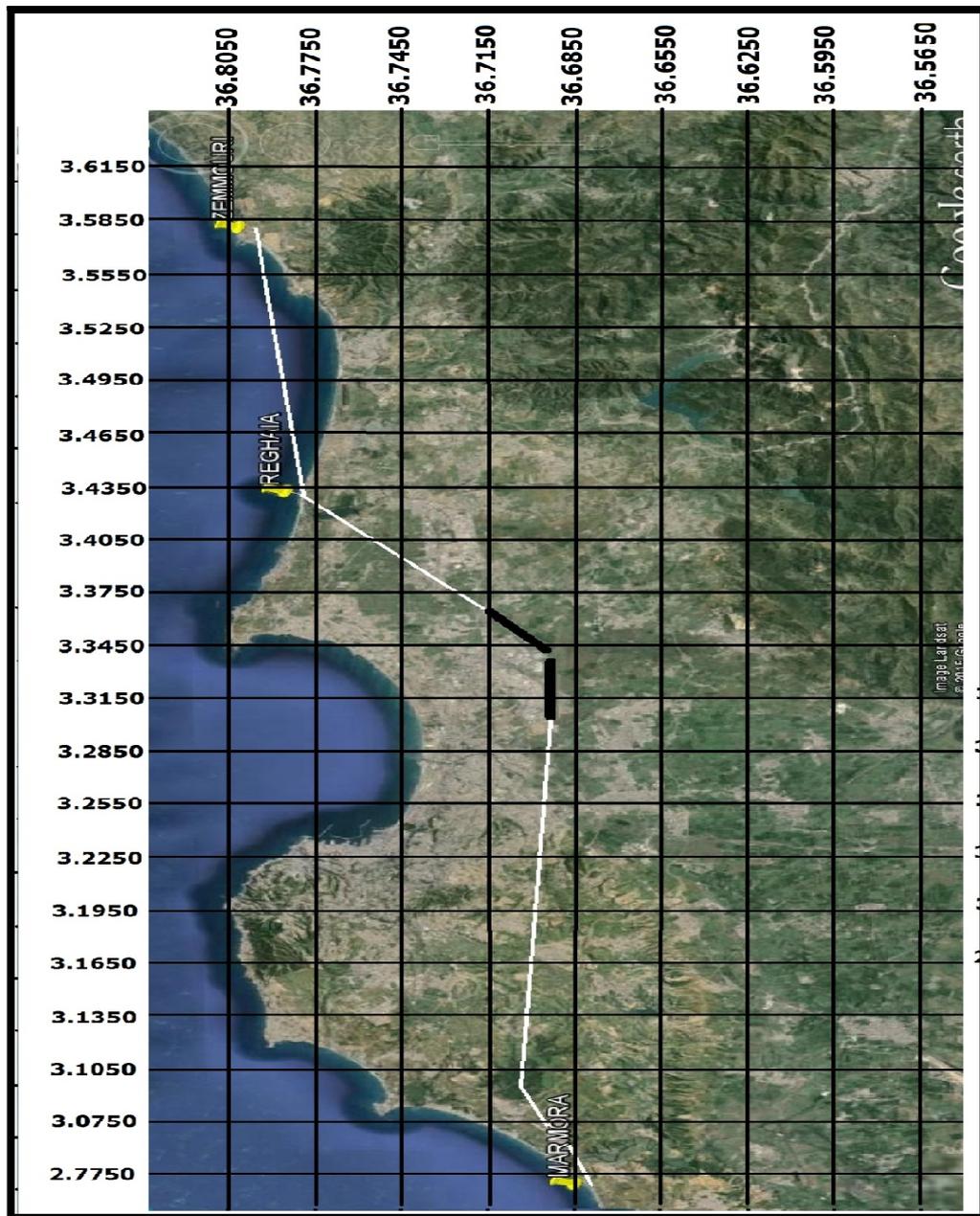


Figure III.9 : Le domaine AROME choisi pour l'étude.

A travers cette grille, on peut calculer le cisaillement du vent entre deux points de la grille sur tout le domaine d'étude. Une fois la piste de l'aéroport est localisée sur la grille du modèle, on va choisir le long de la trajectoire d'approche les points de la grille qu'il fallait utiliser pour calculer le cisaillement du vent. Le cisaillement sera calculé à partir des composantes du vent zonales et méridiennes prévues par le modèle AROME pour les 48 heures d'échéance.

Ce calcul est effectué systématiquement après avoir lancé un programme dans le modèle AROME, qui calcule la variation du profil du vent sur deux points de grille déterminés en surface ; ou en altitude pour le calcul du cisaillement vertical du vent.

Le cisaillement horizontal du vent du vent horizontal ou vertical est calculé sur le même niveau d'altitude alors que le cisaillement vertical est calculé sur deux niveaux d'altitude le long du même profil vertical.

Pour le calcul du cisaillement horizontal, on va définir 22 points de grille situés de part et d'autre le long des trajectoires d'approches des deux pistes de l'aéroport, comme le montre la figure (III.10). On choisira des niveaux d'altitudes différents pour le calcul des cisaillements du vent, en fonction de l'altitude de l'appareil à l'approche de l'aéroport.

Pour le calcul de cisaillement vertical, le principe consiste à superposer deux niveaux sur lesquels on veut calculer les cisaillements.

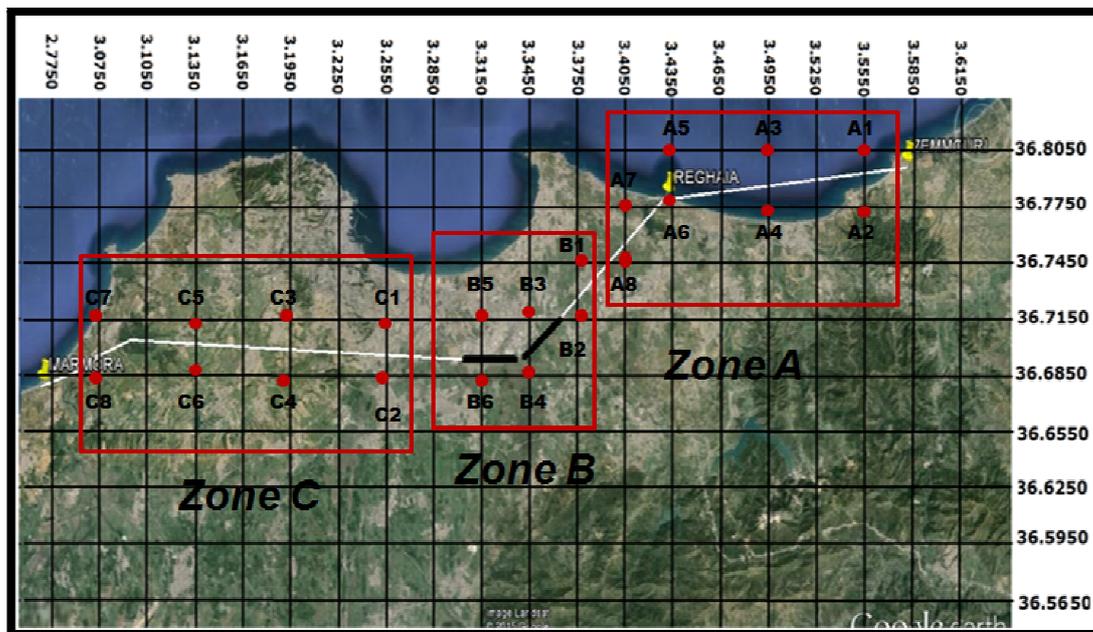


Figure III.10: Sélection des points de grille à travers lesquels on calculera le cisaillement de vent ; le long des trajectoires d'approche des deux pistes d'Alger

Le choix des points de grille est effectué d'une telle manière qu'on puisse calculer les cisaillements sur toute la trajectoire d'approche ; pour cela nous avons délimité trois zones ; chacune recouvre une partie précise du secteur d'approche comme suit :

La zone A

À l'intérieur de cette zone se situe le segment d'approche initiale ainsi que le segment intermédiaire de la piste 23. Le cisaillement horizontal dans cette zone est calculé par la variation du vent prévue sur les points de grille sélectionnée (A1-A2, A3-A4, A5-A6, A7-A8). Alors que le cisaillement vertical dans cette zone est calculé à partir de l'adjonction de deux autres grilles sur deux niveaux déterminés qui sont : le niveau supérieur et le niveau inférieur à celui choisis pour le calcul du cisaillement de vent.

Les altitudes prises en compte pour ce segment varient entre 1200 m et 330 m ; en fonction de la position de l'avion et son altitude dans cette zone.

Les niveaux AROME qui ont été sélectionnés pour le calcul du cisaillement horizontal du vent sont les suivants:

- Le niveau 1000m sur lequel se situent les points de grille A1 et A2
- Le niveau 800m sur lequel se situent les points de grille A3 et A4
- Le niveau 600m sur lequel se situent les points de grille A5 et A6
- Le niveau 200 m sur lequel se situent les points de grille A7 et A8

La zone B

À l'intérieur de cette zone, se situent les deux pistes d'Alger et une partie des approches finales vers les deux pistes; la prévision des cisaillements de vent dans cette zone va se faire en surface à une hauteur standard (10 m) ; car l'évolution des aéronefs à l'intérieur de cette région s'effectue au sol.

- En surface la prévision du vent avec le modèle AROME s'effectue à une hauteur de 10m; donc, les cisaillements étudiés dans la zone B sont ceux prévus sur le niveau 10 m ; sur lequel se situent les points de grille de la zone B : B1-B2, B3-B4, B5-B6.

La zone C

À l'intérieur de cette zone se situe le segment d'approche initiale ainsi que le segment intermédiaire de la piste 27. Le cisaillement horizontal dans cette zone est calculé par la

variation des vents prévus sur les points de grilles sélectionnées (C1-C2, C3-C4, C5-C6, C7-C8). Alors que le cisaillement vertical est calculé à partir de l'adjonction de deux autres grilles sur deux niveaux déterminés qui sont : le niveau supérieur et le niveau inférieur à celui choisis pour le calcul du cisaillement de vent. Les altitudes prises en compte pour ce segment varient entre 1200 m et 330 m.

Pour cela on choisira les niveaux AROME: 1000m, 800m, 600m, 400m qui correspondent aux niveaux 3, 5, 7 et 9 et sur lesquels se situent les points (C1 et C2), (C3 et C4), (C5 et C6), (C7 et C8) respectivement.

Les niveaux en altitude qui ont été sélectionnés pour le calcul du cisaillement vertical du vent dans les zones A et C sont les suivants:

- La superposition des deux niveaux (1100 m – 900 m) qui va nous permettre de calculer les cisaillements verticaux des vents horizontaux et verticaux sur le niveau 1000m.
- La superposition des deux niveaux (900 m – 700 m) qui va nous permettre de calculer les cisaillements verticaux des vents horizontaux et verticaux sur le niveau 800m.
- La superposition des deux niveaux (700 m – 500 m) qui va nous permettre de calculer les cisaillements verticaux des vents horizontaux et verticaux sur le niveau 600m.
- La superposition des deux niveaux (500 m – 300 m) qui va nous permettre de calculer les cisaillements verticaux des vents horizontaux et verticaux sur le niveau 400m.
- La superposition des deux niveaux (2 m – 50 m) qui va nous permettre de calculer les cisaillements verticaux des vents horizontaux et verticaux sur la surface de l'aéroport d'Alger. (sur la zone B)

III. 4.4 L'extraction des données

Pour l'étude de la situation du 10/02/2014 et calculer les cisaillements du vent, nous avons besoin des données du vent en surface et en altitude. Ces données comportent :

1. Les prévisions du vent moyen horizontal en surface : clsu et clsv ; qui sont exploités dans le programme pour le calcul du cisaillement horizontal du vent horizontal à l'intérieur de la zone B
2. Les prévisions des pics du vent moyen horizontal en surface : uraf et vraf, qu'on a utilisés pour faire une comparaison entre le vent maximal et le cisaillement en surface.

3. Les prévisions du vent moyen horizontal en altitude : u et v ; qui sont exploités dans le programme pour le calcul de :
 - Cisaillement horizontal du vent horizontal en altitude, sur les niveaux (200m, 400m, 600m, 800m, 1000m) à l'intérieur des zones A et B.
 - Cisaillement vertical du vent horizontal ; par superposition des niveaux déjà cités.

4. Les prévisions des vents moyen vertical en altitude : w ; qui sont exploités dans le programme pour le calcul de :
 - Cisaillement horizontal du vent vertical en altitude, sur les niveaux (200m, 400m, 600m, 800m, 1000m) à l'intérieur des zones A et B.
 - Cisaillement vertical du vent vertical sur les niveaux (200m, 400m, 600m, 800m, 1000m) à l'intérieur des zones A et B.

III.4.5 Comparaison entre les observations et les prévisions en surface à (25)

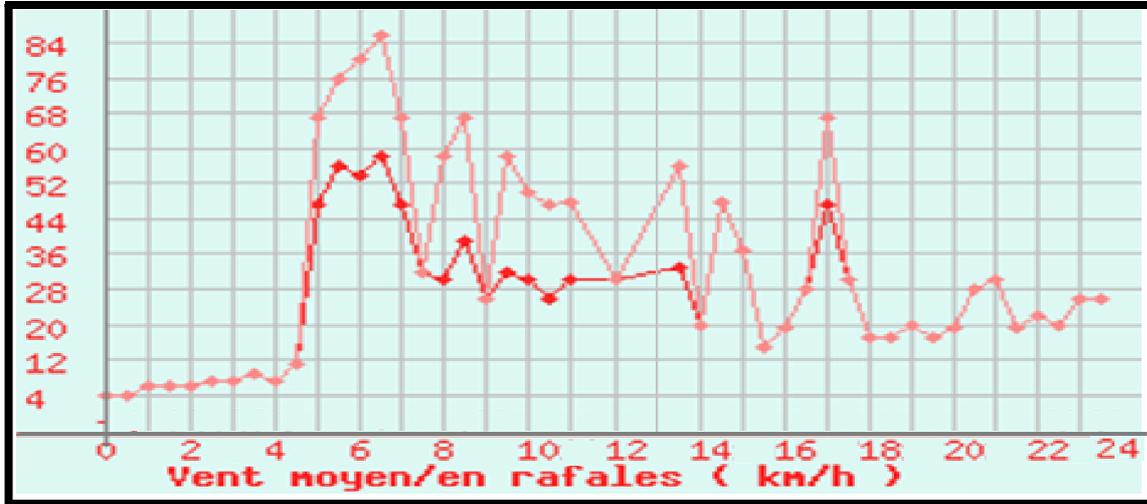


Figure III.11: Observations des vents moyens (courbe en rouge) et des rafales de vent (courbe en rose) de la station du Dar El Beida à 25 m d'altitude pour la journée du 11/02/2014.

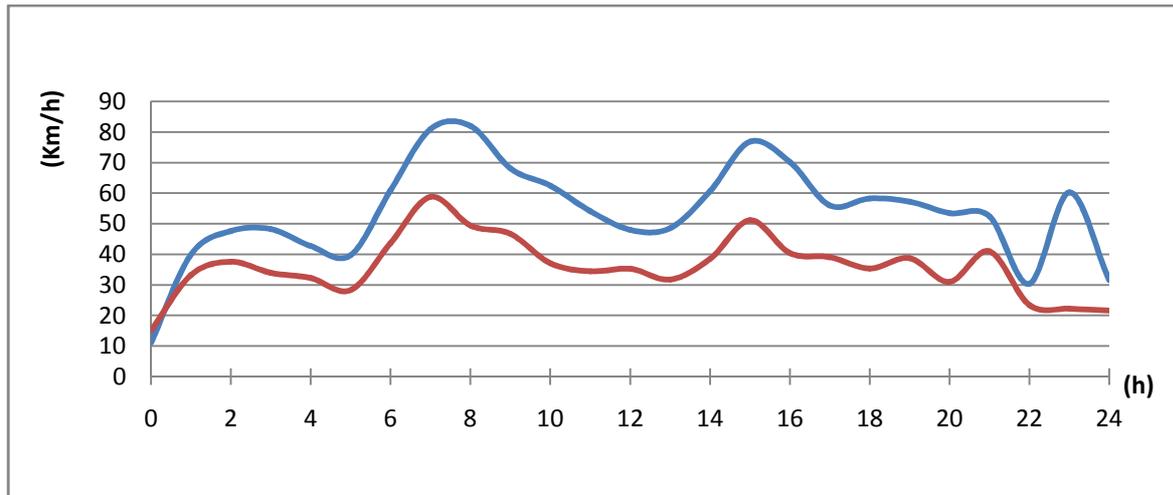


Figure III.12 :Prévisions AROME du vent moyen (courbe en bleu) et des rafales de vent (courbe en rouge) sur le secteur du Dar El Beida à 25 m d'altitude pour la situation du 11/02/2014.

Les données d'observations et les résultats de prévision ne sont pas identiques mais, ils sont plutôt, rapprochés et cela peut être dû aux imprécisions des instruments de mesure. Le pic a été enregistré à 7 :00 UTC pour les deux résultats avec une intensité au alentour de 26 m/s.

III.5 Les résultats de simulation

III.5.1 Les vents en altitude

L'analyse des résultats de prévision du vent en surface et en altitude avec le modèle AROME pour la situation du 10/02/2014 nous permet de constater que cette journée est caractérisée par des vents assez forts qui peuvent atteindre une intensité de 34 m/s dans certain région et a tous les niveaux. On remarque que les vents sont caractérisés par une variabilité spatio-temporelle très marquante. Car la circulation atmosphérique au nord de l'Algérie est perturbée par la présence des reliefs et la diversité des caractéristiques de la surface (mer, continent, forêt..). Ces prévisions sur 48 heures d'échéances révèlent l'existence de deux flux à mi journée sur tous les niveaux: le flux méditerranéen orienté Sud-Est qui découle du large de l'archipel du Madère et le flux saharien orienté vers le nord venant des régions du sud de l'Algérie passant par la chaîne montagneuse de l'atlas saharien. La confrontation des deux flux au niveau des régions semi aride sur les hauts plateaux au centre du pays représente le siège d'un cisaillement horizontal de vent en surface et un cisaillement vertical du vent en altitude. Ce front turbulent continuera, ainsi, son parcours vers l'atlas tellien et le littoral algérien.

