

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES ET PHOTOS

LISTE D'ORGANIGRAMME

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES COURBES

INTRODUCTION

PARTIE 1: CONTEXTE GENERAL

Chapitre 1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMAT DES ZONES D'ÉTUDE

Chapitre 2 GENERALITES SUR LE BROUILLARD

PARTIE 2: METHODOLOGIE ET DONNEE D'ENTREE

Chapitre 1 METAR ET SPECI

Chapitre 2 TRAITEMENT DES DONNEES

PARTIE 3: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chapitre 1 RESULTATS

Chapitre 2 INTERPRETATION DES RESULTATS

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

WEBOGRAPHIE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS

ASECNA : Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar

BR : Brume humide

BKN : Broken (nuages fragmentés)

CAVOK : Ceiling And Visibility OK

CB : Cumulonimbus

FG : FoG

Ft : Foot

FMMI : Code OACI de la station d'Ivato

FMMT : Code OACI de la station de Tamatave

FMSD : Code OACI de la station de Fort-Dauphin

HR : Humidité Relative

IFR : Instrument Flight Rules

METAR : Meteorological Aerodrome Report

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

SCT : Scattered (nuage épars)

SPECI : Spécial

TU : Temps Universel

OVC : Overcast (ciel couvert)

VBA : Visual Basic for Application

VFR : Visual Flight Rules

LISTE DES FIGURES ET PHOTOS

FIGURE 1 : CLIMAT EN FONCTION DES POSITIONS DE LA TERRE ET DU SOLEIL.....	3
FIGURE 2 : PROCESSUS DE FORMATION DE BROUILLARD D'EVAPORATION	8
FIGURE 3 : BROUILLARD FORME PAR REFROIDISSEMENT ADIABATIQUE (BROUILLARD DE PENTE)	9
FIGURE 4 : BROUILLARD D'ADVECTION	9
FIGURE 5 : BROUILLARD DE RAYONNEMENT	10
FIGURE 6 : PROFIL VERTICALE DE L'ATMOSPHERE STANDARD[4]	11
FIGURE 7 : BAROMETRE A MERCURE.....	13
FIGURE 8 : LES DIFFERENTS TYPES DE NUAGE ET LEURS NIVEAUX.....	16
PHOTO 1 : VUE AERIENNE DE L'AEROPORT D'IVATO.....	4



LISTE D'ORGANIGRAMME

ORGANIGRAMME 1 : DEMARCHE DU TRAITEMENT DES DONNEES	26
ORGANIGRAMME 2 : LES CONDITIONS FAVORABLES POUR LA FORMATION DE BROUILLARD SELON L'ORDRE DE PRIORITE DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES.....	40

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : TABLE DE CODES DE W'W' (TEMPS PRESENT)[6]	22
TABLEAU 2 : EXEMPLE DE DONNEES DANS LE MICROSOFT EXCEL APRES TRAITEMENT SOUS VBA.....	25
TABLEAU 3 : MOYENNE D'OCCURRENCE DE BROUILLARD DE 2007 A 2017	28
TABLEAU 4 : TABLEAU DE MOYENNE DE PRESSION A IVATO.....	29
TABLEAU 5 : MOYENNE D'HEURE D'APPARITION DE BROUILLARD	30
TABLEAU 6 : TABLEAU DE MOYENNE DE PRESSION FMMI, FMMSD, FMMT	31
TABLEAU 7 : EXTRAITE DE LA DONNEE UTILISEE.....	33
TABLEAU 8 : OCCURRENCE DE BROUILLARD SELON LA FORCE DE VENT (FF).....	34
TABLEAU 9 : OCCURRENCE DE BROUILLARD SELON T-TD.....	34
TABLEAU 10 : OCCURRENCE DE BROUILLARD SELON DIRECTION DU VENT (DDD)	34
TABLEAU 11 : OCCURRENCE DE BROUILLARD SELON LA DIFFERENCE DE PRESSION ENTRE FMMSD ET FMMT	34
TABLEAU 12 : REPARTITION DE NOMBRE DE CAS DE BROUILLARD PAR INTERVALLE DE FORCE DE VENT	35
TABLEAU 13 : REPARTITION DE NOMBRE DE CAS DE BROUILLARD PAR INTERVALLE DE T-TD	36
TABLEAU 14 : REPARTITION DE NOMBRE DE CAS DE BROUILLARD PAR INTERVALLE DE DDD VENT	36
TABLEAU 15 : REPARTITION DE NOMBRE DE CAS DE BROUILLARD PAR INTERVALLE DE $P_{FMMSD}-P_{FMMT}$	37

LISTE DES COURBES

COURBE 1 : MODE D'OCCURRENCE MENSUEL DE BROUILLARD	28
COURBE 2 : MOYENNE D'HEURE D'APPARITION DU BROUILLARD	31
COURBE 3 : COURBE DES MOYENNES DES PRESSIONS FMMI, FMSD, FMMT	32

INTRODUCTION

Nombreux sont les phénomènes météorologiques qui résultent de l'interaction entre la Terre, l'océan et l'atmosphère. Ces phénomènes peuvent présenter parfois des risques potentiels sur le plan économique, mécanique et humain. Toutefois, leurs prévisions représentent un énorme atout .

Parmi les phénomènes météorologiques existants, le brouillard est d'une importance capitale surtout dans le domaine de l'aéronautique. En effet, il réduit la visibilité entraînant ainsi des risques d'accidents sur l'aérodrome. La prévention du phénomène consiste à anticiper les situations propices à la formation, d'un trouble atmosphérique.

Le but de cette étude est de contribuer à la prévision du brouillard à Ivato en essayant de trouver la relation entre la variation des valeurs des paramètres météorologiques à la formation du présent phénomène. D'où le titre de ce présent ouvrage : «CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'OCCURRENCE DE BROUILLARD SUR L'AERODROME D'IVATO».

Pour ce faire, nous allons diviser notre travail en trois grandes parties dont la première nous parlera du contexte général renfermant la présentation des zones d'études, suivie de la généralité sur le brouillard ainsi que les paramètres météorologiques pertinentes pour la prévision de ces nuages bas.

Ensuite, la deuxième partie sera réservée à l'aspect méthodologique utilisée et enfin ;

La troisième partie nous évoquera les différents résultats ainsi que les interprétations des résultats.

PARTIE 1: CONTEXTE GENERAL

Chapitre 1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMAT DES ZONES D'ÉTUDE

1.1 Généralité sur le climat de Madagascar

Madagascar, se trouve dans l'hémisphère sud, a un climat tropical, rythmé par deux saisons bien différentes : la saison sèche et fraîche, d'avril à octobre, et la saison des pluies, chaude et humide, d'octobre à avril. On distingue aussi quatre subdivisions saisonnières ressemblant à ce qui existe dans le climat tempéré : deux périodes intermédiaires ou intersaisons, dont la première en septembre-octobre - novembre (équivalent du printemps) et la seconde en mars - avril - mai (équivalent de l'automne) ; deux périodes centrales, l'été en décembre-janvier-février et l'hiver en juin-juillet-août. La figure 1 ci-dessous illustre la variation des saisons globale et le climat en fonction des positions de la Terre et du Soleil.

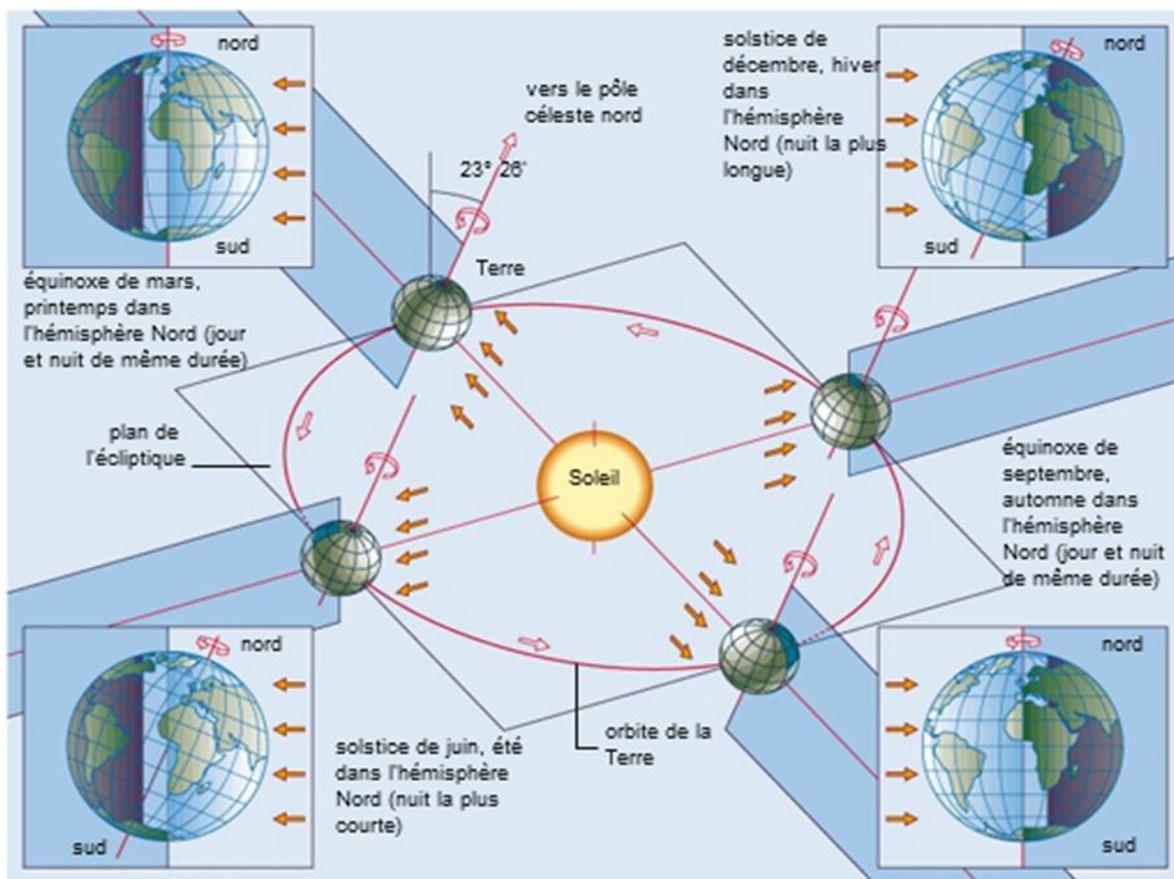


Figure 1 : Climat en fonction des positions de la Terre et du soleil

(Source : Petit Larousse 2010)

1.2 Antananarivo (Ivato)

1.2.1 Délimitation administrative

L'aéroport d'Ivato se trouve à 20 kilomètres au nord-ouest d'Antananarivo, la capitale de Madagascar. En partant du centre-ville, il existe deux possibilités pour accéder à Ivato, soit l'itinéraire passant par Talatamaty, Antanetibe, Mandrosoa et Mamory, soit celui vers la droite au niveau d'Ambohibao vers le côté nord, en passant par Amboaroy, Ambohijanahary et Ankadindravola. La photo 1 ci-dessous nous montre la vue aérienne de l'aéroport d'Ivato.



Photo 1 : Vue aérienne de l'aéroport d'Ivato

(Source : Google Earth, 2018)

1.2.2 Délimitation de la zone d'étude

La station d'observation d'Ivato est déterminée par son indicatif :

- OMM: 67083
- OACI: FMMI

Les coordonnées géographiques de l'aéroport international d'Antananarivo Ivato sont :

- Latitude : 18° 48' Sud
- Longitude : 47° 29' Est
- Altitude : 1280 m (4198 ft)

1.2.3 Climat d'Antananarivo (Ivato)

- ❖ En saison d'été, de novembre jusqu'en Avril :
 - Climat tropical chaud et humide ou saison pluvio-orageuse où la ZCIT (Zone de Convergence InterTropical) est très active, Le vent tourne, en général, pendant la matinée de Sud-Est à Nord Nord-Est l'après-midi ;
- ❖ En saison d'hiver, de mai jusqu'en octobre
 - ⇒ Climat tropical froid et sec où le brouillard et le crachin se manifestent pendant la matinée ;
 - Le vent tourne de Sud Sud-Est toute la journée
 - ⇒ à cause de la prédominance de l'anticyclone, la vitesse de vent est localement fort.

1.3 Fort-Dauphin (ou Taolagnaro) [1]

Fort-Dauphin est une ville de la province de Tuléar, chef-lieu de la région d'Anosy, située dans le Sud-Est de l'île de Madagascar, dont elle est la plus ancienne ville. Elle est distante de 1 122 km d'Antananarivo, la capitale de Madagascar

1.3.1 Situations géographiques

La station d'observation de Fort-Dauphin est déterminée par son indicatif :

- OMM: 67197
- OACI: FMSD

Les coordonnées géographiques de l'aéroport de Fort-dauphin sont :

- Latitude : 25° 02' Sud
- Longitude : 46° 59' Est
- Altitude : de 8 à 160 mètres

Fort-Dauphin est dominée par le pic Saint Louis qui culmine à 529 mètres d'altitude, au nord de la ville.

