

# REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1



INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALES

Département de Navigation Aérienne

---

---



## Projet de fin d'études

en vue de l'obtention du diplôme de Master en **Aéronautique**

Spécialité : Navigation Aérienne

Option : opération aérienne

---



## Thème

Prévision du cisaillement du vent de basse couche avec le  
modèle AROME à haute résolution

---

### Présenté par :

- DJELLAI Roumaïssa

### Dirigé par :

- Mr T.Rezoug  
- Mr M.Mokhtari

**IAES**

**2021 - 2022**

## **REMERCIANT**

*Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury pour leur présence, pour leur lecteur attentif de ma thèse ainsi que les remarques qu'ils m'adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer mon travail. Je voudrais exprimer ma gratitude à mes directeurs de recherche, Mr REZDUG pour son soutien et la grande confiance qu'il m'a accordée pour mener à bien mon travail. Je remercie également Mr MOUKHTARI, pour son aide ainsi que pour ces conseils.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous mes grandes familles surtout ma mère et mon père qui ont toujours su me soutenir et encourager dans les moments difficiles.*

### Résumé

Le cisaillement du vent constitue une menace pour la sécurité aérienne dans le monde entier, en particulier lors du décollage et de l'atterrissage (à basse altitude). Dans cette étude, nous avons essayé de trouver un moyen pour calculer n'importe quelle type du cisaillement du vent sur l'aéroport d'Algérie, en utilisant le modèle opérationnel à haute résolution \*AROME\* qui est habituellement utilisé dans l'office national de la météorologie. Notre nouveau programme aide l'aéroport à calculer la force du vent de cisaillement et suivre les différentes variations qui pourraient se produire autour de lui. Afin de maintenir la sécurité et éviter les résultats négatifs.

### Abstract

Wind shear continues to pose a threat to aviation safety all around the world especially during to take off and landing (low altitude). In this study we tried to find a way to calculate the deference type of wind shear on the airport of Algeria using the high-resolution operational model \*AROME\* which is usually used in the national office of meteorology. Our new program helps the airport to calculate wind shear, and follow the different variation that's could happened around it. In order to maintain security and avoid the negative results.

### ملخص

لا يزال قص الرياح يشكل تهديدا على سلامة الطيران في جميع انحاء العالم, خاصة أثناء الإقلاع والهبوط على ارتفاع منخفض. حاولنا في هذه الدراسة إيجاد طريقة لحساب مختلف أنواع قص الرياح في مطار هواري بومدين باستخدام النموذج التشغيلي عالي الدقة, الذي يستخدم عادة في المكتب الوطني للأرصاد الجوية. حيث يعمل البرنامج الجديد على حساب قوة الرياح بجميع أنواعه في أنحاء المطار ويمكن أيضا من متابعة الاختلاف الذي يمكن أن يحدث حتى تتمكن من الحفاظ على الأمن وتجنب مختلف النتائج السلبية الناجمة عنه.

## **Table Des Matières**

---

Remerciant .....	I
Résumés.....	II
Table des matières .....	III
Liste des figures .....	VIII
Liste des tableaux .....	XII
Liste des abréviations et acronymes .....	XIII
Introduction générale .....	1

### **Chapitre I : Les notions de base de la météorologie**

I-1 Introduction.....	4
I-2 structure de l'atmosphère.....	4
I-2-1 la troposphère.....	6
I-3 Composition de l'air atmosphérique .....	6
I-4 La vapeur d'eau .....	7
I-5 Température de l'air .....	8
1. Définition de la température de l'air.....	8
2. Unité de mesure.....	8
3. Distribution verticale de la température .....	9
4. Transfert de la chaleur .....	9
I-6 La pression atmosphérique .....	10

1. Définition de la pression atmosphérique .....	10
2. Unité de mesure .....	11
3. Mesure de pression .....	12
4. Variation de pression avec l'altitude .....	12
I-7 L'humidité .....	13
I-8 Les masses d'air .....	14
1. Définition d'une masse d'air .....	14
2. Formation et dissolution d'une dépression .....	14
I-9 le vent .....	15
1. Définition du vent .....	15
2. Unités de mesure .....	15
3. La vitesse du vent .....	16
4. Principales causes du vent .....	17
5-La direction des vents en haute altitude et à la surface du sol .....	19
I-10 l'atmosphère standard .....	20
I-11 conclusion.....	21

## **Chapitre II : Le cisaillement du vent et l'aéronautique**

II-1 Introduction .....	23
II-2 Définition du cisaillement du vent .....	23
II-3 calcul du cisaillement du vent .....	26
II-4 Intensité du cisaillement du vent .....	27
II-5 les origines du cisaillement du vent .....	28

II-6 Reconnaissance du cisaillement du vent .....	37
1- Indices météorologiques extérieurs .....	37
2- Indices provenant des instruments de bord et/ou de l'équipement embarqué .....	38
3- Observation du cisaillement du vent au moyen des instruments météorologiques ordinaires .....	39
II-7 l'effet du cisaillement du vent sur les performances d'avion .....	41
1- Effet du cisaillement du vent sur la vitesse propre d'avion .....	41
2- l'effet du cisaillement du vent sur l'angle d'attaque .....	42
3- L'effet du cisaillement du vent traversier .....	44
4-L'effet d'une microrafale .....	44
II-8 Les précautions contre le cisaillement du vent .....	46
II-7 conclusion .....	46
 <b>Chapitre III : Prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger</b>	
III.1 Introduction .....	48
III.2 Présentations de l'aéroport d'Alger .....	48
III.3 le cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger .....	50
III-4 La détection du cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger .....	52
III-5 La prévision numérique du temps .....	54
III-6 Les équations utilisées pour la prévision numérique du temps PNT..... .....	56
III-7 les modèles de prévision numérique utilisés à l'ONM .....	56

III-8 Simulation numérique des situations de cisaillement de vent sur l'aéroport d'Alger .....	59
1. Le choix de la station météorologique .....	59
2. Le choix de modèle de simulation .....	60
3. Le choix de domaine spatial de simulation .....	60
III-9 L'extraction des données .....	65
III-10 Les résultats de la prévision .....	67
III-11 conclusion.....	71
<b>Conclusion et perspective .....</b>	<b>72</b>
Bibliographie .....	73
Annexes.....	74
Annexe A.....	75
Annexe B.....	76
Annexe C.....	77

## Liste des figures

### **Chapitre I : Les notions de base de la météorologie**

Figure I.1 : structure de l'atmosphère .....	5
Figure I.2 : un schéma explique le cycle d'eau .....	8
Figure I.3 : la distribution verticale de la température .....	9
Figure I.4 schéma représente la force de pression.....	11
Figure I.5 schéma représente le fonctionnement d'un baromètre à mercure.....	12
Figure I.6 la variation de l'atmosphère en fonction de l'altitude .....	13
Figure I.7 la variation de la tension de vapeur à saturation en fonction de la température .....	14
Figure I.8 Un schéma qui représente la différence de pression entre deux zones en fonction de leur distance .....	17
Figure I.9 la direction du vent en haute altitude .....	19
Figure I.10 la direction du vent à la surface du sol .....	20

### **Chapitre II : Le cisaillement du vent et l'aéronautique**

Figure II.1 : cisaillement horizontal du vent horizontal .....	24
Figure II.2 : cisaillement horizontal du vent vertical .....	24
Figure II.3 : un schéma qui montre la différence entre le cisaillement horizontal du vent horizontale (1) et du vent vertical (2) .....	25
Figure II.3 : cisaillement verticale du vent vertical .....	25

Figure II.4 : un schéma qui représente les types du cisaillement verticale....	26
Figure II.5 : l'effet d'un relief sur l'écoulement du vent .....	30
Figure II.6 : un schéma qui représente le phénomène de Foehn .....	30
Figure II.7 : un schéma qui représente la boucle de convection à l'origine de la brise de terre .....	31
Figure II.8 : un schéma qui représente l'effet de la brise de pente (Catabatique) sur un avion .....	32
Figure II.9 : un schéma qui montre l'effet de la brise de mer sur un avion .....	34
Figure II.10 : Cycle de vie d'un orage .....	35
Figure II.11 : l'effet des cellules orageuses sur un avion .....	36
Figure II.12 : l'effet d'une microrafale sur un avion .....	37
Figure II.13 : présentation vectorielle de la trajectoire de vol (R) après diminution transitoire de la vitesse propre .....	42
Figure II.14 : présentation vectorielle de la trajectoire de vol (R) après augmentation transitoire de la vitesse propre.....	42
Figure II.15 : l'effet du cisaillement du vent sur l'angle d'attaque .....	43
Figure II.16 : un schéma qui montre l'effet d'une microrafale devant l'avion .....	44
Figure II.17 : un schéma montre l'effet d'une rafle lorsque l'avion vole à travers un courant descendant de microrafale .....	44
Figure II.18: un schéma qui montre l'effet d'une Microrafale apparaissant derrière l'avion .....	45

Figure II.19 : un schéma montre l'effet d'une microrafale lorsque l'avion traverse d'elle .....	45
---	----

### **Chapitre III : Prévion de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger**

Figure III.1 : L'emplacement géographique de l'aéroport d'Algérie .....	50
Figure III.2 : le phénomène de brise de mer qui se produit à côté de l'Algérie .....	51
Figure III.3 : le phénomène de la brise de terre qui se produit à côté de l'Algérie .....	51
Figure III.4 : la position des trois anémomètres et la station météorologique .....	53
Figure III.5 : le principe de la prévision numérique de temps .....	54
Figure III.6 le découpage de la boîte atmosphère de la terre .....	55
Figure III.7 : Domaine Aladin/Algérie .....	57
Figure III.8 : domaine Aladin/sable Algérie .....	58
Figure III.9 : domaine AROME nord d'Algérie .....	59
Figure III.10 : le domaine Arome choisi pour l'étude .....	61
Figure III.11 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 .....	63
Figure III.12 : diagramme explique la méthode de calcul selon le programme .....	67
Figure III.13 : les variation de l'intensité du cisaillement du vent sur la zone A .....	68
Figure III.14 : l'intensité du cisaillement dans la zone B .....	69

Figure III.15 : l'intensité du cisaillement du vent su la zone c.....70

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau II.1</b> les intensités di cisaillement du vent selon L'OACI.....	29
<b>Tableau III.1</b> les caractéristiques de l'aéroport Houari Boumediene.....	49
<b>Tableau III.1</b> l'intensité du cisaillement de vent su la zone A.....	68.
<b>Tableau III.2</b> l'intensité du cisaillement sur la zone B à 20h .....	69
<b>Tableau III.3</b> intensités du cisaillement du vent dans la zone C .....	70

## *Liste des abréviations et acronymes*

---

<b>ALADIN :</b>	Air Limite, Adaptation dynamique, Développement International.
<b>AROME:</b>	Application of Research at Operation to MEsocal
<b>FT :</b>	unité de mesure pied
<b>IAC :</b>	Cartes d'approche aux instruments
<b>LLWAS:</b>	système avertisseur de cisaillement du vent dans les basses Couches
<b>NM :</b>	unité de mesure Nautic mailles
<b>OACI :</b>	Organisation International de l'Aviation Civil
<b>ONM :</b>	Office National de la Météorologie
<b>RWY :</b>	la piste (Runway)
<b>TDWR :</b>	Radar météorologique Doppler d'aéroport

# INTRODUCTION GENERALE

---

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE :**

Une connaissance précise de l'atmosphère est en effet essentielle pour pratiquer l'aviation, c'est pour cela il y'a les services météorologiques qui aident l'aviation à réduire le danger des phénomènes météorologique qui sont incontrôlable

En aéronautique le vent peut être aussi avantageux qu'inconvenant, particulièrement dans le domaine des opérations aériennes et d'exécutions des vols. Il faut reconnaitre 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.

Notre étude se fait au niveau de l'aéroport d'Alger car on observe qu'il y a toujours des changements rapides sur la vitesse et la direction du vent, à cause de son emplacement géographique qui favorise l'apparition de ces phénomènes. Malgré tout ça il n'existe aucune moyenne d'observation afin de minimiser le risque des phénomènes dangereux.

Le but de mémoire est de faire une combinaison entre les moyens utilisés par l'office national météorologique et d'autres moyens informatique (programmation en python) afin d'être capable de calculer le vent et leurs types dans différents point autour de l'aéroport, pour but d'améliorer la sécurité aérienne au niveau de l'aérodrome d'Alger.

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 tous 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 du vent sur l'aérodrome d'Alger ?

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

**Le premier chapitre** : on a parlé des notions de base de la météorologie afin d'aider les lecteurs à comprendre bien les différents phénomènes météorologiques.

**Le deuxième chapitre** : on bien expliquer le phénomène du cisaillement du vent (les cause les origines, les types leurs conséquences) et on a mettre en lumière la relation entre le cisaillement du vent et l'aéronautique.

**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 24-25/novembre 2021 qui a été sélectionnée d'après l'analyse des observations annuelles des vents en surface sur l'aérodrome d'Alger. On a écrit un programme on python qui nous permettre de calculer le vent ou le cisaillement du vent entre deux points sélectionnés dans la grille d'une manière rapide et bref.

A la fin on a terminé notre étude par une conclusion générale.

**Chapitre I :**

**Les notions de base de la météorologie**

# **Chapitre I : les notions de base de la météorologie.**

---

## **I-1 Introduction :**

Dans ce chapitre, on va comprendre les bases de la météorologie.

En météorologie comme dans toutes les autres sciences physiques, l'utilisation de la mathématique est une chose courante et essentielle au spécialiste car, des fois il est très difficile d'exprimer en mot et en langage clair certains concepts et phénomène mais il est possible de les traiter avec les mathématiques avancées.

Sans oublier son vocabulaire propre qui peut rebuter le lecteur par certains mots ou expressions. Alors ce chapitre présente une solution à ces deux difficultés pour bien comprendre le contexte physique dans lequel s'effectue cette étude.

## **I-2 structure de l'atmosphère :**

L'atmosphère terrestre et la fine pellicule gazeuse constituée d'air qui entourent notre planète. Aller retenu par l'attraction terrestre et du fait de sa compressibilité elle va en se raréfiant constamment à mesure qu'on s'élève. La limite supérieure de l'atmosphère n'est pas nette 50% de sa masse se situent entre 0 et 5 km d'altitude 90% entre 0 et 16 km 99 % en dessous de 32 km. La présence de gaz à plus haute altitude se constate grâce à de nombreux phénomènes étoiles filantes ralentissement progressif des satellites qui finissent par rentrer dans l'atmosphère en se consumant vers 130 km d'altitude.

La totale de l'atmosphérique représente le millionnaire de la moche de la terre.

Atmosphère nous apparaît comme un milieu presque insignifiant dans le système terre atmosphère mais dans l'importance aurait été capitale pour le développement de la vie.

L'allure générale de la variation de la température en fonction de l'altitude et la même pour une même latitude et une même saison. Éric existe 4 régimes différents de variations de température avec l'altitude ce qui nous conduit à diviser l'atmosphère en quatres grandes régions créant ainsi une stratification de l'atmosphère en couches.

## Chapitre I : les notions de base de la météorologie.

En partant du sol la température commence par décroître jusqu'à une certaine altitude cette couche s'appelle la troposphère. On y trouve les nuages et les phénomènes météorologiques.

Au-dessus, se trouve la stratosphère, où la température est soit constante soit croît à nouveau. La limite entre ces deux couches s'appelle la stratopause.

La stratosphère s'étend jusqu'à là qui se situe vers 50 km d'altitude et dont la température est comprise entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  il n'y a pas ou très peu de nuages dans la stratosphère.

Au-dessus de la stratopause, la température recommence à décroître, formant une couche appelée mésosphère, limitée par la mésopause située entre 70 et 85 km d'altitude, là où la température atteint un minimum de  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Au-dessus de la mésopause, la température recommence à croître, dans une couche appelée thermosphère. Vers 600 km d'altitude, la température varie de  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  et présente un rythme diurne très marqué.

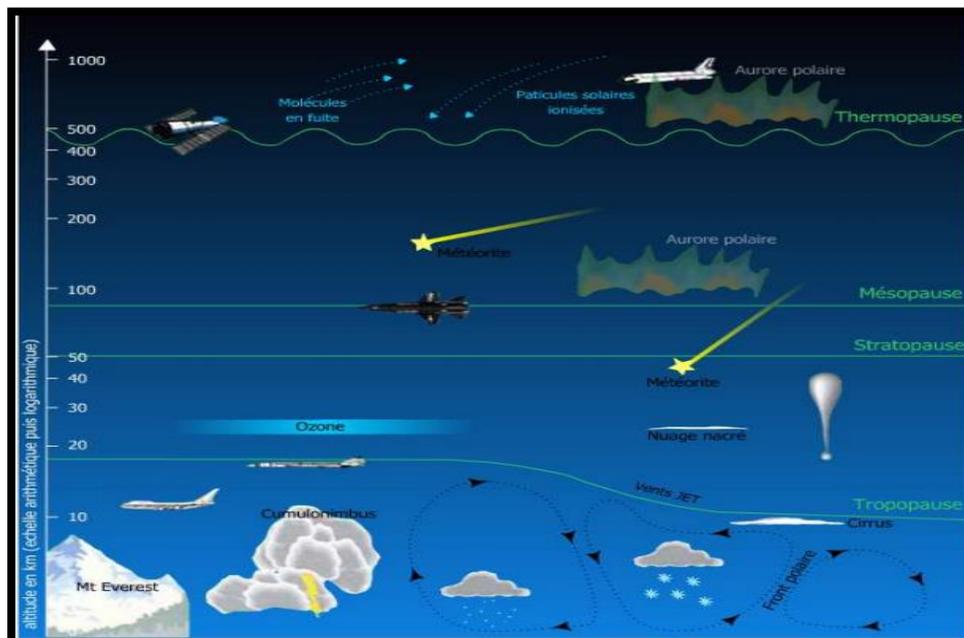


Figure I.1 : structure de l'atmosphère.[2]

# **Chapitre I : les notions de base de la météorologie.**

---

## **I-2-1 la troposphère :**

### **1. Définition de la troposphère : [3]**

La troposphère est donc la couche d'atmosphère partant du sol et présentant en moyenne une décroissance de la température avec latitude. Cette couche, dont l'épaisseur varie avec latitude, a une extension verticale plus importante au-dessus de l'équateur qu'au-dessus des pôles.

Les phénomènes météorologiques ont lieu dans la troposphère, car ils font intervenir l'eau, qui se situe en majeure partie dans cette couche. Les nuages, par exemple se situent presque tous dans la troposphère même si on peut trouver les sommets de nuage à fort développement vertical, appelée cumulonimbus, dans la basse stratosphère. De plus, la majorité des avions en ligne volent dans la troposphère, exception faite de la concorde qui croisait vers 20 km d'altitude, on comprend donc c'est la troposphère joue un rôle important du point de vue météorologique ou même aéronautique.

### **2. Définition de la Tropopause : [3]**

La couche de transition qui existe entre la troposphère et la stratosphère est suffisamment mince pour être assimilée à une surface; on l'appelle tropopause. Sur un sondage donnant la variation de température avec l'altitude, on repère la tropopause par le point où la température cesse de décroître franchement.

Les vents les plus forts dans l'atmosphère ainsi que la turbulence se rencontrent au voisinage de la tropopause. On peut adopter comme ordre de grandeur que le vent croît avec l'altitude de 5% par 1000 ft sous la tropopause, alors qu'il décroît de 5% par 1000 ft au-dessus de la tropopause.

## **I-3 Composition de l'air atmosphérique :**

L'atmosphère avant tout constituée d'air sec, mélange de gaz dont la composition reste pratiquement constante entre 0 et 80 km d'altitude. (L'azote, oxygène, argon) représentent à eux seuls 99,94% de la masse d'air.

## **Chapitre I : les notions de base de la météorologie.**

---

La troposphère contient aussi de l'eau (sous forme de vapeur d'eau, qui est un gaz invisible, et aussi sous forme condensée gouttelettes ou en cristaux « les nuages »), ainsi que des poussières d'origines très variées ces derniers sont encore appelés noyaux de condensation, car c'est autour d'elles que la vapeur d'eau se condense en eau liquide. L'eau joue un rôle considérable pour le transfert d'énergie.

### **I-4 La vapeur d'eau :**

L'évaporation des océans, mers, lacs et l'évapotranspiration des végétaux fournissent la vapeur d'eau à l'atmosphère. Celle-ci se condense pour former les nuages, qui vont précipiter, obligeant ainsi l'eau de pluie à retourner à sa source. C'est ce que l'on appelle le cycle de l'eau. Tous ces phénomènes interviennent dans la répartition de l'eau dans l'atmosphère et explique la très grande variabilité de la teneur en eau dans la troposphère et la faible teneur aux niveaux plus élevés. La masse totale moyenne de l'eau contenue dans l'atmosphère n'est que 0.25% de celle de l'air, ce qui situe l'eau comme quatrième composant de l'air après l'argon.

Alors, on constate que la vapeur d'eau est le constituant de l'atmosphère le plus important d'un point de vue météorologique.

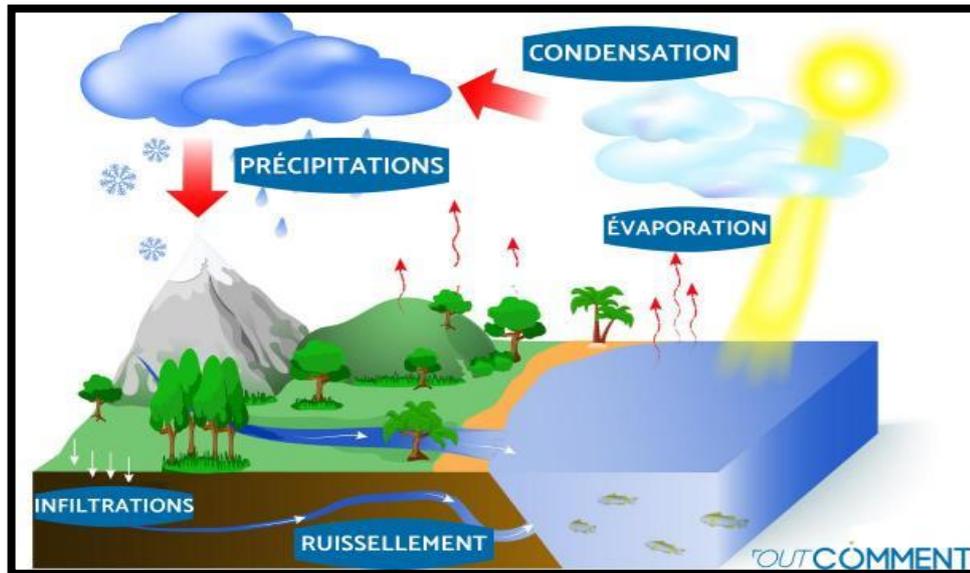


Figure I.2 : un schéma explique le cycle d'eau. [20]

### I-5 Température de l'air :

#### 1. Définition de la température de l'air : [6]

La température est une grandeur qui caractérise l'état d'agitation des molécules. C'est le mouvement de Brownien pour bien comprendre si on apporte de la chaleur au fluide, en le chauffant, le mouvement Brownien des molécules s'accélère et la température augmente. Si l'inverse, le fluide perd de son énergie sous forme de chaleur, le mouvement se ralentit et la température diminue. Si mouvement brownien était complètement arrêté, le fluide serait à sa température la plus basse possible, encore appelée Zéro absolu. Il n'est donc pas possible de descendre à des températures plus basses.