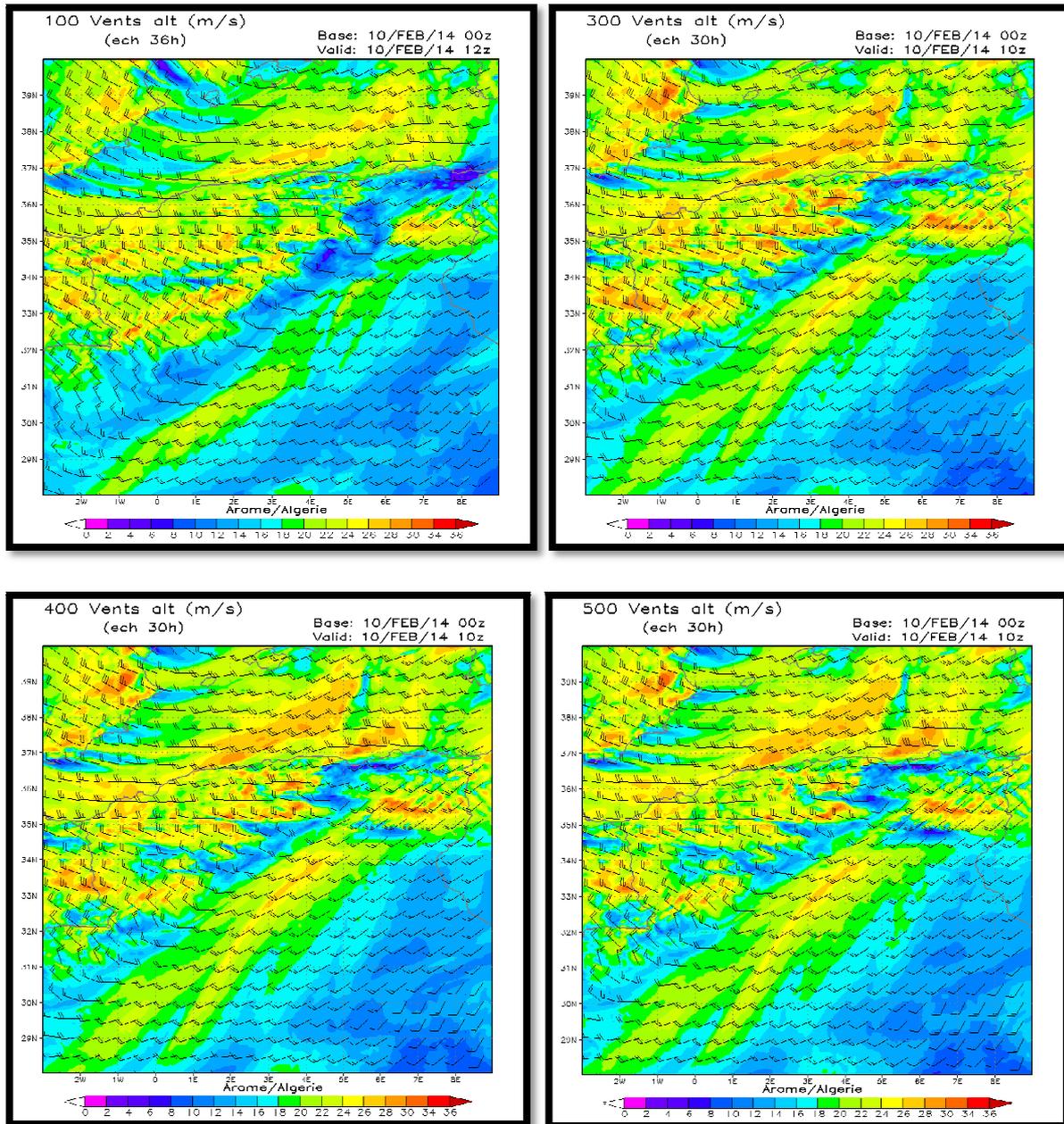


Figure III.13: cartes de prévision d'intensité et de direction de vent en altitude avec le modèle AROME.

Les vents enregistrés par le modèle durant cette période sur le nord de l'Algérie ont dépassés 20 m/s d'intensité avec des pics de 34 m/s sur les niveaux 100, 300, 400 et 500 m. On remarque aussi une variabilité très marqué des directions de vent dans presque tous les niveaux analysés [figure III.13].

III.5.2 Les vents en surface à 10m

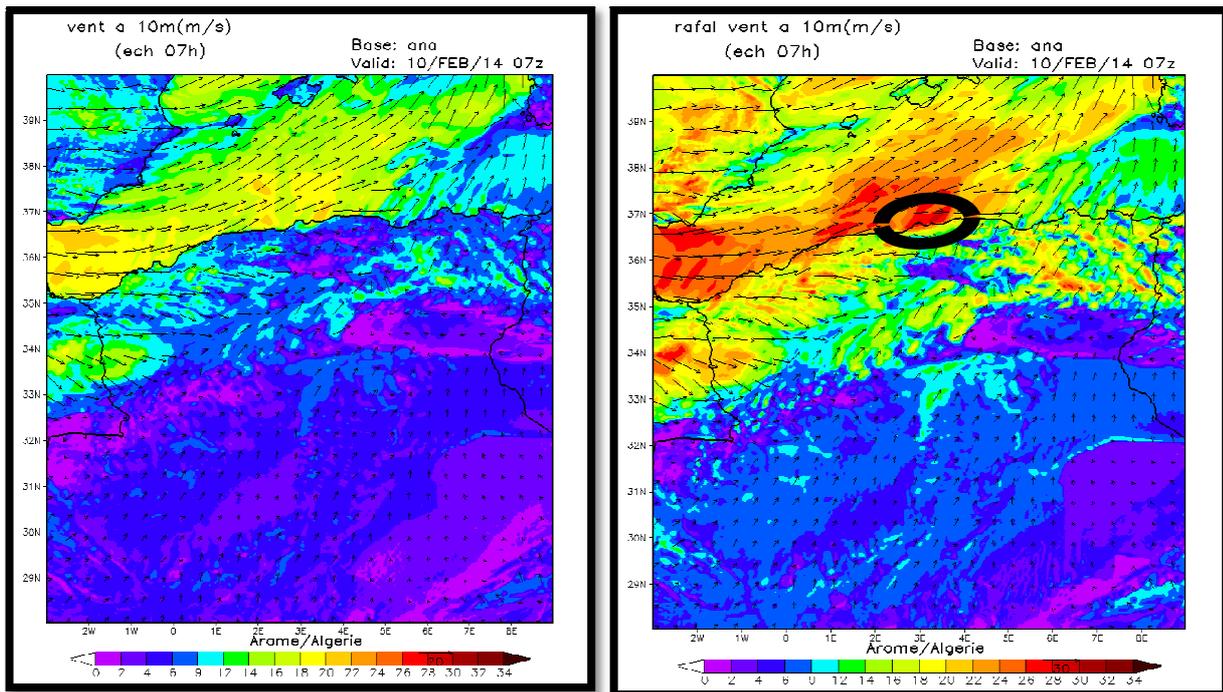


Figure III.14 : Carte de prévision des vents moyens en surface (à gauche) et des rafales de vent en surface (à droite).

En surface (10 m), on retrouve des vents assez forts avec des directions très variables durant la journée. Sur la figure III.12 (à gauche), les vents horizontaux moyens prévus en surface à 7 :00 utc sont de l'ordre de 12-16 m/s sur les côtes d'Alger. Les rafales prévus pour le modèle AROME à la même heure sont de l'ordre 26-28 m/s sur les côtes d'Alger. Les simulations AROME sont compatibles avec les résultats d'observations pour la région d'Alger.

III.5.3 Les cisaillements horizontaux prévus pour la journée de 10/02/2014

❖ La zone A :

Les résultats des cisaillements horizontaux prévus sur la zone A pour 48 échéances ; sont présentés sous forme de graph contenant la force du vent et le cisaillement et la direction du vent est représentée par la rose des vents.

Pour illustration, on s'intéresse aux valeurs maximales de cisaillement du vent. Ces valeurs correspondent au cisaillement 4 qui représente le niveau 200 m.

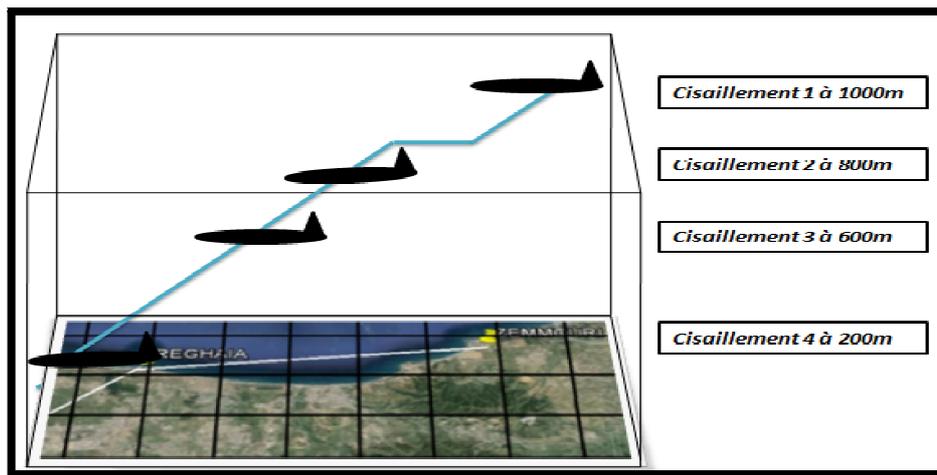


Figure III.15 :coupe verticale de la zone A

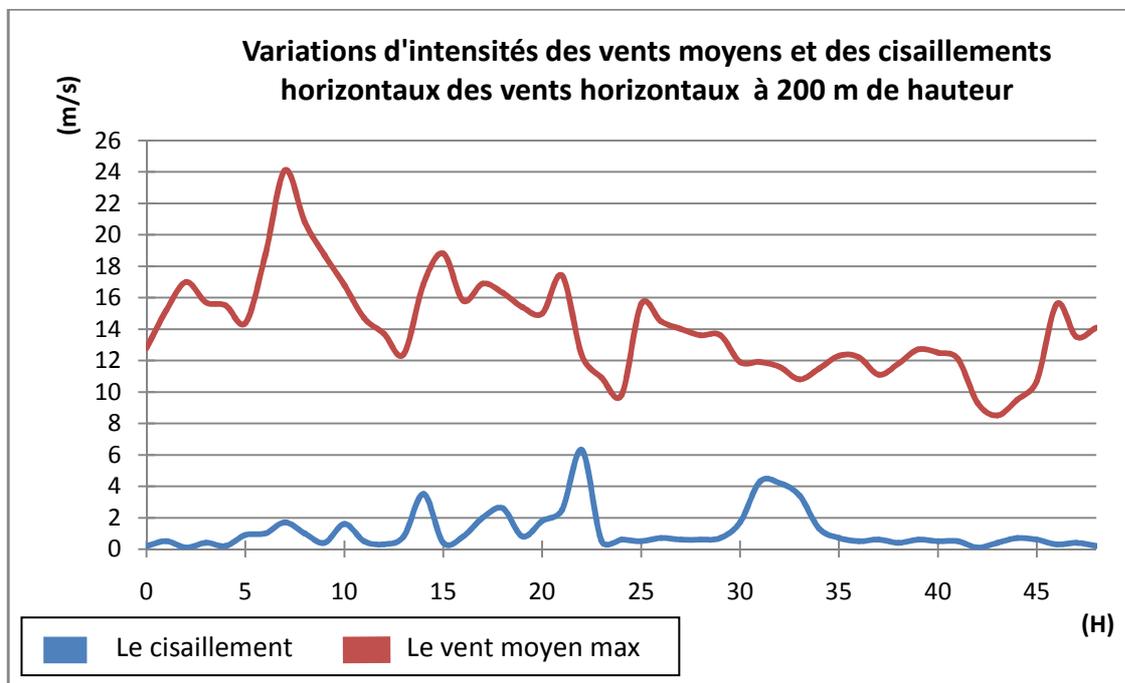


Figure III.16 : résultats de prévision des vents moyens max et des cisaillements des vents horizontaux sur le niveau 200 m.

La figure III.15 représente l'évolution temporelle des forces des cisaillements horizontaux des vents horizontaux comparés aux forces des vents moyens maximaux sur le niveau 200 m pour les 48 heures d'échéances. Le pic du vent a été enregistré à 7:00 utc. Les intensités des cisaillements ne sont pas trop importantes comparant à celles des vents moyens et le plus considérable a été prévu à environ 21:00 utc avec une intensité de 7 m /s. D'après ces courbes, on peut dire que la présence des vents forts en altitude n'implique pas forcément la présence de forts cisaillements.

La variation des directions des cisaillements horizontaux des vents horizontaux sur le niveau 200 m sont données sous forme de rose des vents pour qu'on puisse visualiser l'ampleur de ces fluctuations sur 48 heures d'échéances. L'analyse de la rose des vents ci-dessous nous montre qu'au niveau 200m, la variation des directions des vents est très marquante. Le cisaillement apparaît dans toutes les directions. On peut donc dire qu'à haute altitude, la variabilité des directions de vent l'emporte sur la variabilité des forces de vent et cela peut être expliqué par la topographie de la région d'Alger.

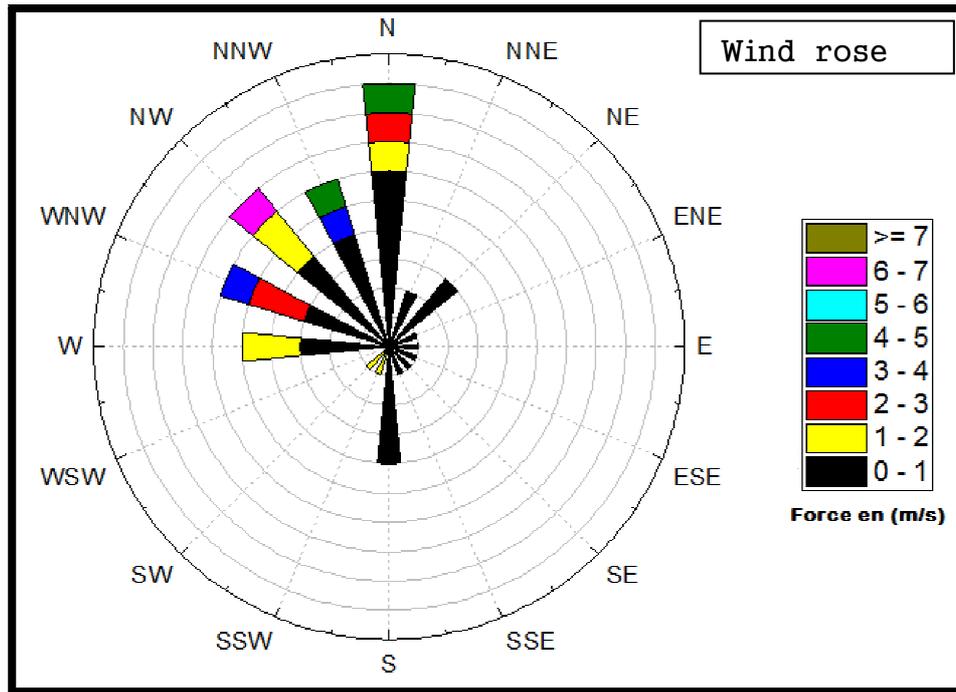


Figure III.17: les directions des cisaillements prévus sur le niveau 200 m

La figure III.16 représente l'évolution temporelle des cisaillements horizontaux des vents verticaux pour 48 heures d'échéances. A travers cette courbe on peut percevoir à la fois, la force et la direction du cisaillement.

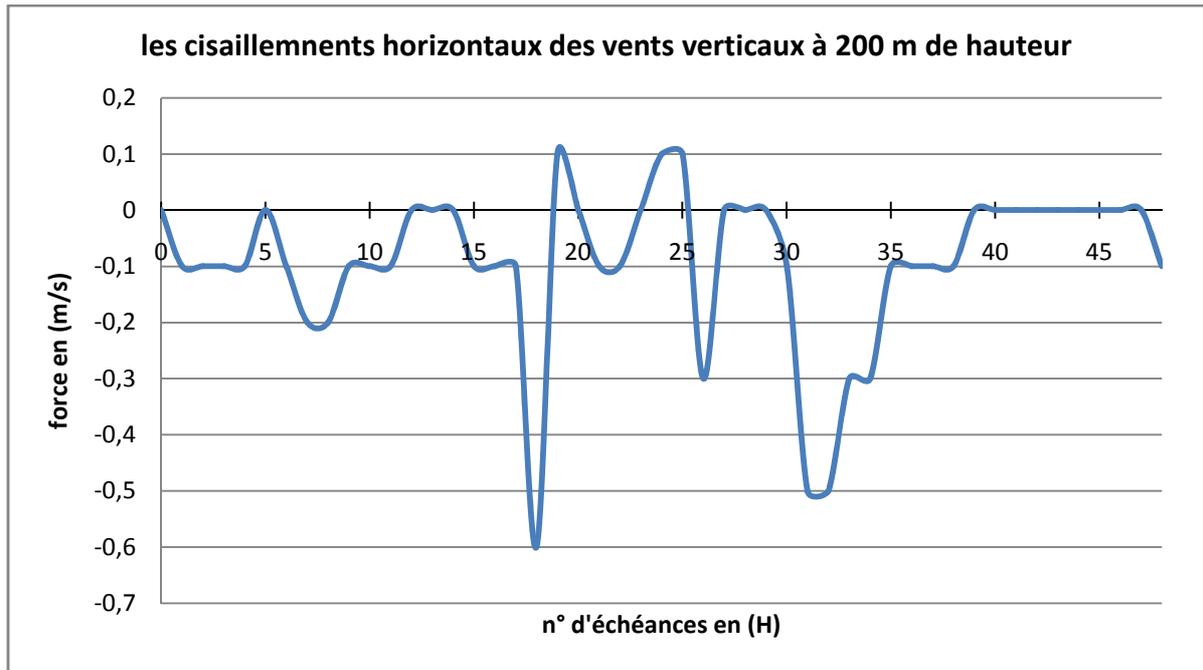


Figure III.18 :résultats de prévision des cisaillements des vents verticaux sur le niveau 200 m
 Les cisaillements illustrés sur cette figure sont très variable, les mouvements descendants prédominent les mouvements ascendants avec des forces qui ne dépassent pas 0.6 m/s. La situation étudiée ne mentionne pas la présence des nuages convectifs ou des orages ou toute autre source apparition des microrafales (cisaillements des vents verticaux) menaçant ; c'est pour cette raison que les forces prévues avec le modèle AROME restent minime le long de période de prévision.