1.3.2 Généralité sur le climat de Fort-Dauphin

La ville bénéficie de 1 700 mm de précipitations annuelles, en raison de la proximité d'une barrière montagneuse. Ainsi, la région de Taolagnaro est plus verte et plus fertile que les régions avoisinantes.

La température moyenne est de 23° C, et oscille entre 20°C et 26°C selon les mois.

1.4 Tamatave

Tamatave est une grande ville de l'Est de Madagascar, chef-lieu de la province et de la région de l'Est. Située à 353 km au Nord-Est d'Antananarivo.

1.4.1 Situation géographique

La station d'observation de Tamatave est déterminée par son indicatif :

- OMM: 67095
- OACI: FMMT

Les coordonnées géographiques de l'aéroport de Tamatave sont :

- Latitude : 18° 07' Sud
- Longitude : 49° 24' Est
- Altitude :5 mètres

1.4.2 Généralité sur le climat de Tamatave

Avec une température moyenne de 24°C et 3 500mm de pluie par an, le climat de Tamatave est de type subéquatorial : températures chaudes et des pluies fréquentes tout au long de l'année

De Janvier à Avril, la saison chaude est rythmée par les cyclones qui peuvent parfois être extrêmement violents.

Le vent d'Alizé des régions intertropicales souffle presque toute l'année.

Chapitre 2 GENERALITES SUR LE BROUILLARD

2.1 Définitions [2]

Le brouillard est un hydrométéore constitué de très petites gouttelettes d'eau, souvent invisibles à l'œil nu, en suspension dans l'air.

Par convention, l'appellation "**brouillard**" est utilisée lorsque la visibilité horizontale au sol est inférieure à 1 km dans au moins une direction ; l'appellation "**brume humide**" , par contre, est utilisée lorsque la visibilité horizontale au sol est comprise entre 1 et 5 km.

Les brouillards résultent de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique en gouttelettes qui restent en suspension dans l'air en quantité suffisante pour réduire la visibilité à moins de 1 km. Le diamètre des gouttes est de l'ordre de quelques microns (1/1000e mm). Leur vitesse de chute ne dépasse pas quelques millimètres par seconde.

La présence d'une quantité suffisante de noyaux de condensation est nécessaire à la formation de brouillard. En général, il faut 0,5 g d'eau condensé par kilogramme d'air pour qu'apparaisse un brouillard suffisamment épais.

2.2 Les différents types de brouillard [2], [3]

Les brouillards sont classés selon leurs processus physiques de formation :

- ❖ Brouillards formés par évaporation (brouillard de lac, de rivière, de mer et brouillards frontaux)
- ❖ Brouillards formés par mélange de deux masses d'air (mélange par brassage horizontal ou vertical)
- ❖ Brouillards formés par refroidissement de l'air :
 - Refroidissement adiabatique : brouillard de pente
 - Refroidissement non adiabatique :
 - Brouillard d'advection
 - Brouillard de rayonnement

2.2.1 Le brouillard d'évaporation

Il est formé par un apport supplémentaire de vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau provient de la surface liquide sous-jacente ou des précipitations.

Les brouillards de lac, de rivière, de mer, procèdent du premier processus. Ce type de brouillard se rencontre fréquemment au lever du Soleil au printemps et en été mais il se dissipe, en général, assez rapidement après le lever du Soleil.

Les brouillards frontaux se forment dans l'air froid par évaporation des précipitations provenant de l'air chaud. La portion supérieure de l'air froid est saturée en premier lieu. Il se forme donc une couche de nuages qui se présentent le plus

souvent sous forme de fractostratus. Cette couche de nuages peut descendre jusqu'au sol et former du brouillard.



Figure 2 : Processus de formation de brouillard d'évaporation

(Source : www.deule-climat.net/cours_brouillard.htm , 2018)

2.2.2 Le brouillard de mélange

Le mélange horizontal de deux masses d'air ne peut entraîner la formation d'un brouillard très dense, car la quantité d'eau condensée de cette manière est très faible ; un refroidissement supplémentaire par rayonnement ou un apport de vapeur d'eau est nécessaire.

Considérons deux masses d'air nettement différentes : la première ayant une température de 10°C et un rapport de mélange de 7 g/kg (H.R. : 92%) ; la seconde, une température de 20°C et un rapport de mélange de 14 g/kg (H.R. : 94%). Leur mélange donne une masse d'air d'une température de 15°C et d'un rapport de mélange égal à 10.5 g/kg. Une telle masse d'air est saturée, mais ne contient pas d'eau liquide ; il n'y aura donc pas de brouillard tant qu'un refroidissement supplémentaire n'intervient pas.

Toutefois, en présence d'un grand nombre de noyaux de condensations (dans les régions industrielles par exemple) un tel mélange peut entraîner la formation de bancs de brouillards ou de brume.

Ce type de brouillard est très dangereux pour la navigation maritime, car leurs manifestations sont peu suivies par les météorologistes du fait du petit nombre de relevés effectués en mer.

2.2.3 Brouillard de pente

Dans les régions présentant un relief marqué, il se forme le long des pentes et laissant la vallée dégagée un brouillard dit de relief. La figure ci-dessous nous montre ce type de brouillard.

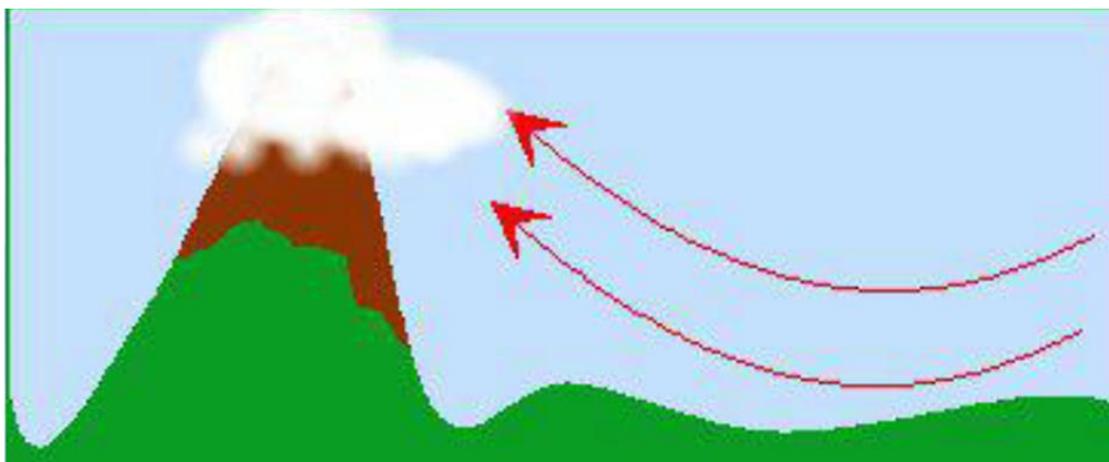


Figure 3 : brouillard formé par refroidissement adiabatique (brouillard de pente)

(Source : www.deule-climat.net/cours_brouillard.htm, 2018)

2.2.4 Brouillard d'advection

On appelle advection le mouvement horizontal de l'air. Le brouillard d'advection se forme lors du déplacement d'une masse d'air sur une surface (terre ou mer) dont la température est inférieure à la température du point de rosée de la masse d'air.

Ce type de brouillard peut se former indépendamment de la couverture nuageuse et du moment de la journée.

Dans les régions montagneuses, le brouillard d'advection apparaît également suite à la condensation de l'humidité par exemple dans le fond des vallées. Une augmentation de la vitesse du vent transforme le brouillard en stratus.

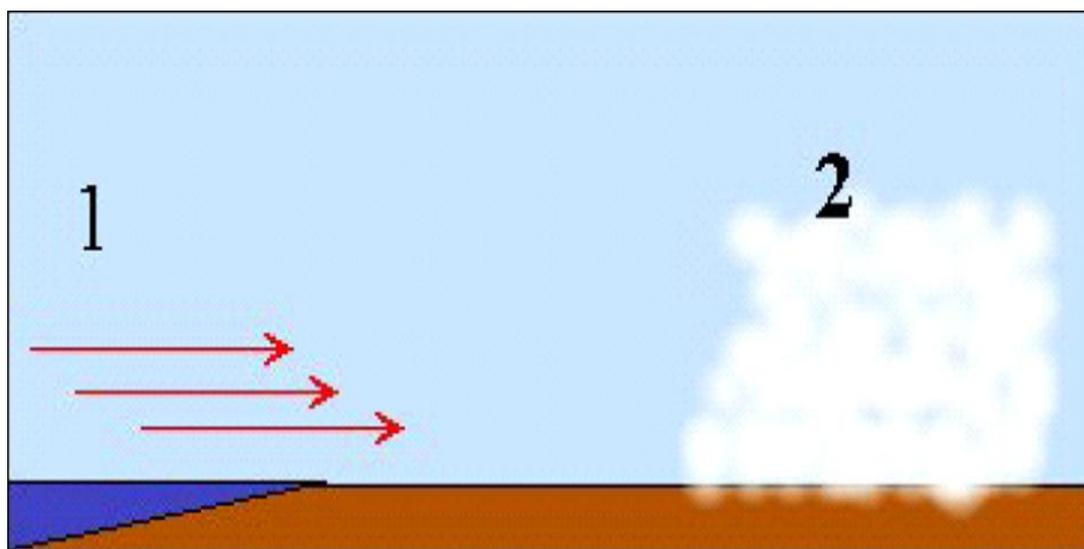


Figure 4 : Brouillard d'advection

(Source : www.deule-climat.net/cours_brouillard.htm, 2018)

2.2.5 Brouillard de rayonnement

Le refroidissement nocturne entraîne un abaissement de la température de l'air puisqu'il n'y a pas de rayonnement solaire pour réchauffer le sol, qui va à son tour émettre de radiation de grande longueur d'onde. Un phénomène de saturation aura lieu et des gouttelettes d'eau se condenseront sur les noyaux de condensation. La formation du brouillard de rayonnement se fait alors à partir du sol au fur et à mesure que la nuit avance, et il arrive souvent qu'il est plus dense au lever du jour. Ce type de brouillard est appelé brouillard radiatif ou brouillard de convection. C'est un brouillard exclusivement continental. En se dissipant, il peut donner naissance à des Stratus.

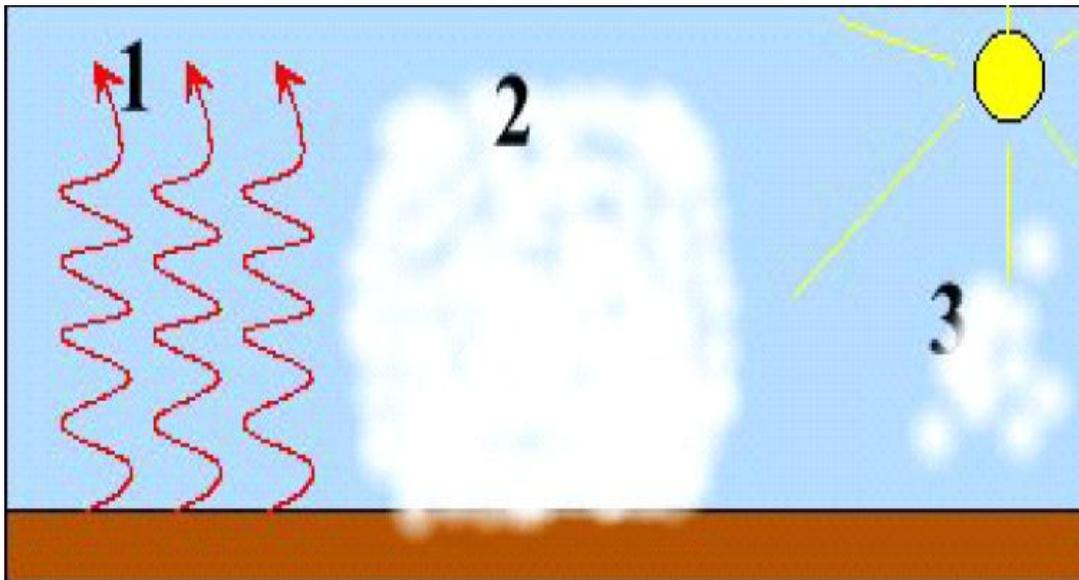


Figure 5 : Brouillard de rayonnement

(Source : www.deule-climat.net/cours_brouillard.htm, 2018)

2.3 Les dangers du brouillard :

- La réduction de visibilité empêche tout vol à vue.
- Le sol n'est pas toujours visible et les obstacles de grandes dimensions verticales ne sont aperçus que trop tard pour être évités.
- Le vol IFR est faisable en cas brume. Par contre le vol VFR n'est pas conseillé voire même dangereux
- Si le brouillard est givrant, on ajoute les risques liés au givre.

2.4 LES PARAMÈTRES DESCRIPTIFS DU BROUILLARD

2.4.1 LA TEMPÉRATURE [4]

2.4.1.1 La température de l'air

La température est une grandeur physique qui exprime la chaleur ou le froid de l'atmosphère ou de l'air ambiant dans un lieu donné. Sa mesure s'effectue, en météorologie, avec un thermomètre ou thermographe dans un abri fabriqué en bois ou en plastique, situé à une hauteur de 1,25 à 2m au-dessus du sol, conformément aux recommandations générales de l'OMM. On utilise souvent les thermomètres en mercure, en alcool ou en toluène qui ont chacun des intervalles de graduations pour la mesure de la température, alors que la mesure en altitude s'effectue soit par le radiosondage, soit par avion ou par satellite. En général, l'unité de mesure est en degré Celsius.