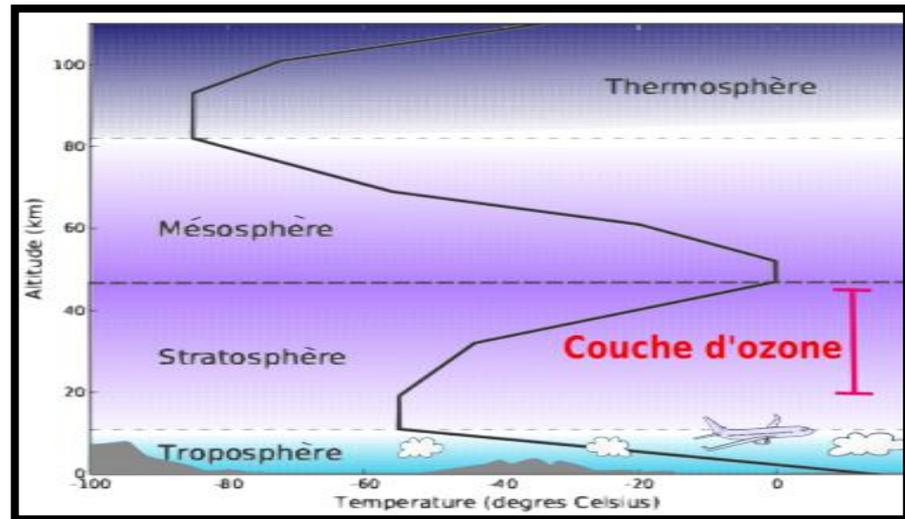
#### 2. Unité de mesure :

Il existe trois échelles :

- Échelle de Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Échelle de Kelvin : avec  $T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$ .
- Échelle Fahrenheit : avec  $T(^{\circ}\text{F}) = 9/5 t(^{\circ}\text{C}) + 32$ .

#### 3. Distribution verticale de la température :

## Chapitre I : les notions de base de la météorologie.



*Figure I.3:* La distribution verticale de la température. [2]

La décroissance de température moyenne dans l'atmosphère étant égale à  $6,5^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$  ou encore  $2^{\circ}\text{C}/1000\text{ft}$ .

#### 4. Transfert de la chaleur :

Dans l'atmosphère terrestre, les échanges de chaleur ont lieu suivant plusieurs modes :

➤ Par rayonnement :

Au niveau du système terre-atmosphère, c'est le soleil qui envoie l'énergie sous forme de rayonnement, cette énergie se propage dans le vide de l'espace et est absorbée lorsqu'elle rencontre de la matière. La terre absorbe donc cette énergie et ainsi se réchauffe. Mais l'atmosphère absorbe aussi une partie de rayonnement solaire, ce qui lui permet aussi de se réchauffer.

➤ Par conduction :

La chaleur se propage le long d'un corps à un autre corps s'ils sont en contact. Par exemple une masse d'air d'une certaine température, arrivant sur un sol froid, subira un refroidissement de ses basses couches, qui sont en contact avec le sol.

➤ Convection :

## **Chapitre I : les notions de base de la météorologie.**

---

Ce mode de propagation de la chaleur n'est possible que dans un fluide par exemple un fluide chauffé à sa base. C'est le cas de l'atmosphère initialement chauffée par conduction au-dessus des différents types de surface terrestre. Certaines parties de fluide, plus chaudes, ont tendance à monter et sont remplacées par du fluide plus froid qui s'échauffe à son tour.

➤ **Advection :**

En météorologie, le terme « advection » désigne un mouvement horizontal de l'air. Grâce au mouvement des fluides dans le système terre-atmosphère, la chaleur (ou l'énergie) peut se transporter d'un droit à l'autre.

➤ **Turbulence :**

Dans certains cas, la turbulence qui s'applique à une couche d'atmosphère, peut provoquer un transfert de chaleur au sein même de cette couche.

### **I-6 La pression atmosphérique :**

#### **1. Définition de la pression atmosphérique : [4]**

Par définition, la pression est une force par unité d'aire. Ainsi, à une altitude donnée, la pression atmosphérique est le poids de la colonne d'air de section unitaire qui s'étend du niveau considéré jusqu'au sommet de l'atmosphère.

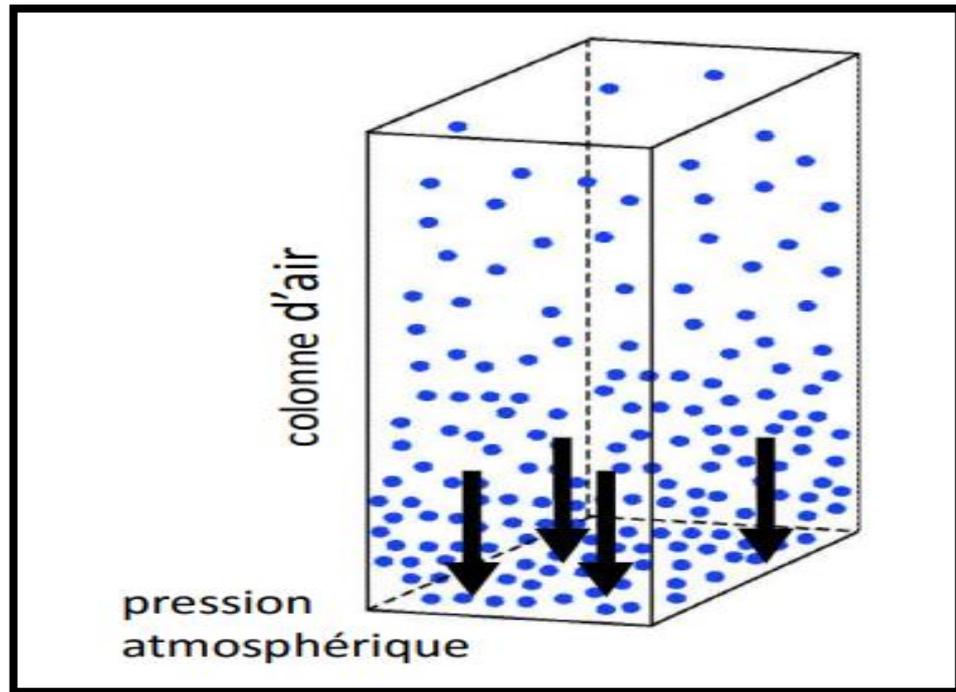


Figure I.4 schéma représente la force de pression [2]

### 2. Unité de mesure :

Différentes unités sont utilisées pour exprimer la pression atmosphérique :

Dans le SI, c'est le kilopascal (kPa) ; cependant, en météorologie, on emploie souvent le millibar (mb) ; un kilopascal vaut 10 millibars. La pression moyenne au niveau moyen de la mer est de 101,32 kPa. De jour en jour, la pression varie : à son maximum, elle atteint 105 kPa tandis qu'elle peut être de 96 kPa dans une tempête importante. Dans les ouragans ou les typhons, elle est encore plus basse ; on y a déjà mesuré 87 kPa.

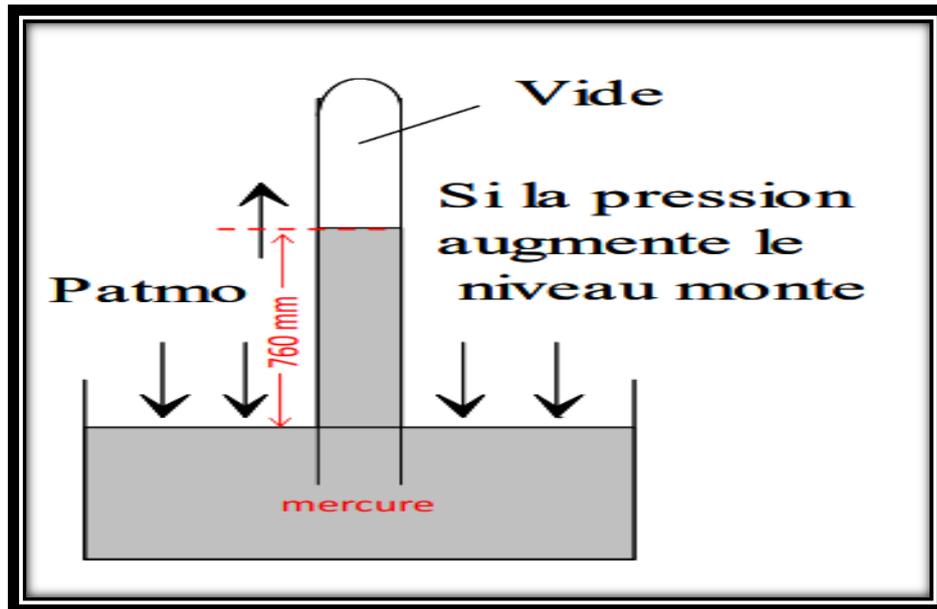
Plusieurs facteurs, comme l'altitude et la température, peuvent faire varier la pression atmosphérique et ainsi créer des zones de haute ou de basse pression. Ces variations sont directement liées aux principaux phénomènes météorologiques.

### 3. Mesure de pression :

Le baromètre à mercure sert à mesurer la pression atmosphérique. L'air pèse sur le mercure contenu dans une cuve et le force ainsi à monter dans un tube à l'intérieur duquel on a fait le vide. Le niveau atteint par le mercure permet d'évaluer la pression exercée par l'air. Pendant longtemps, la hauteur du mercure

## Chapitre I : les notions de base de la météorologie.

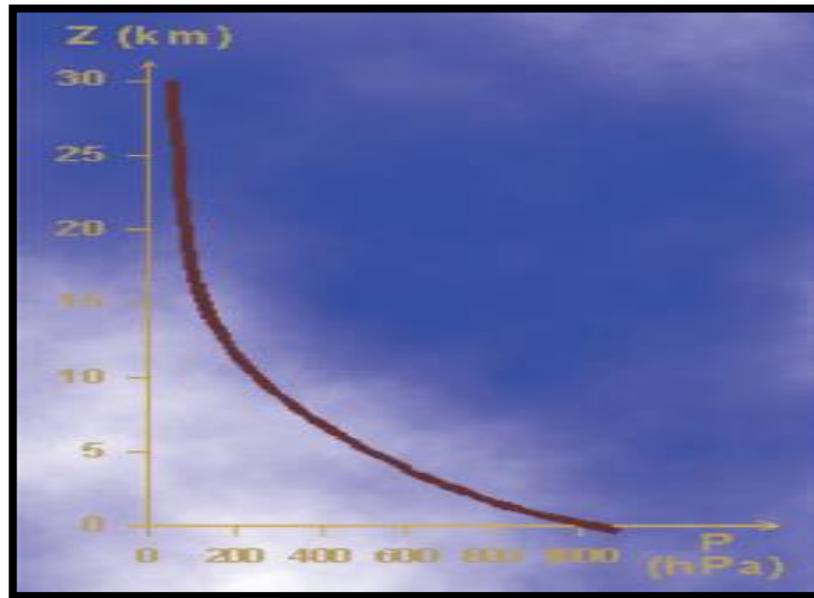
a constitué l'unité de mesure de la pression atmosphérique. Le système international utilise aujourd'hui l'hectopascal (hPa) : 1 000 hPa équivalent à la pression qu'exerce une masse de 1 kg sur une surface de 1 cm<sup>2</sup>.



*Figure 1.5* schéma représente le fonctionnement d'un baromètre à mercure [2]

#### 4. Variation de pression avec l'altitude :

Au niveau de la mer, la pression atmosphérique est généralement comprise entre 950 et 1050 hpa. Dès que l'on s'élève en altitude, la pression atmosphérique varie très rapidement, présentant une décroissance de la pression atmosphérique entre 0 et 30 km.



*Figure I.6* la variation de l'atmosphère en fonction de l'altitude. [2]

La décroissance de pression atmosphérique entre 0 et 30 km.

Pour les basses couches de l'atmosphère, on peut retenir l'ordre de grandeur suivant : la pression atmosphérique décroît d'un facteur 10 tous les 15 km à peu près. Ainsi, si la pression au niveau de la mer est de l'ordre de 1000 hpa, elle est de 100 hpa à 15 km d'altitude, et de 10 hpa à 30 km.

### I-7 L'humidité :

L'augmentation ou la diminution du contenu en vapeur d'eau dans l'air se traduit par une augmentation ou une diminution de la tension de vapeur. La figure I.7 montre la variation de la tension de vapeur à saturation en fonction de la température, pour la vapeur en équilibre par rapport à l'eau et à la glace. Les valeurs de la température et l'humidité de l'air représentent un point sur la figure. Si le point est sous la courbe (A), l'air n'est pas saturé ; s'il est au-dessus de la courbe (C), il est sursaturé ; s'il est juste sur la courbe (B), il est saturé. Au point D, l'air est sursaturé par rapport à la glace mais sous-saturé par rapport à l'eau. Cette différenciation dans la courbe de la tension de vapeur sous le point de congélation est la base du mécanisme de croissance des cristaux de glace dans un nuage.

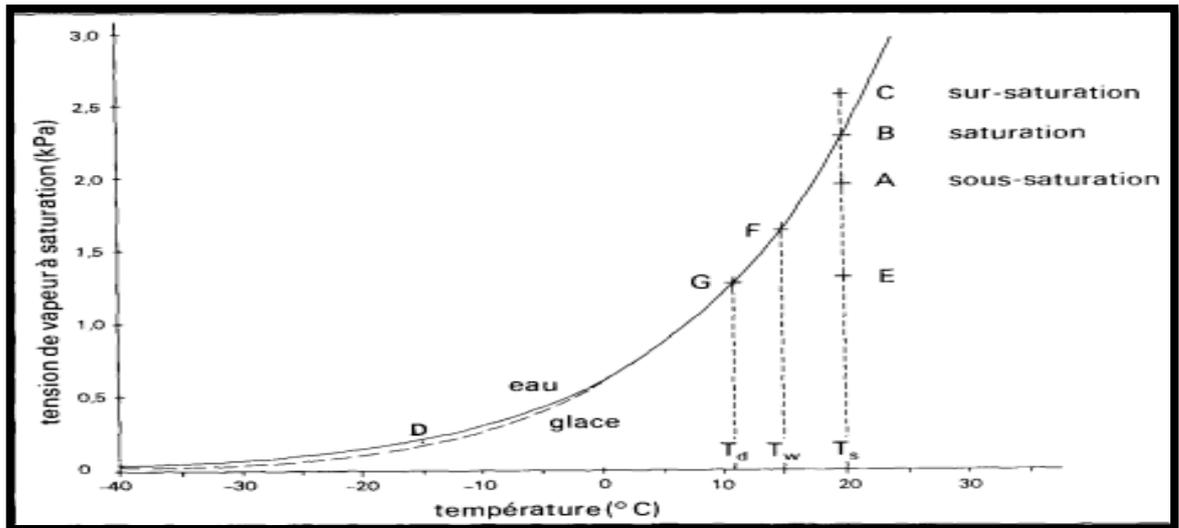


Figure I.7 la variation de la tension de vapeur à saturation en fonction de la température

[4]

### I-8 Les masses d'air :

#### 1. Définition d'une masse d'air : [6]

On appelle masse d'air un énorme volume atmosphérique ayant séjourné dans une région bien précise et qui en a acquis les caractéristiques climatiques. En se déplaçant au gré des vents, les masses d'air entrent en contact les unes avec les autres et contribuent ainsi à la distribution de l'humidité et de la chaleur à la surface du globe. Lorsque deux masses d'air de température et d'humidité différentes se rencontrent, elles ne se mélangent pas; elles s'affrontent le long d'une ligne appelée front. Cette rencontre engendre la formation de nuages et de précipitations.

#### 2. Formation et dissolution d'une dépression :

Lorsque des masses d'air froid, issues des régions polaires, se heurtent à des masses d'air chaud provenant des tropiques, leur rencontre produit une ligne de front sur laquelle, en un point donné, la pression se met à tomber : une dépression est née. Nuages, précipitations et vents s'y développent jusqu'à la dissolution du phénomène.

# Chapitre I : les notions de base de la météorologie.

---

## I-9 le vent :

### 1. Définition du vent : [5]

Le vent est tout simplement le déplacement de l'air. En s'écoulant des zones de haute pression vers les zones de basse pression, ces courants contribuent à établir un certain équilibre atmosphérique. Parce qu'ils entraînent avec eux la chaleur et l'humidité des masses d'air, ils jouent également un rôle primordial dans la plupart des phénomènes météorologiques. Deux éléments sont nécessaires pour caractériser le vent : sa direction et sa vitesse. La première est donnée en degrés par rapport au nord vrai tandis que la seconde s'exprime en kilomètres par heure (km/h). Le vent est donc représenté par un vecteur (comme tout déplacement), dont il faut préciser la direction (celle du mouvement de la particule d'air) et le module (la vitesse de la particule d'air). Ce vecteur est tangent à la trajectoire suivie par la particule.

### 2. Unités de mesure : [5]

Le module de vecteur de vent, que l'on appelle abusivement « force du vent », n'est rien d'autre que la vitesse du vent, et doit donc être exprimé en unités de vitesse.

Dans le système international, l'unité de vitesse est le m/s. c'est donc l'unité qu'il faudra utiliser chaque fois que l'on fera des calculs sur la force du vent » cette unité est également utilisée en climatologie.

Pour l'aéronautique la météorologie synoptique, on utilise plutôt le nœud (KT) en abrégé. Un mobile à une vitesse de 1 nœud s'il parcourt un mille nautique (NM) en une heure comme  $1\text{NM} = 1852\text{m}$  don approximativement  $1\text{KT} = 0.5\text{m/s}$ .

Le Km/h est aussi une autre unité possible pour exprimer la force du vent. Assez peut utiliser par la météorologie, il est souvent cité par les médias lors de tempête spectaculaires, car il permet au public de mieux rendre compte de la vitesse atteinte. On peut se rappeler qu'un nœud est égale approximativement à 2km.

La direction du vent est donnée par une girouette et sa vitesse est mesurée par un anémomètre. L'ensemble de ces deux capteurs est situé sur un pylône ç 10 m au-dessus du sol, positionné dans un endroit assez dégagé, pour éviter les influences du sol et des obstacles environnants (effets de turbulence).

## Chapitre I : les notions de base de la météorologie.

---

La direction du vent est exprimée en degré, comptés à partir du nord (vrai ou magnétique selon le cas).

Le vent synoptique est moyenné sur 10 min et sa direction est repérée par rapport au géographique (nord vrai).

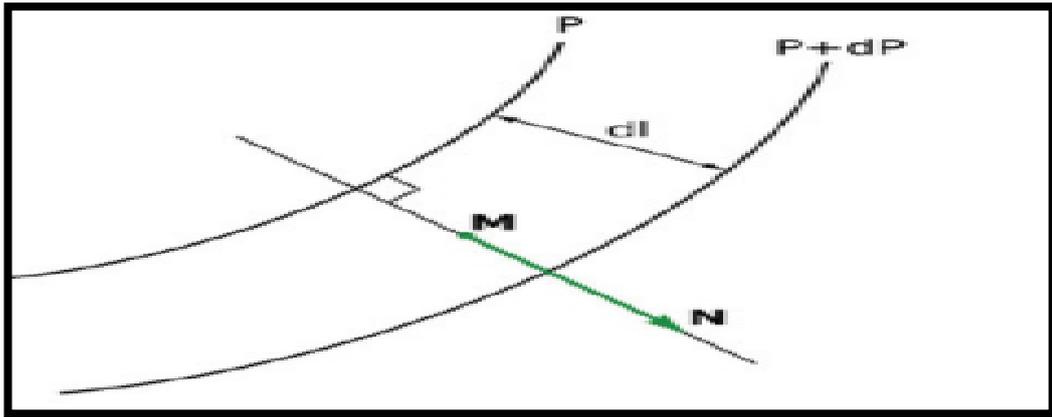
Le vent du METAR est moyenné sur 10 min et sa direction est repérée par rapport au nord géographique également. La vitesse maximale du vent (encore appelée rafale) est transmise dès qu'elle dépasse 10KT celle du vent moyen.

Le vent transmis par les tours de contrôle (vent aéronautique) est moyenné sur 2min et sa direction est repérée par rapport au nord magnétique. Il est beaucoup plus représentatif du vent rencontré lors des phases de décollage ou d'atterrissage.

Les directions du vent repérées en rose de 36 en utilisant 18 secteurs de 20° la précision de la girouette est généralement de + ou - 10°, mais elle peut, dans certains cas descendre, ç +ou- 5°. Dans les messages météorologiques, la direction est transmise en étant arrondie à la dizaine de degrés la plus proche

### 3. La vitesse du vent :

Les isobares, qui relient les lieux de même pression atmosphérique sur une carte météorologique, mettent en évidence les anticyclones et les dépressions. En indiquant le gradient de pression (la différence de pression entre deux zones en fonction de leur distance), elles permettent aussi de connaître la vitesse des vents.



**Figure I.8** Un schéma qui représente la différence de pression entre deux zones en fonction de leur distance. [5]

#### 4. Principales causes du vent :

##### 4-1- Gradient horizontal de pression :

La figure I-8 montre le gradient horizontal de pression au point M, le vecteur perpendiculaire aux isobares situées de part et d'autre du point M, dirigé des faibles vers les fortes valeurs de pression, et dont le module vaut :  $\frac{dP}{dl}$

Avec :

- $dP$  : différence de pression entre les deux isobares.
- $dl$  : distance séparant les deux isobares.