❖ Zone B

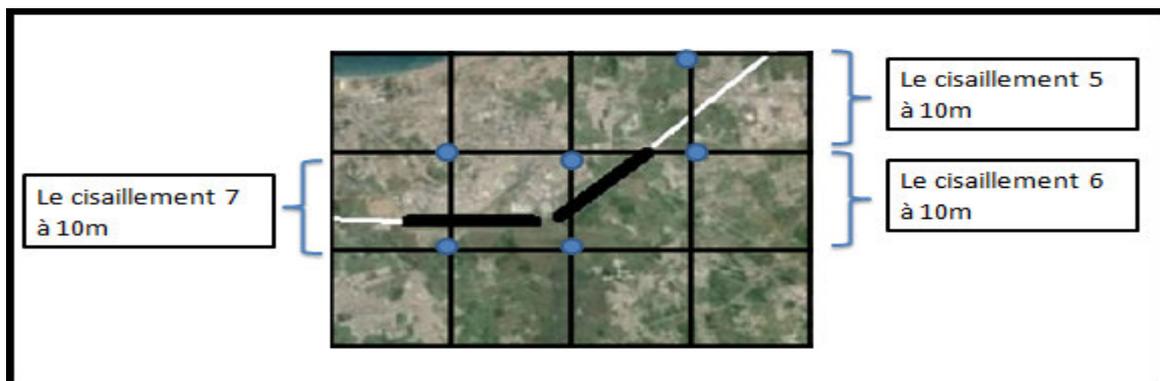


Figure III.19 :Coupe verticale de la zone B

Les résultats des cisaillements horizontaux prévus sur la zone B pour 48 échéances sont aussi présentés sous forme de graphe pour les forces du vent et de cisaillement. Les directions des cisaillements sont représentées par la rose du vent.

A partir de ces résultats de prévision, nous avons choisis d'illustrer les résultats du cisaillement 6 prévus à la surface de l'aérodrome pour les deux jours du 10 et du 11 Février 2014 puisque ces résultats représente le cas le plus défavorable pour cette situation .

La figure III.19 représente les courbes d'évolution temporelle des vents moyens maximaux (le graphe en rouge) ainsi que des cisaillements horizontaux des vents horizontaux (le graphe en bleu), prévues avec le modèles AROME en surface (10 m), pour 48heures d'échéances.

Après analyse ; on remarque que les cisaillements en surface sont corrélatifs avec les vents, c'est-à-dire qu'un vent fort implique un fort cisaillement du vent horizontal et dans certain cas ils dépassent la force du vent ; comme le cas du cisaillement prévu à 20:00 UTC de la journée du 10/02/2014 et à 16:00 UTC de la journée du 11/02/2014. Car en présence d'obstacle le vent devient très turbulent et sa direction est très variable. Le pic enregistré pour cette situation en surface atteint 26 m/s ce résultat coïncide celui prévus à 7:00 UTC sur la carte de vent en surface et celui observé par la station météorologique. Ce pic est accompagné d'un cisaillement maximal qui s'élève à 15 m/s ; un cisaillement horizontal qui aurait pu poser des dommages aux avions à proximité du sol, lors de son surgissement.

Les directions des cisaillements horizontaux des vents horizontaux en surface prévue par le modèle AROME pour 48 heures d'échéances sont représentées par la rose du vent (figure III.20). On remarque une forte variabilité de la direction de vent ; et cela peut être lié, comme nous l'avons déjà expliqué, à la forte rugosité du terrain parcouru (présence d'obstacles :relief, bâtiments, installations...). Les cisaillements horizontaux des vents verticaux en surface sont pratiquement nuls; car même s'il existe des microrafales en altitude, lorsqu'elles arrivent à proximité du sol, elles s'étalent horizontalement sous forme de vortex qui s'intègrent par suite aux vents horizontaux.

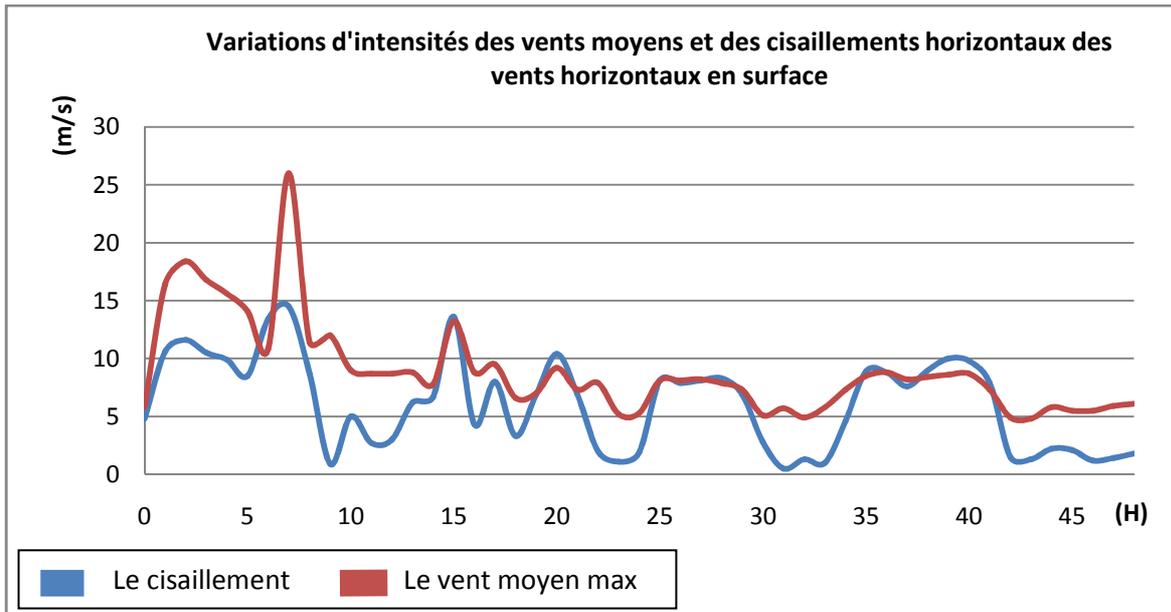


Figure III.20: résultats de prévision des vents moyens max et des cisaillements des vents horizontaux en surface.

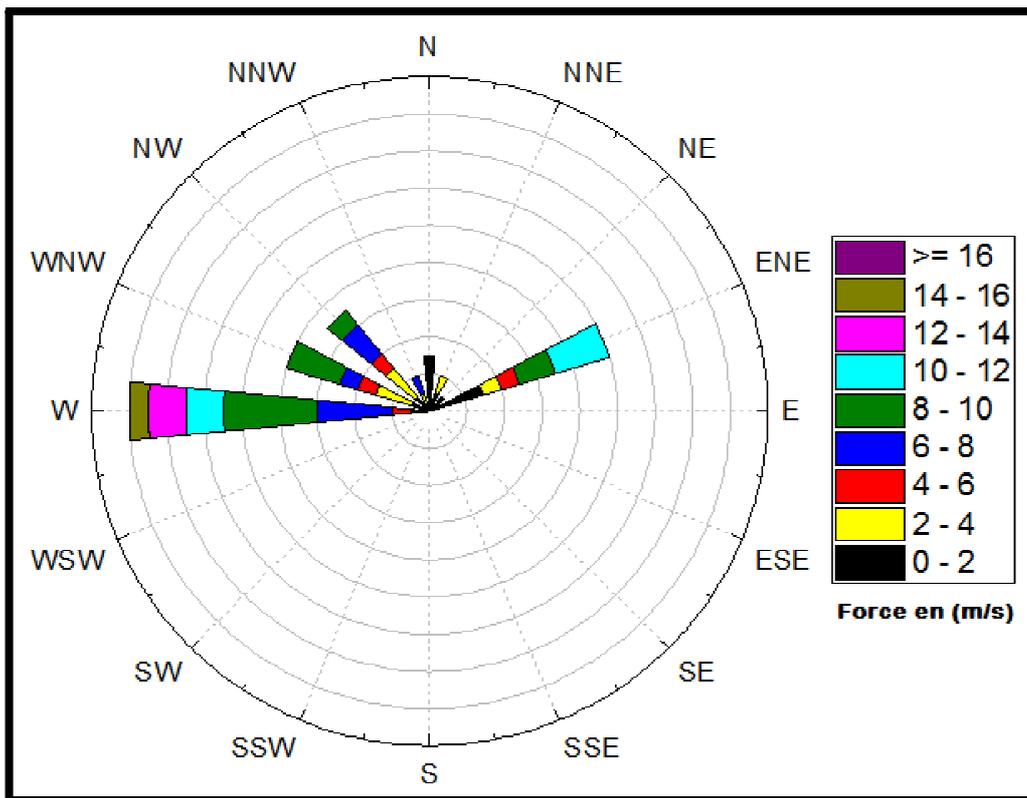


Figure III.21: les directions des cisaillements prévus en surface.

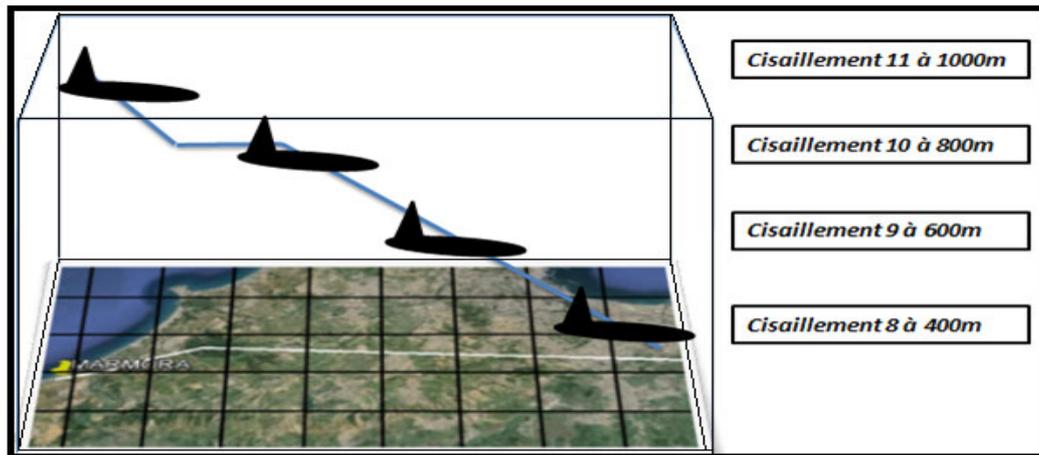
❖ *Zone C*

Figure III.22 : coupe verticale de la zone C

Tous comme dans les cas précédents, les résultats des cisaillements horizontaux prévus sur la zone C pour 48 échéances sont présentés sous forme de graph. Tandis que les directions du vent sont montrées par la rose du vent.

A partir de ces résultats de prévision, nous allons présenter ; ceux de la situations du cisaillement 10 prévus sur le niveau 800 m pour illustrer les cisaillements des vents horizontaux ainsi que ceux du cisaillement 11 à 1000 m pour illustrer les cisaillements des vents verticaux respectivement :

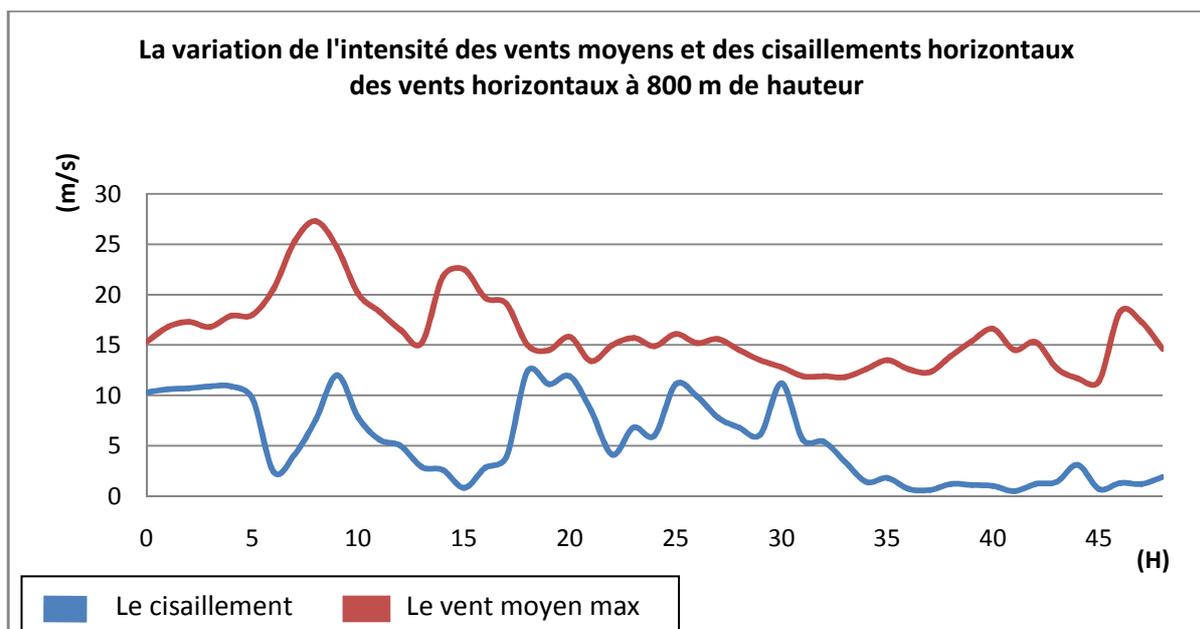


Figure III.23 : Résultats de prévision des vents moyens max et des cisaillements des vents horizontaux sur le niveau 800 m.

La figure III.23 représente les courbes d'évolutions temporelles des forces des vents moyens maximaux (en rouge) et des cisaillements horizontaux des vents horizontaux (en bleu) prévus à 800 m par le modèle AROME pour 48 heures d'échéances.

AROME prévoit des cisaillements modérés avec une intensité maximale de 12 m/s à environ 09 :00 UTC, 19 :00 UTC de la journée du 10/02/2014 et à 06 :00 UTC de la journée du 11/02/2014 ; cela peut être lié au phénomène de brise puisque les pic sont enregistrés soit le matin après le levé du soleil (brise de terre) ou le soir après le couché du soleil (brise de mer).

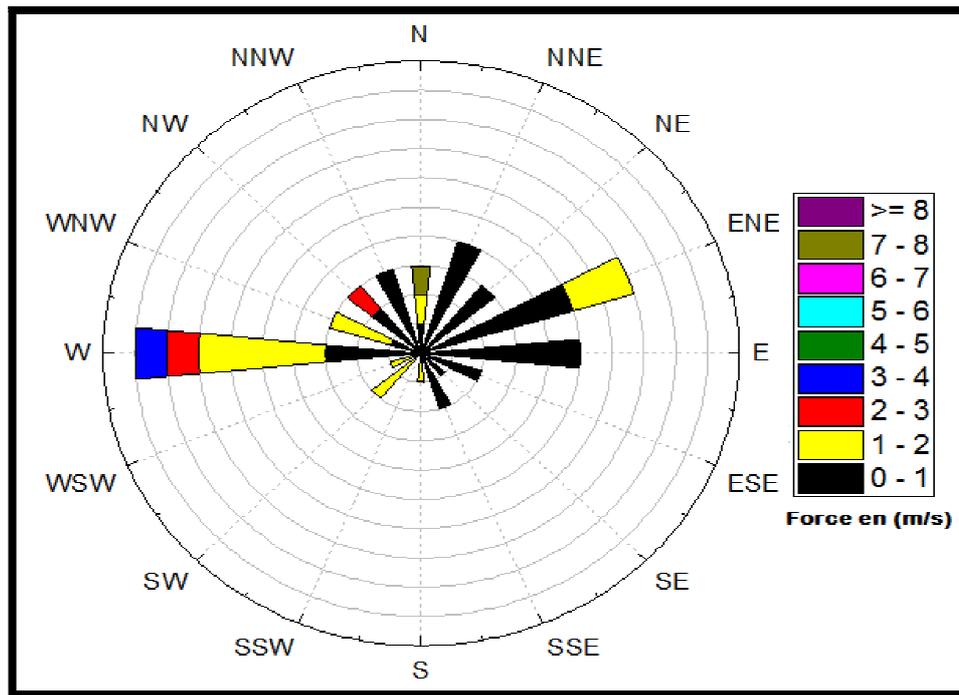


Figure III.24 : les directions des cisaillements prévus sur le niveau 800 m.

La figure III.24 représente la variation des directions des cisaillements horizontaux des vents horizontaux prévues sur la zone C par le modèle AROME à 800 m d'altitude pour 48 heures d'échéances. Les fluctuations sur ce niveau sont remarquables. Cette grande variation de direction peut fortement être liée à zone de rencontre des vents locaux et les vents synoptiques vu que l'altitude 800 m est très proche de la limite supérieure de la couche limite atmosphérique.