En aéronautique, la température varie en fonction de l'altitude et la connaissance du niveau de l'isotherme zéro degré permet de connaître la zone où se produit le givrage (entre 0° et -5°) qui entraîne la modification du profil et du poids des aéronefs. Le profil vertical de la température en fonction de l'altitude est donné ci-dessous :

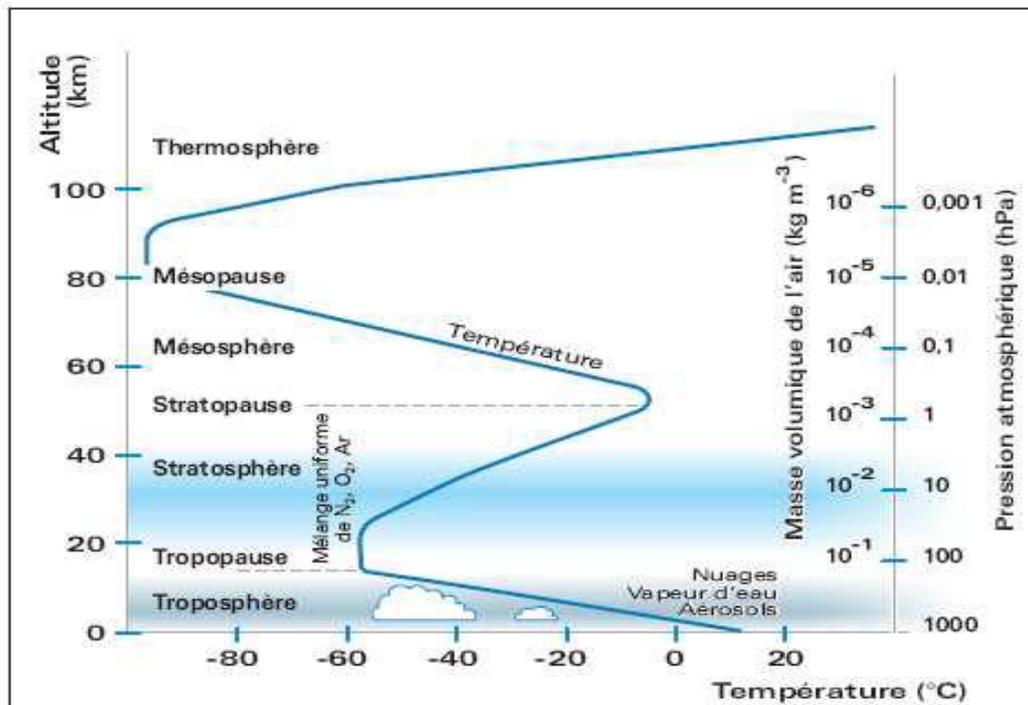


Figure 6 : Profil verticale de l'atmosphère standard[5]

Le gradient de température retenu n'est pas celui que l'on rencontre tous les jours. Pour la troposphère, couche des phénomènes météorologiques, le gradient de $-6,5 \text{ °C} / 1000 \text{ m}$ est un gradient moyen. Il se peut que la température évolue de façon différente. Il se peut également que le gradient ne soit pas constant de 0 à 11000 m.

Conversion d'unités : Celsius-Fahrenheit, Celsius-Kelvin

$$\text{°C} = (\text{°F} - 32) \times \frac{5}{9}$$

$$\text{°F} = \frac{9}{5} \times (\text{°C} + 32)$$

$$\text{°C} = \text{°K} - 273,15$$

$$\text{°K} = \text{°C} + 273,15$$

2.4.1.2 Humidité relative de l'air

L'air atmosphérique contient de la vapeur d'eau. Celle-ci provient de l'évaporation au-dessus des mers, des lacs, des sols humides ou elle est produite par l'activité humaine.

La quantité de vapeur d'eau qui peut être contenue dans l'air dépend des conditions de température et de pression de ce dernier. Plus la température de l'air est élevée et plus la quantité d'eau qui peut être dissoute est importante.

L'humidité relative est le rapport entre la masse d'eau dissoute dans l'air et la masse maximale d'eau que l'on peut y dissoudre.

Lorsque l'humidité relative atteint 100 %, on dit qu'il y a **saturation** ou que **l'air est saturé** en vapeur d'eau. Dans ce cas il va pouvoir se former des nuages ou du brouillard selon les conditions. L'humidité relative permet donc aux météorologues de prévoir les formations de nuages et même le type de nuages et les risques de précipitation.

L'humidité relative se mesure avec un hygromètre ou un psychromètre. Elle se note, en général, HR.

2.4.1.3 La température du point de rosée, Td

La température du point de rosée est la température à partir de laquelle l'air devient saturé lorsqu'on le refroidit à pression constante.

2.4.2 LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

2.4.2.1 L'origine de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique résulte des chocs des molécules d'air entre elles et avec les objets dans l'atmosphère. Historiquement, les premières mesures de la pression atmosphérique ont été effectuées par TORRICELLI dans les canaux de VENISE. De là Si la pression fut mise au point un instrument pour la

mesurer, le baromètre. Celui-ci utilise du mercure (Hg) pour mesurer la pression atmosphérique. Le niveau monte première unité de mesure de la pression atmosphérique fut le millimètre de mercure (mm Hg) ou le pouce de mercure (In Hg) pour les Anglo-Saxons.

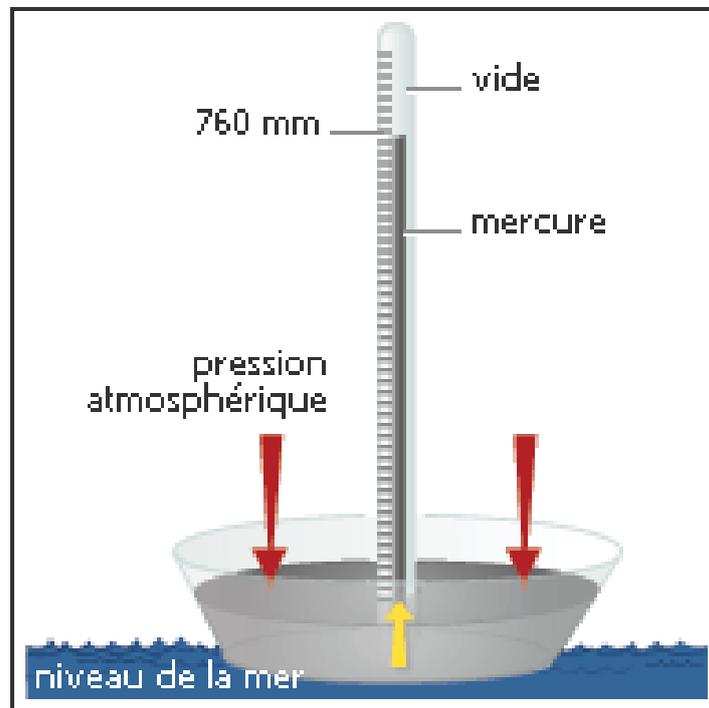


Figure 7 : Baromètre à Mercure

(Source : Microsoft Encarta 2009)

Dans le système international d'unités, la pression se donne en Pascal. En météorologie, il est plus pratique d'utiliser l'hectopascal.

Nous retiendrons que :

<p style="text-align: center;">En moyenne à 0 m :</p> <p style="text-align: center;">$P_{\text{atm}} = 1013 \text{ hPa} = 1013 \text{ mbar} = 760 \text{ mmHg} = 29,92 \text{ InHg}$ et</p> <p style="text-align: center;">$1 \text{ hPa} = 1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$</p>

La pression est le poids de la colonne d'air qui surmonte l'unité de surface sur laquelle elle s'exerce. sa variation temporelle est liée à celle de la température et son gradient génère le vent.

Les pilotes font appel au code Q qui définit clairement le niveau de pression barométrique de référence, le niveau "zéro" qui permet de caler leur altimètre de bord :

QFE: pression barométrique mesurée au niveau de la piste

QNH: pression barométrique corrigée des erreurs instrumentales, de température et de gravité et ramené au niveau moyen de la mer suivant les caractéristiques de l'atmosphère standard (variation de 6.5°/1000 m).

QNE: C'est l'altitude correspondant en atmosphère standard à la pression barométrique actuelle. Il est utilisé pour déterminer le niveau de vol (flight level).

QNH régional : c'est le QNH le plus bas observé dans la région considérée. Il est utilisé, pour des raisons de sécurité évidentes, par les centres de contrôle régionaux. Sachant que l'altitude peut varier de quelque 10 m par millibar, les pilotes sont obligés de régler leur altimètre avant l'atterrissage, et de comparer sa valeur avec le QNH réel au risque de trouver la piste plus tôt que prévu...

❖ Les anticyclones

Ce sont des zones de haute pression que l'on note A ou H (H pour high sur les documents anglo-saxons). Dans ces zones le vent est faible et le temps est beau avec un ciel souvent bien dégagé.

❖ Les dépressions

Ce sont des zones de basse pression que l'on note D ou B (L pour L \ddot{o} w sur les documents anglo-saxons). Dans ces zones le vent est plutôt fort et le temps est mauvais avec un ciel souvent fort encombré et des précipitations fréquentes.

2.4.3 LE VENT

Le vent est le mouvement horizontal de l'air par rapport à la surface de la terre. De ce point de vue, le vent semble être une variable assez simple, mais, en pratique, il y a tellement de forces mises en jeu, que son étude en devient très complexe et très intéressante.

2.4.3.1 Direction et force du vent

La loi de Buys-Ballot donne la direction du vent en fonction de la répartition du champ de pression. Elle peut s'énoncer de l'une des manières suivantes :

- Un observateur placé le dos au vent dans l'hémisphère Nord a les hautes pressions à sa droite et les basses pressions à sa gauche. Dans l'hémisphère Sud, il aura les hautes pressions à sa gauche et les basses pressions à sa droite.
- Dans l'hémisphère Nord, le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour des zones de hautes pressions et dans le sens inverse autour des zones de basses pressions. Dans l'hémisphère Sud, le sens de rotation est inversé.

Ce vent considéré à grande échelle est appelé le vent synoptique par opposition aux vents locaux.

Enfin, en météorologie on ne s'intéresse pas à la direction dans laquelle souffle le vent mais bien d'où il souffle.

NB : Par gradient d'une force, on entend son taux de variation dans une direction.

2.4.3.2 La connaissance du vent en aéronautique :

- Le vent est important pour le roulage, le décollage, la tenue de la navigation, la sécurité en l'air et l'atterrissage...
- Les services de météorologie aéronautique fournissent les informations suivantes sur le vent :
 - La direction d'où il vient
 - La vitesse du vent en nœud (1 kt = 1 Nm/h = 1,852 km/h)
 - Si nécessaire, la vitesse des rafales

L'observation des effets du vent sur la fumée, les arbres, etc, permet d'estimer sa vitesse en l'absence d'instrument de mesure (girouette, anémomètre).

2.4.4 **LES NUAGES** [4]

Les nuages sont l'ensemble visible de gouttelettes d'eau liquides ou de minuscules cristaux de glaces en suspension dans l'atmosphère et sans contact avec la surface de la terre ou de la mer. Ses formations se déclenchent à partir de la condensation de vapeur d'eau et les différents placements de masses d'air. Les nuages sont classés, en général, par leurs dimensions et niveaux de suspensions dans l'atmosphère et par leurs formes, tels que :

- **Nuages de l'étage supérieur** : cirrus, cirrostratus et cirrocumulus ;
- **Nuages de l'étage moyen** : altostratus et altocumulus ;
- **Nuages de l'étage inférieur** : stratocumulus, stratus et nimbostratus ;
- **Nuages à grand développement vertical** : cumulus et cumulo-nimbus ;

Mais ceux qui ont des influences considérables sur les activités aéronautiques, sont les cumulus et les cumulonimbus, à cause de leurs dimensions très étroites. Les flux de masses d'air qu'ils produisent se déplacent à grande vitesse suivis de pluies très fortes et des orages.