Plus les isobares sont rapprochées sur une carte, plus  $dl$  est petit, donc plus le gradient horizontal de pression est fort.

$$P = \overrightarrow{g_{radh}} |\overrightarrow{MN}| \text{ et } |\overrightarrow{MN}| = |\overrightarrow{g_{radh}} P| = \frac{dP}{dl} \quad [5] \quad I.1$$

##### 4-2-force de pression :

Considérons une particule d'air atmosphérique de masse  $m$  situé au point M de la figure x. cette particule subira une force de pression ( $F_p$ ), que l'on peut décrire de la façon suivante.

## Chapitre I : les notions de base de la météorologie.

---

La force de pression est toujours dirigée des hautes vers les basses pressions.

Le module de la force de pression est donné par :

$$F_p = \frac{m}{\rho} \times \frac{dP}{dI} = \left| \frac{m}{\rho} \overrightarrow{g_{radhP}} \right| \quad [5] \quad I.2$$

Avec :

- $m$  : masse de la particule d'air.
- $\rho$  : masse volumique de l'air.
- $\frac{dP}{dI}$  : gradient horizontal de pression.

La force de pression est d'autant plus importante que les isobares sont serrées.

### 4-3- Force de Coriolis :

Sous l'action de la force de pression, la particule se met en mouvement. Il serait logique de penser qu'elle se dirige des hautes vers les basses pressions, conformément au sens de la force de pression. Mais, en raison de la rotation de la terre autour de l'axe des pôles, la particule est très vite déviée de cette trajectoire par une autre force, la force de Coriolis. La force de Coriolis est toujours perpendiculaire à la vitesse à la vitesse du vent, et elle est dirigé à droite du vecteur vitesse dans l'hémisphère nord.

Le module de la force de Coriolis est donné par :

$$F_c = 2 \times m \times \Omega \times v \times \sin \varphi \quad [5] \quad I.3$$

- $\Omega$  : rotation angulaire de la terre (c'est-à-dire 7.29rd/s).
- $\varphi$  : la latitude de lieu considéré
- $m$  : la masse de particule.
- $v$  : la vitesse du vent.

Donc : La force de Coriolis est proportionnelle à la vitesse du vent et dépend de latitude. À l'équateur, la force de Coriolis est nulle.

### 4-4- vent géostrophique :

Le vent géostrophique ( $V_g$ ) est celui que l'on obtient par le calcul en adoptant certaines hypothèses simplificatrices :

## Chapitre I : les notions de base de la météorologie.

- Le mouvement de la particule d'air est rectiligne et uniforme, cela signifie aussi que l'accélération subie par la particule est nulle et que la trajectoire est une droite, la vitesse de la particule est constante.
- Il n'y a pas de frottement.

Le vent géostrophique est celui qui s'établit lorsque la force de Coriolis équilibre la force de pression. La particule d'air, qui aurait dû se diriger vers la dépression, est d'abord déviée sur sa droite (dans l'hémisphère nord), puis finit par suivre l'isobare lorsque les deux forces s'équilibrent.

Le vent géostrophique souffle le long de l'isobare.

### 5. La direction des vents en haute altitude et à la surface du sol :

La direction que suivent les vents résulte de la combinaison de plusieurs forces. Le gradient de pression pousse l'air à se diriger en ligne droite d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. La force de Coriolis dévie ce mouvement vers la droite ou vers la gauche selon l'hémisphère.

Lorsque rien n'empêche ces forces de s'exercer, comme c'est le cas en haute altitude, les vents tendent à souffler parallèlement aux isobares. Dans l'hémisphère nord il tourne dans le sens horaire autour des anticyclones et dans le sens antihoraire autour des dépressions.

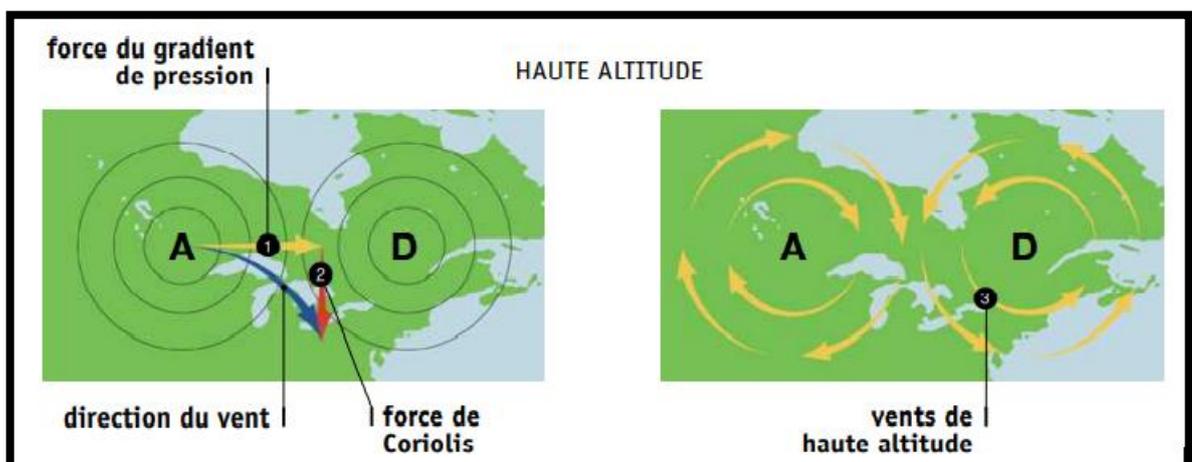


Figure I.9 la direction du vent en haute altitude. [3]

## Chapitre I : les notions de base de la météorologie.

Mais la terre exerce elle-même une force de friction sur la très basse atmosphère : les couches d'air situées en dessous de 500m d'altitude sont entraînées par le mouvement de la planète, ce qui diminue la force de Coriolis. Les vents de surface peuvent ainsi pénétrer jusqu'au cœur des dépressions.

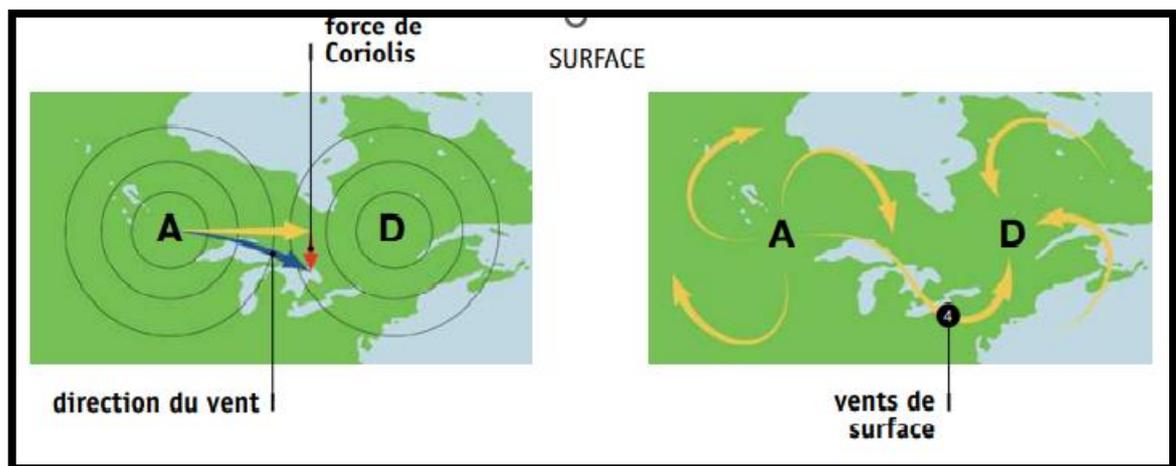


Figure I.10 la direction du vent à la surface du sol. [3]

### Note :

Une dépression (D) est une zone de basse pression, un anticyclone (A) une zone de haute pression.

### I-10 l'atmosphère standard :

l'O.A.C.I. (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) a défini une atmosphère standard : loi de référence de variation de la pression en fonction de l'altitude.

Elle correspond aux conditions moyennes de température et de pression que l'on rencontre dans l'atmosphère.

C'est cette référence qui permet d'étalonner les altimètres, d'assurer la sécurité des aéronefs et d'homologuer des records.

- Au niveau de la mer  $T = +15^{\circ}\text{C}$  et  $P_{\text{atm}} = 1013,25 \text{ hPA}$ .
- Gradient vertical température :  $-6,5^{\circ}\text{C} / 1000 \text{ m}$  (soit  $-2^{\circ}/1000'$ ) jusqu'à 11000 m, nul entre 11000 et 20000 m puis  $+10^{\circ}\text{C}/1000 \text{ m}$  jusqu'à 32000 m

## Chapitre I : les notions de base de la météorologie.

---

- La tropopause se situe à 11000 m.
- L'air est sec et de composition constante • accélération de la pesanteur  $g=9.80665\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

### **I-11 Conclusion :**

Le domaine de la météorologie est un domaine très vaste avec leurs différentes notions. La connaissance de ces notions nous nous permettons de comprendre et d'analyser les différents phénomènes météorologiques.

**Chapitre II :**

**Le cisaillement du vent et l'aéronautique**

## **Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique**

---

### **II-1 Introduction :**

Afin d'assurer la sécurité en aéronautique, il est nécessaire d'étudier, d'analyser et de trouver des solutions et des recommandations pour les différents phénomènes dangereux.

Les conditions météorologiques défavorables sont la cause de 40% des accidents d'approche et d'atterrissage.

Les conditions de vent défavorables, comme (les vents de travers forts, un vent arrière ou un cisaillement du vent) sont la cause de 15% des accidents d'approche et l'atterrissage.

Le cisaillement du vent est le principal causal de 4% des accidents d'approche et d'atterrissage et est le 9<sup>ème</sup> cause de décès.

### **II-2 Définition du cisaillement du vent :**

Le cisaillement du vent est défini comme un changement soudain de la vitesse et/ou de la direction du vent.

Le cisaillement du vent se produit dans toutes les directions, mais pour plus de commodité, il est mesuré sur les axes vertical et horizontal, devenant ainsi un cisaillement du vent vertical et horizontal.

**1. Cisaillement horizontal:** Variations horizontale ou verticale de l'intensité ou de la direction du vent sur l'axe horizontal:

➤ **Le cisaillement horizontal du vent horizontal:**

C'est une variation horizontale du vent horizontale, on l'exprime par KT/NM, se traduit par une diminution du vent de face ou une augmentation du vent arrière, ou un passage d'un vent de face à un vent arrière).

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

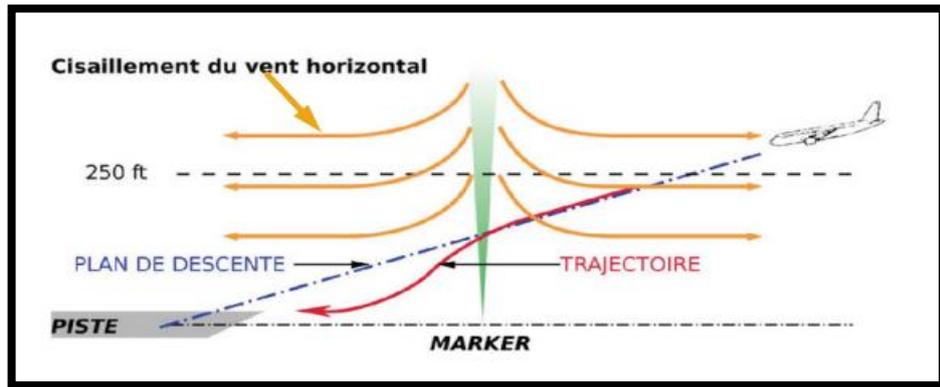


Figure II.1 : cisaillement horizontal du vent horizontal. [5]

### ➤ Le cisaillement horizontal du vent vertical :

C'est une variation horizontale du vent vertical, se traduit par une rafale descendante ou ascendante.

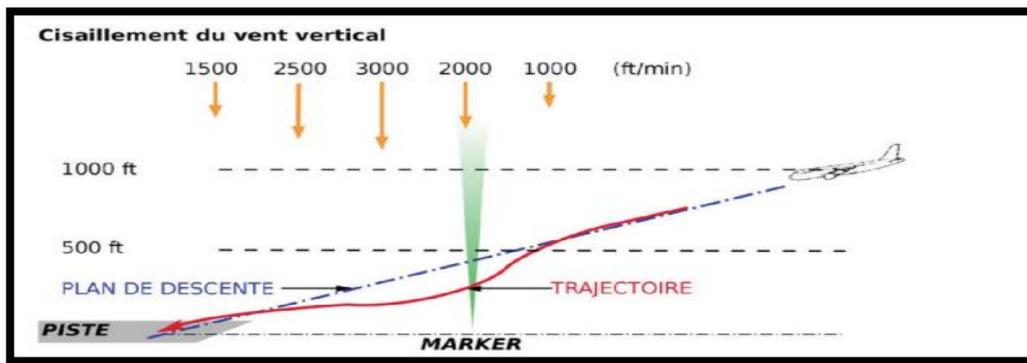


Figure II.2 : cisaillement horizontal du vent vertical. [5]

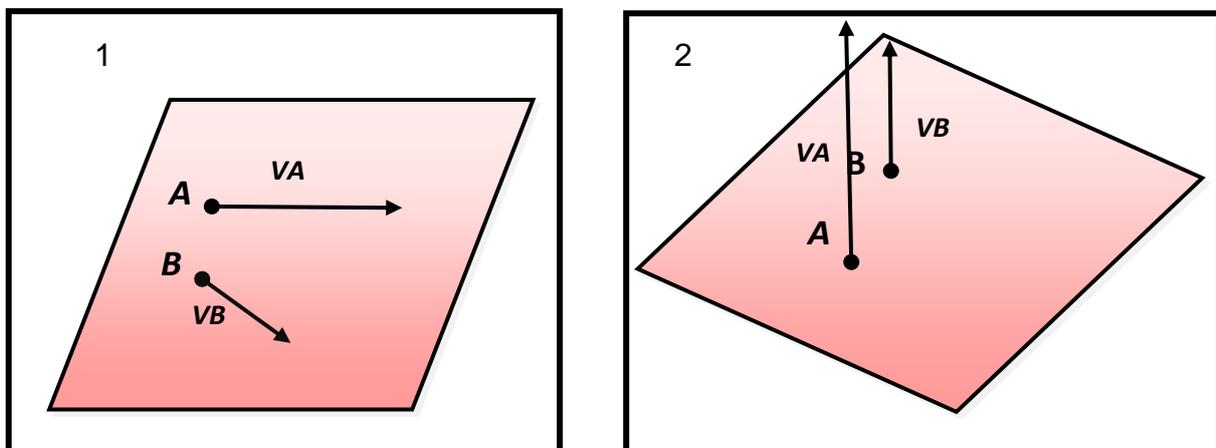


Figure II.3 : un schéma qui montre la différence entre le cisaillement horizontal du vent horizontal (1) et du vent vertical (2).

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

2. **Cisaillement vertical:** Variations du vent de l'axe horizontal vers l'axe verticale, entraînant des turbulences susceptibles d'affecter la vitesse de l'aéronef lors de la montée ou de la descente à travers la couche de cisaillement du vent.

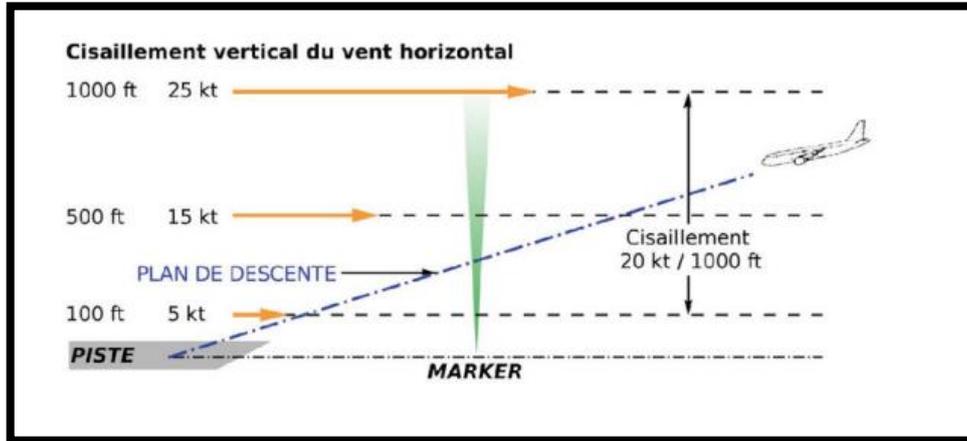


Figure II.3 : cisaillement verticale du vent vertical. [5]

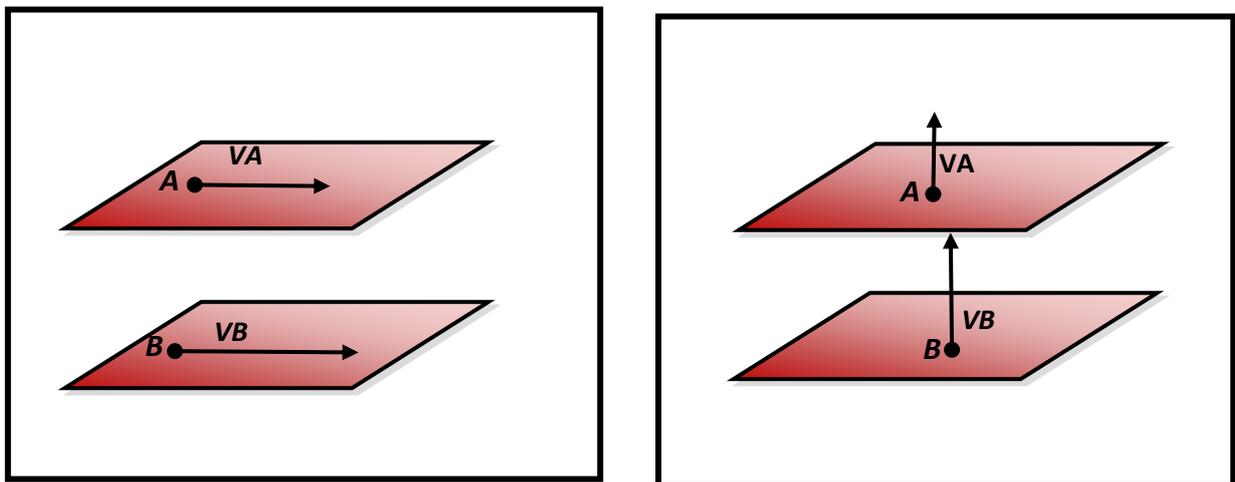


Figure II.4 : un schéma qui représente les types du cisaillement verticale.

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

### II-3 calcul du cisaillement du vent :

Le cisaillement du vent, qui est un changement du vecteur vent d'un point de l'espace à un autre, est donné par la différence entre les vecteurs vents aux deux points, laquelle est elle-même un vecteur (ayant à la fois une vitesse et une direction).

#### 1. Calcule du cisaillement horizontal ou vertical du vent horizontal :

On peut calculer le cisaillement du vent horizontal sous forme graphique au moyen de triangle des vitesses, ou par le calcule, ou par la trigonométrie.

Dans notre travail on s'intéresse par la méthode de calcul, où en soustrayant l'une de l'autre les composantes des deux vecteurs vent, soit manuellement soit par ordinateur.

Le calcule manuelle se fait selon les étapes suivantes:

Considérons un vent  $\vec{v}_A$  au point A, et un vent  $\vec{v}_B$  au point B

#### ➤ Composantes est-ouest des deux vecteurs vent :

\*Point A:  $(x_A)$ .                      \* Point B:  $(x_B)$ .

#### ➤ Composantes nord-sud des deux vecteurs vent:

\* point A:  $(y_A)$ .                      \*point B:  $(y_B)$ .

Le cisaillement du vent de point A vers point B est donnée par :

$$(\vec{v}_B - \vec{v}_A)$$

**Note :** la différence vectorielle dépend du sens dans lequel l'observateur se déplace, du point A au point B ou du point B au point A. S'il se déplace du point A  $(\vec{v}_A)$  vers le point B  $(\vec{v}_B)$  le cisaillement du vent c'est :  $(\vec{v}_B - \vec{v}_A)$ , si non (déplace de B vers A) c'est :  $(\vec{v}_A - \vec{v}_B)$  .

Les composantes du cisaillement de vent  $(\vec{v}_{CZ})$  sont :  $\vec{v}_{CZ} (x_{CZ}, y_{CZ})$

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

---

Avec :  $(\vec{v}_{CZ}) = (\vec{v}_B - \vec{v}_A)$

Alors :

La composante Est-Ouest de la différence vectorielle (cisaillement du vent) est  $x_{CZ}$  avec  $x_{CZ} = (x_B - x_A)$ .

La composante Nord-Sud de la différence vectorielle (cisaillement du vent) est  $y_{CZ}$  avec  $y_{CZ} = (y_B - y_A)$ .

La vitesse (intensité) du cisaillement du vent =

$$(\vec{v}_{CZ}) = \sqrt{(x_{CZ})^2 + (y_{CZ})^2} \quad \text{II-1}$$

La direction du cisaillement du vent :

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{y_{CZ}}{x_{CZ}} \right) \quad \text{II-2}$$

Pour le cisaillement vertical on ajoute la troisième composante  $\vec{v}_{CZ}(x_{CZ}; y_{CZ}; z_{CZ})$  avec :

$$z_{CZ} = (z_B - z_A)$$

La vitesse du cisaillement vertical du vent :

$$\vec{v}_{CZ} = \sqrt{x_{CZ}^2 + y_{CZ}^2 + z_{CZ}^2} \quad \text{II-3}$$

### II-4 Intensité du cisaillement du vent :

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

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

Cisaillement du vent	Intensité
Légère	Inferieur à 04KT
Modéré	Entre 05 et 08KT
Fort	Entre 09 et 12KT
Très fort	Supérieur à 12KT

**Tableau II.1** les intensités di cisaillement du vent selon L'OACI.

### II-5 les origines du cisaillement du vent :

#### 1. Le profil de vent dans les basses couches :

Il est notoire que, indépendamment de l'influence des facteurs météorologiques particuliers qui causent un cisaillement du vent, ce phénomène est toujours présent dans l'atmosphère, sans qu'il en résulte toutefois, normalement, des difficultés pour les pilotes. On le constate en particulier dans la couche située au-dessous de 600 m (2 000 ft), où la traînée due au frottement qui s'exerce sur la masse d'air la plus rapprochée de la surface terrestre entraîne des changements dans la vitesse et la direction du vent avec la hauteur.