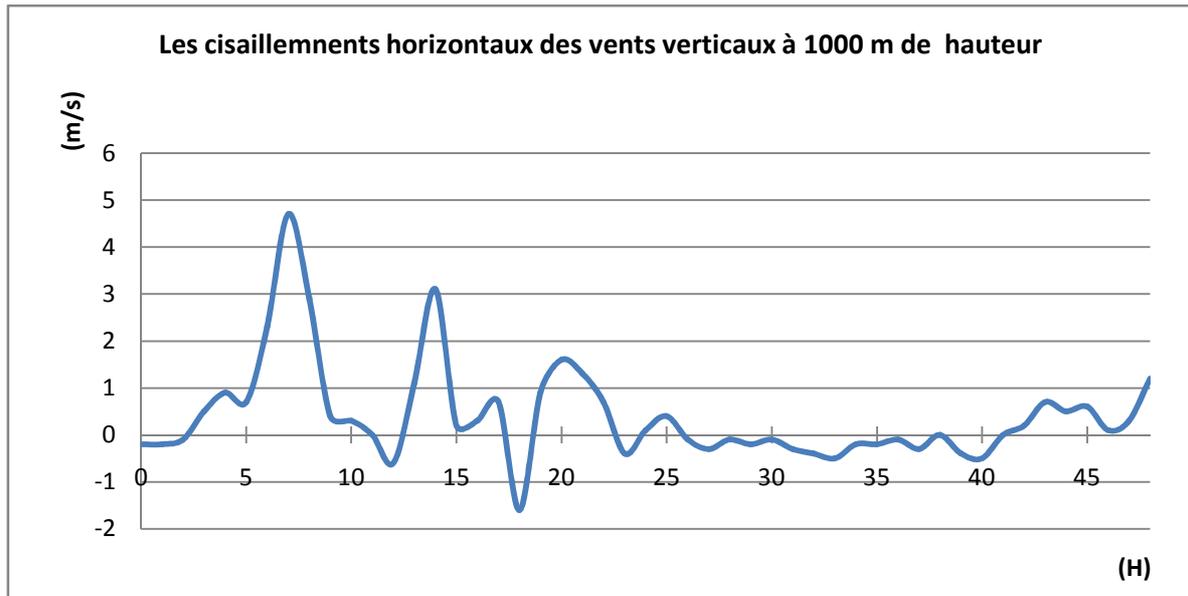


Figure III.25: résultats de prévision des cisaillements des vents verticaux sur le niveau 1000 m

La figure III.25 représente l'évolution temporelle des forces et des directions des cisaillements horizontaux des vents verticaux prévus avec le modèle AROME sur la zone C à 1000 m d'altitude par rapport au sol pour 48 heures d'échéances. On remarque qu'une rafale avec une intensité de 4.8 m/s a été enregistrée par le modèle à environ 7 :00 UTC ; en analysant les courbes des niveaux inférieurs on remarque l'absence de rafale donc ; on peut dire que le pic prévu à 1000 m est une séquelle d'une situation d'orage qui se développe en dehors de la couche limite atmosphérique. Mis à part cette rafale, les cisaillements restent très faibles tout le long de la période de prévision.

III.5.4 Les cisaillements verticaux prévus pour la journée du 10/02/2014

Les résultats des cisaillements verticaux prévus sur les niveaux déjà cités ; sont présentés sous forme de carte météorologique contenant les forces et les directions des cisaillements verticaux des vents horizontaux. L'avantage de ces cartes c'est qu'on puisse présenter le cisaillement vertical sur n'importe quel point de grille AROME car le concept se résume au calcul de la variation des profile de vent sur deux points de grille séparés en altitude et non pas en surface par superposition de niveaux. Mais dans le cadre de ce chapitre, nous nous limitons à l'étude du secteur précédent.

❖ *Cisaillements verticaux des vents horizontaux*

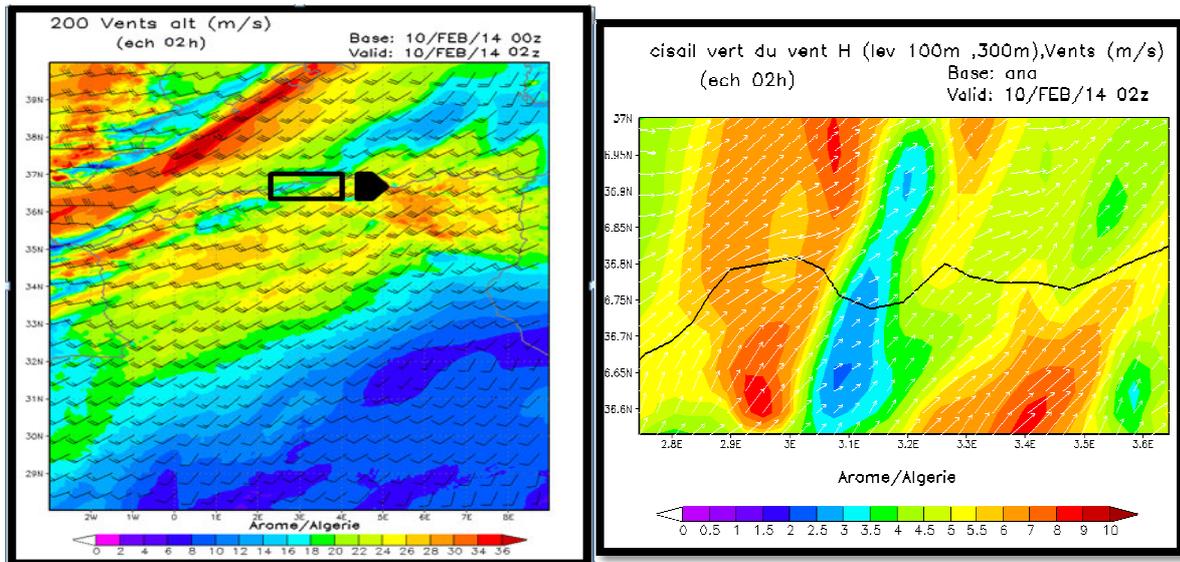


Figure III.26: les résultats de prévision des vents moyens et des cisaillements verticaux des vents horizontaux sur le niveau 200 m.

La figure III.26 représente les vitesses et les directions des cisaillements sur le niveau 200m ; obtenu par la superposition des niveaux 100 m et 300 m pour la situation du 10/02/2014. Le modèle AROME a prévu des cisaillements verticaux assez puissants sur notre zone d'étude. Le cas le plus critique a été enregistré à 2 :00 UTC, avec des vitesses qui atteignent 9 m/s sur certaines parties et une variabilité des directions très prononcée surtout aux alentours des trajectoires d'approches vers l'aérodrome ou des cisaillements orientés Nord -Est sont déterminés.

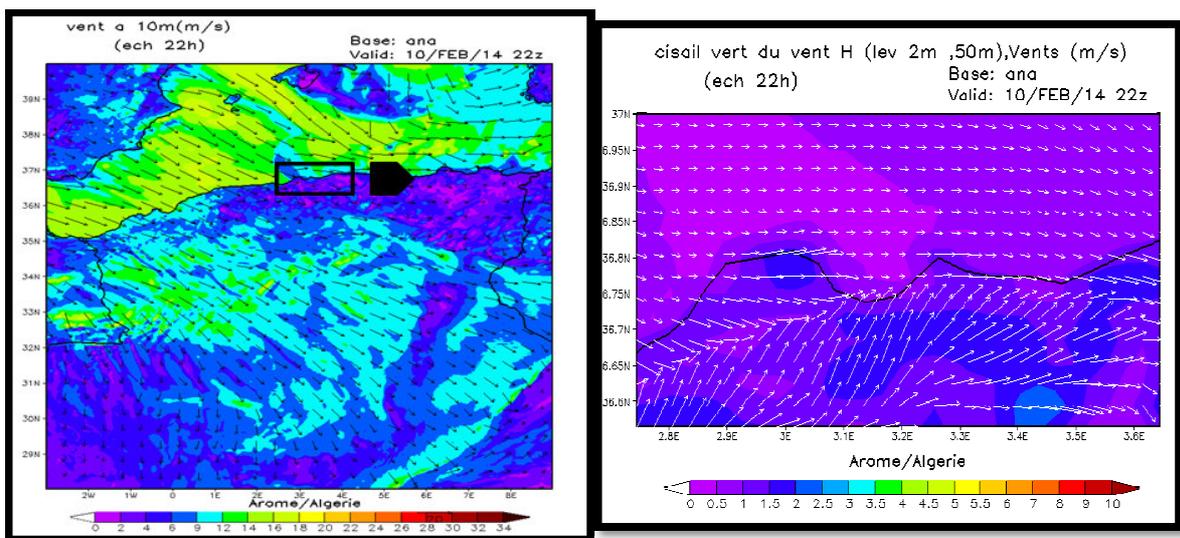


Figure III.27: Prévision des vents moyens et des cisaillements verticaux des vents horizontaux en surface.

La figure III.27 représente les vitesses et les directions des cisaillements en surface ; obtenu par la superposition des niveaux 2 m et 50 m pour la situation du 10/02/2014. On remarque que les vitesses des vents moyens en surface sont très faible ; ce qui fait que les vitesses des cisaillements prévus sur le secteur d'Alger sont aussi faibles. En revanche les directions des cisaillements en surface sont plus voyantes. On aperçoit même une zone de confrontation entre deux flux ; de direction opposées ; à 22 :00 UTC sur le coté West de l'aérodrome et qui indique une forte turbulence.

❖ *Cisaillements verticaux des vents verticaux*

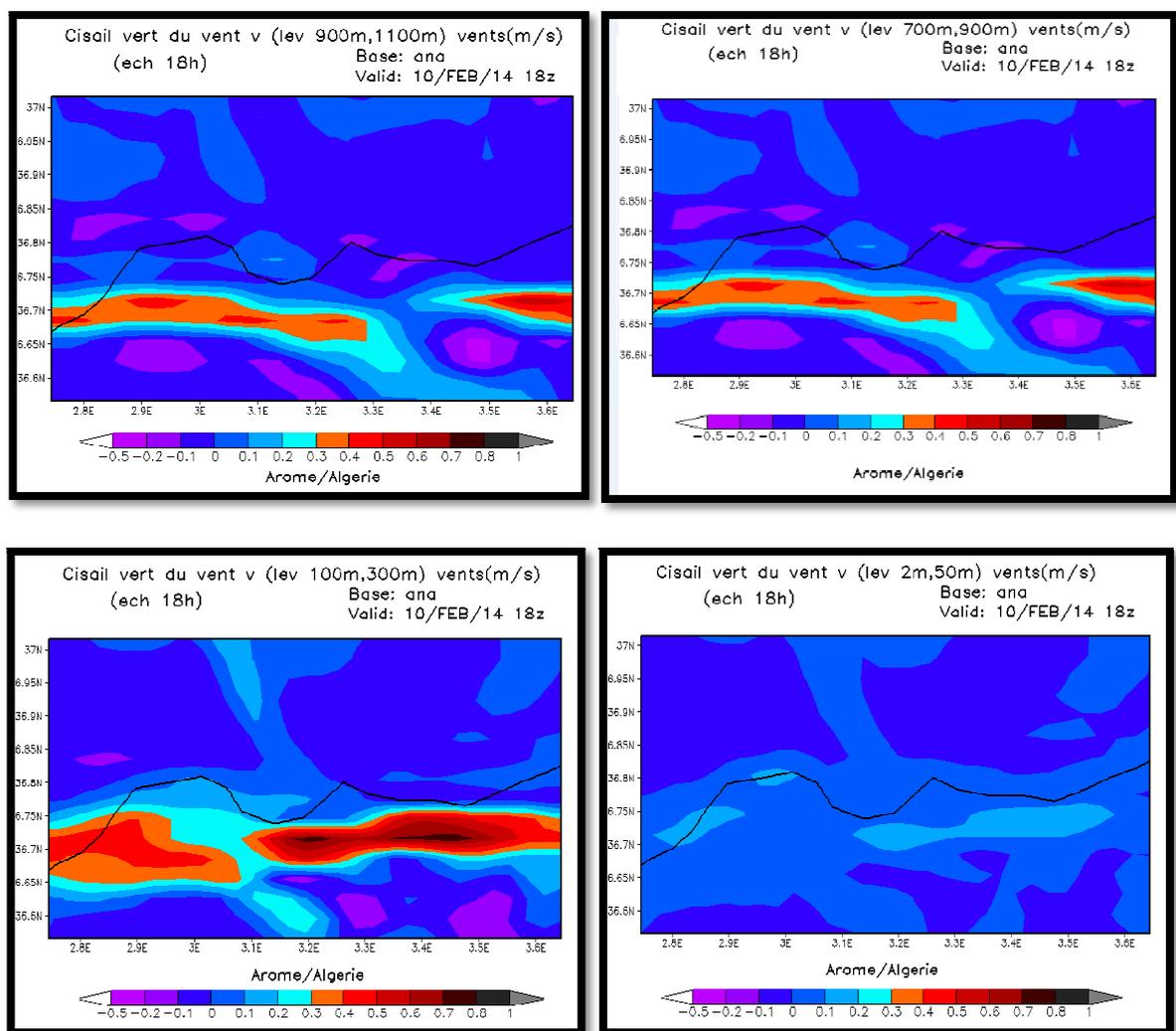


Figure III.28 : les cartes de prévision des cisaillements verticaux des vents verticaux.

La figure III.28 représente les résultats des cisaillements verticaux des vents verticaux ou autrement dit ; des microrafales ; sur le secteur d'Alger, prévus avec le modèle AROME sur les niveaux 1000 m, 800 m, 200 m et en surface à 18 :00 UTC. On remarque que ce type de cisaillement est très négligeant comparant aux cisaillements des vents horizontaux. Sur tous

les niveaux analysés on observe qu'il dépasse rarement 0.8 m/s et en surface il est presque nul car comme nous l'avons déjà expliqué, les vents verticaux à proximité du sol se transforme en vents horizontaux. On peut justifier ces faibles cisaillements par l'absence de cellule orageuse à l'intérieur de laquelle les microrafales se développent.

III.6 Conclusion

Nous avons calculé les quatre types de cisaillement de vent à partir des composantes du vent prévues par le modèle AROME pour l'aérodrome d'Alger. Les résultats des simulations de la situation de 10 Février montrent une certaine cohérence avec les observations. D'après les prévisions, les cisaillements les plus dominants sont les cisaillements des vents horizontaux que ce soit en module ou en direction ; du fait de la diversité de ces vents sur notre domaine. Par contre les cisaillements des vents verticaux sont très insignifiants pour cette situation.

Nous avons entamé ce travail avec l'hypothèse ; qu'aux alentours de l'aérodrome d'Alger les cisaillements les plus fréquents sont ceux des vents horizontaux, du fait de l'orographie de la région ; puis les résultats de prévision du programme que nous avons lancé dans le modèle AROME a justifié cette hypothèse.

Il est à noter que les cisaillements calculés dans ce travail ne sont pas validés faute d'absence des données d'observation concernant le cisaillement sur l'aéroport d'Alger. Néanmoins, ce nouveau produit prévu par AROME est de grande importance. Il sera mis au service des prévisionnistes de l'ONM pour assurer la veille météorologique pour l'aérodrome d'Alger.

IV.1 Introduction

De nombreux accidents aériens à travers l'histoire ont été entraînés par des cisaillements de vent violent, brusque et imprévisibles aux abords des aéroports durant les phases d'approche, tous comme dans le cas du crash de l'avion militaire algérien à Oum el-Bouaghi le 11/02/2014. D'après plusieurs sources de presse le crash est dû aux mauvaises conditions météorologiques et plus précisément aux rafales des vents.

La simulation numérique de la situation atmosphérique du 11/02/2014 avec le modèle AROME nous a permis de faire une analyse détaillée sur la nature des vents et tous les types des cisaillements aux alentours de la région d'Oum el-Bouaghi au moment du crash.

Dans ce chapitre, nous allons aussi faire une étude météorologique détaillée de la situation, c'est pour cela que nous effectuerons une analyse synoptique en surface et en altitude dans l'espérance de donner quelques causes de ce drame du côté conditions météorologiques.

IV.2 Analyse synoptique de la situation du 11/02/2014:

- *En Altitude (500hPa):*

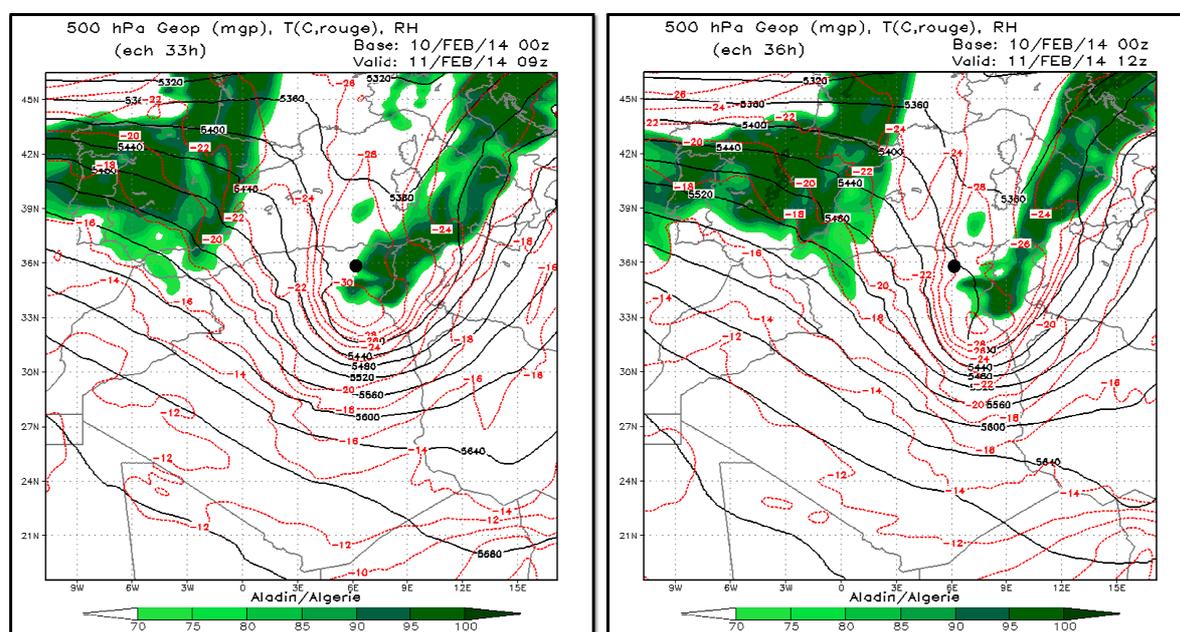


Figure IV.1 : Géopotentiel en mgp (traits noirs), températures en °C (traits rouges) et humidité en % (en shaded) à 500 hPa pour la journée du 11/02/2014 à 9:00 UTC et 12:00 UTC.