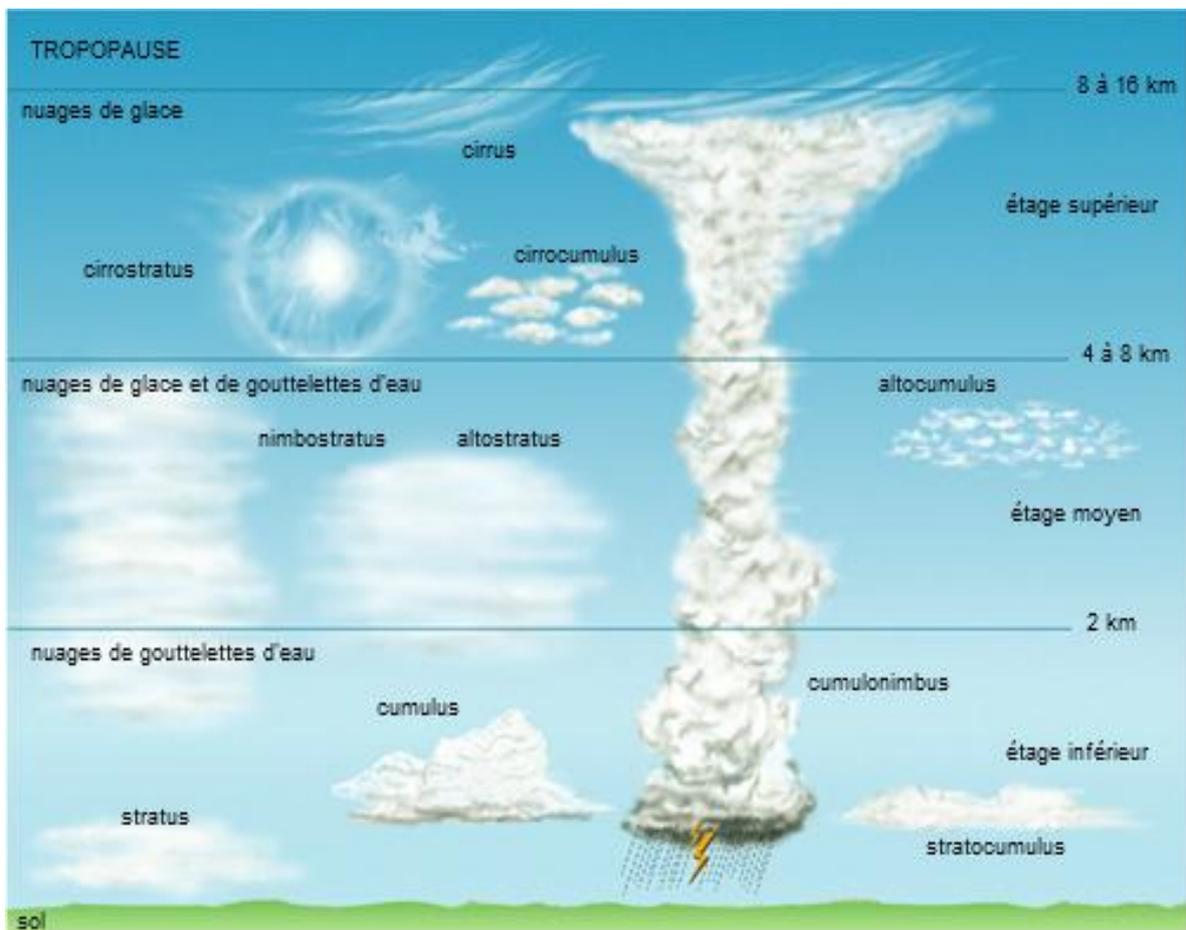


Figure 8 : Les différents types de nuage et leurs niveaux

(Source : le Petit Larousse 2010)

En aéronautique, la **nébulosité** est estimée différemment que celle en synoptique et l'observation s'effectue directement par l'œil humain ou par le télémètre de nuages. Les observations de nuages effectuées aux fins des messages d'observation pour l'atterrissage devraient être représentatives des conditions dans la zone d'approche (à l'aérodrome et au voisinage). Dans le message à transmettre au pilote, il est nécessaire d'y mentionner la hauteur de la base des nuages.

Les unités de mesures de la nébulosité du ciel se divisent en cinq :

- ⇒ Ciel clair ($0/8$)
- ⇒ Peu nuageux ($1/8$ à $2/8$)
- ⇒ Nuages épars ($3/8$ à $4/8$)
- ⇒ Nuages fragmentés ($4/8$ à $7/8$)
- ⇒ Ciel couvert ($8/8$)

PARTIE 2: METHODOLOGIE ET DONNEE D'ENTREE

Chapitre 1 METAR ET SPECI

1.1 METAR [5]

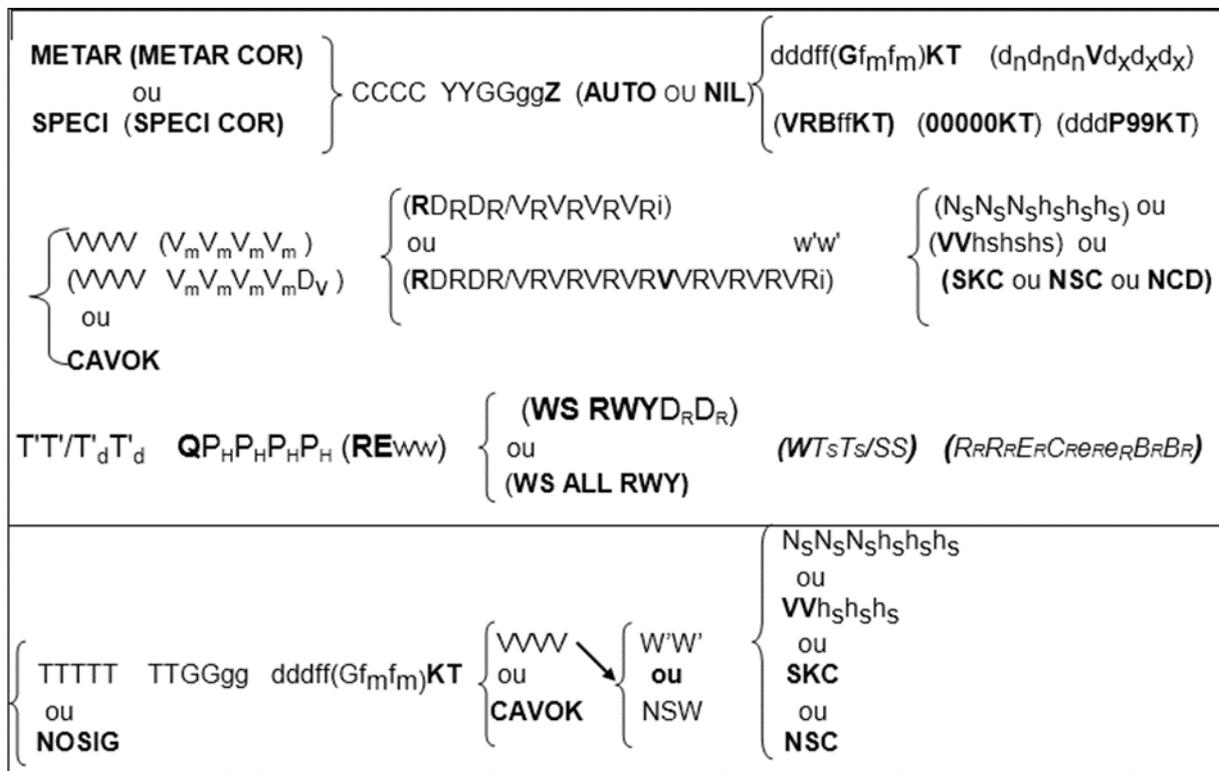
1.1.1 Généralités :

Un **METAR** (METeorological Airport Report) est un rapport d'observation (et non de prévision) météorologique pour l'aviation. Ce code international a été développé par les membres de l'OACI et est approuvé par l'Organisation météorologique mondiale. Les données de base sont communes à tous les pays, mais certaines sections du code sont sujettes à des variantes locales.

METAR et **SPECI** sont les noms de code utilisés respectivement pour le chiffrage d'observations météorologiques régulières pour l'aviation et le chiffrage d'observations météorologiques spéciales pour l'aviation. Une prévision de tendance est jointe à un message **METAR** ou à un message **SPECI**. Lorsque l'aggravation d'un élément météorologique s'accompagne de l'amélioration d'un autre élément (par exemple abaissement de la couche nuageuse et amélioration de la visibilité), un seul message **SPECI** est émis, il sera alors traité comme un message d'aggravation.

Les **METAR** et **SPECI** corrigés sont notés respectivement **METAR COR** et **SPECI COR**.

Forme symbolique :



Indicateur d'emplacement : CCCC

Le groupe littéral CCCC décrit l'indicateur d'emplacement OACI de la station ayant émis le METAR ou le SPECI.

Date : YYGGggZ

Jour du mois (**YY**), Heures (**GG**) et Minutes (**gg**) UTC de l'observation, suivis directement sans espace de l'indicateur littéral **Z**.

Ce groupe est inclus dans tous les messages METAR et SPECI. Dans un message SPECI, ce groupe indique l'heure d'occurrence du (des) changement(s) qui a (ont) justifié l'émission du message d'observation.

Exemple : Dans les METAR, "gg = 00" ou "gg = 30".

Dans les SPECI, GGgg indique l'heure UTC des changements observés.

Observations entièrement Automatiques : (AUTO)

Le mot de code **AUTO** est inséré avant le groupe relatif au vent, pour indiquer qu'il s'agit d'un message contenant des observations entièrement automatiques effectuées sans intervention humaine.

Le mot de code **NIL** indique que le message issu d'un système d'observations entièrement automatique, n'est pas disponible.

Vent : dddff(G_mf_m)KT (d_nd_nd_nVd_xd_xd_x) (VRBffKT) (00000KT) (dddP99KT)

ddd : Direction vraie d'où souffle le vent, moyennée sur les 10 minutes précédant l'heure de l'observation et arrondie à la dizaine de degrés la plus proche.

Les valeurs de la direction du vent (**ddd**) inférieures à 100° sont précédées d'un 0 et un vent soufflant du Nord vrai est chiffré 360.

Exemples :

Pour un vent de secteur NORD 0°ddd = 360 ;

Pour un vent de secteur NORD-EST 14°ddd = 010 ;

Pour un vent de secteur SUD-OUEST 238°ddd = 240.

ff : Vitesse du vent en nœuds, moyennée sur les 10 minutes précédant l'heure de l'observation.

KT : indicateur littéral de l'unité de mesure de la vitesse du vent utilisée en zone ASECNA. Il indique que le nombre qui le précède est une mesure en nœuds de la vitesse du vent.

Il y a discontinuité marquée du vent quand il y a changement brusque et prolongé de la direction du vent de 30° ou plus avec une vitesse de vent de 10 KT ou plus avant ou après ce changement, ou un changement de vitesse du vent de 10 KT ou plus durant au moins 2 minutes.

Lorsque la variation totale de la direction du vent se situe entre 60° et 180° et que la vitesse moyenne est inférieure à 3KT, ddd est chiffré **VRB**.

Lorsque la variation totale de la direction du vent dépasse 180°, ddd est chiffré **VRB** quelle que soit la vitesse.

V : indicateur littéral du groupe donnant la variabilité du vent en direction.

Lorsque la variation totale de la direction du vent se situe entre 60° et 180° et que la vitesse du vent est égale ou supérieure à 3KT, les deux directions extrêmes du vent seront indiquées par le groupe $d_n d_n d_n V d_x d_x d_x$.

Lorsque la vitesse du vent est inférieure à 1KT, elle sera indiquée comme étant "calme", il est chiffré par 00000, suivi directement, sans espace, de l'abréviation KT

Exemples :

- ✓ Pour un vent variant entre les secteurs NORD et SUD EST avec une vitesse moyenne de 2KT dddff = VRB02KT;
- ✓ Pour un vent variant entre les secteurs Nord-Est, Sud et Ouest-Nord-Ouest avec ff=15KT dddff = VRB15KT;
- ✓ Pour un vent variant entre les secteurs NORD et SUD EST avec une vitesse moyenne de 5KT dddff = 07005KT 360V140
- ✓ Pour un vent calme dddff = 00000KT

G : indicateur littéral de la vitesse maximale des rafales de vent.

f_mf_m : vitesse maximale des rafales.

Le groupe Gf_mf_m n'est chiffré que si au cours de la période de 10 minutes qui précède l'observation, la vitesse maximale du vent dans les rafales, dépasse la vitesse moyenne de 10KT ou plus.

La période d'établissement de la moyenne pour la mesure des variations de la vitesse moyenne du vent (rafales), est de trois secondes.

Pour des vitesses du vent égales ou supérieures à 100 nœuds, les groupes ff et f_mf_m sont :

- Précédés de l'indicateur P et
- Transmis comme suit : P99KT

Exemples :

Pour un vent moyen de 120° et 6KT avec des rafales de 18KT dddff = 12006G18KT;

Pour un vent de 140° et 150KT dddff = 140P99KT;

Visibilité : VVVV (VVVV V_mV_mV_mV_mD_V) (V_mV_mV_mV_mD_V)

VVVV : Valeur de la visibilité dominante qui est la visibilité atteinte ou dépassée dans au moins la moitié du cercle d'horizon ou au moins la moitié de la surface de l'aérodrome ; ces zones pouvant comprendre des secteurs contigus ou non.

V_mV_mV_mV_m : Valeur de la visibilité minimale

D_V : Direction, en rose de huit (N, NE, E, etc....), vers où la visibilité minimale est observée.

En dehors des fluctuations rapides de la visibilité, la visibilité dominante doit être déterminée et indiquée par **VVVV** et **D_V** n'est pas inclus dans le message.