On désigne généralement cette couche par l'expression « couche de frottement ». Celle-ci peut être subdivisée comme suit :

- **La couche limite de surface :** Comprise entre la surface terrestre et une hauteur d'environ 100 m (330 ft), dans laquelle le déplacement de l'air est contrôlé surtout par le frottement avec la surface (terrestre).
- **La couche d'Ekman :** Qui s'étend à partir d'une hauteur d'environ 100 m (330 ft) jusqu'à une hauteur d'au moins 600 m (2 000 ft) ; dans cette couche, l'effet de frottement est toujours significatif, mais il diminue progressivement à mesure que la hauteur augmente, tandis que d'autres

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

---

facteurs déterminants, notamment la force de Coriolis et la force du gradient de pression horizontal, prennent de plus en plus d'importance.

Le cisaillement du vent à trois origines : origine dynamique, origine radiative et origine convective

### 1-Origine dynamique :

C'est la variation de l'intensité ou de la direction du vent suite à la rencontre des obstacles le long de sa trajectoire.

#### 1-1 Influence du relief :

Le déplacement de l'air à proximité du sol est fortement influencé par les aspérités de la surface, tout obstacle entraîne l'apparition de mouvement désordonnés qui peuvent s'organiser et former des tourbillons à l'axe horizontal ou vertical. L'épaisseur de la couche ainsi perturbée est essentiellement variable en fonction de la vitesse du vent et de la configuration de la surface.

Outre les modifications de filets d'air, les obstacles jouent un rôle de semi-venturi qui se traduit par une augmentation de la vitesse du vent.

Lorsque de l'air en mouvement rencontre un obstacle (montagne par exemple), une partie des filets d'air tend à la contourner tandis que l'autre partie est forcé de s'élever.

Sur le versant au vent apparaissent donc des mouvements ascendants relativement réguliers. On considère généralement que la vitesse verticale augmente avec la pente. Toutefois, si la pente est supérieure de  $40^\circ$  un tourbillon à axe horizontal se développe au pied de la montagne de telle sorte que l'angle de déviation des filets demeure inférieur à  $40^\circ$ .

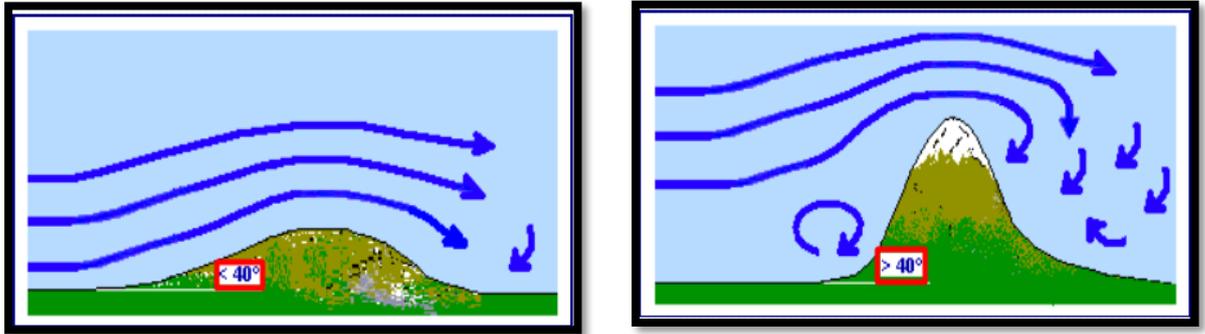


Figure II.5 : effet d'un relief sur l'écoulement du vent. [17]

Au sommet de relief la vitesse augmente par effet venturi.

Sur le versant sous le vent, on observe un mouvement rabattant les courants vers le flanc de la montagne, la composante verticale de la vitesse du vent étant évidemment vers le bas.

### 1-2 Le phénomène de Foehn :

L'effet de Foehn est un vent caractéristique des zones montagneuses. Il est donc lié à l'effet orographique sur le mouvement de l'air. Cet effet se traduit par un vent fort et sec le long des pentes en aval du relief.

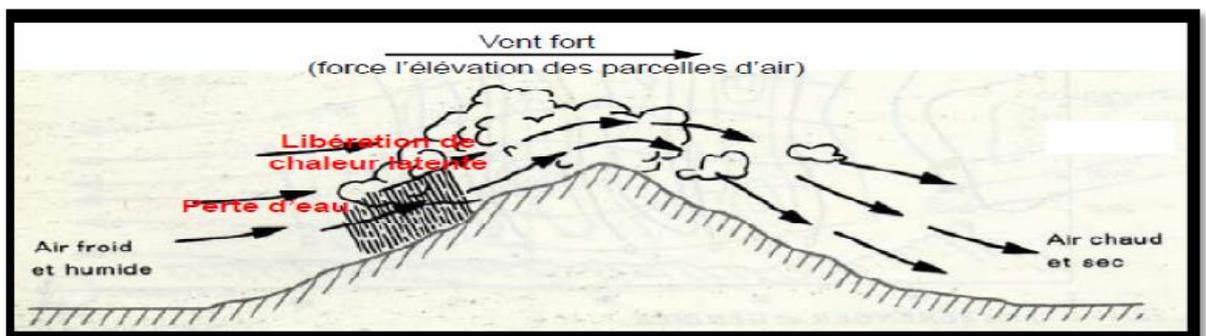


Figure II.6 : un schéma qui représente le phénomène de Foehn. [16]

Il existe deux types de Foehn :

- **Le Foehn sec** : il est dû à l'ascendance de l'air froid et se 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 cisaillement.

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

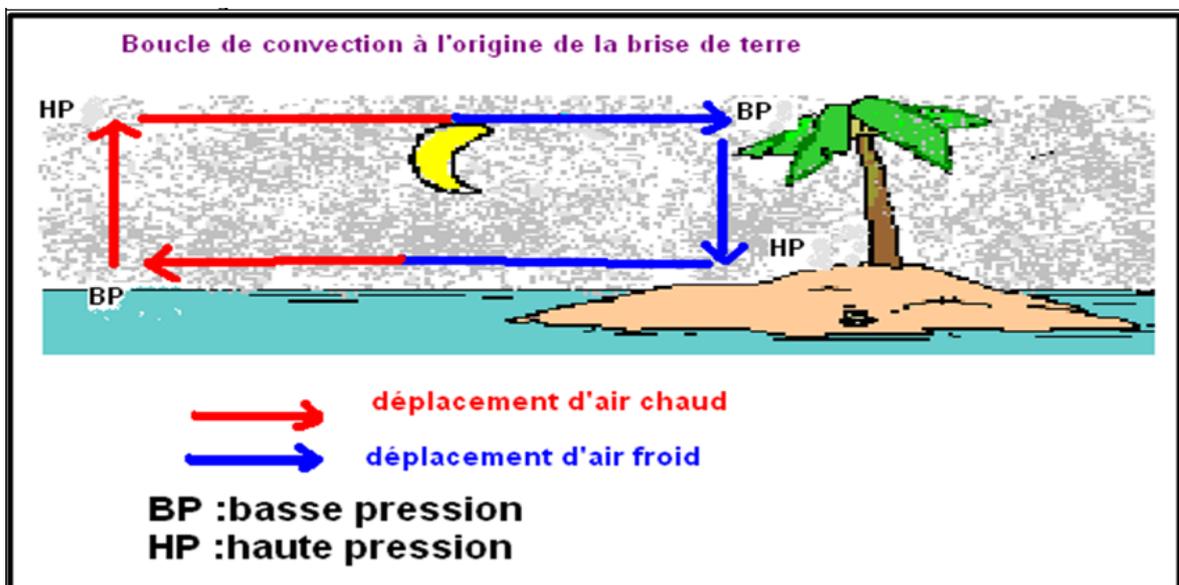
- **Le Foehn humide** : C'est la déviation des filets d'air par un profil montagneux qui soulèvent des particules humides formant, ainsi, des nuages accompagnés de fortes précipitations sur le versant face au vent du relief.

### 2- Origine radiative :

Il se produit dans la nuit, (absence de rayonnement solaire) sur la surface terrestre.

#### 2-1 Brise de terre :

La nuit, le sol se refroidit plus rapidement que la mer (ou un plan d'eau important), alors que la mer est encore chaude, donc il favorise le mouvement ascendant de l'air. Alors, s'installe une circulation d'air de la terre vers la mer (de haute pression vers une basse pression). En général, la brise de terre est plus faible que la brise de mer : le vent (circulation d'air) atteint de 10 à 20 km/h et son extension sur l'océan est aussi assez limitée. Cependant, sur une côte bordée de montagnes, où souffle un vent catabatique, la brise de terre est amplifiée.



*Figure II.7* : un schéma qui représente la boucle de convection à l'origine de la brise de terre. [17]

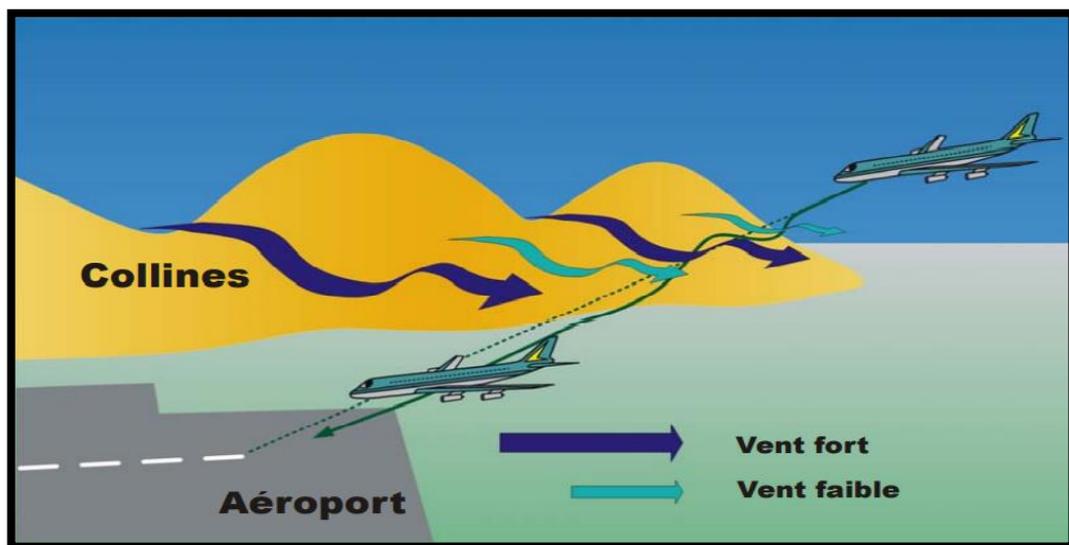
**Note** : le vent catabatique c'est un vent (brise de pente) qui souffle de la pente vers la terre durant la nuit.

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

### 2-2 Brise de pente (catabatique) :

C'est la brise descendante de la montagne, nuit, les pentes se refroidissent rapidement et l'air en contact se refroidit à son tour. Sous l'effet de la gravité, l'air s'écoule vers le fond de la vallée : c'est le vent catabatique. Sa vitesse est faible mais la baisse de température de l'air est très marquée. Si la vallée débouche sur la plaine, plus basse, l'air froid peut s'y écouler, un peu à la manière d'un ruisseau c'est le vent de montagne.

On a remarqué qu'un vent de montagne soufflant hors d'une vallée donnant sur la mer pouvait chasser le brouillard et garder la côte dégagée. Selon la configuration topographique, l'air froid peut s'accumuler dans une cuvette et, à l'automne, provoquer des gelées hâtives. Il se forme alors un dôme d'air froid ; l'air y est très stable du fait de sa grande masse volumique.



*Figure II.8* : un schéma qui représente l'effet de la brise de pente (Catabatique) sur un avion. [1]

### 2-3 les courants jets nocturnes des basses couches :

Le cisaillement vertical de la vitesse du vent est à l'origine du courant-jet, phénomène d'un intérêt particulier pour les aviateurs. On définit le courant-jet comme un ruban de longueur (1 000 km à 2 000 km) et de largeur (100 km à 200 km) variable dans lequel le vent atteint au moins 110 km/h

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

---

Dans certaines conditions, un vent fort super-géostrophique se forme dans les basses couches, en particulier dans les plaines continentales larges bordées de barrières montagneuses. Ce phénomène est appelé « courant-jet dans les basses couches » car il naît sous forme d'une bande longue et étroite de vents forts dont les lignes de courant et les iso-thermes ressemblent à celles des courants-jets que l'on rencontre dans les couches supérieures de l'atmosphère. L'axe du courant-jet de basses couches se situe en général au-dessous de 500 m (1 600 ft), mais il tend à s'élever peu à peu après s'être formé. La formation de ce courant dépend d'un certain nombre de facteurs, le plus important étant le refroidissement nocturne qui se produit rapidement à la surface. Cela étant, ce processus survient après le coucher du soleil et le phénomène atteint son maximum à peu près au moment du lever du soleil.

### 3- Origine convective :

Il se produit dans la présence du soleil, il existe 4 origines :

#### 3-1 Brise de mer :

La brise de mer doit son existence au réchauffement inégal de la terre ferme et du plan d'eau. En effet, durant le jour, la température du sol augmente rapidement sous l'action du rayonnement solaire alors que celle du plan d'eau n'augmente que peu. L'air au-dessus du sol devient donc plus chaud que l'air au-dessus de la mer et vu sa faible masse volumique, il amorce un mouvement vers le haut. Sur la terre ferme, l'ascension se fait en bloc et la chute de pression engendre un appel d'air en provenance du large. La vitesse maximale de la brise est de 15 à 25 km/h

Le cisaillement dans la brise de mer se produit surtout à la surface, le long du bord antérieur, lorsque le front pénètre à l'intérieur des terres, bien qu'un cisaillement de moindre ampleur existe à des niveaux plus élevés. L'importance de l'effet de la brise de mer en un lieu donné dépend beaucoup de la topographie environnante ; cet effet peut donc être très localisé.

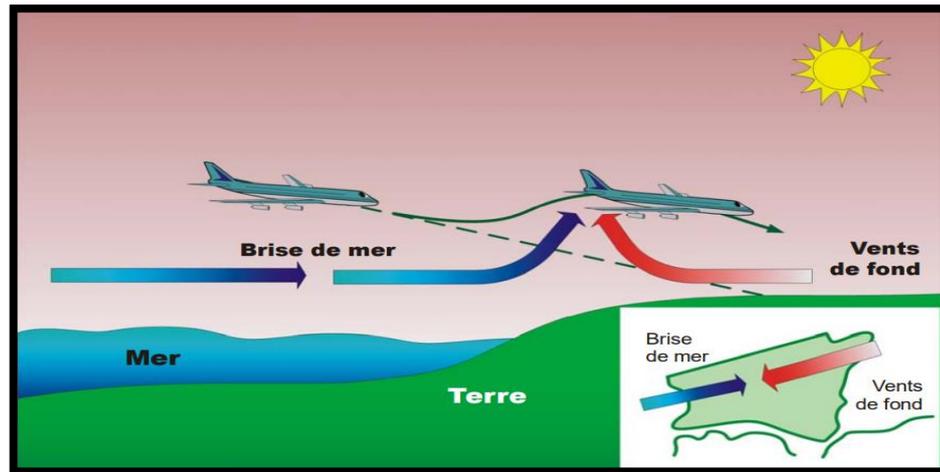


Figure II.9 : un schéma qui montre l'effet de la brise de mer sur un avion [1]

### 3-2 Brise montant de vallée (Anabatique) :

Durant la journée toute pente exposée est réchauffée par rayonnement solaire. L'air en contact avec la surface de la pente est à son tour réchauffé alors qu'au même niveau mais à une certaine distance de pente, la température de l'air ne varie pratiquement pas. L'air plus chaud donc plus légère, remonte la pente : c'est le vent anabatique. Il est remplacé par de l'air qui, à l'origine, se trouvait à une certaine distance de la pente. Après un certain temps, une circulation fermée d'établit.

### 3-3 les cellules orageuses :

Une cellule orageuse est un nuage de type cumulonimbus qui contient des courants ascendants et descendants, dû à la convection atmosphérique, et qui se déplace comme une entité, fonctionnant comme la plus petite unité d'un système orageux et donnant des précipitations intenses localisées.

Le cumulonimbus, masse de nuages qui se dresse comme une tour sur des courants de surtension, est une forme particulièrement violente et spectaculaire de convection atmosphérique. Lorsque l'atmosphère devient instable, pour une raison quelconque, elle est soumise à un mouvement de convection.

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

Chaque cellule accomplit son propre cycle de vie en une période de 30 minutes à une heure ; ce cycle peut se diviser naturellement en trois stades, selon la direction et l'ampleur de la veine verticale de vent dominant dans la cellule

- Stade cumulus ou stade de croissance caractérisé par des ascendances dans toute la cellule.
- Stade de maturité, caractérisé par la présence simultanée de courants ascendants et de rabattants.
- Stade de dissipation, caractérisé par de faibles courants rabattants dans toute la cellule.

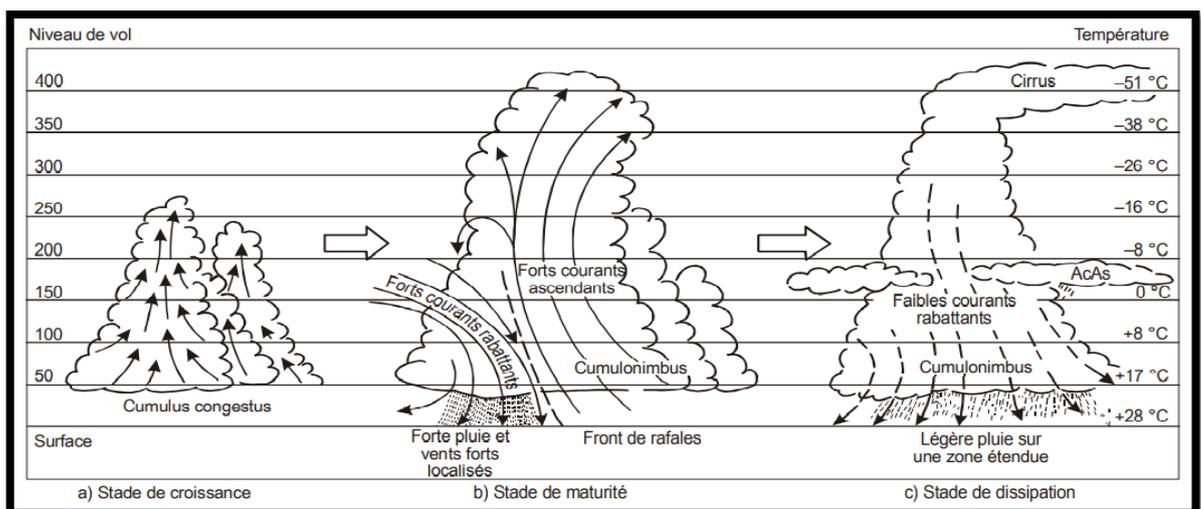
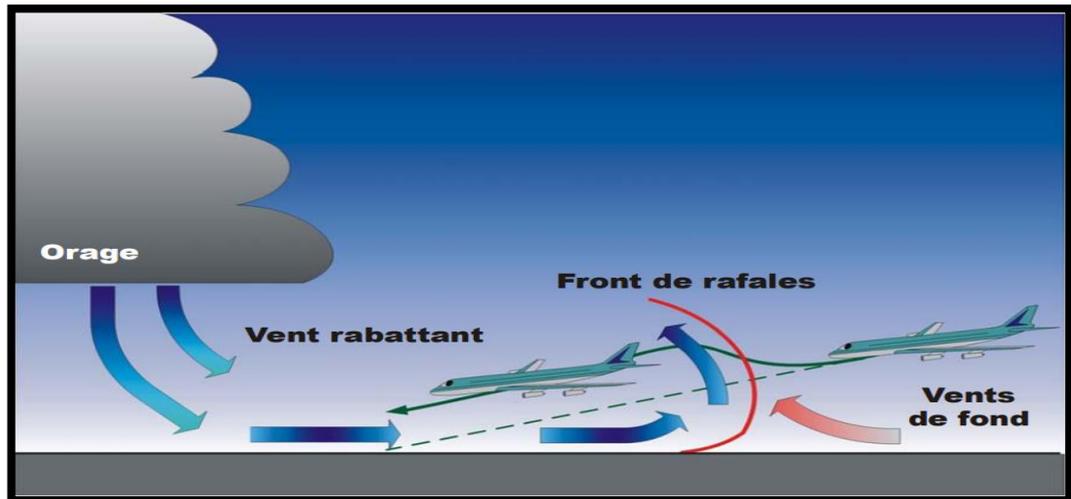


Figure II.10 : Cycle de vie d'un orage. [1]



*Figure II.11* : l'effet des cellules orageuses sur un avion [1].

### 3-4 Les microrafales :

Courant aérien descendant intense sous un orage, dont l'écrasement en surface produit des vents violents sur une étendue restreinte

Les microrafales combinent notamment deux menaces distinctes pour la sécurité aérienne:

- La partie descente, entraînant de forts courants descendants (atteignant jusqu'à 6000 ft/mn de vitesse verticale).
- La partie de l'éclat, entraînant un grand cisaillement du vent horizontal et un déplacement du vent de face en vent arrière (les vents horizontaux peuvent atteindre jusqu'à 45 kt).