La situation météorologique du 11/02/2014 est caractérisée en altitude (500 hPa), par un minimum de géopotentiel (5320 mgp) centré sur le nord de la Méditerranée, sur les Alpes

(Fig. IV.1). Ce minimum se prolonge du sud Européen jusqu'au Sud-est de l'Algérie sous forme d'un thalweg. Cette excroissance de basses pressions a permis l'advection de l'air froid venant de l'Europe vers les régions nord-est de l'Algérie où se situe l'isotherme maximale qui renferme le nord de la wilaya de Khenchla. Les températures enregistrées par le modèle ALADIN durant cette période sur le nord-est de l'Algérie ont atteint les -30° à 500 hPa. Ce couloir dépressionnaire matérialise la convergence horizontale (mouvements du vent horizontal vers le centre de dépression) qui se traduit par une accumulation de particules vers le centre dépressionnaire, comme le montrent les valeurs d'humidité sur la figure IV.1.

A travers l'analyse des deux cartes de la figure IV.1 ; on peut confirmer l'existence d'un thalweg de surface qui provient du centre dépressionnaire situé au nord de la Méditerranée et à l'intérieur duquel est renfermé l'isotherme maximale à -30° , aux alentours du secteur du crash. Ce gradient de température maximale accompagné d'un gradient de pression minimale, assiste simultanément à la naissance d'une convergence horizontale qui est caractérisée par des mouvements horizontaux tourbillonnaires escortés avec des mouvements verticaux ascendants ; généralement les vitesses de ces vents verticaux sont très faibles comparées à celles des vents horizontaux. Cette démonstration nous indique qu'une analyse des cisaillements verticaux suffira pour l'étude de la situation, puisque la variation est notable en altitude.

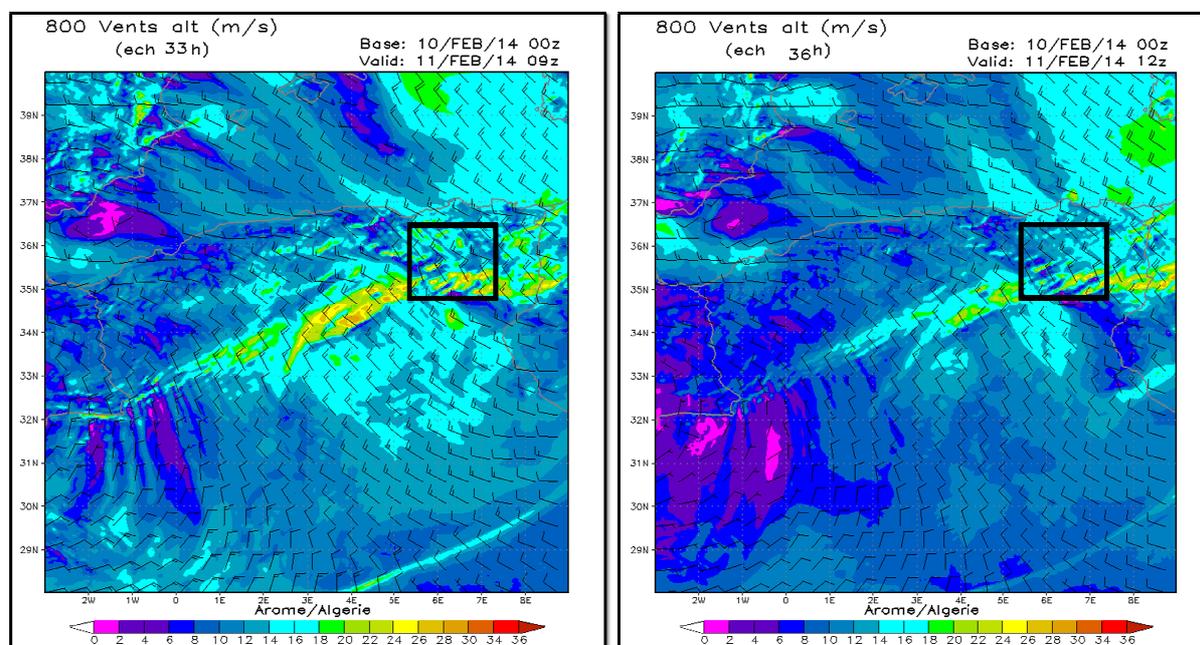


Figure IV.2 : Cartes des vents moyens prévus à 800 m d'altitude par le modèle AROME pour la journée du 11/02/2014 à 9:00 UTC et 12:00 UTC.

Le vent horizontal à 800 m est orienté nord-est vers le centre de la dépression ; on remarque ainsi une forte variabilité des directions et des vitesses ; particulièrement sur les régions de basses pressions délimitées à l'intérieur du cadran défini sur les cartes (Fig. IV.2). Les pics de vent enregistré par le modèle atteignent les 34 m/s à 9:00 UTC et 30 m/s à 12:00 UTC aux alentours de la région du crash.

Pour l'étude des cisaillements verticaux, nous allons alors, faire un zoom sur le secteur délimité par le cadran noir, à l'intérieur duquel s'est déroulé le crash.

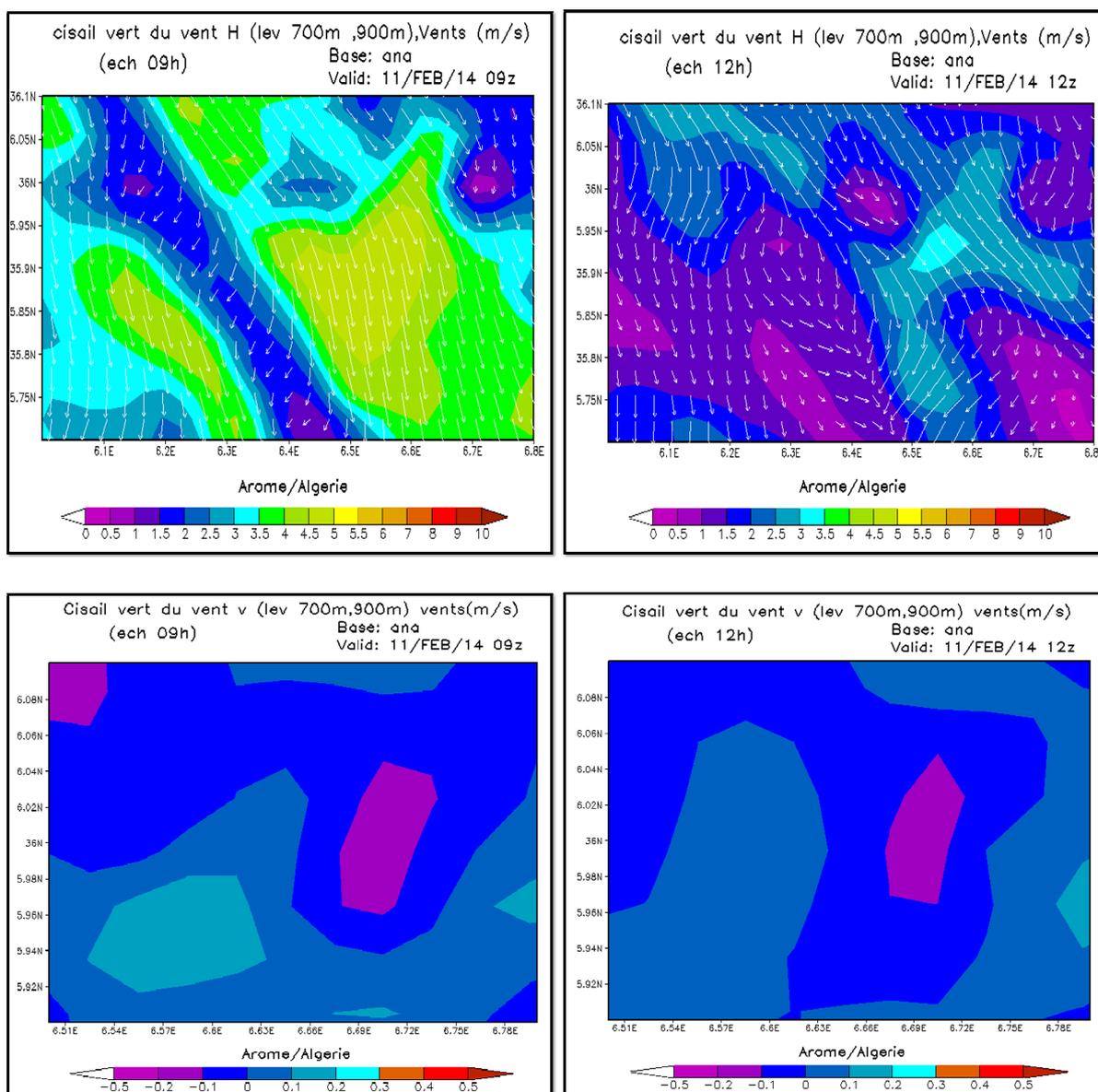


Figure IV.3 : Cartes de cisaillement vertical du vent horizontal et de cisaillement vertical du vent vertical prévues avec le modèle AROME pour la situation du 11/02/2014 à 9 :00 UTC et 12 :00 UTC.

Les cartes de la figure (IV.3) montrent que les cisaillements des vents horizontaux l'empotent sur ceux des vents verticaux, qui sont de l'ordre de 10^{-2} m/s sur tous les niveaux analysés. Ceux-ci ne sont pas assez dangereux pour un aéronef en phase d'approche. Les vitesses des cisaillements verticaux des vents horizontaux varient de 0.5 jusqu'à 4.5 m/s, des vitesses de cet ordre elles ne représentent aucun danger pour un avion. Les directions de ces cisaillements s'orientent vers le sud ; c'est-à-dire que cet avion qui se dirige vers le nord rencontre de brusque vent de face ; ce qui aurait pu être dangereux si les vitesses du cisaillement été plus intense.

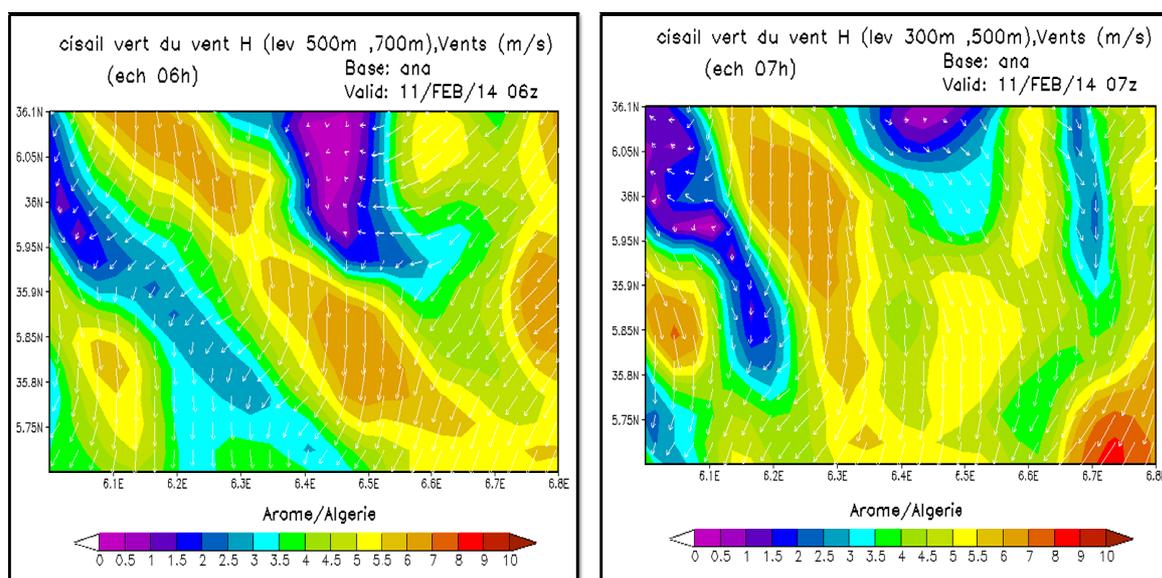


Figure IV.4 : Cartes de cisaillement vertical de vent horizontal prévues avec le modèle ROME sur les niveaux 600 m et 400 m à 06 :00 UTC et 07 :00 UTC respectivement.

La figure (IV.4) représente les cartes de pour le cas de cisaillement le plus intense, surgit le jour du crash. La vitesse maximale atteinte était de 8 m /s, sur le niveau 400 m à 07:00 UTC.

- **En surface (10 m)**

La carte des rafales de vent (Fig. IV.5) nous indique qu'en surface, les vent soufflent du nord vers le sud ; contrairement à se qui est indiqué en altitude. Dans le secteur de notre étude apparait des vents en surface assez forts qui atteignent la vitesse de 30 m/s mais l'analyse des résultats des cisaillements à cette étape ne donnent aucune indication dangereuse.

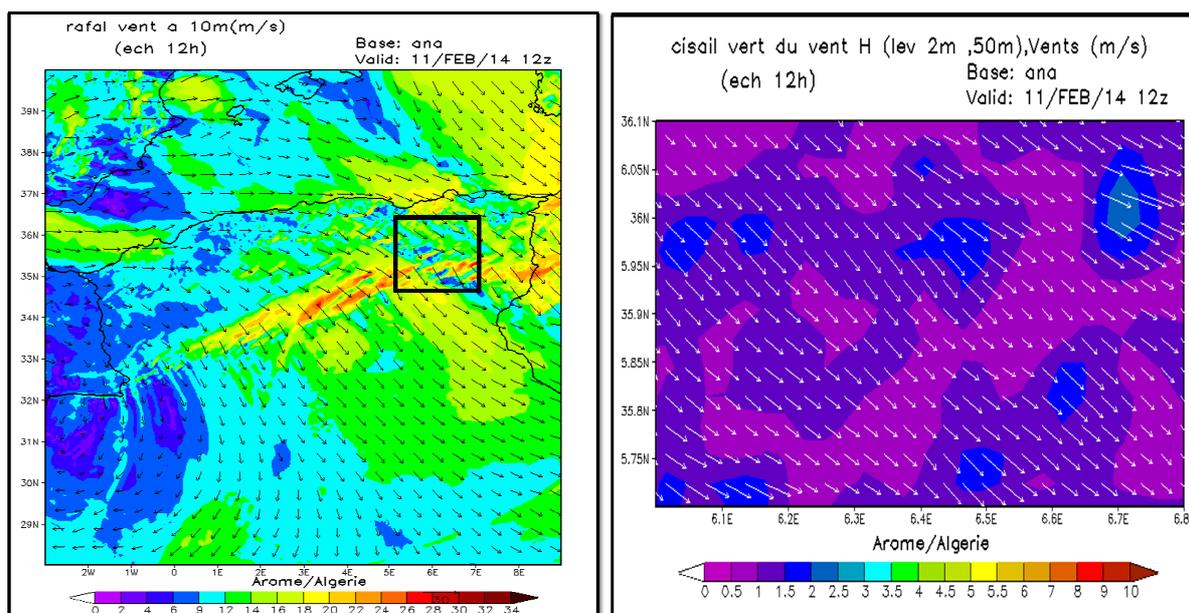


Figure IV.5 : Carte de rafale de vent et de cisailment vertical du vent horizontal prévues en surface à 12 :00 UTC.

En résumé, la situation du 11/02/2014 est caractérisée par la présence d'un thalweg barométrique qui s'étend sur tout le secteur d'approche vers l'aérodrome de Constantine ; ce thalweg renferme l'isotherme minimale qui atteint les -30° ; ces deux paramètres de pression et de température ont fait que les vents soient assez forts ce jour ci ; mais l'analyse des cisaillements n'a déclaré aucun cas dangereux.

IV.2 Le déroulement du crash

Il est fort possible que l'avion était déjà en détresse ; puis les petites turbulences quelle a rencontré en passant par la chaîne montagneuse de Ain M'Lila lui a fait perdre totalement sa stabilité.

La figure (IV.6) montre une coupe verticale, prise à 6°E , de la vitesse du vent moyen prévue par le modèle AROME à 12 :00 utc. On remarque une forte variation de la vitesse du vent entre la région de Batna et Oum El Bouaghi. Sur cette trajectoire, la vitesse du vent passe de 10 m/s à 28 m/s sur une distance de 0.5° (~50 km).

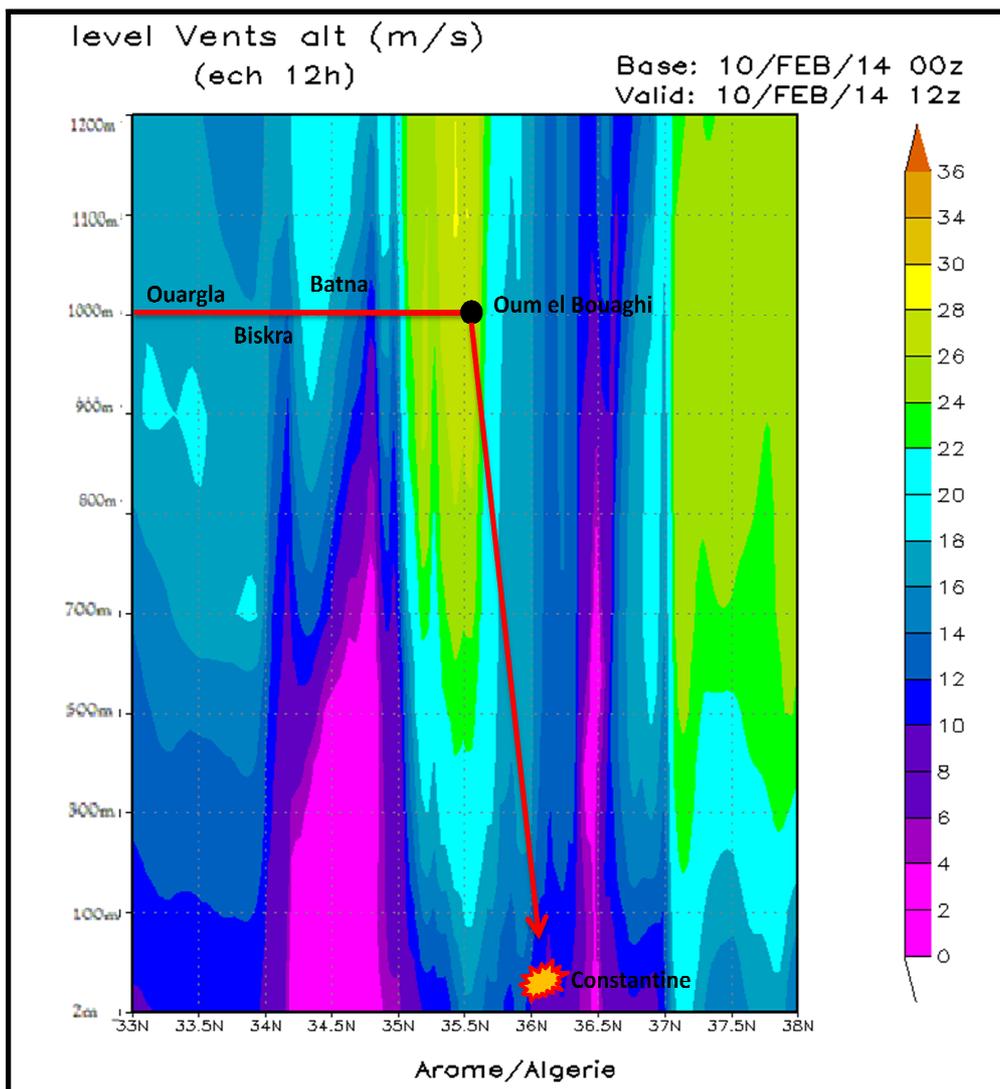


Figure VI.6 : Coupe verticale sur la longitude 6°E des vents moyens prévus avec le modèle AROME à 12:00 UTC de 2 m jusqu'à 1200 m.