Lorsque la visibilité fluctue rapidement et que la visibilité dominante ne peut être déterminée, seule la plus faible visibilité **V_mV_mV_mV_m** doit être indiquée, sans indication de la direction **D_V**.

Lorsque la visibilité minimale **V_mV_mV_mV_m** est inférieure à 1 500 m ou à 50% de la visibilité dominante **VVVV**, **V_mV_mV_mV_m** et **D_V** doivent être indiquées dans le message.

Lorsque la visibilité minimale **V_mV_mV_mV_m** est observée dans plusieurs directions, la direction la plus importante pour l'exploitation doit être indiquée.

Temps présent (ou prévu) : w'w'.

Le code w'w' est utilisé pour le chiffrage d'un, deux ou au plus trois phénomène(s) du temps présent pour l'exploitation aéronautique conformément à la Table de code ci-dessous :

Tableau 1 : table de codes de W'W' (temps présent)[6]

QUALIFICATIF		PHENOMENES METEOROLOGIQUES		
INTENSITE OU PROXIMITE	DESCRIPTEUR	PRECIPITATIONS	OBSCURCISSEMENT	AUTRES PHENOMENES
- Faible	MI Mince	DZ Bruine	BR Brume	PO Tourbillon de poussière/sable
Modéré	BC Bancs	RA Pluie	FG Brouillard	SQ Grains
	PR Partiel (couvrant une partie de l'aérodrome)	SN Neige	FU Fumée	FC Nuages en entonnoir (trombe terrestre ou trombe marine)
+ Forte	DR Chasse-poussière/sable/neige basse	SG Neige en grains UP Précipitation non identifiée par le système auto	VA Cendres volcaniques	TS Orage seul à l'aérodrome
	BL Chasse-poussière/sable/neige élevée	IC Cristaux de glace	DU Poussière généralisée	SS Tempête de sable
VC Au voisinage	SH Averse	PL Granules de glace	SA Sable	
	TS Orage	GR Grêle		DS Tempête de poussière
	FZ Se congelant ou surfondu	GS Grésil et/ou neige roulée	HZ Brume sèche	

L'abréviation **BR** est utilisée lorsque la visibilité se trouve réduite par des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace et qu'elle est inférieure ou égale à 5 000 mètres mais supérieure ou égale à 1 000m.

L'abréviation **FG** est utilisée lorsque la visibilité se trouve réduite par des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace et qu'elle est inférieure à 1 000 mètres.

W'W' est chiffré **MIFG** lorsque la visibilité, à deux mètres au-dessus du niveau du sol, est égale ou supérieure à 1 000 mètres et que la visibilité apparente dans la couche de brouillard est inférieure à 1 000 mètres.

L'abréviation littérale **VCFG** est utilisé pour chiffrer n'importe quel type de brouillard observé au voisinage de l'aérodrome.

L'abréviation littérale **BCFG** est utilisée pour chiffrer des bancs de brouillard et l'abréviation littérale **PRFG** pour chiffrer le brouillard couvrant une partie de l'aérodrome, avec une visibilité apparente dans le banc ou le bouchon de brouillard

inférieure à 1 000 mètres, le brouillard s'étendant jusqu'au moins deux mètres au-dessus du niveau du sol.

Groupe des Nuages : $N_S N_S N_S h_S h_S h_S$

$N_S N_S N_S$: Nébulosité aéronautique de la couverture nuageuse en considération.

$h_S h_S h_S$: Hauteur de la base de la couche ou masse nuageuse de nébulosité $N_S N_S N_S$.

CAVOK : "**C**loud **A**nd **V**isibility **O**K", Mot de code pour indiquer que la visibilité horizontale est très bonne et que la couverture nuageuse n'est pas significative pour l'aéronautique.

Le terme **CAVOK** ne doit être utilisé que lorsque les conditions atmosphériques suivantes sont observées simultanément:

- a) La visibilité horizontale est supérieure ou égale à 10 km;
- b) Pas de nuages au-dessous de 1 500 m., ou au-dessous de l'altitude minimale de secteur la plus élevée, au cas où celle-ci est supérieure à 1 500 m et absence de cumulonimbus;
- c) Pas de phénomène significatif du Tableau de code W'W'.

$N_S N_S N_S h_S h_S h_S =$ **SKC** (**SK**y **C**lear ou ciel clair) s'il n'y a pas de nuages ni de restriction relative à la visibilité verticale et si l'abréviation CAVOK ne convient pas.

$N_S N_S N_S h_S h_S h_S =$ **NSC** (**N**o **S**ignificant **C**loud ou pas de nuages significatifs) s'il n'y a pas de nuages au-dessous de 1 500 m, pas de CB, aucune restriction à la visibilité verticale et si les abréviations **CAVOK** et **SKC** ne conviennent pas.

Lorsque **SKC** est indiqué et que la visibilité dominante est réduite par les phénomènes obscurcissant, la visibilité verticale ne doit pas être signalée.

Seuls les cumulonimbus (**CB**) et les cumulus bourgeonnants (**TCU**) sont signalés comme genres de nuages significatifs dans le message.

La nébulosité aéronautique $N_S N_S N_S$ se chiffre comme suit :

- | | |
|-----------------------------|---|
| • Nébulosité de 1 à 2 octas | $N_S N_S N_S =$ FEW (nuages rares) |
| • Nébulosité de 3 à 4 octas | $N_S N_S N_S =$ SCT (nuages épars) |
| • Nébulosité de 5 à 7 octas | $N_S N_S N_S =$ BKN (ciel fragmenté) |
| • Nébulosité de 8 octas | $N_S N_S N_S =$ OVC (ciel couvert). |

Lorsqu'une couche de nuages est composée de CB et de TCU se partageant la même base, seul le genre de nuage CB doit être indiqué dans le message.

La hauteur de la base des nuages $h_S h_S h_S$ est exprimée en multiple de 30 mètres (100 pieds) jusqu'à 3000 mètres (10 000 pieds) et en multiple de 300 mètres (1 000 pieds) au-dessus.

Lorsque le ciel est obscurci mais que la visibilité verticale peut encore être mesurée, le groupe **VV** $h_S h_S h_S$ est utilisé. **VV**: Indicateur littéral du groupe de visibilité verticale. Dans ce cas, $h_S h_S h_S$ indique, par échelons de 30 mètres (100 pieds) jusqu'à 600 mètres (2 000 pieds), la valeur de la visibilité verticale.

Lorsque plusieurs couches de nuages sont observées, la nébulosité et la hauteur des nuages doivent être indiquées dans l'ordre ci-après :

1. La couche la plus basse, quelle que soit sa nébulosité (FEW, SCT, BKN ou OVC)
2. La couche immédiatement au-dessus, couvrant plus de 2 octas (SCT, BKN ou OVC)
3. La couche immédiatement au-dessus, couvrant plus de 4 octas (BKN ou OVC)
4. Les cumulonimbus (CB) et/ou cumulus bourgeonnants (TCU) quelles que soient leurs nébulosités et hauteurs s'ils ont été observés et n'ont pas été signalés selon les alinéas 1 à 3 ci-dessus.

L'ordre de transmission des groupes est celui qui va des niveaux inférieurs vers les niveaux supérieurs.

Température : T'T'/T'dT'd

T'T'/T'dT'd : Groupe de la température de l'air et de la température du point de rosée, mesurées sous abri en bout de piste.

Les valeurs de température exprimées en degrés Celsius, sont arrondies à la valeur entière la plus proche. Les décimales supérieures ou égales à 0,5 sont arrondies par excès, celles inférieures à 0,5 sont arrondies par défaut.

Les températures comprises entre - 9 °C et + 9 °C sont chiffrées et précédées de 0. Par exemple + 6 °C est chiffré 06. Toutes les valeurs négatives sont précédées de la lettre majuscule **M**. Par exemple - 9 °C est chiffré M09 et - 0.5 °C est chiffré M00.

Exemples :

- ✓ Température = -0,6°C et température du point de rosée = - 8,4°C.....
T'T'/T'dT'd = M01/M08
- ✓ Température = 27,5 °C et température du point de rosée = 22,4 °C.....
T'T'/T'dT'd = 28/22

Groupe de la pression : QP_H P_H P_H P_H

Q : Indicateur littéral du groupe du QNH.

La pression **P_HP_HP_HP_H** est calculée en dixième d'hectopascal et exprimée dans le message en hectopascal (hPa) au moyen d'un nombre de quatre chiffres arrondi par défaut à l'hectopascal entier.

Exemples :

- ✓ QNH mesuré= 997,9 hPa.....QP_H P_H P_H P_H = Q0997
- ✓ QNH mesuré= 1010,1 hPa.....QP_H P_H P_H P_H = Q1010

Chapitre 2 TRAITEMENT DES DONNEES

On a utilisé **Excel VBA (Visual Basic pour Application)** pour le triage et l'arrangement des données. Et XLSTAT pour les calculs, tests d'hypothèse et l'élaboration des courbes.

Excel VBA est un langage de programmation permettant d'utiliser du code Visual Basic pour exécuter les nombreuses fonctionnalités de l'Application Excel. Un programme écrit en VBA est souvent appelé une **macro**. Les macros permettent notamment d'automatiser des tâches répétitives réalisées sous Excel.

Voici un extrait du code Visual Basic pour montrer les cas d'apparition des brouillards en 6^{ème} colonne et les brumes en 7^{ème} colonne.

```
b=InputBox("Entrez le nombre de la premiere colonne pour FG")
for x=1 to n-m-int((n-m)/2)
g=0
for y=b+6 to b+25
if cells(x,y)="FG" then
cells(x,b)="FG"
end if

if cells(x,y)="VCFG" then
cells(x,b)="VCFG"
end if

if cells(x,y)="PRFG" then
cells(x,b)="PRFG"
end if

if cells(x,y)="BCFG" then
cells(x,b)="BCFG"
end if

if cells(x,y)="MIFG" then
cells(x,b)="MIFG"
end if

if cells(x,y)="BR" then
cells(x,b+1)="BR"
end if

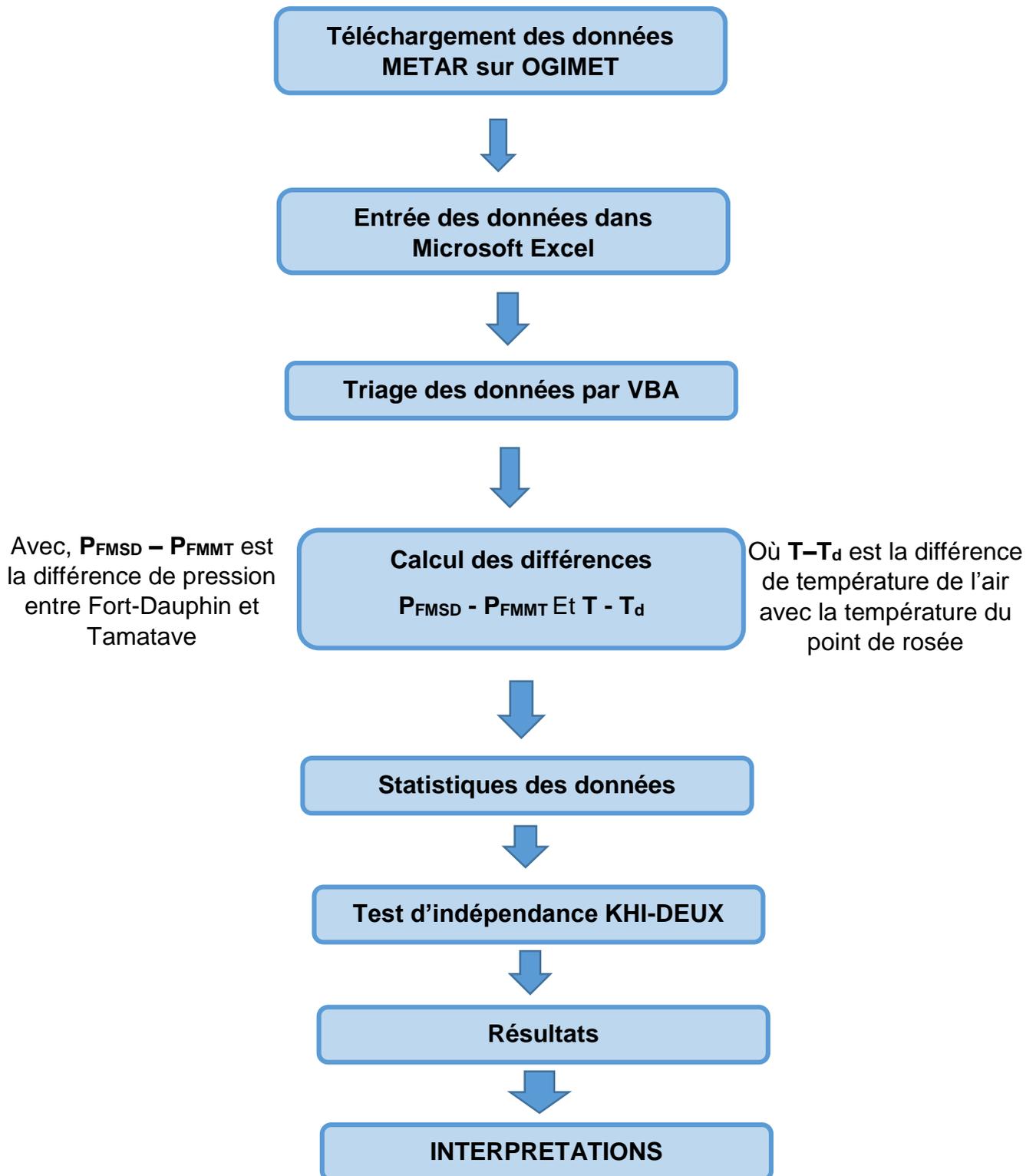
if cells(x,y)>1000 and cells(x,y)<1080 then
cells(x,b+2)=cells(x,y)
end if

if cells(x,y)>0 and cells(x,y)<50 then
cells(x,b+3+g)=cells(x,y)
g=1
end if
next y
next x
```