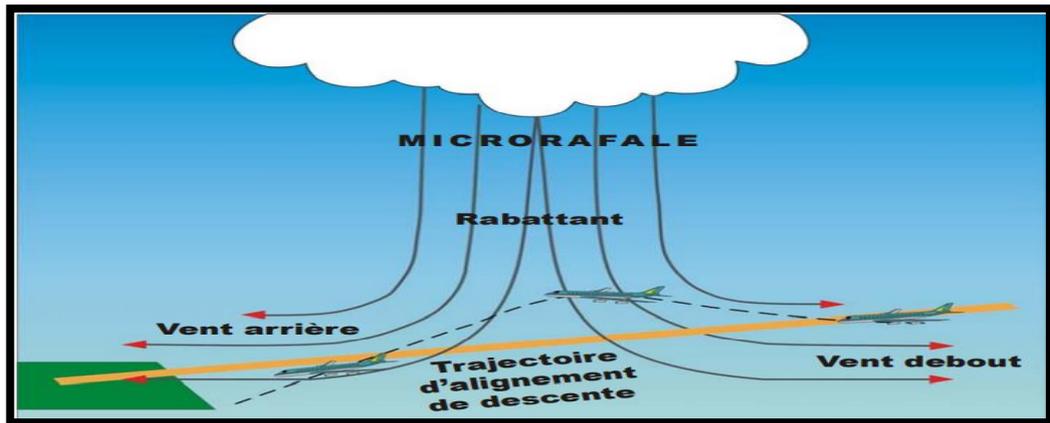


Figure II.12 : l'effet d'une microrafale sur un avion [1]

### II-6 Reconnaissance du cisaillement du vent :

#### 1- Indices météorologiques extérieurs :

La reconnaissance des indices météorologiques extérieurs caractéristiques de la possibilité d'un cisaillement du vent dans les basses couches à proximité de l'aéroport permet au pilote de prendre en temps voulu les décisions lui permettant d'éviter de s'y exposer en remettant les gaz ou en retardant l'approche ou le décollage jusqu'à ce que la situation s'améliore. Même s'il est décidé de poursuivre le vol, la reconnaissance des indices extérieurs du cisaillement du vent alerte le pilote et l'incite à se montrer très attentif aux indications des instruments de pilotage à l'atterrissage et au décollage. Les indices extérieurs que le pilote peut avoir directement sont les suivants :

- Le fort vent de surface en rafales, plus particulièrement si l'aérodrome est situé près de collines ou si des bâtiments relativement imposants ont été érigés près de la piste ; ce seraient des indices de l'existence possible d'une aire localisée de cisaillement du vent et de turbulences.
- Les nuages lenticulaires (des altocumulus ayant l'aspect d'une soucoupe et une consistance laiteuse) indiquent la présence d'ondes stationnaires, en général sur le versant sous le vent d'une montagne.
- Les verglas, c'est-à-dire les précipitations tombant de la base d'un nuage mais s'évaporant avant d'atteindre le sol (particulièrement sous

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

---

un nuage de convection), puisque des rabattants peuvent encore exister et atteindre le sol quoique la précipitation se soit évaporée.

- Les nuages en rouleaux entourant la base d'un orage et s'avancant devant la ceinture de pluie indiquent la présence d'un front de rafales.
- Les orages devraient toujours être considérés comme pouvant susciter un dangereux cisaillement du vent.
- Les zones de soulèvement de poussière par le vent, surtout quand elles ont la forme d'un anneau au-dessous des nuages de convection, indiquent la présence d'une rafale descendante.
- Des manches à air indiquant des vents de forces et de directions différentes.
- Des panaches de fumée tourmentés, dont les parties supérieure et inférieure prennent des directions différentes.

### **2- Indices provenant des instruments de bord et/ou de l'équipement embarqué :**

Les indices de cisaillement du vent que le pilote devrait s'efforcer de rechercher en parcourant les instruments du regard sont les changements sensibles de vitesse propre, de position par rapport à la pente du radiophare d'alignement de descente, de vitesse verticale (positive ou négative) et de régime des moteurs. Les changements notables de régime que nécessite le maintien de la trajectoire de vol constituent souvent le premier indice du cisaillement du vent. Le contrôle du régime revêt par conséquent une extrême importance, surtout avec l'emploi des autos manettes. Les écarts anormaux et soudains par rapport à la trajectoire de vol prévue peuvent aussi se déceler grâce au variomètre, à la barre d'indication de descente de l'ILS et au dispositif avertisseur de proximité du sol. Le radar météorologique de bord peut aider à détecter et à éviter les cellules de convection.

### **3- Observation du cisaillement du vent au moyen des instruments météorologiques ordinaires :**

#### **3-1 Anémomètre :**

On utilise les anémomètres pour observer et mesurer le cisaillement du vent dans le plan horizontal (le long d'une piste par exemple). Sur beaucoup d'aérodromes il faut installer des anémomètres pour fournir sur les vents de surface des renseignements qui soient représentatifs des parties importantes de la piste, comme les zones de décollage et de toucher des roues. Avec plusieurs anémomètres on peut obtenir des informations sur le cisaillement horizontal du vent.

#### **3-2 Sondage par ballon :**

Dans la plupart des cas, les données sur le vent que fournissent les sondages par ballons sont plutôt utiles pour indiquer le cisaillement du vent en élévation (coupe verticale), mais il est peu probable qu'elles aident beaucoup à détecter un cisaillement du vent associé à des nuages de convection (fronts de rafales, rafales descendantes, microrafales, etc.). Si les données des sondages sont sans doute d'une certaine utilité en exploitation pour observer le cisaillement du vent, elles ne sont pas très utiles pour prévoir des conditions favorables au développement d'un cisaillement du vent.

#### **3-3 Radar météorologique au sol :**

Le bord antérieur d'un front de rafales, en particulier lorsqu'il est produit par une ligne de grains, est parfois visible sur les écrans des radars météorologiques classiques (surtout ceux qui fonctionnent sur une longueur d'onde de 10 cm, mais aussi de 3 cm) sous la forme d'arcs ou de lignes minces mais très distincts.

#### **3-4 Satellites météorologiques :**

Des fronts de rafales ont aussi été observés assez fréquemment sur des images de satellites météorologiques. La caractéristique la plus aisément

## **Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique**

---

observée est le nuage en rouleau (stratus), qui se forme souvent au-dessus de la partie antérieure d'un front de rafales, spécialement dans le cas des fronts de rafales qui se forment à partir de lignes de grains.

### **3-5 Système avertisseur de cisaillement du vent dans les basses couches (LLWAS) :**

Ce système comprend cinq capteurs du vent à la surface placés en des points « stratégiques » du périmètre de l'aérodrome, un capteur central du vent à la surface, ainsi que des microprocesseurs et des unités de visualisation qui permettent de surveiller et de comparer continuellement les différences vectorielles, entre les observations des vents de surface à la périphérie et au centre du champ. Les capteurs périphériques mesurent le vent instantané et un échantillon des observations est traité toutes les dix secondes par l'ordinateur central. Le capteur central fournit toutes les deux minutes un vent moyen de surface auquel on compare les valeurs des vents de surface à la périphérie.

### **3-6 Radar météorologique Doppler d'aéroport (TDWR) :**

Le TDWR, un radar de bande C, fournit également des renseignements précis sur le type de précipitations qui s'abat sur un aéroport. Outre les avertissements, ou alertes, de cisaillement du vent, le TDWR offre des produits utiles aux contrôleurs aériens et aux pilotes, tels que des renseignements sur la pluie se congelant et/ou la bruine, et la neige.

Le TDWR permet de détecter les zones de cisaillement du vent en approche et ainsi de fournir aux pilotes un avertissement plus avancé du risque de cisaillement du vent.

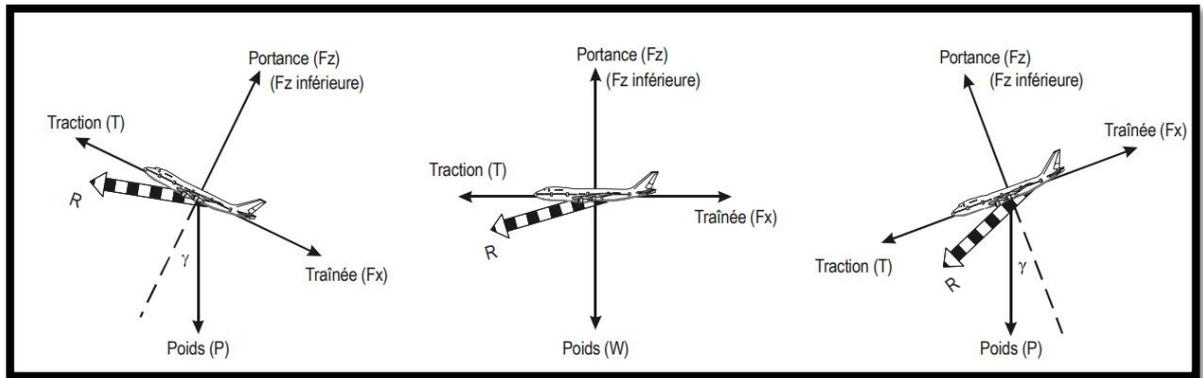
### II-7 l'effet du cisaillement du vent sur les performances d'avion:

- Les performances de vol sont affectées par:  
Des rafales de vent de face augmentent instantanément la vitesse de l'aéronef. Elles ont donc tendance à faire voler l'aéronef au-dessus de la trajectoire prévue et/ou à accélérer.
- Un courant descendant affecte à la fois l'angle d'attaque de l'aéronef (qui augmente) et la trajectoire de l'aéronef car son taux de descente augmente.
- Les rafales de vent arrière diminuent instantanément la vitesse de l'aéronef et ont donc tendance à faire voler l'aéronef sous la trajectoire prévue et/ou décélérer.
- Les cisaillements de vent associés aux courants-jets, aux ondes orographiques et aux surfaces frontales, se produisent généralement à des altitudes qui ne présentent pas le même risque que les microrafales (qui se produisent plus près du sol)

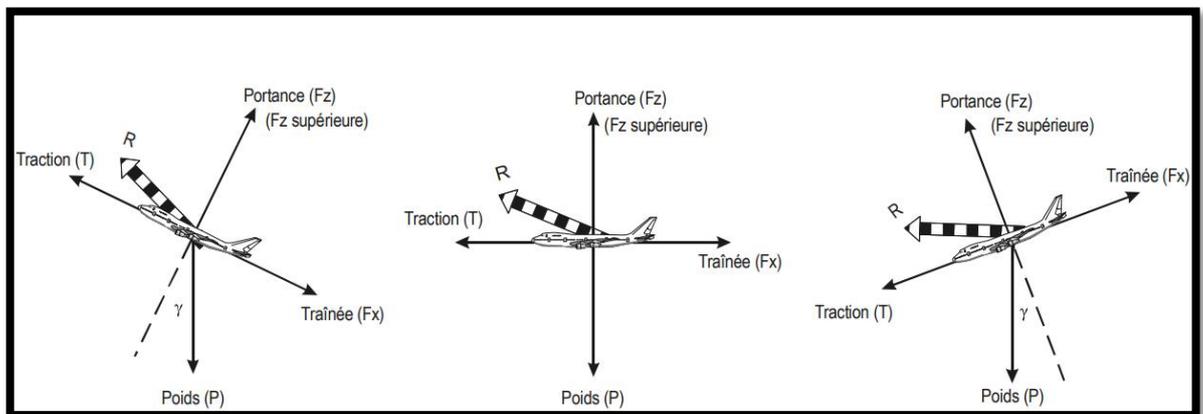
#### 1- Effet du cisaillement du vent sur la vitesse propre d'avion :

En cas de cisaillement du vent, cependant, le vent horizontal (sa composante par rapport à la route suivie est alors l'élément important, qu'il s'agisse d'un vent debout au décollage ou à l'atterrissage ou d'un vent arrière pendant le vol) n'est assurément pas stable, pas plus qu'il ne change progressivement, pouvant au contraire changer rapidement sur une distance relativement courte. S'il est exposé à un passage aussi rapide de vent debout à vent arrière, un avion ne peut, en raison de son inertie, manifestement pas accélérer ou décélérer instantanément pour reprendre la vitesse propre pour laquelle il a été compensé et, pendant une période courte mais de durée finie, la vitesse propre se modifie selon le changement du vent. Ce changement « passer » de vitesse propre modifie la portance et la traînée, rompant l'équilibre des forces qui s'exercent sur l'avion.

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique



**Figure II.13** : présentation vectorielle de la trajectoire de vol (R) après diminution transitoire de la vitesse propre. [1]



**Figure II.14** : présentation vectorielle de la trajectoire de vol (R) après augmentation transitoire de la vitesse propre. [1]

### 2- l'effet du cisaillement du vent sur l'angle d'attaque :

Tout comme un changement de vitesse propre dû au cisaillement du vent, un changement d'angle d'attaque dû à un rabattant ou à une ascendance est un changement passager qui précède le retour à l'angle d'attaque original après compensation par la stabilité longitudinale de l'avion. Un rabattant cause une diminution passagère de l'angle d'attaque, diminution qui, à son tour, entraîne une diminution du coefficient de portance et rompt l'équilibre des forces auxquelles l'avion est soumis, suscitant ainsi une résultante de portance qui entraîne un enfoncement de la trajectoire de vol.

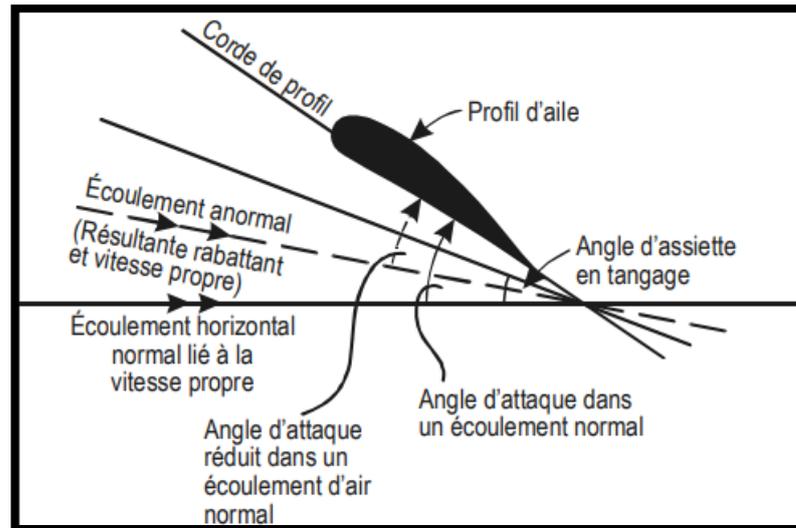


Figure II.15 : l'effet du cisaillement du vent sur l'angle d'attaque. [1]

### 3- L'effet du cisaillement du vent traversier :

De façon générale, elle n'affecte ni la vitesse propre ni l'angle d'attaque et, par conséquent, ne modifie pas l'équilibre des forces qui, dans le plan vertical, s'exercent sur l'avion. Elle affecte par contre les angles de dérive et de dérapage, ce qui ajoute aux difficultés du pilote dans une situation déjà complexe.

### 4- L'effet d'une microrafale :

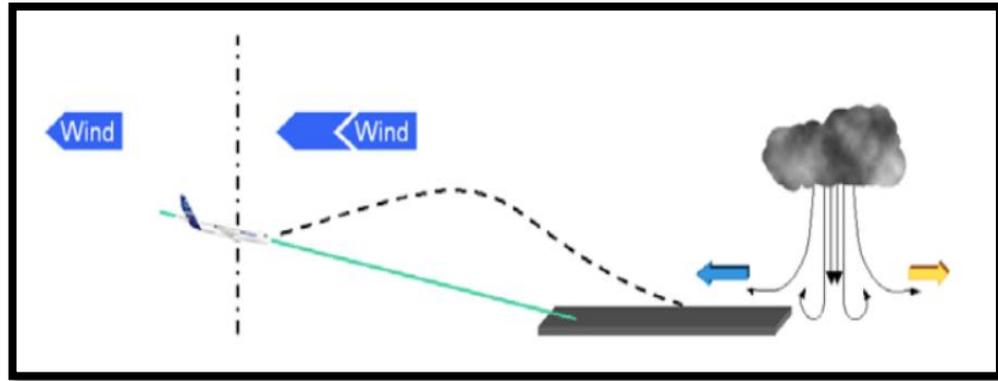
Quatre cas peuvent être observés en fonction de la position de l'aéronef par rapport aux microrafales :

#### a. Microrafale devant l'avion :

Les pilotes ne perçoivent pas toujours une augmentation du vent de face comme un risque. Mais une telle rafale de vent de face déstabilise l'approche de l'aéronef, qui aura tendance à voler au-dessus de la trajectoire et/ou à accélérer, si le pilote ne réagit pas adéquatement.

Si le cisaillement du vent de face se produit au décollage, les performances de l'aéronef augmentent. Mais une fois sortie du cisaillement, la vitesse indiquée diminue, ce qui entraîne une augmentation de l'angle d'attaque.

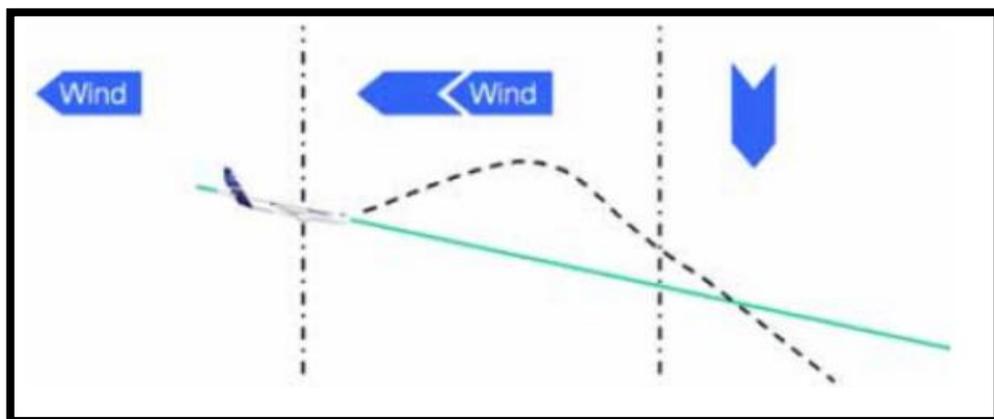
## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique



**Figure II.16** : un schéma qui montre l'effet d'une microrafale devant l'avion. [15]

b. L'avion vole à travers un courant descendant de microrafale :

Les courants descendants verticaux sont généralement précédés d'une augmentation de la composante vent de face. Si le pilote n'apprécie pas pleinement la situation, il réagira aux effets des rafales de vent de face pour retrouver la trajectoire prévue en réduisant la puissance et en appuyant sur le manche. À ce stade, un tirage vertical augmentera le taux de chute de l'avion, ce qui ramènera l'avion en dessous de la trajectoire prévue.



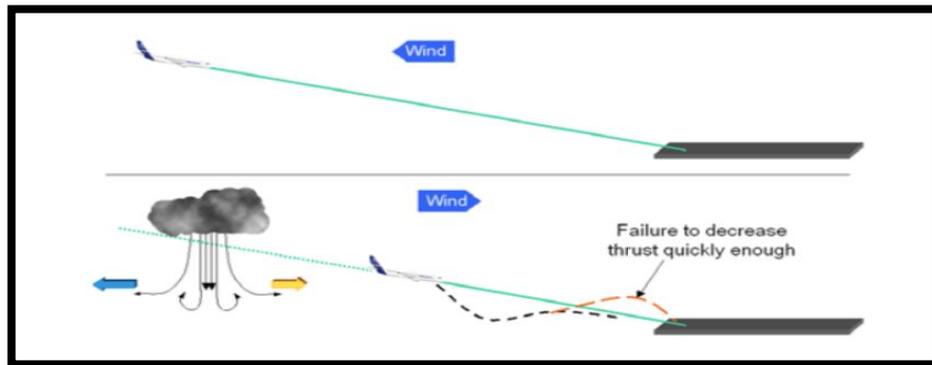
**Figure II.17** : un schéma montre l'effet d'une rafale lorsque l'avion vole à travers un courant descendant de microrafale. [15]

c. Microrafale apparaissant derrière l'avion :

En cas d'augmentation soudaine du vent arrière, la vitesse de l'avion diminue instantanément. La portance diminue et l'avion a tendance à voler en dessous de la trajectoire d'approche.

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

- Si les pilotes tirent sur le manche pour reprendre la trajectoire sans ajouter de poussée suffisante, l'angle d'attaque augmentera considérablement et l'avion descendra.
- Si une poussée suffisante est réglée pour reprendre la trajectoire prévue mais que la réaction du pilote est trop lente pour réduire la poussée une fois de retour sur la bonne trajectoire, l'avion volera au-dessus de la trajectoire d'approche et/ou va accélérer.

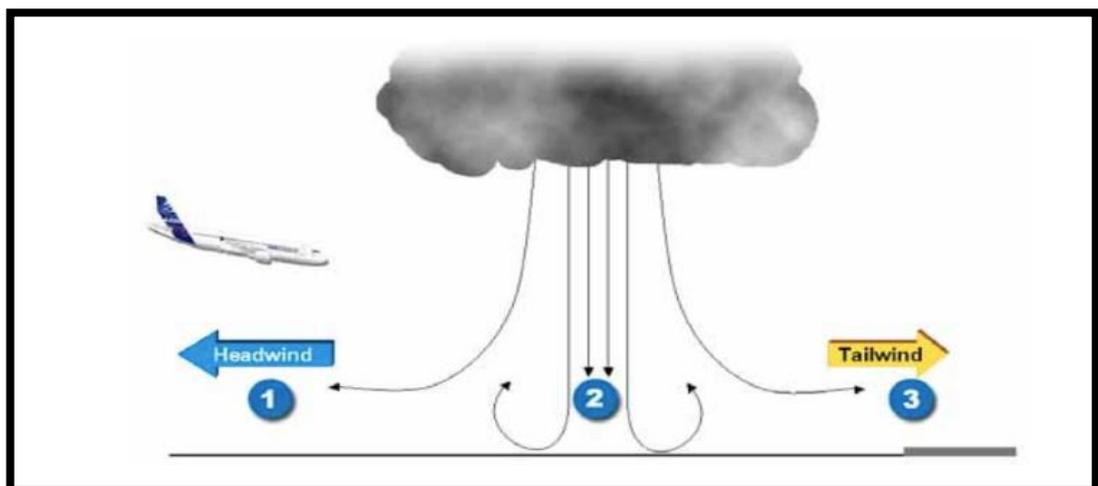


**Figure II.18:** un schéma qui montre l'effet d'une Microrafale apparaissant derrière l'avion [15]

### d. L'avion vole à travers une microrafale :

C'est le pire des cas car c'est la combinaison des trois cas précédents:

- Rafale de vent de face.
- Courant descendant.
- Rafale de vent arrière.



**Figure II.19 :** un schéma montre l'effet d'une microrafale lorsque l'avion traverse d'elle. [15]

## Chapitre II : le cisaillement du vent et l'aéronautique

---

### II-8 Les précautions contre le cisaillement du vent :

#### 1- Précaution au décollage :

- Utiliser la puissance nominale maximale au décollage.
- Utiliser la plus grande longueur possible de piste.
- Utiliser le braquage de volets recommandé.
- Prendre une vitesse de cabrage supérieure.
- Ne pas se fier au directeur de vol à référence de vitesse.

#### 2- Précaution en approche

- Stabiliser l'avion en approche à 300 m (1 000 ft) sol au plus tard.
- Effectuer le moins possible de réductions de puissance.
- Utiliser la piste la mieux appropriée.
- Utiliser le braquage de volets recommandé.
- Prendre une vitesse d'approche supérieure.
- Utiliser les systèmes de vol automatique pendant l'approche.

### II-9 conclusion

L'apparence de cisaillement du vent est liée avec des différentes causes et il a un mauvais effet sur le comportement d'avion en particulier et sur la sécurité aérienne en générale.

