

CHAPITRE –VI- L’HUMIDITE

I- QUELQUES APPROCHES DE DEFINITION DES TERMES UTILISES LIES AU TITRE

1°) LA FUSION : c’est le passage d’un corps de l’état solide à l’état liquide , sous l’action de la chaleur .Sous une pression donnée , la température reste constante pendant toute la durée de la fusion d’un corps pur .

2°) sublimation : c’est le passage d’un corps de l’état liquide à l’état gazeux , toujours sous l’effet de la chaleur , la température reste constante , ainsi que la pression .

3°) vaporisation : c’est le passage d’un corps de l’état liquide à l’état gazeux , dispersion en gouttelettes fines sous l’action de la chaleur , la température reste constante . La pression diminue et reste constante .

4°) liquéfaction : c’est le passage d’un corps de l’état gazeux à l’état liquide .

5°) condensation : c’est le passage d’un gaz à l’état liquide par refroidissement ou par compression ; diminution donc de la température et augmentation de la pression .

6°) solidification : c’est le passage d’un corps de l’état liquide à l’état solide .

7°) saturation : état liquide , d’un gaz qui est saturé , état pleinement rassasié. Saturé : se dit d’une solution qui ne peut dissoudre une quantité supplémentaire de substance dissoute. Saturer : amener une solution à contenir la plus grande quantité possible du corps dissout .

8°) humidité : état de qui est humide . **L’humidité absolue** c’est le nombre de grammes de vapeur d’eau contenue dans un mètre cube d’air. **L’humidité relative** est le rapport de la pression effective de la vapeur d’eau à la vapeur maximale. **L’hygromètre** est l’appareil qui mesure l’humidité de l’air .Dans l’hygromètre à cheveux ceux-ci raccourcissent par la sécheresse , s’allongent par l’humidité , ce qui déplace une aiguille devant un cadran gradué . Humide se dit d’un corps chargé d’eau ou de vapeur d’eau . **L’hygroscope** est l’appareil mettant en évidence de façon qualitative les variations de l’état hygrométrique de l’air . **Hygroscopique** : se dit d’un corps qui a tendance à absorber l’humidité de l’air . **Hygrostat** : c’est l’appareil maintenant constant l’état hygrométrique de l’air ou d’un gaz . **Hygrométrie ou hygroscopie** : science qui a pour but de déterminer l’humidité de l’atmosphère .

9°) humidificateur : appareil servant à maintenir un degré hygrométrique donné en un lieu déterminé .l’ Humidimètre est l’appareil de mesure de l’humidité d’un matériau .

10°) évaporation : transformation sans ébullition d’un liquide en vapeur par sa surface . L’évaporateur est un appareil chauffé à la vapeur et servant à distiller l’eau de mer .

11°) psychromètre : appareil servant à déterminer l’état hygrométrique de l’air .

II-PHENOMENES ET ETATS LIES A L'HUMIDITE DE L'AIR (donc de la vapeur d'eau dans l'air)

1°) LES DIFFERENTS ETATS DE L'EAU DANS L'ATMOSPHERE .

L'eau existe dans l'atmosphère sous trois (3) états .

- à l'état solide elle prend la forme de :
 - la glace
 - la neige
 - la grêle (grêlons , grelots)
- à l'état liquide , elle crée :
 - les gouttes de pluie ou bien
 - les minuscules gouttelettes qui forment les nuages et les brouillards
- à l'état gazeux , elle forme :
 - la vapeur d'eau qui existe toujours en une certaine quantité dans l'atmosphère.

L'atmosphère est donc , un mélange d'air sec et de vapeur d'eau . La vapeur d'eau est l'un des états possibles de l'eau dans l'atmosphère . Les trois (3) états principaux de l'eau dans l'atmosphère sont donc :

- le gaz : c'est la vapeur d'eau , elle nécessite 80 cal/gr pour la fusion .
- liquide : l'eau nécessite 538cal/gr pour vaporisation .
- solide : glace nécessite 1cal/gr = 417,5 j/Kg/°K pour la solidification .