Tableau 2 : Exemple de données dans le Microsoft Excel après traitement sous VBA

Heures	Brouillard	Brume	Pression				
21h00			1022	METAR	FMMI	052100Z	VRB02KT
22h00			1022	METAR	FMMI	052200Z	00000KT
23h00			1022	METAR	FMMI	052300Z	VRB02KT
0h00	VCFG	BR	1021	METAR	FMMI	060000Z	08004KT
1h00	VCFG	BR	1021	METAR	FMMI	060100Z	VRB01KT
2h00		BR	1022	METAR	COR	FMMI	060200Z
3h00	FG		1022	METAR	FMMI	060300Z	05003KT
4h00		BR	1023	METAR	FMMI	060400Z	08002KT
5h00			1023	METAR	FMMI	060500Z	06004KT
6h00			1023	METAR	FMMI	060600Z	05004KT
7h00			1023	METAR	FMMI	060700Z	VRB03KT

Les démarches à suivre pour aboutir à cette finalité seront présentées par l'organigramme suivant :



Organigramme 1 : Démarche du traitement des données

PARTIE 3: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chapitre 1 RESULTATS

1.1 Occurrence de brouillard dans la station d'Ivato

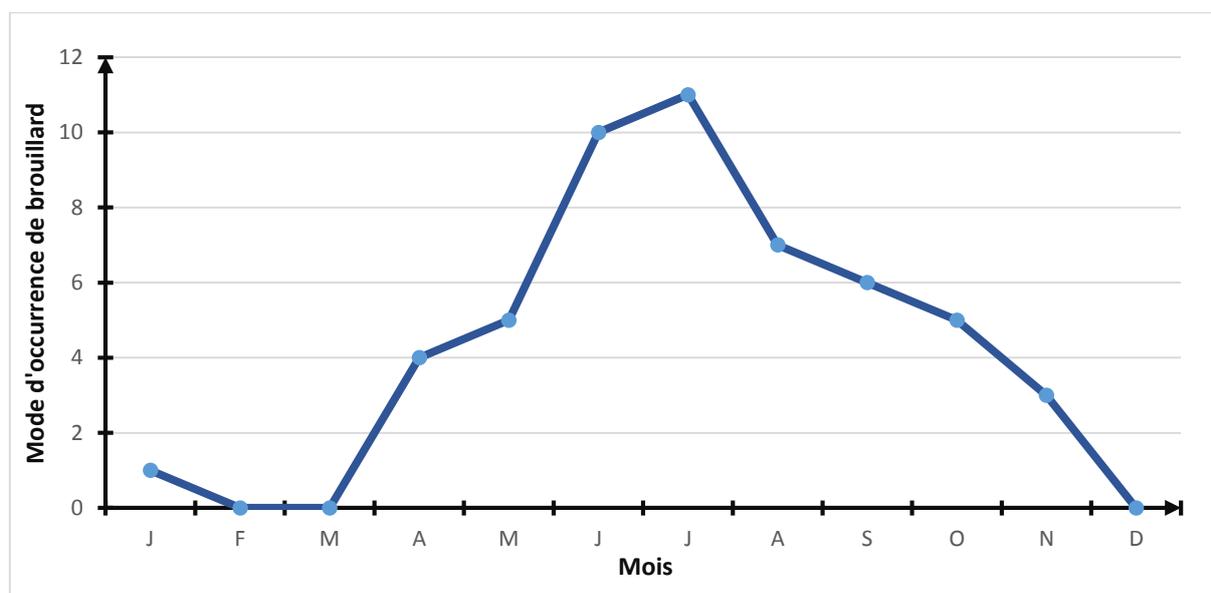
La moyenne d'occurrence de brouillard dans la station d'Ivato de 2007 à 2017 est illustrée dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 : Nombre de jours moyenne d'apparition de Brouillard de 2007 à 2017

FMMI	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
2007	0	0	2	4	3	6	4	8	1	4	7	1	40
2008	1	1	0	4	3	10	2	3	6	8	3	0	41
2009	0	5	3	5	11	9	4	7	6	5	3	3	61
2010	1	2	6	2	8	7	9	7	14	17	4	7	84
2011	1	1	0	4	6	12	11	6	4	9	8	3	65
2012	1	0	3	4	5	5	7	6	3	12	1	0	47
2013	1	0	0	0	5	8	5	9	5	5	3	1	42
2014	3	0	1	4	5	2	1	7	4	6	4	0	37
2015	0	0	1	7	4	10	11	10	2	6	2	0	53
2016	1	0	0	3	5	8	7	1	1	5	4	0	35
2017	2	0	3	1	6	9	11	1	6	3	1	0	43
Total	11	9	19	38	61	86	72	65	52	80	40	15	548
Mode	1	0	0	4	5	10	11	7	6	5	3	0	

Le nombre de jours total où on observe du brouillard entre 2007 et 2017 est de N=548 ; et on constate que le nombre de jours d'apparition de brouillard était maximal en 2010 avec N=84, et était minimal en 2016 avec N=35.

La courbe 1 suivante montre le mode de nombre d'apparition de brouillard



Courbe 1 : Mode d'occurrence mensuel de brouillard

Le mode observé dans les mois janvier, **février**, **mars**, **avril** **novembre** et **décembre** est négligeable.

Contrairement dans les mois **mai**, **juin**, **juillet**, **août**, **septembre** et **octobre**, *le mode est considérable*. C'est pendant ces mois que le refroidissement est bien marqué. D'où le brouillard est intéressant du mois **mai** en **octobre**.

1.2 Tableau de moyenne de pression à Ivato

Les pressions mensuelles d'Ivato de 2007 à 2017 sont dressées dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Tableau de moyenne de pression à Ivato

FMMI	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2007	1018	1014	1019	1021	1023	1024	1024	1024	1024	1021	1020	1018
2008	1017	1014	1019	1021	1022	1024	1025	1024	1023	1022	1019	1019
2009	1018	1018	1018	1020	1021	1024	1026	1023	1024	1022	1020	1019
2010	1018	1019	1019	1022	1022	1025	1025	1025	1023	1021	1020	1018
2011	1017	1015	1019	1020	1022	1023	1023	1025	1024	1021	1020	1018
2012	1017	1016	1020	1021	1023	1025	1024	1023	1025	1022	1021	1020
2013	1019	1018	1021	1021	1024	1023	1025	1025	1024	1023	1020	1020
2014	1019	1017	1020	1022	1023	1025	1027	1025	1025	1021	1021	1020
2015	1017	1019	1020	1021	1023	1023	1026	1026	1024	1023	1021	1020
2016	1019	1018	1020	1022	1024	1026	1025	1023	1025	1021	1021	1020
2017	1019	1019	1017	1022	1024	1024	1024	1024	1023	1021	1019	1019
Moy P _{FMMI}	1018	1017	1019	1021	1023	1024	1025	1024	1024	1022	1020	1019

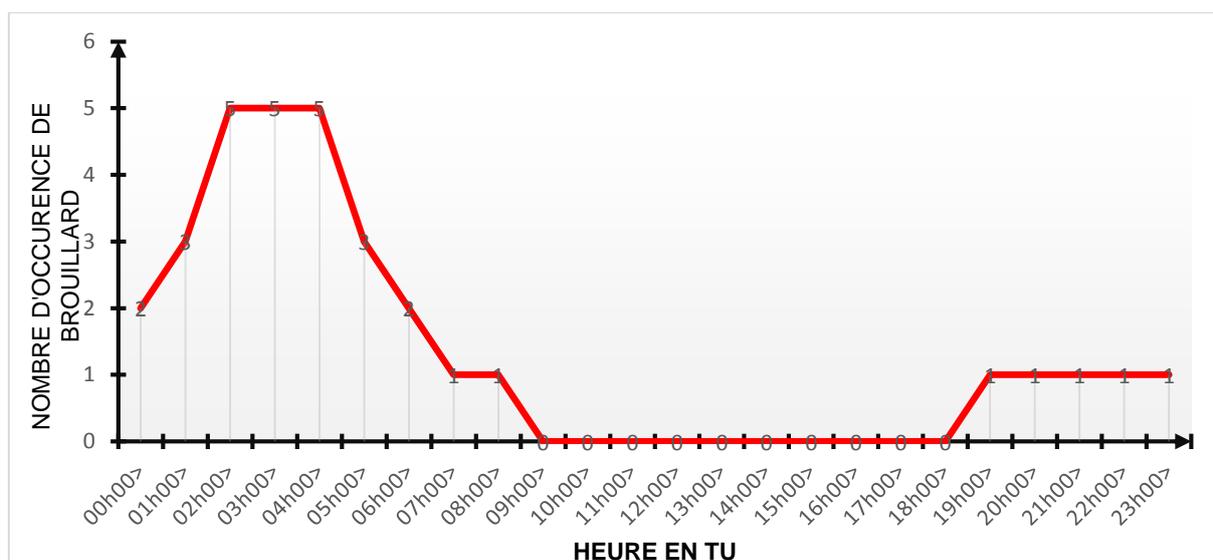
Ce tableau exprime que la pression FMMI est élevée pendant les mois **Mai**, **Juin**, **Juillet**, **Août**, **Septembre**, **Octobre**. Donc c'est la période de forte pression, il n'y a ni de forte plus ni de vent fort. D'où les brouillards se forment le plus.

1.3 Moyenne d'heures d'apparition du brouillard entre 2007 à 2017

Tableau 5 : Moyenne d'heure d'apparition de Brouillard

Heure	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
00h00>	0	0	0	0	1	1	2	5	5	4	0	0	2
01h00>	0	0	0	0	3	5	4	9	11	6	2	0	3
02h00>	0	0	0	2	5	5	5	8	13	10	4	6	5
03h00>	0	1	3	3	6	5	8	10	14	1	2	6	5
04h00>	0	1	1	2	7	5	7	6	10	13	1	3	5
05h00>	0	0	0	1	6	4	4	3	5	7	1	2	3
06h00>	0	0	0	0	6	2	2	0	1	2	1	1	2
07h00>	0	0	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	1
08h00>	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1
09h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
20h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
21h00>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
22h00>	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	1
23h00>	0	0	0	0	0	1	1	1	0	2	0	0	1

Pour mieux le cerner, la moyenne d'heure est exprimée sous forme de courbe. On peut voir en ordonnée le nombre moyenne d'occurrence de brouillard, et en abscisse l'heure de 00 :00 TU à 23 :00 TU



Courbe 2 : Moyenne d'heure d'apparition du brouillard

A partir de cette courbe, on observe que le brouillard se forme en moyenne a partir de **19 :00 TU**, donc l'intervalle d'heures d'apparition du brouillard est de **19:00 TU** jusqu'à **08 :00 TU** pendant les 11 saisons étudiées de 2007 à 2017.