## ***Chapitre III :***

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

## **Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger**

### ***III.1 Introduction :***

Depuis les premières heures de l'aviation, l'homme pense à minimiser le max de danger en contrôlant tout ce qui pourrait menacer la sécurité aérienne.

Le cisaillement du vent est un phénomène très dangereux pour l'aviation, mais malheureusement il n'est pas visible, mais on peut le prévoir par des indices météorologiques ou bien par des systèmes de prévision développés par les météorologues.

Concernant l'aéroport de Houari Boumediene les prévisions météorologiques sont assurées par l'Office National de la météorologie (l'ONM).

L'Office National de la météorologie transmet d'une manière régulière des butins de prévision d'aérodrome (TAF), qui contient les informations des paramètres météorologiques nécessaires pour un vol, comme les informations du vent (vitesse et direction).

Notre étude est une combinaison entre les informations du vent trouvés sur le TAF et le modèle de prévision AROME, afin de développer un programme informatique qui nous permettons de calculer l'intensité et la direction d'un cisaillement du vent, donc on sera capable de le prévoir et alors, éviter les conséquences négatives de ce danger.

### **III.2 Présentations de l'aéroport d'Alger :**

#### **1- Les caractéristiques de l'aéroport d'Alger :**

L'aéroport civil international d'Alger est l'aéroport qui relie la capitale Alger au réseau international et autres villes intérieures algériennes, voici l'ensemble de caractéristiques de cet aéroport sur le tableau suivant :

## Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger

Tableau III.1 les caractéristiques de l'aéroport Houari Boumediene.

<b>Nom</b>	L'aéroport international d'Alger Houari Boumediene
<b>Code IATA</b>	ALG
<b>Code OACI</b>	DAAG
<b>Capacité</b>	22millions passager/an
<b>Pays</b>	Algérie
<b>Ville</b>	Alger
<b>Commune</b>	Dar-El-Beida
<b>Les coordonnées</b>	36°41'40" nord et 3°13'01" est
<b>Altitude</b>	25m (82 ft)
<b>Type d'aéroport</b>	Civile
<b>Gestionnaire</b>	EGSA
<b>Nombre de piste</b>	2 pistes (RWY 05/23 3500m et RWY 09/27 3500m)

### **2- Localisation géographique de l'aéroport :**

L'aéroport international Houari Boumediene est situé dans la banlieue Sud-Est d'Alger sur le territoire de la commune de Dar El Beida dans la wilaya d'Alger en Algérie et s'étend sur une superficie totale de 850 hectares. Il est entouré par l'ATLAS Blidéen du Sud-Est et de Sud-Ouest et voisinant la Baie d'Alger du côté Nord-Est et Nord-Ouest.

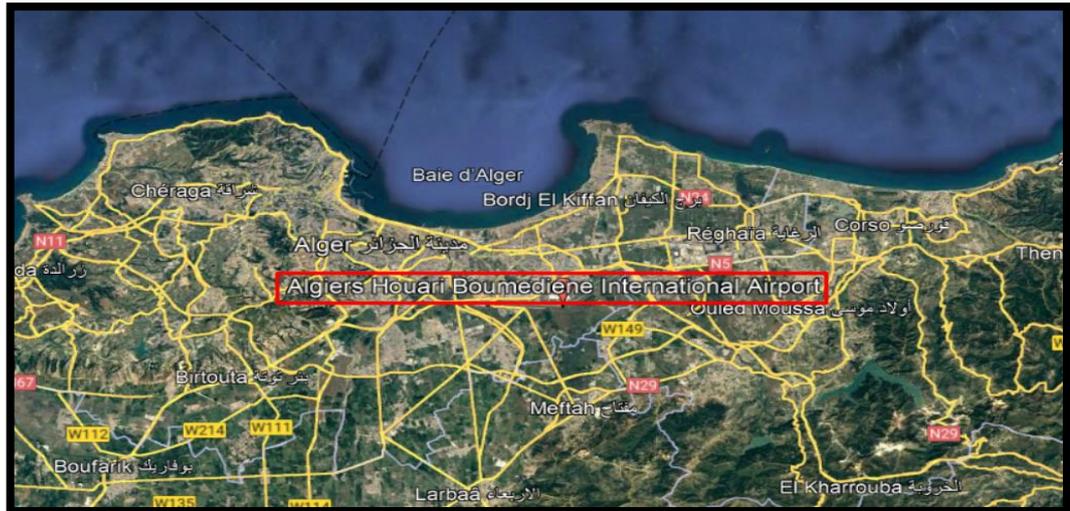


Figure III.1 : L'emplacement géographique de l'aéroport d'Algérie. [19]

### III.3 le cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger :

#### **1- Le régime du vent à l'aéroport d'Alger :**

Dans la région de l'aéroport d'Alger, les variations du vent ne sont pas stables (variables) à cause de la topographie local de cette région (les montagnes qui sont la cause de la brise de montagne et les vastes étendues de la mer qui sont la cause de la brise de mer et de terre).

Les observations de la station météorologique de Dar-El-Beida, constate que les forces de vent peuvent atteindre jusqu'à 94km/h, une force qui peut menacer les avions soit en phase d'approche soit au décollage.

#### **2- Les causes du cisaillement de vent aux alentours de l'aéroport d'Alger:**

##### **a. La brise de mer et la brise de terre :**

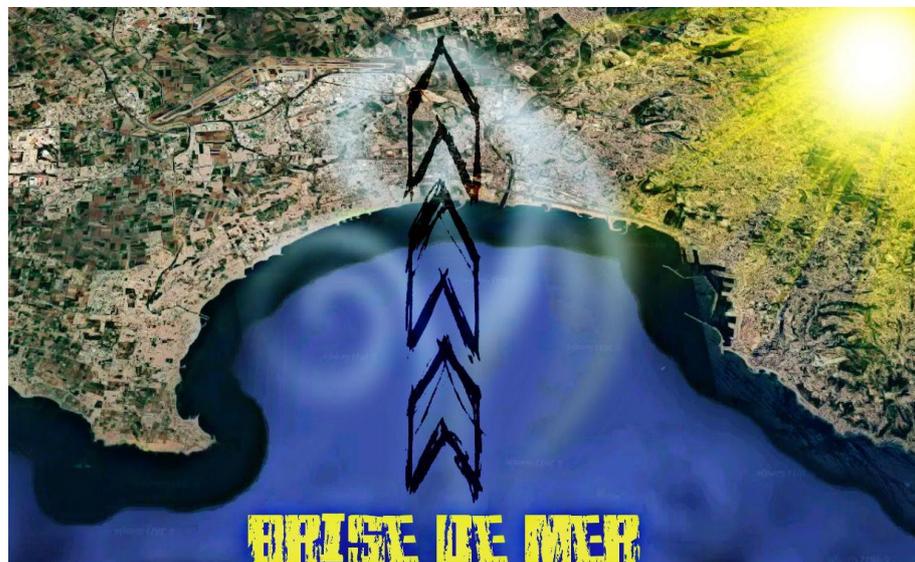
Le jour, la température de sol (Bei d'Algérie) augmente rapidement que celle du plan d'eau (Sahel Algérie). Alors, l'air réchauffé s'élève et est remplacé par l'air plus froid. L'après-midi le réchauffement atteint le maximum, la circulation de brise de mer peut avoir une profondeur de 1500 à 3000 pieds, elle peut produit

### Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger

des vents de 10 à 15 nœuds et s'étendre jusqu'à 50NM dans les terres et atteindre ainsi, l'Atlas Blidéen.

La nuit, le sol (Sahel Algérie) se refroidit plus rapidement Par rapport le plan d'eau (Bei d'Alger) alors le plan d'eau est encore chaud, donc il favorise le mouvement ascendant de l'air. Alors, s'installe une circulation d'air de la terre vers la mer (de haute pression vers une basse pression), il se forme une brise de terre dans la direction opposée.

Ces deux phénomènes sont la cause principale des cisaillements horizontaux sur l'aérodrome.



**Figure III.2 :** le phénomène de brise de mer qui se produit à côté de l'Algérie



**Figure III.3 :** le phénomène de la brise de terre qui se produit à côté de l'Algérie.

## **Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger**

### **b. Perturbation des ondes orographiques venant du sud :**

Le vent qui se dirige du sud vers le nord travers la chaîne montagneuse de l'Atlas blidéen. Ce vent est donc perturbé du côté sous le vent d'où la naissance des cisaillements horizontaux à l'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.

### **c. Le décrochage de flux maritime :**

Lorsqu'un vent maritime soufflant du Nord, Nord-est ou du Nord-Ouest on peut observer un cisaillement du vent aux environs de l'aéroport d'Alger. Ce vent maritime pénètre le sahel algérois et rencontre les reliefs à forte pente générant ainsi, sur la région d'Alger, des tourbillons à axes horizontaux. Ces tourbillons peuvent s'organiser en vortex, qui domine toute la région du sahel.

Alors on peut déduire que l'aérodrome d'Alger subit des cisaillements horizontaux à cause de son emplacement géographique.

## **III-4 La détection du cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger :**

On peut avoir qu'il y'a plus qu'une raison qui peut produire un cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger, mais malheureusement il n'existe aucune moyenne pour détecter ce phénomène au niveau de cet aérodrome. Alors ils ont encore utilisé la méthode visuelle. Il est évident que le cisaillement du vent lui-même n'est pas visible, mais les effets qu'il produit le sont très souvent.

La preuve de sa présence. Les indices sont notamment les suivants :

- Déplacement des couches de nuages adjacentes dans des directions différentes ;
- Déplacement d'un panache de fumée de forme tourmentée dans différentes directions ;
- Nuages en rouleaux précédant l'approche d'une ligne de grains ;
- Forts vents de surface en rafales agitant les arbres, les drapeaux, etc. ;

### Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger

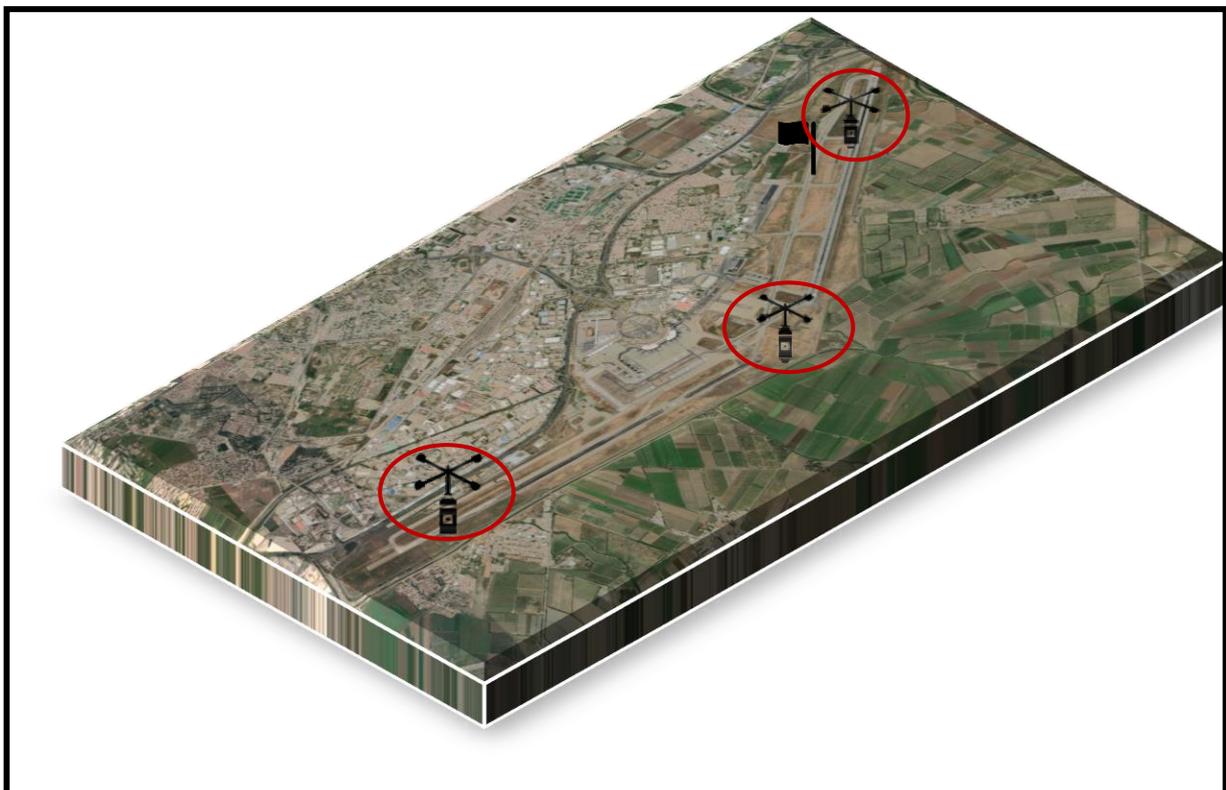
- Manches à air, placées en divers points d'un aérodrome, indiquant des vents différents
- Poussières, soulevée (spécialement en anneaux tourbillonnaires) par des courants descendants sous un nuage de convection.

Sans oublier les rapports des pilotes concernant le cisaillement du vent afin de prévenir les autres avions.

Concernant les systèmes de prévision qu'on a déjà parlé dans les chapitres précédents ne sont pas disponible dans cet aérodrome car l'installation d'un radar détecteur de cisaillement sur l'aérodrome d'Alger sers très couteuse et compliqué car il faudra plusieurs radars pour pouvoir détecter tous les types.

Cependant, ils ont utilisé les anémomètres pour calculer la vitesse du vent pour noter s'il y'a un changement rapide sur la vitesse et noter s'il y'a un vent fort.

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 :** la position des trois anémomètres et la station météorologique

### III-5 La prévision numérique du temps :

#### 1. Définition :

C'est un système informatique qui simule le comportement de l'atmosphère. Il est utilisé soit comme un laboratoire numérique pour étudier les processus atmosphériques et mieux les comprendre, soit comme un outil d'aide à la prévision du temps ou du climat.

#### 2. Le principe de la prévision 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. Cette simulation repose sur les lois physiques qui gouvernent l'évolution atmosphérique.

Les principales sont celles de la mécanique des fluides. Elles sont complétées par celles d'autres processus présents dans l'atmosphère : des changements d'état (l'eau se condense ou s'évapore), beaucoup de turbulence et de nombreuses interactions avec la surface et même l'espace.

Le schéma suivant explique le principe de la PNT :

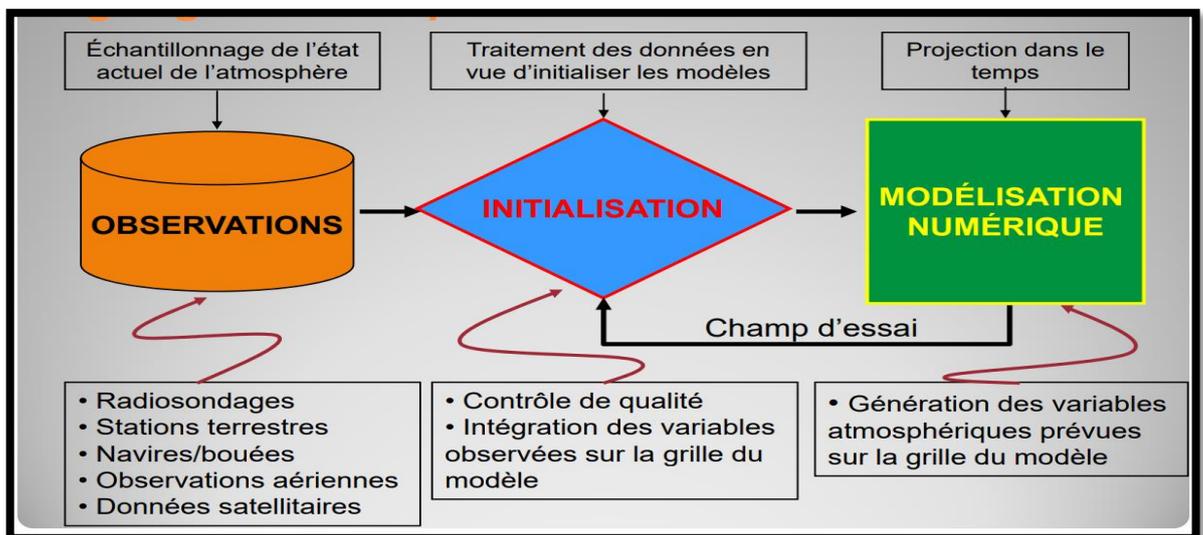


Figure III.5 : le principe de la prévision numérique de temps [9]

### Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger

**Observation** : 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 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 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. Le traitement des données en vue d'initialiser les modèles est basé sur le contrôle de qualité et l'intégration des variables observées sur la grille du modèle.

**Modélisation numérique** : avant tous, il faut établir des hypothèses cohérentes sur la nature du milieu atmosphérique et les principales interactions en jeu dans son évolution. Ensuite donner. 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 des équations peut être effectuées en utilisant un modèle en point de grille, qui correspond à la division de l'espace en boîtes définies par une grille horizontales et par un nombre de niveau verticaux.

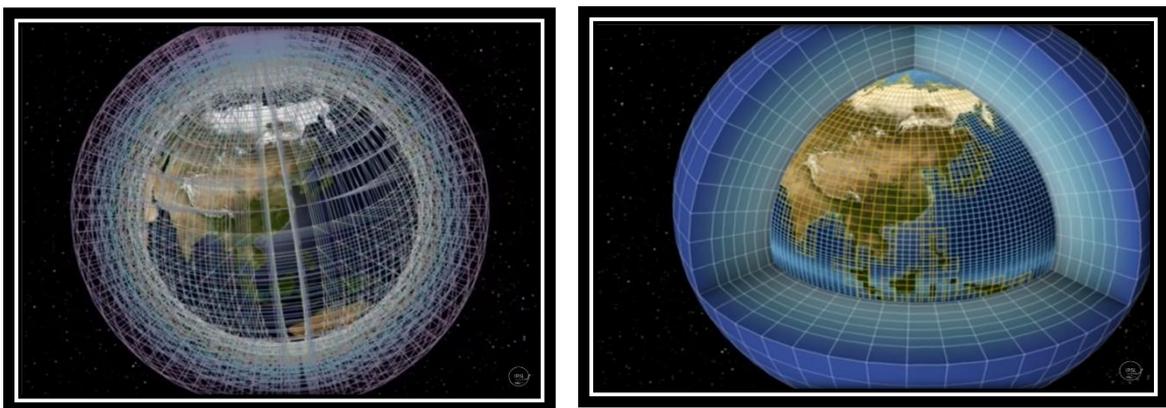


Figure III.6 le découpage de la boîte atmosphère de la terre. [13]

## **Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger**

La prévision numérique du temps consiste à appliquer l'atmosphère les lois de la physique et l'hydrodynamique qui pilote son évolution par un système d'équations aux dérivées partielles, système que l'on résout par des méthodes numériques.

### **III-6 Les équations utilisées pour la prévision numérique du temp PNT :**

- Équation de mouvement.
- Équation de thermodynamique.
- Équation de l'humidité spécifique.
- Équation d'État des gaz parfaits.
- Équation de continuité.

**Note** le calcul numérique associé aux équations qui régissent l'atmosphère Sont effectué après le découpage.

### **III-7 les modèles de prévision numérique utilisés à l'ONM :**

#### **1. Le modèle ALADIN :**

ALADIN (Air Limitée Adaptation dynamique Développement International) est basé sur les équations primitive hydrostatiques utilisant une décomposition horizontale spectrale en série bi -Fourier et une coordonnée hybride ( $\eta$ ) sur la verticale. Est caractérisé par :

- Maille fixe 8km centrée sur l'Algérie.
- 70 niveaux (17m jusqu'à 67 km).
- Couplé à ARPEGE toutes les 03 h.
- Deux f i o s par jour (00, 12h).
- Maximum 72h d'échéance.