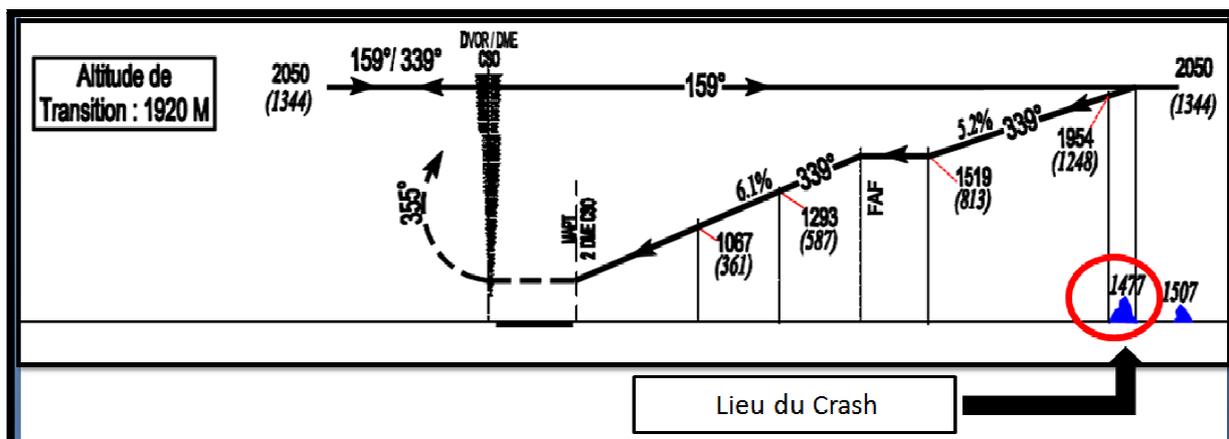


Figure IV.7 : Coupe verticale de la procédure d'approche aux instruments DVOR/DME de la piste 34 de l'aérodrome de Constantine. [Carte IAC 1 modifié]

L'avion avait amorcé son approche vers la piste 34 de l'aérodrome de Constantine. Le crash est survenu lors de l'approche initiale à environ 45Km du seuil de piste.

Aux conditions de vol normal, une rafale de vent arrière de 34 m/s ou un coup de vent debout de 8 m/s (cisaillement du vent horizontal), n'aurait pas eu causé de problème. Donc, il est évident que l'avion été en conflit bien avant sa pénétration dans le secteur étudié ; alors, on peut dire que les pics de vent ainsi que les faibles cisaillements enregistrés n'étaient que des facteurs contributifs au crash et non pas des facteurs déclencheurs.

Tableau IV.1 : caractéristiques opérationnelles de l'avion militaire Hercules C130 [30].

Vitesse maximum en croisière	348 kts
Vitesse de croisière "économique"	339 kts
Vitesse recommandée en zone de turbulences modérées	Réduction de 5 Kt la vitesse de croisière si VI >200 kt max
Vitesse recommandée en zone de turbulences sévères	Réduction de 65 Kt la vitesse de croisière sans excéder 180 Kt

D'après le tableau, si on suppose que la vitesse sol à laquelle l'avion avait amorcé son approche vers la piste 34 de Constantine été d'environ 180KT. La rencontre subite d'un cisaillement verticale du vent horizontal d'une intensité de 3.24 KT (prélevé à partir de carte de prévision des cisaillements verticaux des vents horizontaux à 10:00 UTC sur le niveau 1000 m) induira une diminution de la vitesse sol de 0.8 KT /s (perte de 48KT par minute) ; donc, l'avion s'écrasera au bout de 4 minutes.

Synthèse

La situation synoptique du 11 /02 /2014 nous a orienté vers l'application de notre produit de prévision du cisaillement selon les niveaux d'altitude ; c'est-à-dire le calcul du cisaillement vertical du vent horizontal et vertical. Les résultats de simulation montrent la présence des forts gradients du vent sur la trajectoire de l'Avion mais ces gradients n'ont aucune dangerosité pour l'avion qui s'est crashé ce jour la. Cela nous a donc, permis de conclure que le vent, avait peut être fortifié l'instabilité de l'appareil durant son anéantissement.

Conclusions et perspectives

Ce mémoire s'est basé sur l'étude des quatre types de cisaillement de vent dans la couche limite atmosphérique. Plus précisément, il s'est focalisé sur la plateforme aéroportuaire d'Alger qui est habituellement touché par les variations de la direction et de l'intensité des vents horizontaux appelées cisaillements de vent horizontaux.

Après la comparaison entre les deux modèles de prévision du temps utilisés à l'ONM, ALADIN et AROME, nous avons choisi d'utiliser les sorties de vent du modèle AROME pour le calcul des différents types de cisaillement. En effet, ce modèle offrait une meilleure résolution spatiale sur notre champ d'étude donc, il nous donne plus d'information sur les cisaillements autour de l'aérodrome.

Les résultats des simulations numériques de la situation du 10 février 2014 montrent une certaine cohérence comparée aux observations. Ces résultats indiquent la présence de forts cisaillements en surface à l'intérieur de la couche limite de surface que nous avons assimilé à des turbulences mécaniques, car ils sont dus aux forces de friction exercées par le sol sur le vent. Les résultats révèlent aussi de remarquables cisaillements en altitude à l'intérieur de la couche EKMAN que nous avons assimilés à des turbulences thermiques (phénomène de brise et la rencontre des flux de différentes caractéristiques : température et direction).

La simulation numérique de la situation météorologique du 11 février 2014 n'a indiqué aucun cisaillement nuisible pour l'avion militaire le jour du crash donc, nous n'avons établie aucune conclusion définitive a propos de cette conjoncture.

Ce nouveau produit, qui est le cisaillement du vent, calculé à partir des champs du vent prévus par le modèle AROME, offre une information supplémentaire, pour le prévisionniste, concernant la variation de la force et de la direction du vent sur l'Aérodrome d'Alger. Ceci permettra à terme d'affiner la qualité de la prévision pour cet aérodrome (TAF).

Perspectives :

Nous notons que les seules observations dont on dispose pour cette étude sont des observations du vent en surface enregistré par les trois anémomètres disposés le long des deux pistes. Pour cela, il serait très intéressant s'il existait un outil de détection des cisaillements de vent sur l'aérodrome d'Alger ; pour qu'on puisse effectuer une comparaison entre les données d'observation et les données de prévisions afin de pouvoir estimer les marges d'erreur.

Les prévisions des cisaillements sur l'aérodrome d'Alger seront mises à la disposition de tous les prévisionnistes sur le futur site interne du Centre National des Prévisions Météorologique (CNPM).

Cette étude concerne l'aérodrome d'Alger, il serait très intéressant de la généraliser sur tous les aérodromes de l'Algérie.

Liste des références bibliographiques

- [01] **MÉTAVI** : L'ATMOSPHERE, LE TEMPS ET LA NAVIGATION AERIENNE ;
PAR : ENVIRONNEMENT CANADA JANVIER 2011
- [02] **THESE** : ETUDE DU POTENTIEL EOLIEN DU JET NOCTURNE DANS LA
ZONESAHELIENNE A PARTIR DES OBSERVATIONS DE RADARS PROFILEURS DE
VENT SOUTENUE PAR : SAÏDOU MADOUGOU JUIN 2010
- [03] LES MOUVEMENTS HORIZONTAUX DANS L' ATMOSPHERE /CLIMATOLOGIE
TE HYDROLOGIE /UNIVERSITE DE MARSEILLE 2008
- [04] METEOROLOGIE DYNAMIQUE /ECOLE NATIONALE DE METEOROLOGIE
1986
- [05] AEROLOGIE – METEOROLOGIE DYNAMIQUE PAR : J.BESSE – A. FOURINE
– M. RENAUDIN .LIVRE DE L'ENAC TOME : 02
- [06] ELEMENT DE METEOROLOGIE PAR GILLES MOLINIE 2006
- [07] DOCUMENT OACI 9817/MANUAL ON LAW-LEVEL WIND SHEAR
- [08] ReGird : NOTIONS ELEMENTAIRES SUR L'ENERGIE EOLIENNE /RENAC
RENEWABLE ACADEMY 2013
- [09] COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE / MICRO MÉTÉOROLOGIE /PAR LE
PROFESSEURE: EVA MONTEIRO (SD)
- [10] INFLUENCE DE LA STABILITÉ ATMOSPHERIQUE SUR LES PRATIQUES DU
SECTEUR ÉOLIEN PAR : JONATHON SUMNER 2006
- [11] Méthode d'analyse de la situation météo lors de la préparation du vol : cours type en
formation pratique météo de pilote VFR / D'après l'exposé ENAC-DFPV pour MF, présenté
en CSM-CAL PAR : Vincent Jégourel-Philippe Lavieille , mai 2011

- [12] WIND SHEAR, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION 2008
- [13] METEOROLOGIE, SECTION INSTRUCTION – IVAOTM DIVISION FRANCE
LES PHENOMENE DANGEUREUX POUR L’AERONAUTIQUE 2011
- [14] METEOROLOGIE GENERALE PAR : J.BESSE – A. FOURINE – M. RENAUDIN
.LIVRE DE L’ENAC TOME : 01
- [15] METEOROLOGIE AERONAUTIQUE PAR J.BESSE – A. FOURINE – M.
RENAUDIN .LIVRE DE L’ENAC TOME : 03
- [16] MEMENTO AEROLOGIE / MICROMETEOROLOGIE POUR LE PARAPENTE –
B. LEPRETTRE – REVISION 2002 –
- [17] MODELISATION DE CISAILLEMENTS DE VENT ET ASSIMILATION DE
DONNEES DANS LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE THESE SOUTENU PAR :
ALEXANDRE BOILLEY, LE 29 MARS 2011
- [18] AEROLOGIE – METEOROLOGIE DYNAMIQUE PAR : J.BESSE – A. FOURINE
– M. RENAUDIN .LIVRE DE L’ENAC TOME : 02
- [19] FONDAMENTAUX DE METEOROLOGIE, S. MALARDEL, *CEPADUES*, 2005
- [20] ESSENTIALS OF METEOROLOGY, C.D. AHRENS, *BROOKS*, 2000
- [21] [HTTP://WWW.LAVIONNAIRE.FR/PHENOMCISAILLE.PHPI](http://www.lavionnaire.fr/phenomcisaille.phpi)
- [22] LOW LEVEL WIND SHEAR / NASA CONTRACTOR REPORT 3678 .BY WALTER
FROST
- [23] *FLYING MAGAZINE* BY J. MAC MCCLELLAN January 1987
- [24] <http://ww.meteo.dz/>
- [25] LIVRE DE NAVIGATION DU B.I.A AU C.E.A.E TOME: 3(SD)
- [26] WIND SHEAR By: Lt Col Wally Emerson 15 April 2007

[27] LE CISAILLEMENT DU VENT BASSES ALTITUDE PAR METEO France (SD)

[28] **WINDSHEAR – ITS DETECTION AND ALTERING** DR. PING-WAH LI
HONG KONG OBSERVATORY (SD)

[29] L'INSTABILITE MODULATIONNELLE EN PRESENCE DE VENT ET D'UN
COURANT CISAILLE UNIFORME *ROLAND THOMAS 2012*

[30] <http://faq-fra.aviatechno.net/guide/hercules.php>

[31] <http://ww.meteofrance>

ANNEXE II : Utilisation du logiciel « Origin 2015 » pour le dessin des roses des vents



ORIGIN[®] 2015

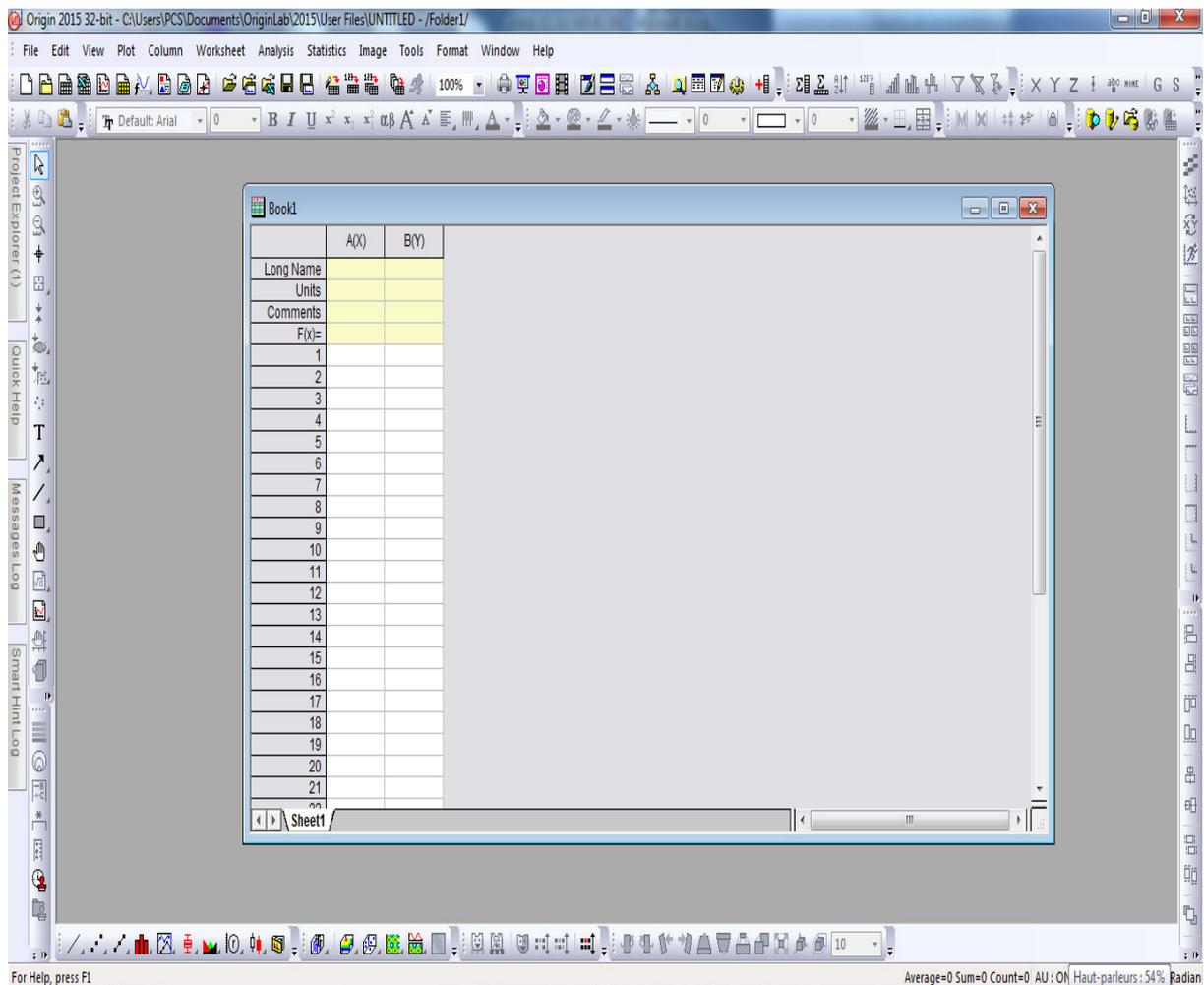
Graphing & Analysis

www.originlab.com

This product is licensed to:
PCS
FF

Version: 92E
Copyright © 1991-2015 OriginLab Corporation

This software is protected by federal copyright law and international treaties. Any unauthorized copying will result in severe civil and criminal prosecution to the maximum extent possible under law. All rights reserved.