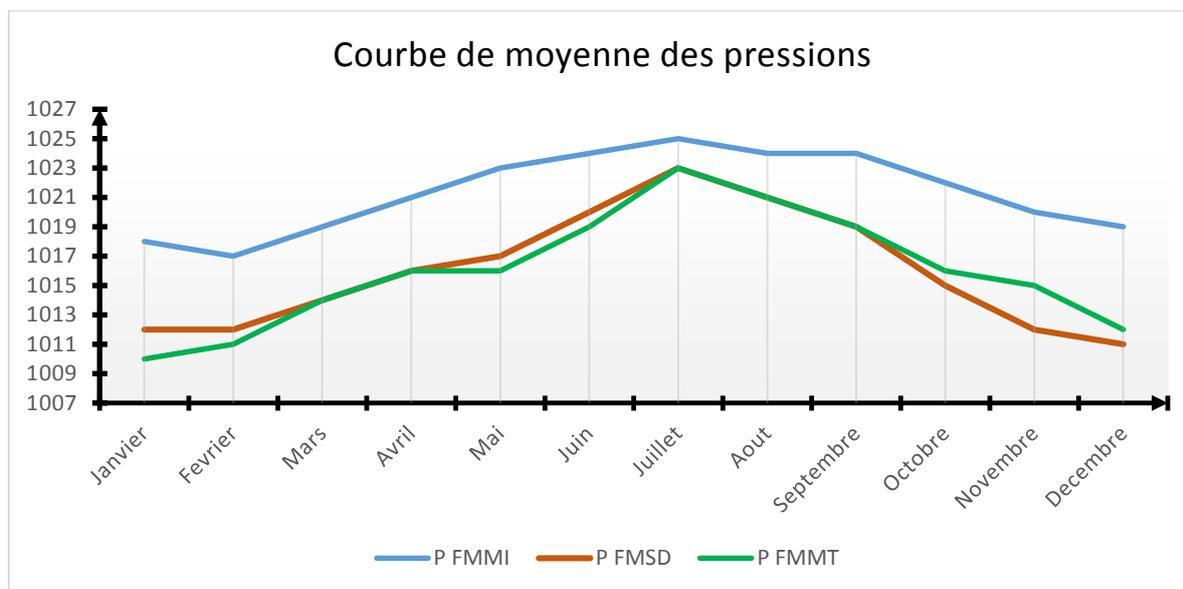
1.4 Tableau de moyenne de pression : FMMI (Ivato), FMDS (Fort-Dauphin) ; FMMT (Tamatave)

Tableau 6 : Tableau de moyenne de Pression FMMI, FMDS, FMMT

Pression	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
FMMI	1018	1017	1019	1021	1023	1024	1025	1024	1024	1022	1020	1019
FMDS	1012	1012	1014	1016	1017	1020	1023	1021	1019	1015	1012	1011
FMMT	1010	1011	1014	1016	1016	1019	1023	1021	1019	1016	1015	1012

Ensuite, nous allons transformer les données de pression en courbe (courbe 2)

- La courbe en **bleue** est la variation de la pression à **Ivato (FMMI)**
- La courbe en **rouge** est la variation de la pression à **Fort-Dauphin (FMDS)**
- La courbe en **vert** est la variation de la pression à **Tamatave (FMMT)**



Courbe 3 : Courbe des moyennes des pressions FMMI, FMMSD, FMMT

1.4.1 Test de corrélation entre les pressions FMMI, FMMSD et FMMT :

Matrice de corrélation :

Variables	FMMI	FMMSD	FMMT
FMMI	1	0,926	0,939
FMMSD	0,926	1	0,871
FMMT	0,939	0,871	1

Ainsi :

- ✚ Les pressions de ces 3 Stations ont une forte corrélation ;
- ✚ Donc, avec des valeurs positives, elles ont une relation proportionnellement forte : plus la pression FMMI augmente, plus les deux autres augmentent ; plus cette même pression diminue, les pressions FMMSD et FMMT diminuent aussi.
- ✚ La différence de pression FMMSD et FMMT a donc une influence sur les données de l’FMMI

La forme de donnée dans EXCEL est présentée dans le tableau 7 ci-dessous :

Tableau 7 : Extraite de la donnée utilisée

Heure en TU	dP	dT	ddV	FF	Nébulosité	phénomène
9	-4	12	100	6	FEW	1BR
12	-4	16	140	7	SKC	
15	-5	6	90	8	FEW	
9	-5	15	130	4	SKC	3BR
12	-3	15	90	9	SKC	
15	-3	6	60	7	FEW	
9	1	10	120	10	FEW	aucun
12	2	9	120	11	SCT	
15	2	2	90	9	FEW	
9	-2	8	110	13	SCT	3BR
12	-2	10	120	9	FEW	
15	-2	5	120	9	FEW	
9	-4	12	90	10	FEW	aucun
12	-4	12	80	9	FEW	
15	-4	4	50	6	FEW	
9	0	29	120	13	SKC	4BR
12	-1	21	140	11	FEW	
15	-2	15	120	9	FEW	
9	-2	9	110	11	FEW	2BR
12	-3	10	100	12	FEW	
15	-3	5	100	9	FEW	

Cet à partir de ce type de tableau qu'on fait les études statistiques. Il montre les observations de 9TU, 12TU, 15TU pour qu'il y a ou pas un brouillard le lendemain.

On peut voir ci-dessous le nombre d'occurrence de brouillard selon chaque valeurs des paramètres météorologiques.

Soient **Mois A** : les mois Janvier, Février, Mars, Avril, Novembre et Décembre ;

Mois B : les mois Mai, Juin, Juillet, Aout, Septembre, Octobre ;

Non : nombre et/ou pourcentage des cas où il on n'observe pas du brouillard ;

Oui : nombre et/ou pourcentage des cas ou on observe du brouillard.

Tableau 8 : Occurrence de brouillard selon la force de vent (ff)

ff	Mois A		Mois B	
	Non	Oui	Non	Oui
[0 ;3[	1	0	4	0
[3 ;9[	22	13	22	35
[9 ;15[	32	5	39	34
15<	2	0	3	0
Somme des observations	57 (76%)	18 (24%)	68 (50%)	69 (50%)

Tableau 9 : Occurrence de brouillard selon T-Td

T-Td	Mois A		Mois B	
	Non	Oui	Non	Oui
[0 ;7[	10	1	23	6
[7 ;10[	19	1	13	21
[10 ;15[	17	9	28	20
[15 ;24[	10	3	5	20
Somme des observations	56 (80%)	14 (20%)	69 (51%)	67 (49%)

Tableau 10 : Occurrence de brouillard selon direction du vent (ddd)

ddd	Mois A		Mois B	
	Non	Oui	Non	Oui
[0 ;60[	0	3	3	5
[60 ;180[	38	9	64	51
[180 ;360[	11	6	5	10
Somme des observations	49 (73%)	18 (27%)	72 (52%)	66(48%)

Tableau 11 : Occurrence de brouillard selon la différence de pression entre FMMSD et FMMT

P _{FMMSD} - P _{FMMT}	Mois A		Mois B	
	Non	Oui	Non	Oui
<-4	6	2	2	3
[-4 ; -2[	9	6	10	14
[-2 ;0[	20	8	14	28
[0 ;3[	14	1	27	20
[3 ;7[	4	3	13	3
Somme des observations	53 (52%)	20 (48%)	67 (50%)	68 (50%)

On voit que durant les mois A : le brouillard apparait sur 25% de nombre d'observation, et il n'y en a pas sur les 75% ; tandis que sur les mois B : on constate une apparition de brouillard sur 50% des observations. Ainsi nous avons les tableaux de contingence suivant : pourcentage des cas de brouillard selon l'intervalle des valeurs des paramètres météorologiques.

Tableau 12 : Répartition de nombre de cas de brouillard par intervalle de force de vent

ff vent	[0;3[	[3;9[	[9;15[	>15
Mois A	0	72	27	0
Mois B	0	51	49	0
Moyenne	0	55	45	0

Test d'indépendance (KHI²) :

Soit $\left\{ \begin{array}{l} H_0 : x \text{ et } y \text{ sont indépendants} \\ \text{contre} \\ H_1 : x \text{ et } y \text{ ne sont pas indépendants} \end{array} \right.$ au niveau $\alpha=0,05$

x : la valeur de force de vent

y : effectif de brouillard en %

Effectif théorique :

	[3;9[	[9;15[	Total
Mois A	58.936	40.064	99.000
Mois B	59.532	40.468	100.000
Moyenne	59.532	40.468	100.000
Total	178	121	299

Khi ² (Valeur observée)	11.029
Khi ² (Valeur critique)	5.991
DDL	2
p-value	0.004
alpha	0.05

Interprétation du test :

H₀ : x et y sont indépendantes.

H₁ : Il existe un lien entre les lignes et les colonnes du tableau.

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H₀, et retenir l'hypothèse alternative H₁.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H₀ alors qu'elle est vraie est inférieur à 0,40%.

⇒ Donc l'occurrence du brouillard dépend de la force du vent.

On a adopté le même test pour les tableaux suivants

Tableau 13 : Répartition de nombre de cas de brouillard par intervalle de T-Td

T-Td	[0;7[	[7;10[	[10;15[	[15;24[
Mois A	7	7	64	22
Mois B	9	31	30	30
Moyenne	9	27	36	28

Test d'indépendance :

Khi ² (Valeur observée)	32.082
Khi ² (Valeur critique)	12.592
DDL	6
p-value	< 0,0001
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : Les lignes et les colonnes du tableau sont indépendantes.

Ha : Il existe un lien entre les lignes et les colonnes du tableau.

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification alpha=0,05, on doit rejeter l'hypothèse nulle H0, et retenir l'hypothèse alternative Ha.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 0,01%.

Tableau 14 : Répartition de nombre de cas de brouillard par intervalle de ddd vent

ddd vent	[0;60[	[60;180[	[180;360[
Mois A	16	50	34
Mois B	8	77	15
Moyenne	10	72	19

Test d'indépendance :

<u>Khi² (Valeur observée)</u>	<u>18.174</u>
<u>Khi² (Valeur critique)</u>	<u>9.488</u>
<u>DDL</u>	<u>4</u>
<u>p-value</u>	<u>0.001</u>
<u>alpha</u>	<u>0.05</u>

Interprétation du test :

H0 : Les lignes et les colonnes du tableau sont indépendantes.

Ha : Il existe un lien entre les lignes et les colonnes du tableau.

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification alpha=0,05, on doit rejeter l'hypothèse nulle H0, et retenir l'hypothèse alternative Ha.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 0,11%.

Tableau 15 : Répartition de nombre de cas de brouillard par intervalle de $P_{FMSD}-P_{FMMT}$

$P_{FMSD}-P_{FMMT}$	<-4	[-4;-2[	[-2;0[	[0;3[	[3;7[
Mois A	10	30	40	5	15
Mois B	4	21	41	29	4
Moyenne	6	23	41	24	6

Test d'indépendance :

Khi ² (Valeur observée)	29.436
Khi ² (Valeur critique)	15.507
DDL	8
p-value	0.000
alpha	0.05

Interprétation du test :

H_0 : Les lignes et les colonnes du tableau sont indépendantes.

H_a : Il existe un lien entre les lignes et les colonnes du tableau.

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative H_a .

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 0,03%.

Chapitre 2 INTERPRETATION DES RESULTATS

2.1 Formation de brouillard

Il existe plusieurs situations où le brouillard prend forme.

2.1.1 Les conditions favorables à la formation de brouillard sont

- Ciel dégagé (FEW ou SCT) :
 - Cette condition optimise le refroidissement radiatif puisqu'il n'y a pas de nuage qui bloquera les radiations venant du sol
 - La probabilité qu'un brouillard se forme est grande si la nuit est longue, c'est-à-dire période de refroidissement
 - L'effet de rayonnement et la condensation de la vapeur d'eau sur le sol sous-forme de rosé ou de gelé blanche

- Vent faible (inférieur à 10kt) :
 - Un léger mouvement de l'air entraîne d'avantage d'air humide en contact directe avec la surface froide du sol. Ainsi le refroidissement est reparti plus rapidement sur une couche suffisamment épaisse.
 - Les fines gouttelettes d'eau constituant le brouillard doivent être suspendus et doivent aussi se regrouper, le vent ne doit donc être :
 - ✓ Ni trop faible : pour maintenir la suspension dans l'air
 - ✓ Ni trop fort : pour éviter la dispersion des gouttelettes d'eau

- Une forte humidité (humidité relative équivalent à 100%) :
 - Condition indispensable pour que le brouillard se forme
 - Cette forte humidité favorise la formation d'un brouillard persistante et dense

- La présence des noyaux de condensation
 - Plus il existe des noyaux de condensation nuageux, plus la phase de condensation est favorisée, donc la formation de brouillard.