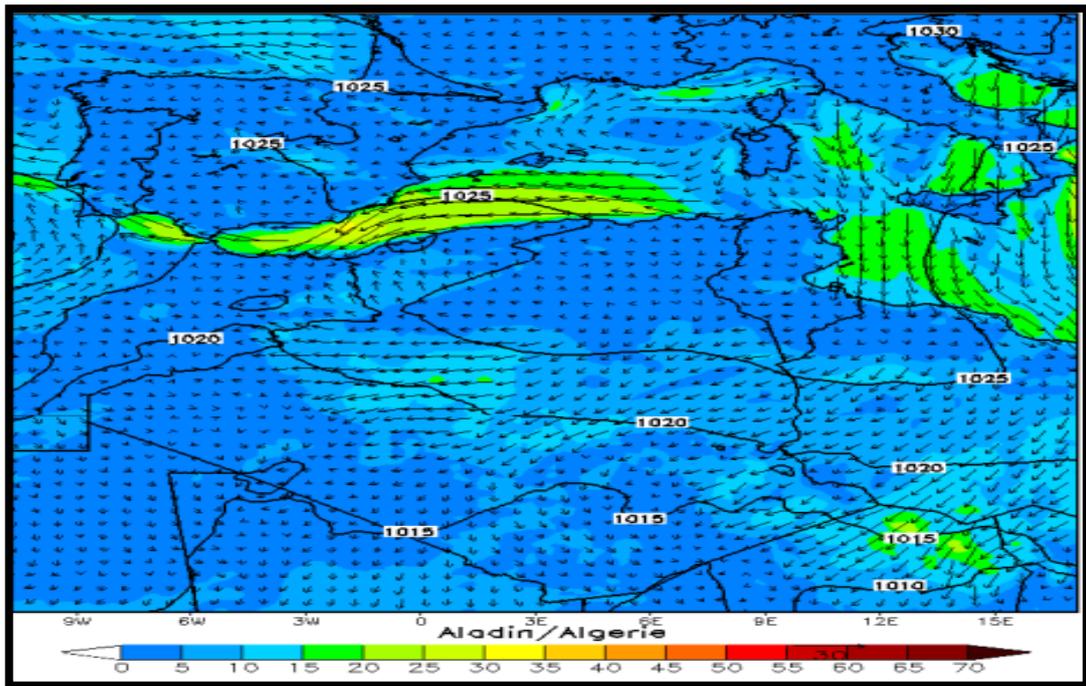


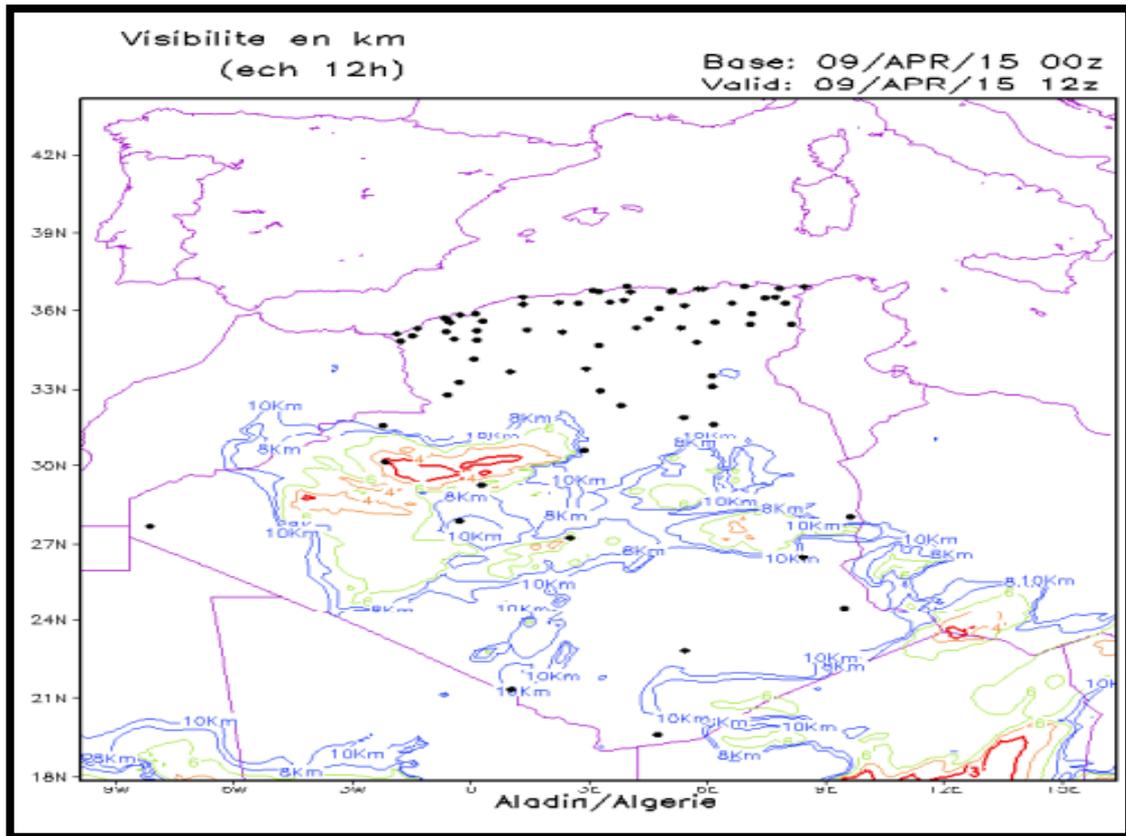
Figure III.7 : Domaine Aladin/Algérie [9]

- **ALADIN- sable :**

C'est une version d'ALADIN qui permet l'évaluation de la prévision du cycle atmosphérique des poussières désertiques. ALADIN-SABLE est un couplage entre le modèle atmosphérique ALADIN et le schéma de surface SURFEX (surface externalisée).

**ALADIN-Sable d'Algérie :**

- Maille fixe 14km centrée sur l'Algérie.
- 70 niveaux (17m jusqu'à 67 km).
- Couplé à ARPEGE toutes les 03 h.
- Deux fois par jour (00, 12h).
- Maximum 72h d'échéance.



FigureIII.8 : domaine Aladin/sable Algérie. [9]

### 2. Le modèle AROME :

(Application of Research to Operations at MEscale), c'est un modèle qui utilise la modélisation à échelle fine avec une résolution horizontale de 3 km, concernant l'altitude peut aller jusqu'à 41 niveaux.

AROME est couplé au modèle ALADIN toutes les trois heures pour lui attribuer les conditions de bords.

Le modèle ROME est caractérisé Par une capacité qui peut à simuler les processus physiques qui se produisent au sein des cumulonimbus, nuage à l'origine des orages.

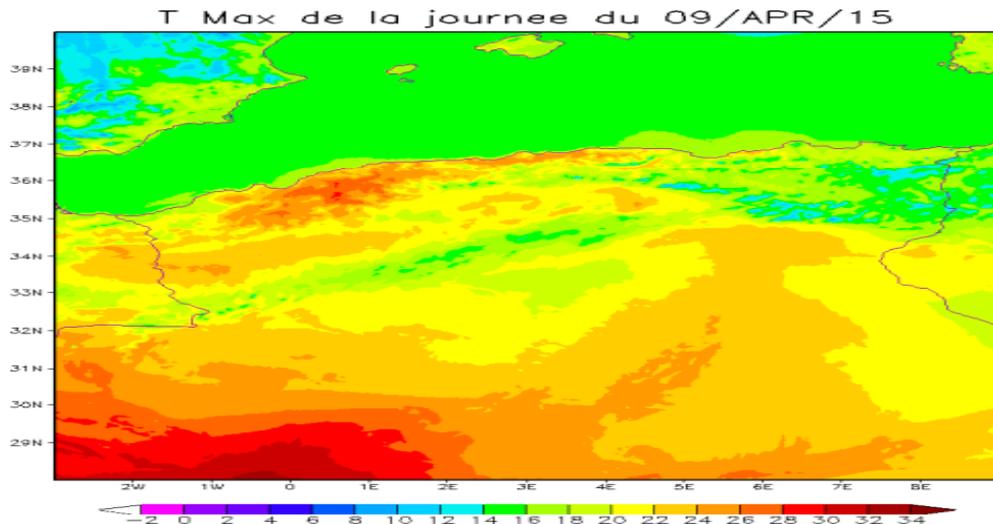


Figure III.9 : domaine AROME nord d'Algérie. [9]

### III-8 Simulation numérique des situations de cisaillement de vent sur l'aéroport d'Alger :

#### 1. Le choix de la station météorologique :

Dans les chapitres précédents on a parlé de l'Aéroport d'Alger dispose aucune données concernant le cisaillement de vent, Alors nous avons utilisées les données de vent moyen soit en surface soit en altitude observées à la station de Dar El-Beida afin d'être capable de détecter le vent fort pour l'année 2022. L'analyse de ces données nous permettons de choisir la situation météorologique du 24-25 novembre 2021 pour cette étude. En effet, on a bien observé que le vent dans ces deux jours est fort.

#### 2. Le choix de modèle de simulation :

Pour notre étude, la prévision du cisaillement du vent sur le secteur de l'aéroport d'Alger se fera par le modèle AROME.

On a choisi ce modèle, car leurs caractéristiques nous nous permettons d'effectuer notre étude puisque :

- ❖ **La résolution spatiale** : AROME dispose une maille de 1.3km. À cette échelle, nous pouvons décrire les processus de surface et les phénomènes météorologiques de fine échelle mieux que le modèle ALADIN donc une meilleure prévision.

- ❖ **La physique du modèle AROME** : la physique du modèle AROME, est plus développée et plus adaptée à des phénomènes météorologiques à petites échelles que le modèle ALADIN.

### 3. Le choix de domaine spatial de simulation :

Le domaine d'étude a été choisie 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 somme servis des deux cartes IAC2 et IAC3. Le secteur décrété est défini entre les latitudes  $36,6623^\circ$  et  $36,8312^\circ$  Nord et les longitudes  $2,7390^\circ$  et  $3,5701^\circ$  Est sur la grille AROME comme le montre la figure (III.10), À l'intérieur de ce secteur se situent les deux balises de ZEMMOURI et de MARMORA au-dessus de lesquelles la procédure d'approche initiale débute; à environ 1200m d'altitude.

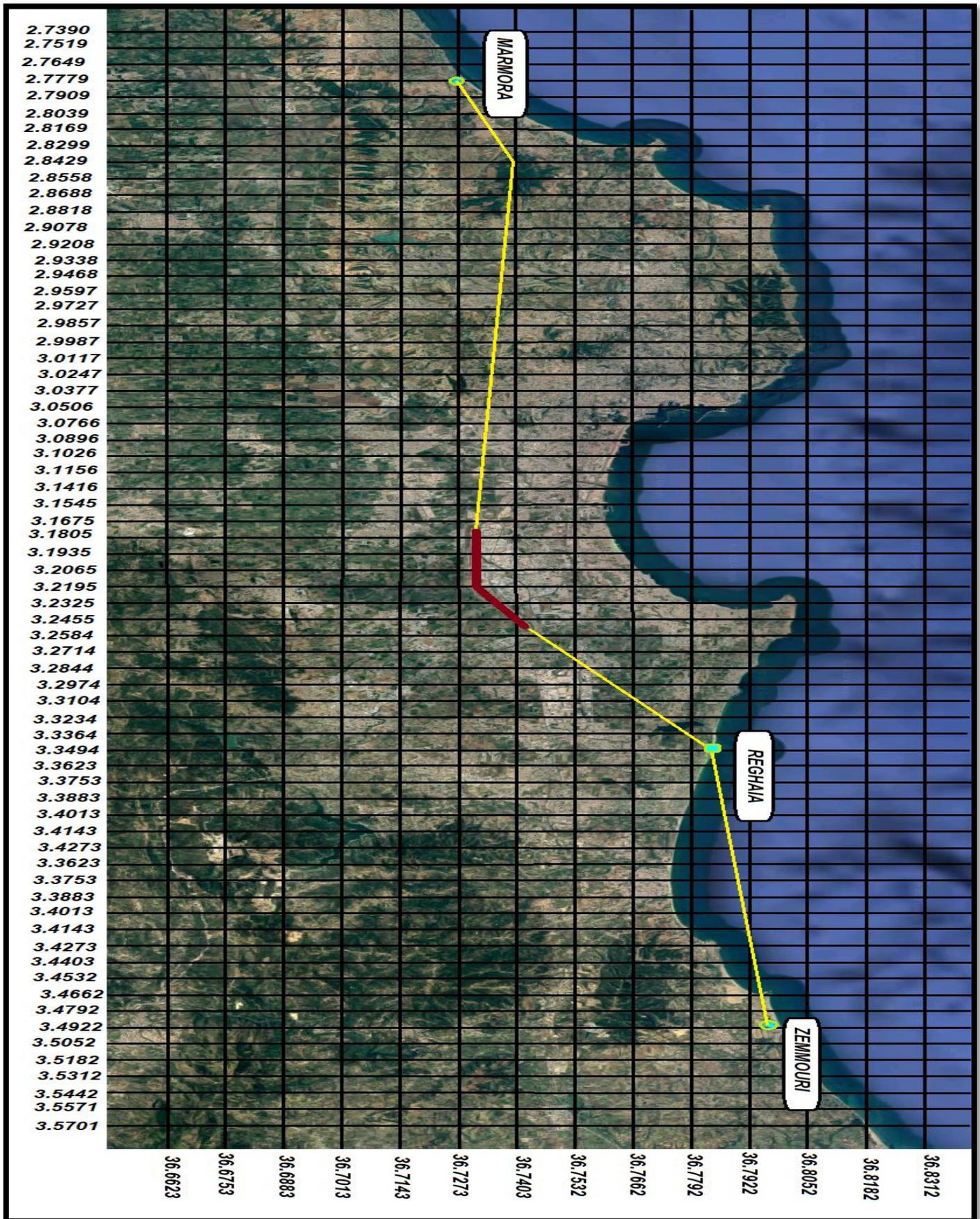


Figure III.10 : le domaine Arome choisi pour l'étude

### **Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger**

---

À travers de 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 prévus par le modèle AROME pour les 48 heures d'échéance.

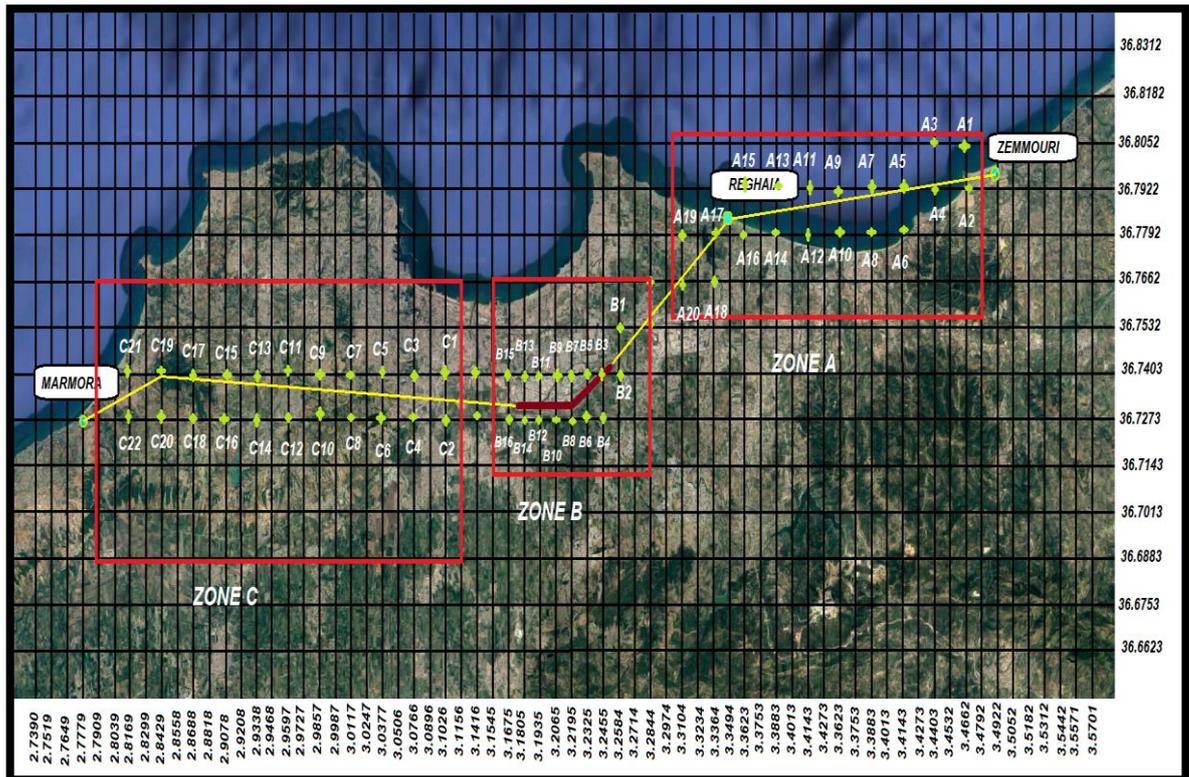
Le calcul se fait à partir d'un programme qu'on a déjà programmé en utilisant le langage python.

Le cisaillement horizontal du vent horizontal, ou vertical est calculé sur le même niveau d'altitude.

Le cisaillement vertical est calculé sur deux niveaux d'altitude le long de même profile vertical.

Pour le calcul du cisaillement horizontal, on va définir 62 points de grille situé de part et d'autre le long des trajectoires d'approches des deux pistes de l'aéroport, comme le montre la figure. On choisira des niveaux d'altitude différents pour calculer le cisaillement 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.11** 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.

### **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, A9-A10, A11-A12, A13-A14, A15-A16, A17-A18, A19-A20). 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 1000 m sur lequel se situent les points de grille (A1 et A2) ; (A3 et A4)

### **Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger**

---

- Le niveau 800 m sur lequel se situent les points de grille (A5 et A6) ; (A7 et A8).
- Le niveau 600 m sur lequel se situent les points de grille (A9 et A10) ; (A11 et A12) ; (A13 et A14).
- Le niveau 200 m sur lequel se situent les points de grille (A15 et A16) ; (A17 et A18) ; (A19 et A20).

#### **La zone B :**

À l'intérieur de cette zone, se situe 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 prévues sur le niveau 10 m ; sur lequel se situent les points de grille de la zone B : B1-B2, B3-B4, B5-B6, B7-B8, B9-B10, B11-B12, B13-B14, B15-B16.

#### **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 grille sélectionnées (C1-C2, C3-C4, C5-C6, C7-C8, C9-C10, C11-C12, C13-C14, C15-16, C17-18, C19-C20, C21-C22). 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-C2 et C3-C4)

(C5-C6 et C7-C8),

## **Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger**

(C9-C10, C11-C12)

(C13-C14, C15-16) et

(C17-18, C19-C20, C21-C22). 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. (La zone B).

### **III-9 L'extraction des données :**

Pour l'étude de la situation du 24-25/11/2021 et calculer les cisaillements du vent, nous avons besoin des données du vent en surface et en altitude. Ces données comportent :

## **Chapitre III : prévision de cisaillement du vent sur l'aéroport d'Alger**

---

1. Les prévisions du vent moyen horizontal en surface : vent 10m (u et v); 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 : rafale 10m, qu'on a utilisé 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 du :
  - 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.
  - Cisaillement horizontal du vent vertical en altitude, sur les niveaux (200m, 400m, 600m, 800m, 1000m) à l'intérieur des zones A et B.
  - Cisaillement verticale du vent vertical sur les niveaux (200m, 400m, 600m, 800m, 1000m) à l'intérieur des zones A et B.

Le programme utilisé, Pour le calcul de ces différentes valeurs est écrit par le langage Python

### **Définition du langage Python :**

Est un langage de programmation interprété, multi paradigme et multiplateformes. Il favorise la programmation impérative structurée, fonctionnelle.

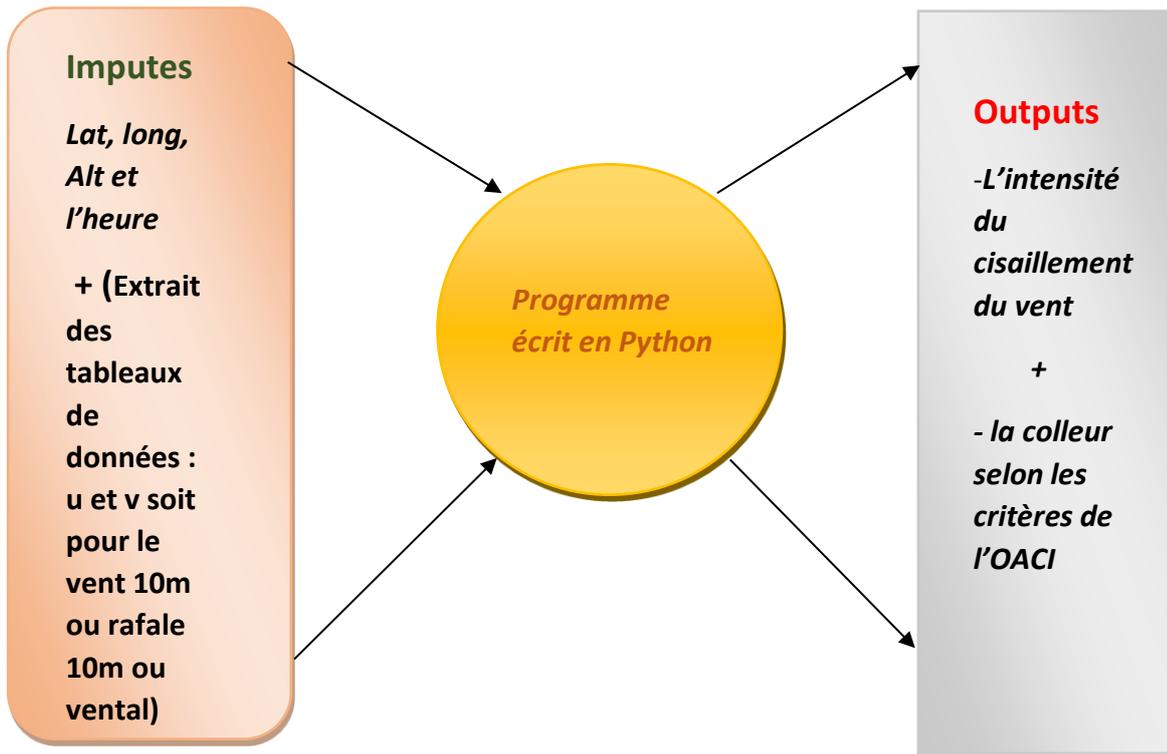


Figure III.12 : diagramme explique la méthode de calcul selon le programme.

### III.10 Les résultats de la prévision :

On va étudier un exemple de calcul du cisaillement de vent le jour 24.11.2021 à l'heure 20h pour chaque zone.

On donne latitude et longitude des points sélectionnées dans la grille, l'heure et l'altitude; le programme automatiquement extraire les données des tableaux de données, affiche les valeurs de (u et v) et calcule directement l'intensité du cisaillement avec le type du ce cisaillement selon les critères de l'OACI.

### La zone A

Les points de grilles	Altitude	L'intensité du cisaillement
A1.A2	1000	0
A3.A4	1000	0.217631067
A5.A6	800	0.597030412
A7.A8	800	0.300146449
A9.A10	600	0.725006738
A11.A12	600	0.793050674
A13.A14	600	0.846097718
A15.A16	200	0.757006659
A17.A18	200	0.717475092
A19.A20	200	0.741364675

Tableau III.13 l'intensité du cisaillement de vent su la zone A.