Origin 2015 32-bit - C:\Users\PCS\Documents\OriginLab\2015\User Files\UNTITLED - /Folder1/

File Edit View Plot Column Worksheet Analysis Statistics Image Tools Format Window Help

Default: Arial 0 B I U x² x³ α β A' A' 0 0 0

Project Explorer (1) Quick Help Messages Log Smart Hint Log

Book1

	A(X)	B(Y)
Long Name		
Units		
Comments		
F(x)=		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		

Sheet1

Average=0 Sum=0 Count=0 AU: 0\ Haut-parleurs : 54% Radian

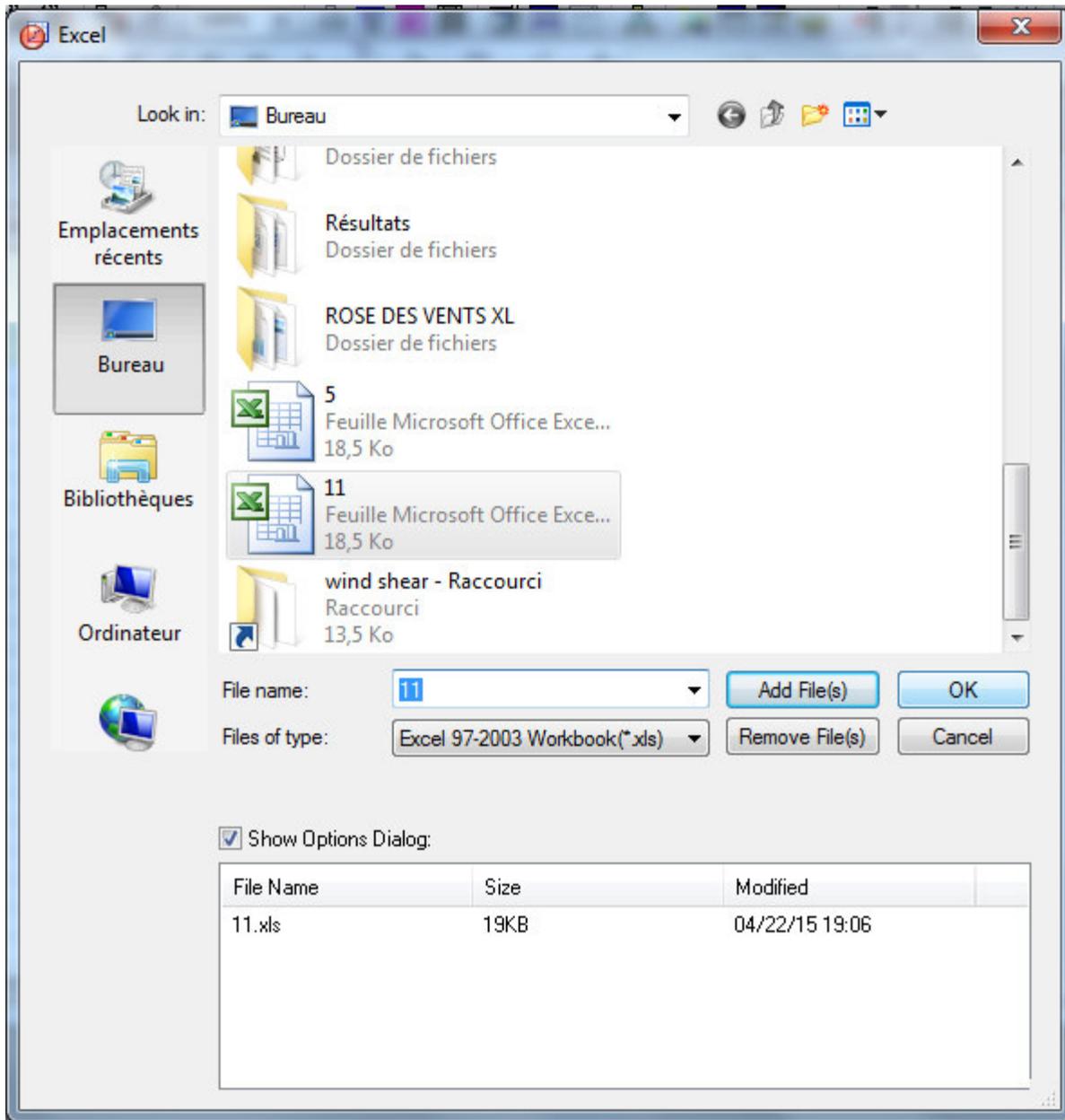
ANNEXE II : Utilisation du logiciel « Origin 2015 » pour le dessin des roses des vents

The screenshot shows the Origin 2015 software interface. The 'File' menu is open, and the 'Import' option is selected, which has opened a sub-menu. In this sub-menu, 'Excel (XLS, XLSX, XLSM).....' is highlighted. The main workspace displays a spreadsheet with the following structure:

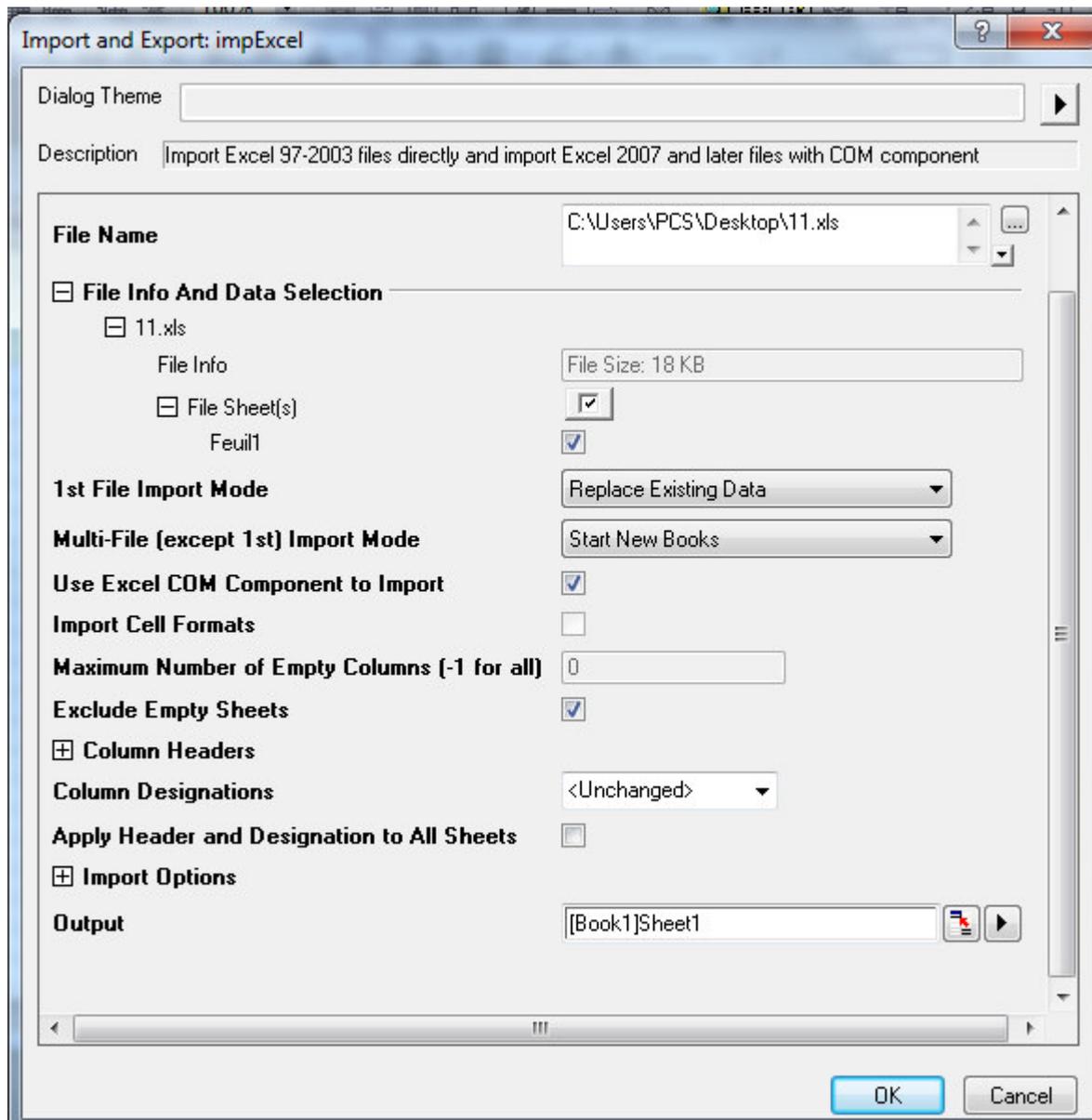
	A(X)	B(Y)
Comments		
F(x)=		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		

The status bar at the bottom indicates: 'Import Excel 97-2003 files directly and import Excel 2007 and later files with COM component'. On the right side, it shows 'Average=0 Sum=0 Count=0 AU : ON 1: [Book1]Sheet1: Radian'.

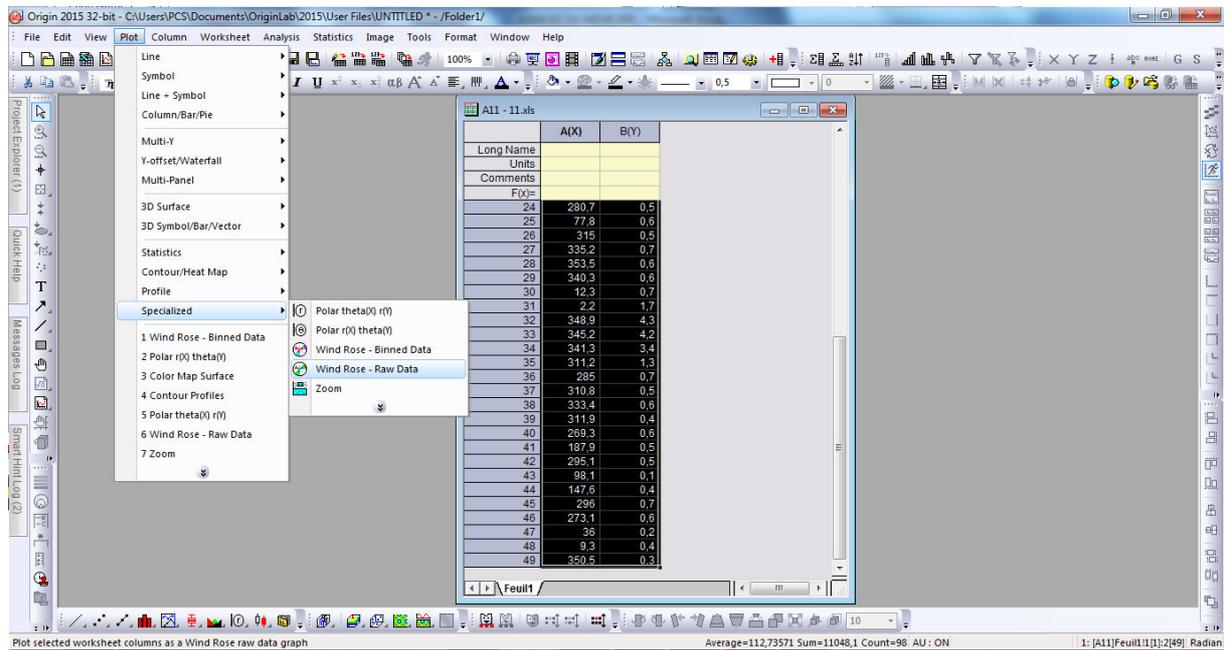
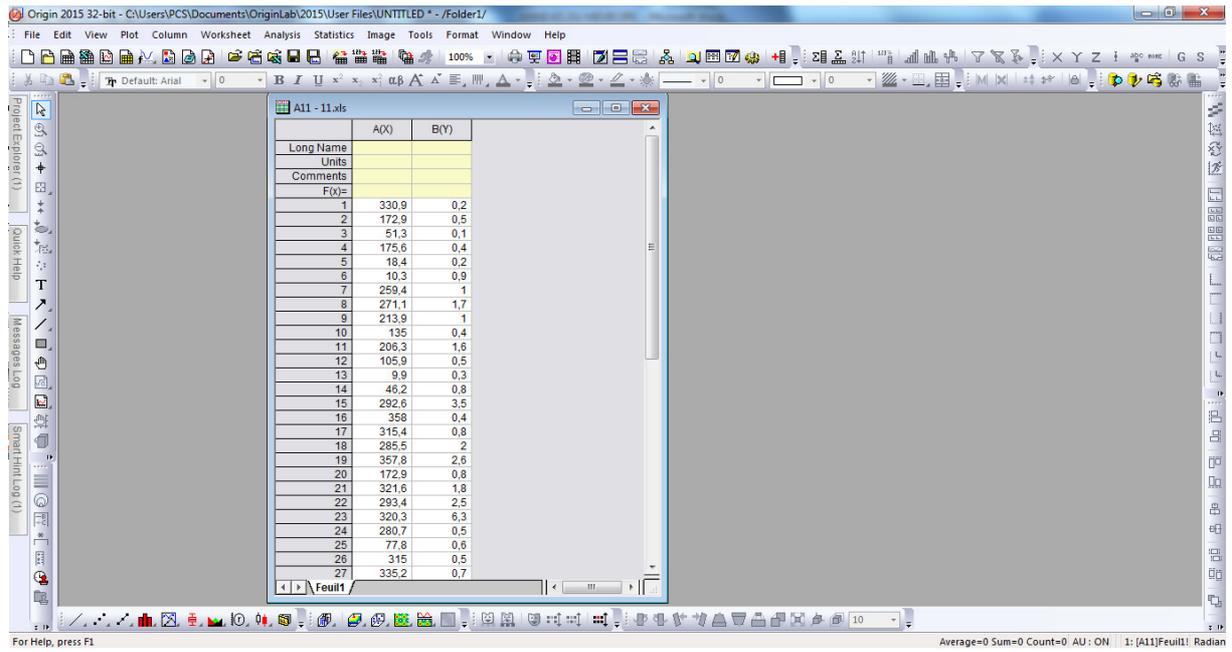
ANNEXE II : Utilisation du logiciel « Origin 2015 » pour le dessin des roses des vents



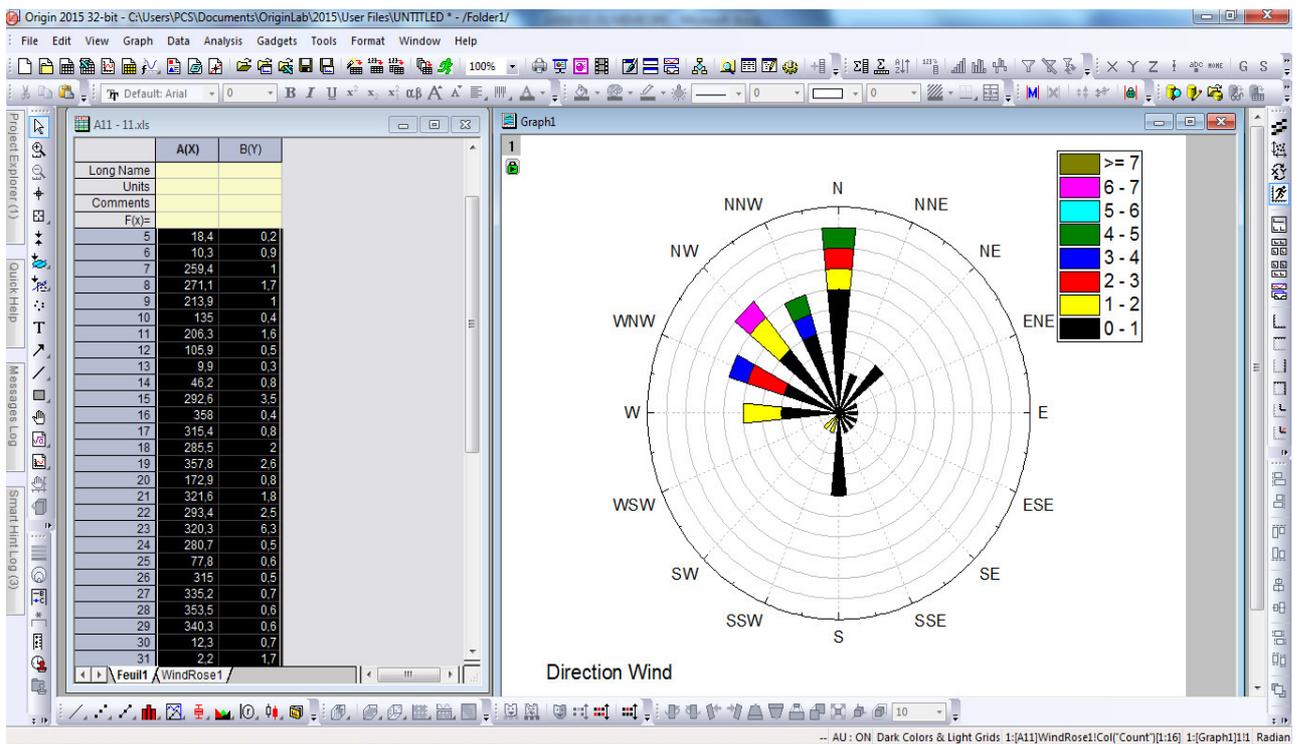
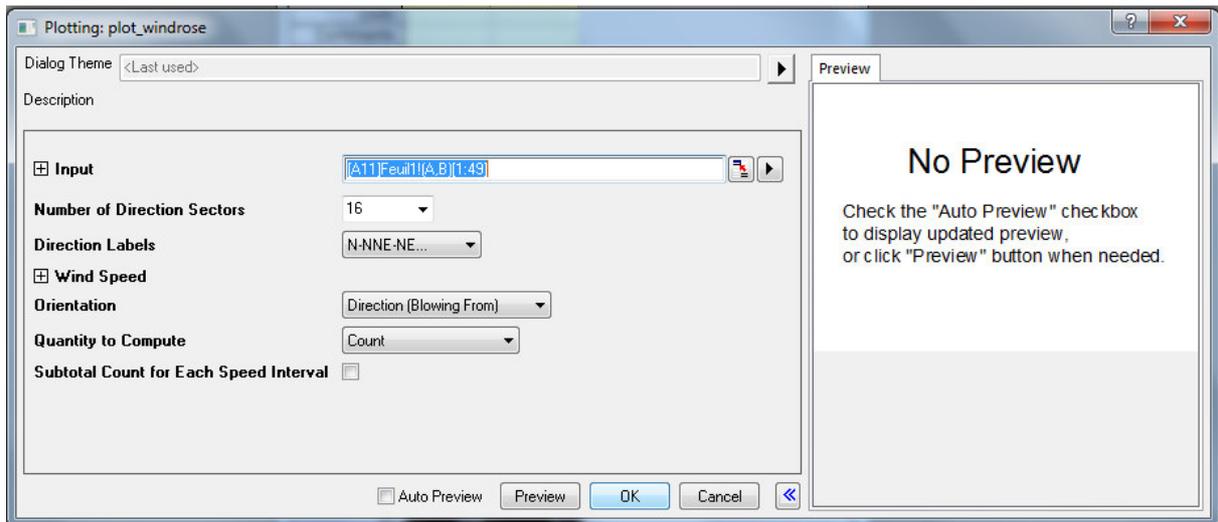
ANNEXE II : Utilisation du logiciel « Origin 2015 » pour le dessin des roses des vents



ANNEXE II : Utilisation du logiciel « Origin 2015 » pour le dessin des roses des vents



ANNEXE II : Utilisation du logiciel « Origin 2015 » pour le dessin des roses des vents