- La dépression du point de rosé (T-Td doit être faible)
 - Avec T-Td faible, une surface mouillée est nécessaire donc permet la formation de brouillard avec un refroidissement moins intense

2.1.2 Les conditions défavorables à la formation de brouillard

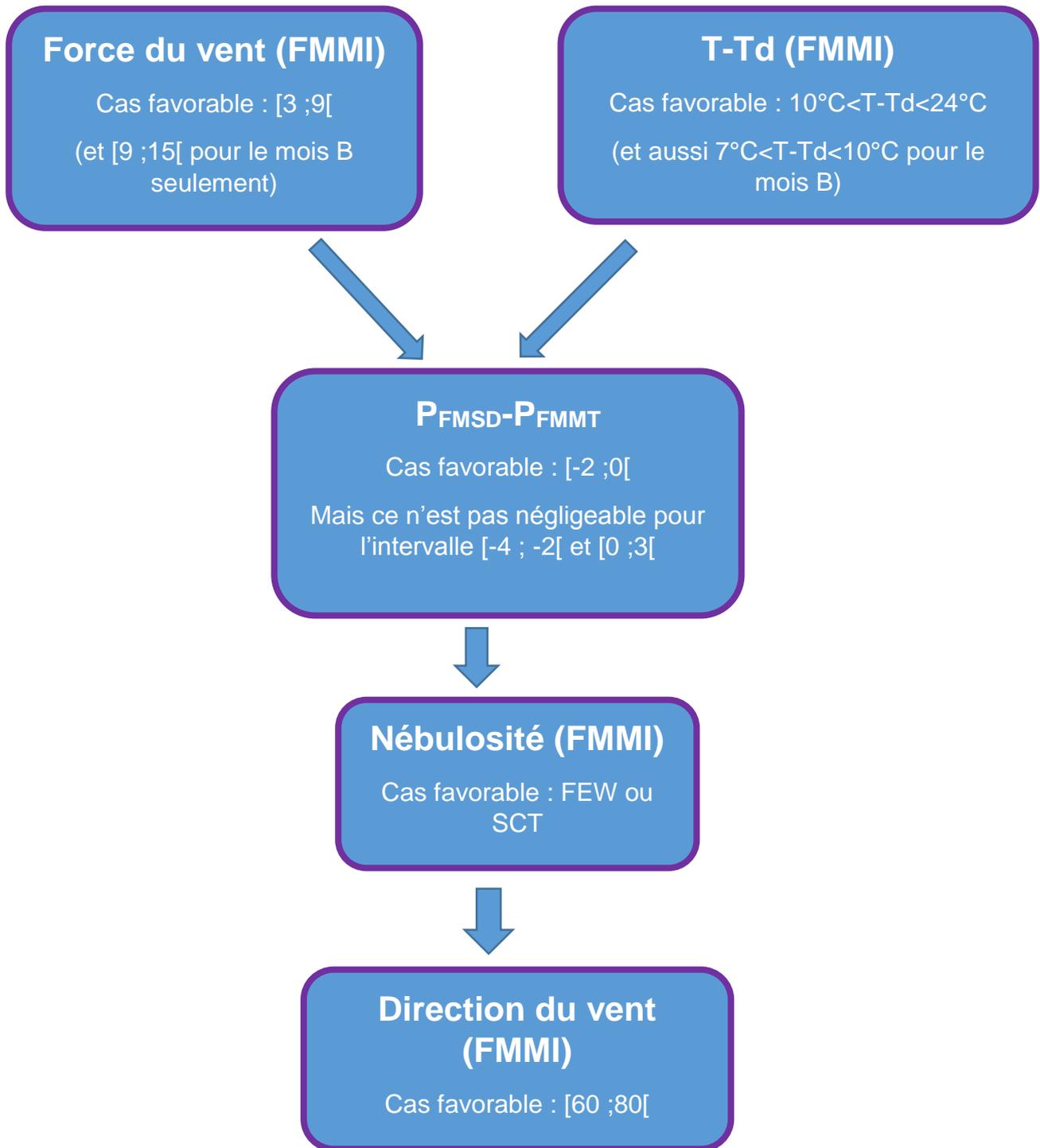
Puisqu'un refroidissement radiatif de la surface favorise la formation de brouillard, tous ce qui embrouillent ce refroidissement vont devenir des conditions défavorables

- Un ciel nuageux (BKN ou OVC) :
 - Un ciel couvert a pour effet de limiter le refroidissement
- Un vent fort (supérieur à 10kt) :
 - Avec des vents forts, le mélange de l'air humide près de la surface et de l'air plus sec au-dessus va diffuser la vapeur d'eau à disposition :
 - ✓ Ce qui pourra alors faire monter le brouillard pour former des stratus
 - ✓ L'absence de vent sur les quelques mètres à partir de la surface va permettre le dépôt de rosé ou de gelé blanche mais non la formation de brouillard
- Une forte dépression du point de rosé (T-T_d élevée) :
 - Une importante dépression du point de rosé ne permet pas aussi que le brouillard (surtout le brouillard de rayonnement) se forme ou se développe car elle ne permet pas un refroidissement marqué.

2.2 Résumé de la condition de formation de brouillard

Nombreux sont les processus pour la formation du brouillard :

- La période est plus favorable en mois de MAI, JUIN, JUILLET, AOUT, SEPTEMBRE et OCTOBRE mais il peut y en avoir des exceptions sur les restes du mois
- Les heures d'apparition sont en moyenne entre 20 TU et 07 TU
- La différence de pression entre Fort-Dauphin et Tamatave suit des intervalles bien défini :
 - ⇒ Si $-5 \leq dP \leq -1$, la probabilité d'apparition de brouillard est de 66,17%
 - ⇒ Si $0 \leq dP \leq 2$, la probabilité d'apparition de brouillard est de 27,94%
 - ⇒ Si $3 \leq dP \leq 6$, la probabilité d'apparition de brouillard est de 5,88%
- La différence de température : $T - T_d$ suit les intervalles suivants :
 - ⇒ Si $1^\circ \leq T - T_d \leq 6^\circ$, la probabilité d'apparition de brouillard est de 12,16%
 - ⇒ Si $7^\circ \leq T - T_d \leq 15^\circ$, la probabilité d'apparition de brouillard est de 63,51%
 - ⇒ Si $16^\circ \leq T - T_d \leq 24^\circ$, la probabilité d'apparition de brouillard est de 24,32%
- La force de vent ff
 - ⇒ Si $ff < 10kt$, la probabilité d'apparition de brouillard est de 75,34%
 - ⇒ Si $ff > 10kt$, la probabilité d'apparition de brouillard est de 24,66%
- La nébulosité :
 - ⇒ Si FEW ou SCT : la probabilité est de 75%
 - ⇒ Si FEW ou SCT est combiné par BKN : la probabilité est de 25%
 - ⇒ Si OVC : la probabilité est de 0%



Organigramme 2 : Les conditions favorables pour la formation de brouillard selon l'ordre de priorité des paramètres météorologiques

CONCLUSION

Les hydrométéores, brouillard et brume humide sont des phénomènes météorologiques dans lesquels l'humidité est environ 100%, résultant de la condensation de la vapeur d'eau dans l'air. Il est en suspension à la proximité du sol donc réduit la visibilité.

Toutefois, la détermination précise en temps et en lieux d'un phénomène comme le brouillard n'est pas une tâche facile. Par condition de visibilité réduite, le brouillard est particulièrement dangereux. Il est responsable de nombreux accidents dans le domaine aéronautique. Ainsi, des études sont incitées pour l'amélioration de la prévision de ce phénomène.

La teste d'hypothèse sur XLSTAT montre qu'il existe un lien entre les valeurs des paramètres météorologiques et l'occurrence de brouillard. La nébulosité totale avant la formation du brouillard constitue un premier élément qui influence cette formation ; elle dépende aussi par l'humidité initiale de la masse d'air ; le vent, le résultat de la pression entre deux zones voisines (Fort-Dauphin et Tamatave pour le vent d'Ivato). Ce vent provoque le déplacement des masses d'air et consiste à repartir verticalement le refroidissement de l'atmosphère par turbulence.

De ce fait, il est assez rare qu'un brouillard soit formé par un seul de ces processus. Si les conditions de formation sont assez connues, elles permettent une bonne prévision. Mais l'étude détaillée des divers processus de formation permet souvent de marquer la limite à partir de laquelle les processus cesseront d'intervenir. Seulement, l'expérience locale acquise sur le site est à cet égard très précieuse.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. RANDRIAMANGA, "Climat de Tolagnaro(ex-Fort Dauphin).pdf," p. 21, 1985.
- [2] *METEOROLOGIE AERONAUTIQUE.* .
- [3] RATOMPONANDRIANINA Hasimbola lavosoa, *ETUDE DES EFFETS DE LA PRESENCE DU BROUILLARD ET CONTRIBUTION A LA PREVISION AVEC LE MODELE WRF-ARW.* Antananarivo, 2015.
- [4] RAZAFIELSON Durand Thènes, *ETUDE DES INFLUENCES DE PARAMETRES METEOROLOGIQUES SUR LA CONSOMMATION DES AERONEFS DANS LES ESPACES RVSM ET NON-RVSM: CAS DE MADAGASCAR.* Antananarivo, 2009.
- [5] D. Pollack, *Cours de météorologie – ENPC.* 2013.
- [6] I. X. Ext and I. X. Ext, "METAR et SPECI," pp. 1–30, 2017.

WEBOGRAPHIE

www.deule-climat.net/cours_brouillard.htm

www.ogimet.com/metars.phtml.en

www.climat-tamatave.net/tamatave_weather.htm

TABLE DE MATIERES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	II
LISTE DES ABREVIATIONS	III
LISTE DES FIGURES ET PHOTOS	IV
LISTE D'ORGANIGRAMME	V
LISTE DES TABLEAUX	VI
LISTE DES COURBES	VII
INTRODUCTION	1
PARTIE 1: CONTEXTE GENERAL	2
Chapitre 1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMAT DES ZONES D'ÉTUDE	3
1.1 Généralité sur le climat de Madagascar.....	3
1.2 Antananarivo (Ivato)	4
1.2.1 Délimitation administrative.....	4
1.2.2 Délimitation de la zone d'étude	4
1.2.3 Climat d'Antananarivo (Ivato)	5
1.3 Fort-Dauphin (ou Taolagnaro) [1]	5
1.3.1 Situations géographiques	5
1.3.2 Généralité sur le climat de Fort-Dauphin	5
1.4 Tamatave	5
1.4.1 Situation géographique	6
1.4.2 Généralité sur le climat de Tamatave.....	6
Chapitre 2 GENERALITES SUR LE BROUILLARD	7
2.1 Définitions [2].....	7
2.2 Les différents types de brouillard [2], [3].....	7
2.2.1 Le brouillard d'évaporation	7
2.2.2 Le brouillard de mélange.....	8
2.2.3 Brouillard de pente.....	8
2.2.4 Brouillard d'advection	9
2.2.5 Brouillard de rayonnement	10
2.3 Les dangers du brouillard :.....	10
2.4 LES PARAMÈTRES DESCRIPTIFS DU BROUILLARD.....	11
2.4.1 LA TEMPÉRATURE [4]	11
2.4.1.1 La température de l'air	11
2.4.1.2 Humidité relative de l'air	12
2.4.1.3 La température du point de rosée, Td	12
2.4.2 LA PRESSION ATMOSPHERIQUE	12
2.4.2.1 L'origine de la pression atmosphérique.....	12
2.4.3 LE VENT.....	14
2.4.3.1 Direction et force du vent.....	14
2.4.3.2 La connaissance du vent en aéronautique :.....	15
2.4.4 LES NUAGES [4].....	15
PARTIE 2: METHODOLOGIE ET DONNEE D'ENTREE	17
Chapitre 1 METAR ET SPECI	18
1.1 METAR [5]	18

1.1.1	Généralités :	18
Chapitre 2	TRAITEMENT DES DONNEES.....	25
PARTIE 3:	RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	27
Chapitre 1	RESULTATS.....	28
1.1	Occurrence de brouillard dans la station d'Ivato	28
1.2	Tableau de moyenne de pression à Ivato	29
1.3	Moyenne d'heures d'apparition du brouillard entre 2007 à 2017	30
1.4	Tableau de moyenne de pression : FMMI (Ivato), FMDS (Fort-Dauphin) ; FMMT (Tamatave.....	31
1.4.1	Test de corrélation entre les pressions FMMI, FMDS et FMMT :	32
Chapitre 2	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	38
2.1	Formation de brouillard	38
2.1.1	Les conditions favorables à la formation de brouillard sont	38
2.1.2	Les conditions défavorables à la formation de brouillard	39
2.2	Résumé de la condition de formation de brouillard	39
CONCLUSION	.....	41
BIBLIOGRAPHIE	.....	A
WEBOGRAPHIE	.....	B
TABLE DE MATIERES	.....	C

Titre : « CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'OCCURRENCE DE BROUILLARD SUR L'AERODROME D'IVATO »

Nombre de page : 41

Nombre de figure : 8

Nombre de photo : 1

Nombre de tableau : 15

RESUME :

Le brouillard est un phénomène silencieux et dangereux qui peut mettre en péril la vie de l'homme moderne. En effet, lorsque la visibilité s'abaisse de manière importante, toute circulation (routière, aérienne, maritime...) peut devenir dangereuse si des précautions ne sont pas prises. Le brouillard n'est pas facile à prévoir. Pour le cas d'Ivato, il est intéressant de faire des études sur les conditions d'apparition de ce phénomène. Dans cet ouvrage, il a été prouvé que la force et la direction de vent, la nébulosité, la différence de température et la température du point de rosé sur les lieux et la différence de pression entre Fort-Dauphin et Tamatave sont des paramètres clés à la formation de brouillard à Ivato. Cette étude contribue à la prévision de brouillard.

Mots-clés : Brouillard, vent, nébulosité, différence de pression Fort-Dauphin et Tamatave, différence entre température et température du point de rosé, prévision

ABSTRACT

Fogs are a quiet and dangerous phenomenon which may disrupt the daily life of modern human. As a matter of fact, if the visibility decreases, every traffic (road, maritime, aerial...) could become dangerous unless we take some precautions. Fogs are difficult to expect. As far as the case of Ivato is concerned, it is interesting to make some studies about the conditions of its appearance. This work shows that the strength and wind's direction, nebulosity, the temperature's difference between local temperature and dew's temperature, the pressure's difference between Fort-Dauphin and Tamatave influence the formation of fog at Ivato. This study contributes to fog forecast.

Keywords: Fog, wind, nebulosity, pressure's difference between Fort-Dauphin and Tamatave, temperature's difference between local temperature and dew's temperature, forecast

Directeur de Mémoire : Monsieur RAKOTOARINOSY Andrianiaina Tahina, Enseignant Chercheur du Département Météorologie.

Auteur :

RAMIANDRISOA Solohaingotiana
Lot II A 119 RP Soavimbahoaka Nanisana
034 28 491 94
ramiandrisoahaingotiana@gmail.com