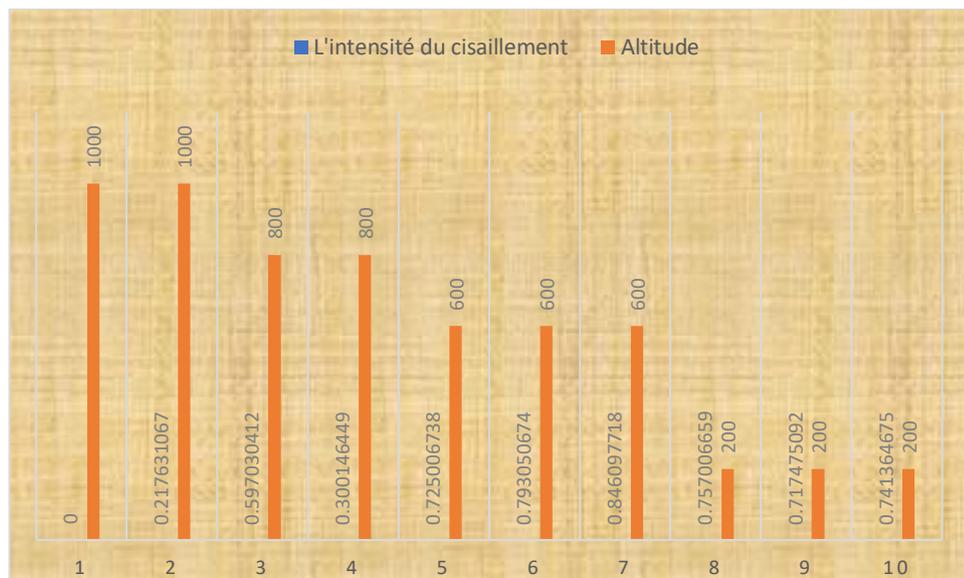
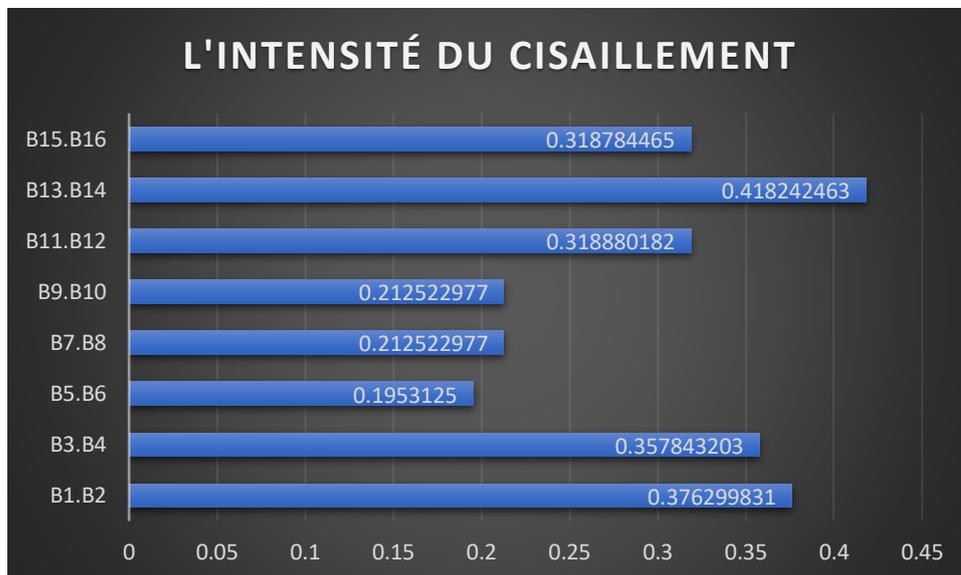


Figure III.13 : es variation de l'intensité du cisaillement du vent sur la zone A

### La zone B

POINTS DE GRILLE	L'INTENSITÉ DU CISAILLEMENT
B1.B2	0.376299831
B3.B4	0.357843203
B5.B6	0.1953125
B7.B8	0.212522977
B9.B10	0.212522977
B11.B12	0.318880182
B13.B14	0.418242463
B15.B16	0.318784465

**Tableau III.2** l'intensité du cisaillement sur la zone B à 20h



**Figure III.14** : l'intensité du cisaillement dans la zone B

### La zone c

Points de la grille	L'altitude	L'intensité du cisaillement
C1.C2	400	0.134411332
C3.C4	400	0.314931943
C5.C6	600	0
C7.C8	600	0.517102523
C9.C10	800	0.143418436
C11.C12	800	6.532081665
C13.C14	1000	0.227100654
C15.C16	1000	0.251945555

Tableau III.3 intensités du cisaillement du vent dans la zone C

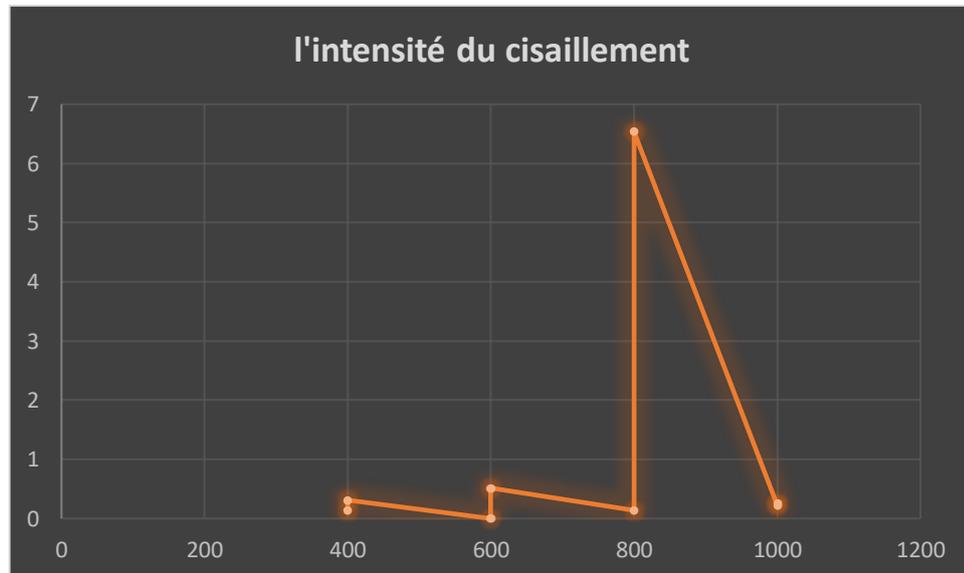


Figure III.15 : l'intensité du cisaillement du vent su la zone c

### Observation

On remarque que soudainement l'intensité du cisaillement a augmenter (au niveau 800m).

Si pour cela il est très danger, car on ne peut pas lui prévoir sans les systèmes de prévision d'un cisaillement.

### **III-11 Conclusion :**

Selon les différents analyses on peut déduire qu'il y'a plus d'une raison qui peut produire le cisaillement du vent, alors il est nécessaire de développer ce programme afin d'éviter les risques causés par le cisaillement du vent.

### Conclusion et perspective

Dans ce mémoire on a étudié le cisaillement de vent et leurs types.

On a essayé de combiner le model de prévision AROME avec un programme de calcul informatique afin d'être capable de prévoir le cisaillement du vent puisque la zone de l'aérodrome est en pleine de risque du cisaillement du vent car sa position géographique.

On ne peut pas juger, si cette méthode est fiable car on ne sait pas la situation réelle dans l'aéroport ce jour-là.

Ce programme peut afficher les résultats dans google-map mais puisque il y'a une big data je n'étais pas capable d'essayé.

### Perspective

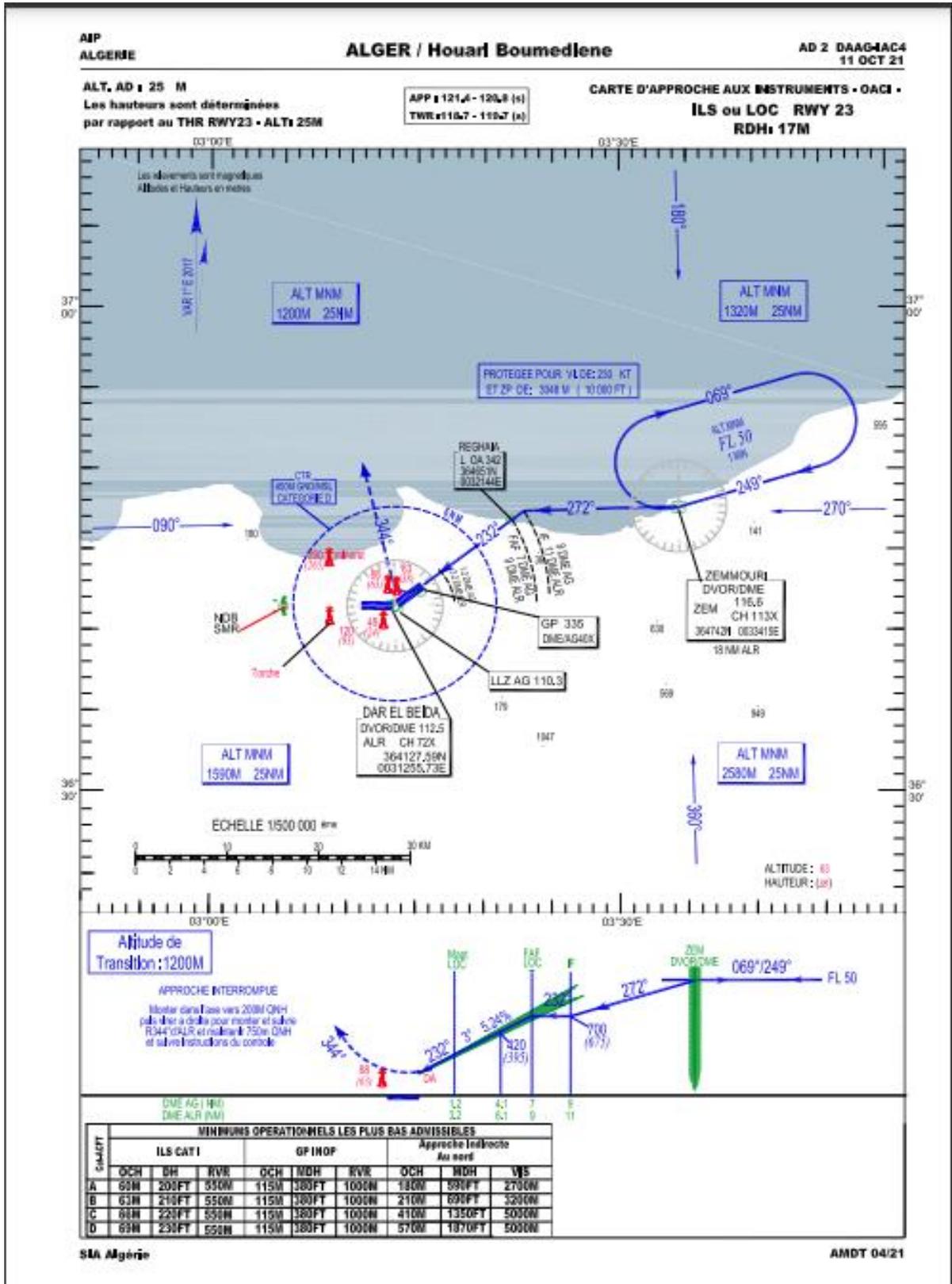
Nous notons que les seules observations dont on dispose pour cette étude sont des observations du vent en surface enregistré par les trois anémomètres disposés le long des deux pistes. Pour cela, il serait très intéressant s'il existait un outil de détection des cisaillements de vent sur l'aérodrome 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.

## **Bibliographie :**

- ❖ MANUELLE DU CISAILLEMENT DU VENT DANS LES BASSES COUCHES-DOC 98171-. [1]
- ❖ AÉROLOGIE MÉTÉOROLOGIE par Arnaud Percher. [2]
- ❖ LIVRE – LA MÉTEO COPRENDRE LES CLIMATS ET L'ENVIRONNEMENT (QA -INTERNATIONAL COLLECTIF-) [3]
- ❖ LIVRE -CONNAITRE LA METEOROLOGIE (RICHARD LEBUC ET REYMOND GERVAIS) -[4]
- ❖ LIVRE – O50 METEROROLOGIE (INSTITUT DE MERMOZ) – [5]
- ❖ LIVRE – LA MÉTEO DE À-Z (ERIC DIOL) - [6]
- ❖ LIVRE –LA METEROLOGIE DE PILOTE EN LIGNE (CHRISTIAN BIZANGER) - [7]
- ❖ MÉMOIRE DE BOUCHEFFA AMEL 2015 [8]
- ❖ MOKHTARI BESKRA PPT. [9]
- ❖ PREVISION NUMÉRIQUE DU TEMP-TECHNO SCIENCE- [10]
- ❖ PRINCIPAL DE LA PREVISION NUMÉRIQUE DU TEMP - ENCYCLOPEDIA UNIVERSALI-[11]
- ❖ LES MODELES DE LA PREVISIONS NUMIRIQUE- ANCIEN SMETEO.INFO-[12]
- ❖ LA PREVISION NUMÉRIQUE DU TEMPS – CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE METEOROLOGIQUE-[13]
- ❖ SITE AEROPORT D'ALGER [14]
- ❖ METEOROLOGIE ELEMONTAIRE – MONKOR AVIATION-[15]
- ❖ CISAILLEMEN DE VENT -AVIONNAIRE-[16]
- ❖ BRISES -METEO CENTER-.com [17]
- ❖ SIA-ENNA- [18]
- ❖ GOOGLE EARTH [19]
- ❖ EDUCATION.TOUT COMMENT.COM ARTICLE SCIENTIFIQUE [20]
- ❖ ANNEX 3 ASSISTANCE METEOROLOGIQUE A LA NAVIGATION AERIENNE [21]

# LES ANNEXES

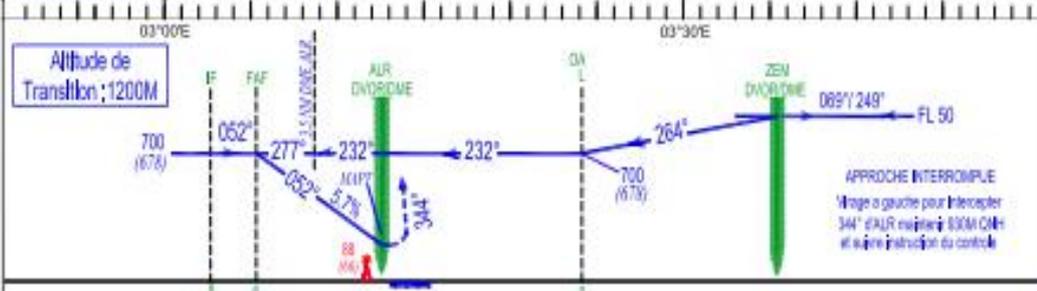
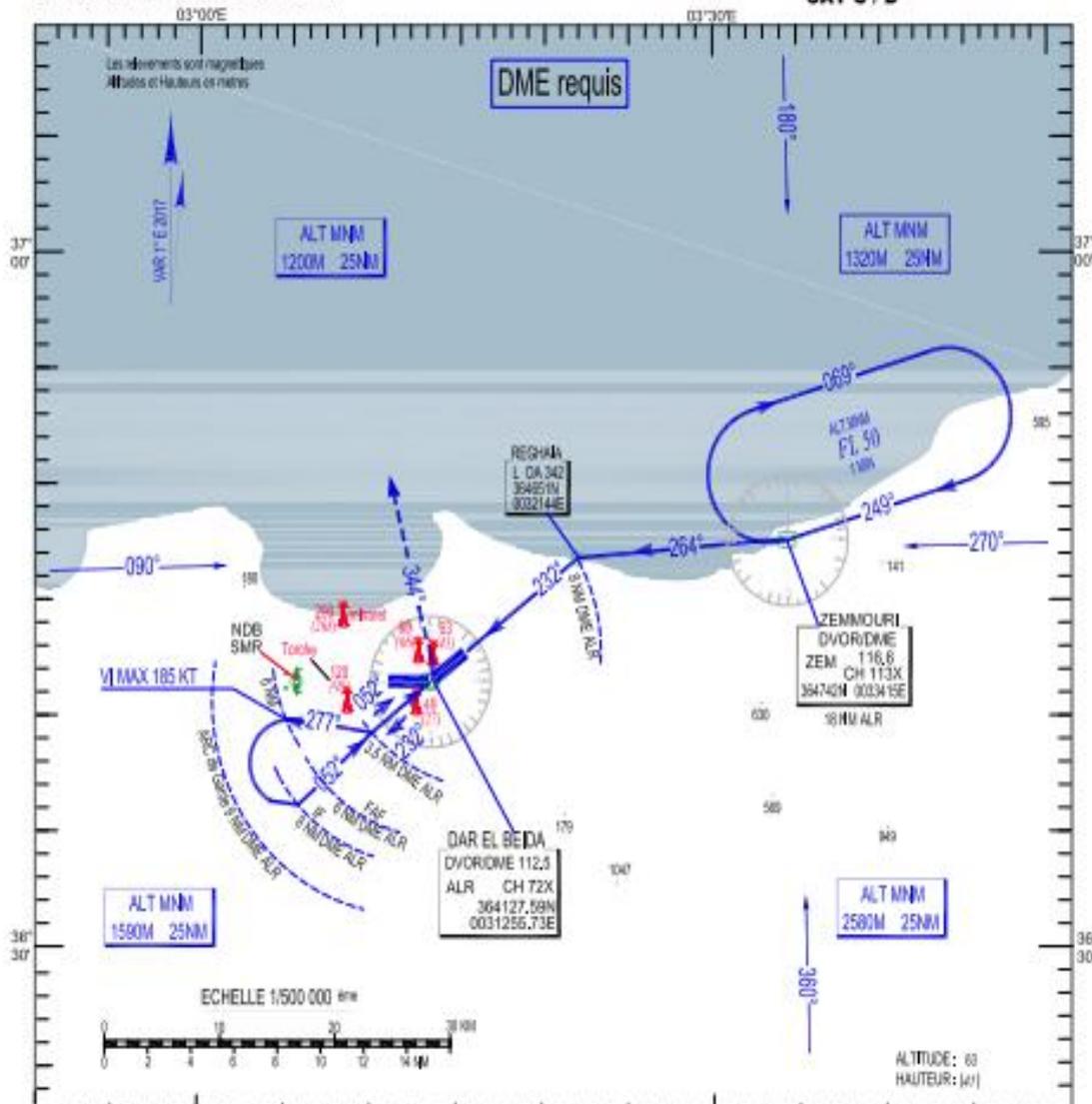
## LES CARTE IACI : [18]



ALT. AD 25 M  
Les hauteurs sont déterminées  
par rapport au THR RWY 05. ALT: 22M

APP 121,4 - 120,3 (M)  
TWR 118,7 - 118,7 (M)

CARTE D'APPROCHE AUX INSTRUMENTS - OACI -  
VOR RWY 05  
CAT C / D



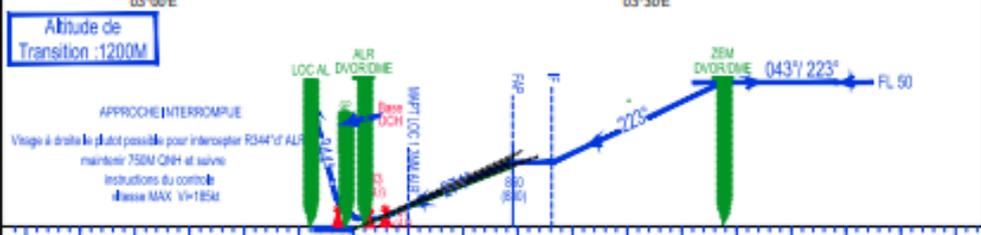
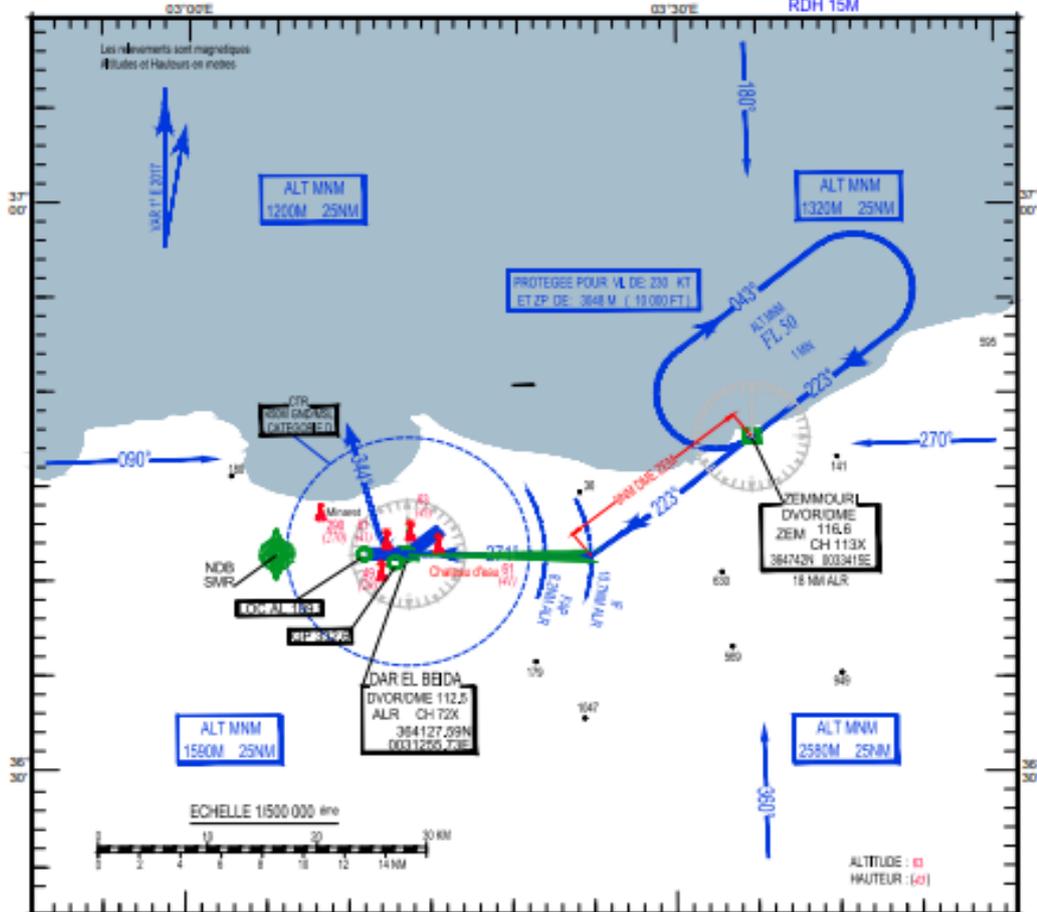
CAT	MINIMUMS OPERATIONNELS LES PLUS BAS ADMISSEILES					
	VOR RWY 05			Approche indirecte Au nord du terrain		
	OCH	MDH	RVR	OCH	MDH	VIS
C	140 M	480 FT	1400 M	410 M	1350 FT	5000 M
D	140 M	480 FT	1400 M	570 M	1870 FT	5000 M

ALT AD : 25 M  
Les hauteurs sont déterminées  
par rapport au THR RWY 27. ALT: 25M

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

CARTE D'APPROCHE AUX INSTRUMENTS - OACI -

I.S. OU LOC RWY 27  
CAT A/B/C/D  
RDH 15M



MINIMUMS OPERATIONNELS LES PLUS BAS ADMISIBLES

CATEG	I.S. RWY 27			LOC RWY 27			Approche indirecte Au nord		
	OCH	OH	RVR	OCH	MDH	VH	OCH	MDH	VH
A	85M	200FT	1250M	150M	500FT	2300M	170M	500FT	2500M
B	83M	200FT	1250M	150M	500FT	2300M	190M	433FT	2300M
C	81M	200FT	1250M	150M	500FT	2400M	190M	433FT	2300M
D	79M	200FT	1250M	150M	500FT	2400M	190M	433FT	2300M