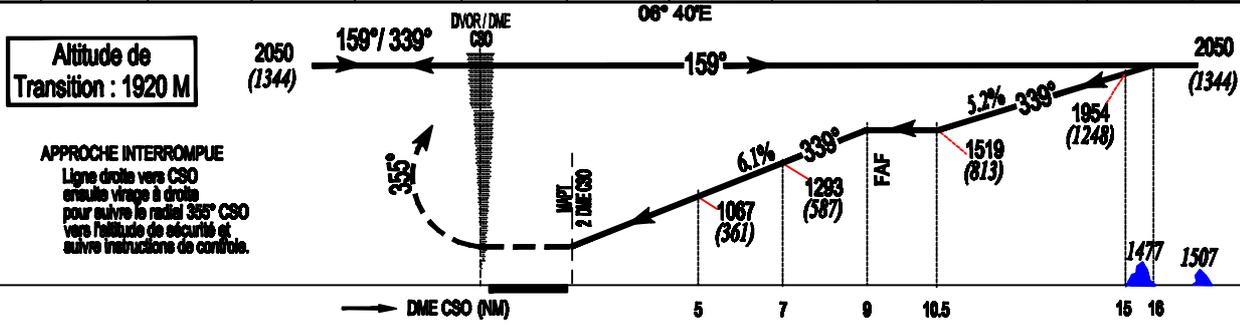
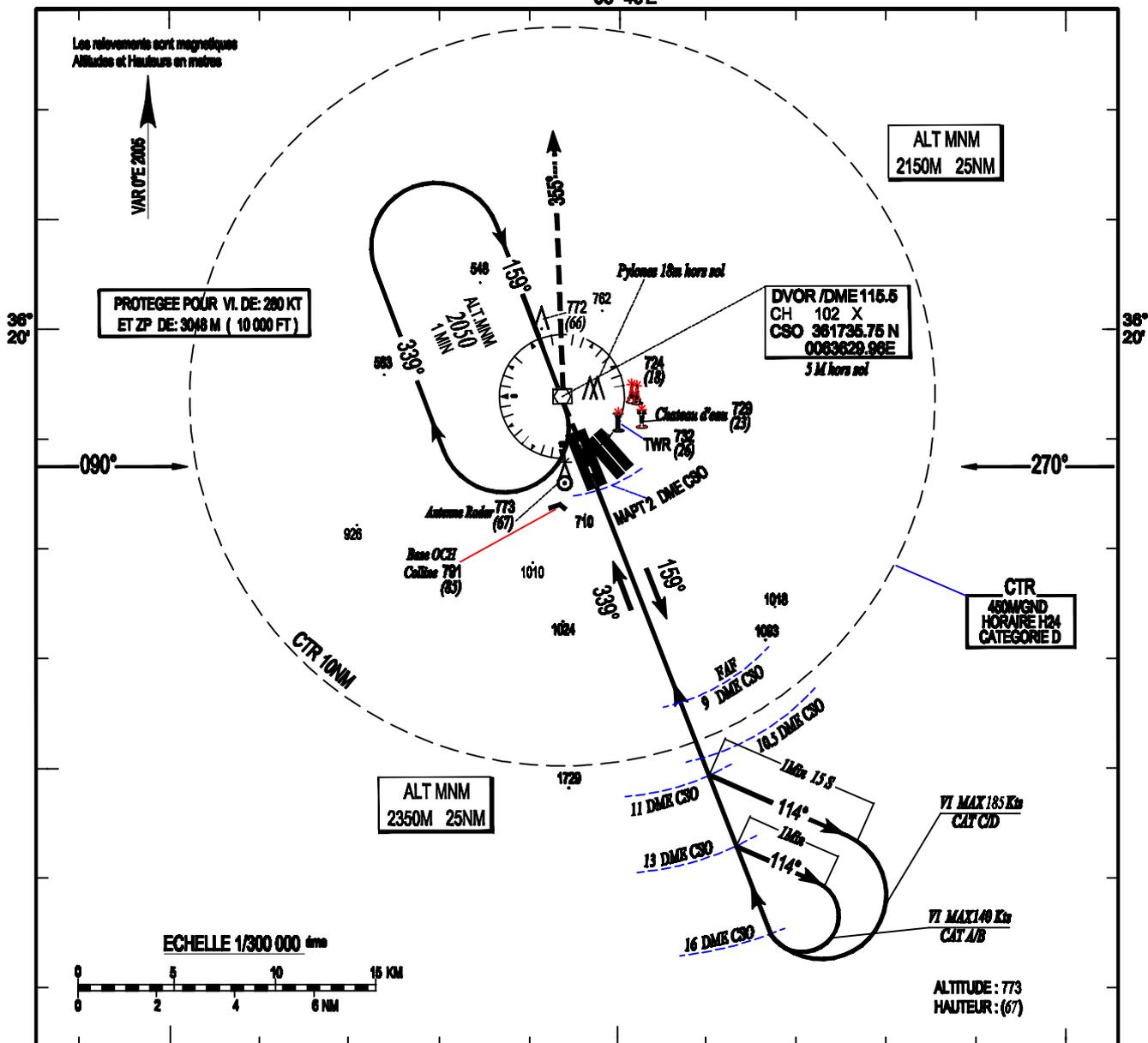


ALT. AD : 706 M
Les hauteurs sont déterminées
par rapport au THR RWY 34 - ALT: 706 M

APP : 120.1
TWR : 118.3, 119.7(s)

CARTE D'APPROCHE AUX INSTRUMENTS - OACI -
DVOR/DME RWY 34
CAT A/B/C/D

06° 40'E



APPROCHE INTERROMPUE
Ligne droite vers CSO
ensuite virage à droite
pour suivre le radial 339° CSO
vers l'altitude de sécurité et
suivre instructions de contrôle.

CAT	MINIMUMS OPERATIONNELS LES PLUS BAS ADMISSIBLES					
	DVOR/DME RWY 34			Approche à vue A L'Etat du terrain		
	QCH	MDH	VH	QCH	MDH	VH
A	175 M	580 FT	2400 M	300 M	990 FT	5000 M
B	175 M	580 FT	2400 M	300 M	990 FT	5000 M
C	175 M	580 FT	3200 M	300 M	990 FT	5000 M
D	175 M	580 FT	3800 M	300 M	990 FT	5000 M

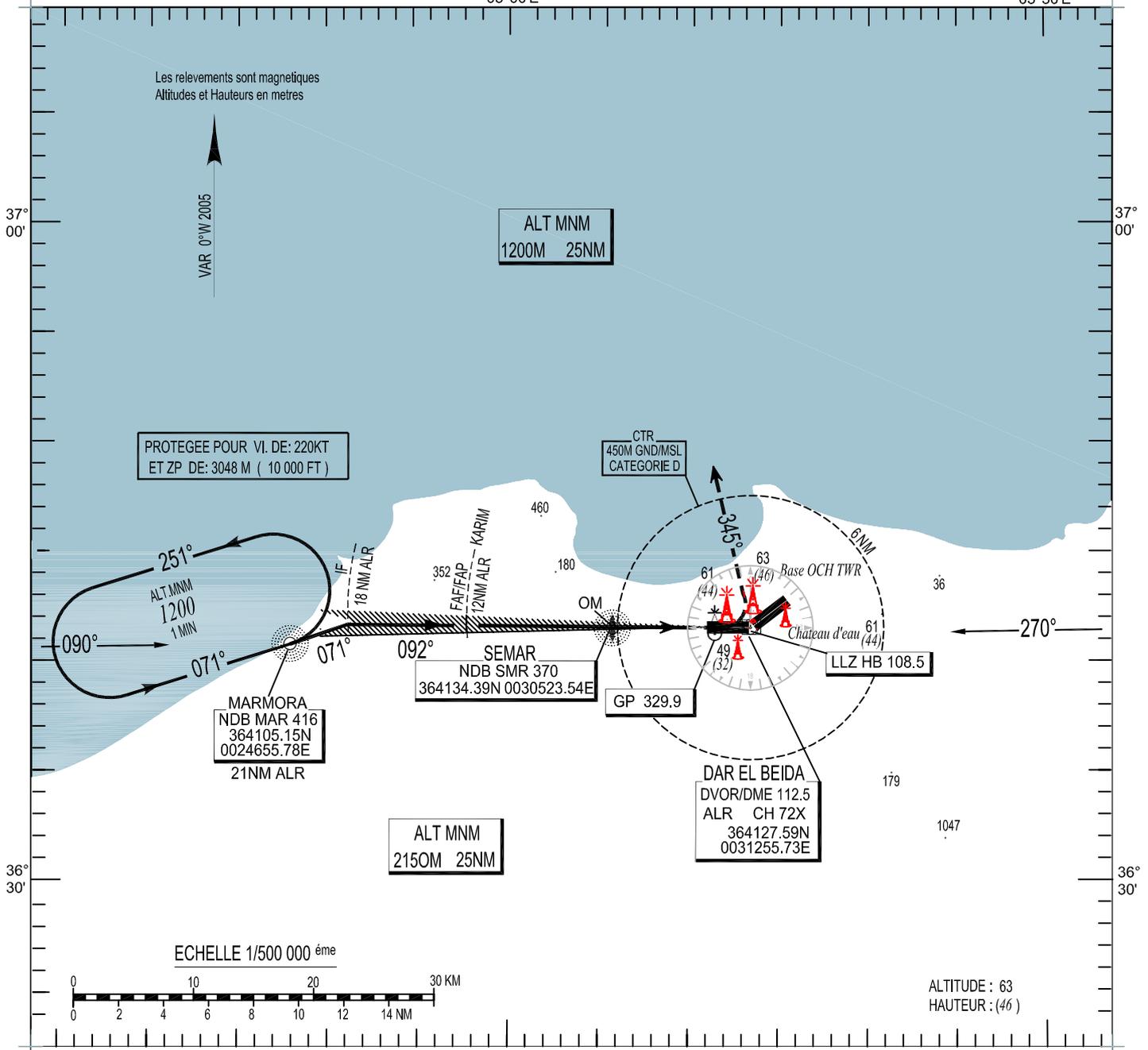
ALT. AD : 25M
Les hauteurs sont déterminées
par rapport au THR RWY 09 . ALT.17 M

APP : 121.4 - 120.8 (s)
TWR : 118.7 - 119.7 (s)

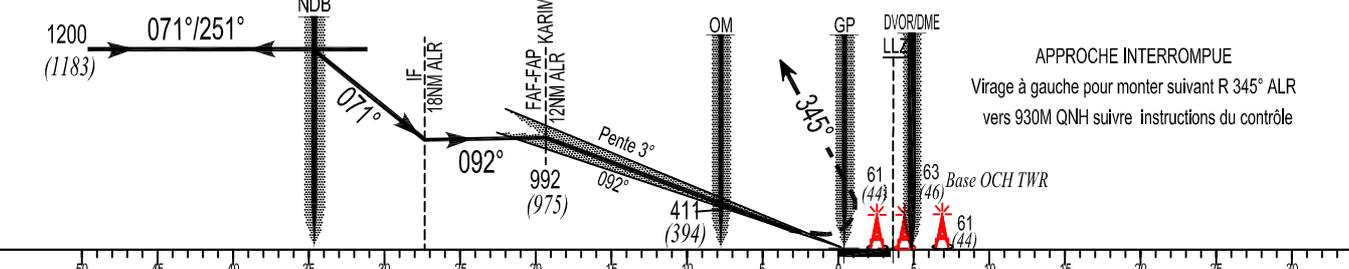
CARTE D'APPROCHE AUX INSTRUMENTS - OACI -
NDB-DVOR/DME-ILS RWY 09
NDB-DVOR/DME RWY 09

03°00'E

03°30'E



Altitude de Transition : 1200M



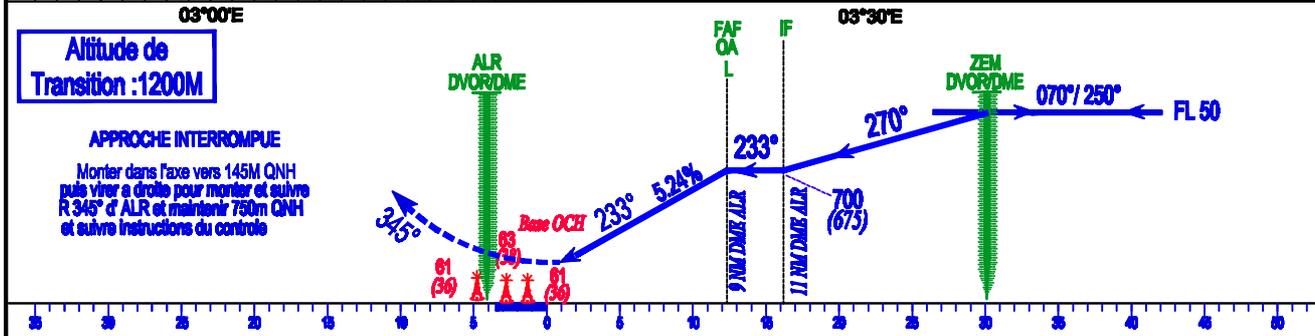
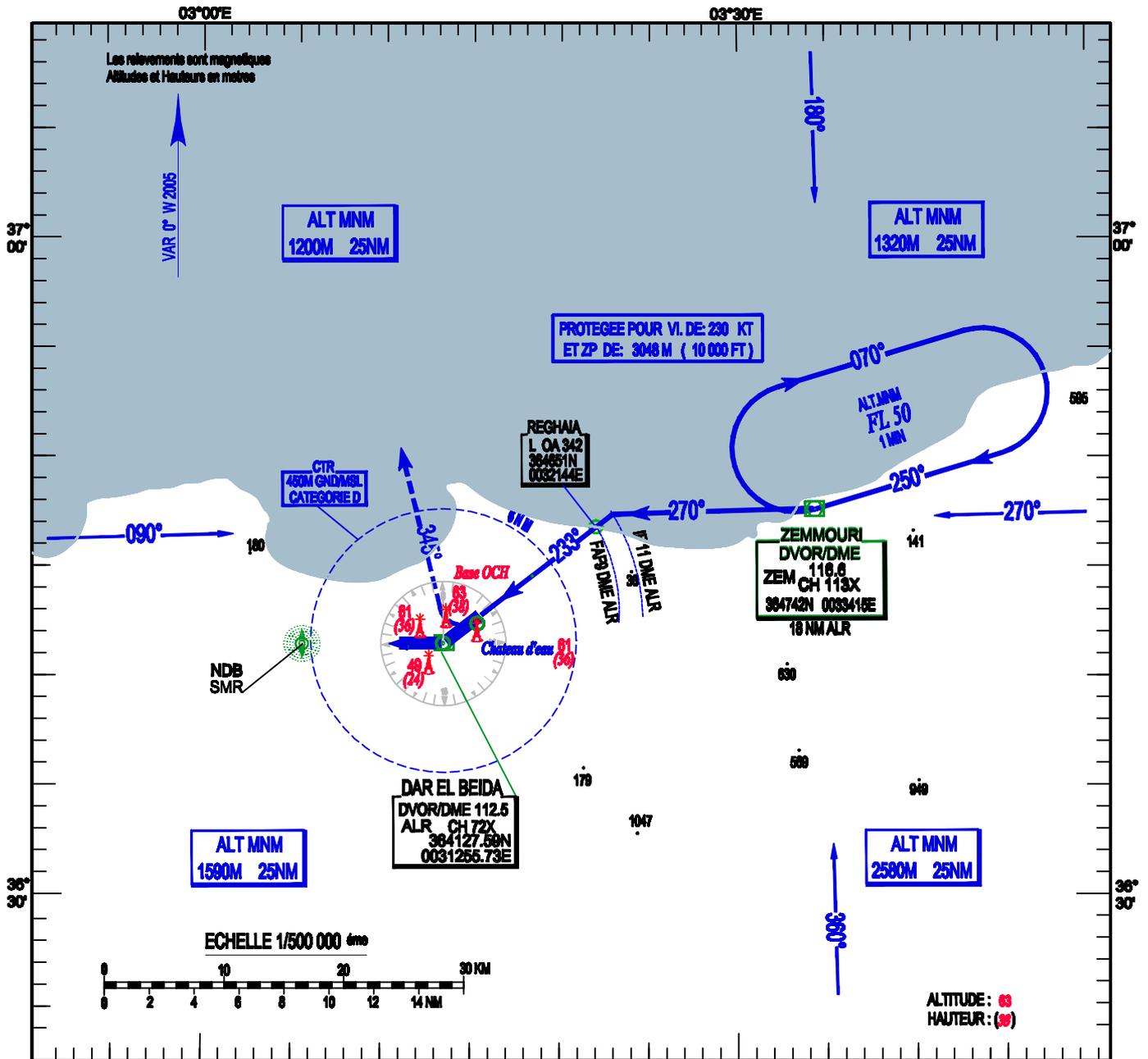
Cat/ACFT	MINIMUMS OPERATIONNELS LES PLUS BAS ADMISSIBLES												
	NDB-DVOR-DME/ILS RWY 09				GP INOP			NDB-DVOR-DME- RWY 09			Approche Indirecte Au nord		
	OCH	DH	RVR	VIS	OCH	MDH	VH	OCH	MDH	VH	OCH	MDH	VH
A	60M	200FT	550M	800M	95M	320FT	1600M	120M	400FT	1600M	170M	560FT	1600M
B	63M	210FT	550M	800M	95M	320FT	1600M	120M	400FT	1600M	170M	560FT	1600M
C	66M	220FT	550M	800M	95M	320FT	1600M	120M	400FT	2000M	230M	760FT	3600M
D	69M	230FT	550M	800M	95M	320FT	2000M	120M	400FT	2400M	230M	760FT	4000M

ALT. AD : 25 M

Les hauteurs sont déterminées
par rapport à ALT de l'AD

APP : 121.4 - 120.8 (ø)
TWR : 118.7 - 119.7 (ø)

CARTE D'APPROCHE AUX INSTRUMENTS- OACI -
DVOR/DME RWY 23



Catégorie	MINIMUMS OPERATIONNELS LES PLUS BAS ADMISSIBLES					
	DVOR/DME RWY 23			Approche Indirecte Au nord		
	OCH	MDH	VH	OCH	MDH	VH
A	120M	400FT	2000M	170M	560FT	2000M
B	120M	400FT	2000M	170M	560FT	2000M
C	120M	400FT	2400M	230M	760FT	4000M
D	120M	400FT	2000M	230M	760FT	4400M