Pour passer de l'un à l'autre soit qu'on absorbe de la chaleur : fusion →vaporisation →sublimation

Soit qu'on libère de la chaleur : solidification →liquéfaction →condensation.

2°) TENSION DE VAPEUR

Comme tous les gaz , la vapeur d'eau possède une force élastique ou « tension de vapeur » . A une température T donnée dans un volume V d'air humide (mélange gazeux d'air sec et de vapeur d'eau , la vapeur d'eau a une pression partielle , appelée tension de vapeur e (exprimée en mb)

L'expérience montre et on constate qu'à toute température correspond une limite au contenu de vapeur. Cette tension de vapeur ne peut dépasser cette limite appelée tension maxima . C'est la pression maximale qui peut être atteinte ou encore tension maximale e_w .

3°) LA SATURATION

Si e_w est atteint , il y a équilibre entre phase gazeuse et liquide , il n'y a plus d'évaporation possible. Cette limite s'accroît avec la température et lorsqu'elle est atteinte (limite) , on dit que l'air est « saturé », c'est la saturation .

De même il peut y avoir équilibre entre phase gazeuse et solide. E_w ne dépend que de la température ; plus la température est élevée , plus e_w est élevée .

E_w est une fonction croissante de t donc $e_w = f(t)$

Pour les températures négatives , on a une tension de vapeur saturante e_i par rapport à la glace .

4°) L'HUMIDITE RELATIVE

L' « humidité relative » , est par, définition , le pourcentage , à une température donnée , de la valeur actuelle de la tension de vapeur d'eau , comparée à la tension maxima de la vapeur d'eau à cette même température .

$H_{rel} = 100 \times (e/e_w)$. e : pourcentage partielle de la vapeur d'eau dans l'air .

e_w : pourcentage maximal de la vapeur d'eau .

e et e_w sont à la même température .

l'humidité relative permet d'estimer la proximité ou non de la saturation . En météorologie , pour tenir compte des variations de pression de l'air , on compare le taux de mélange actuel m c'est-à-dire le nombre de grammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec , avec le taux de mélange saturé M .

$H_{rel} = (m/M) \times 100$ = (volume d'air humide actuel / volume d'air saturé) $\times 100$

Ainsi , on exprime la richesse de l'air en vapeur d'eau par un rapport quantitatif de masses .

5°) LE POINT DE ROSEE

La température à laquelle , il faut refroidir une masse d'air pour que ($e=e_w$) , e soit égale à e_w ou encore $m=M$ s'appelle le « point de rosée » . C'est la température à partir de laquelle l'humidité relative étant égale à 100 , l'air est saturé. Les éléments , permettant de calculer l'humidité relative et le point de rosée sont fournis par le psychromètre . En d'autres termes c'est la température à laquelle l'air humide arrive à saturation par un refroidissement à pression constante . En refroidissant au-delà du « point de rosée » , il y a condensation . Lorsqu'on effectue une observation , on exprime l'humidité de l'air par la valeur du point de rosée en passant par la température du thermomètre mouillé.

6°) LE RAPPORT DE MELANGE

Le rapport de mélange $r = (m_{\text{vap}}/m_{\text{sec}})$ est le rapport de la masse de vapeur à la masse d'air sec contenu dans un volume d'air humide. On l'exprime en g/Kg. Comme pour la tension de vapeur, il existe un rapport de mélange saturante r_w .

7°) L'HUMIDITE SPECIFIQUE

C'est la masse de vapeur d'eau par kg d'air humide.

III-LES TRANSFORMATIONS DES PARTICULES D'AIR DANS L'ATMOSPHERE

1°) EVAPORATION ET CONDENSATION

Plus la température de l'air est élevée, plus grande est la tendance de l'eau liquide à se transformer en vapeur c'est-à-dire à s'évaporer. Au contraire, plus la température de l'air diminue, plus la vapeur d'eau a tendance à revenir à l'état liquide, c'est-à-dire à se condenser. Ces deux phénomènes : évaporation et condensation, sont essentiels en météorologie.

- **L'évaporation productrice de vapeur d'eau**, a lieu en grande partie sur les océans et le reste des fleuves, les lacs ou le sol humide et par transpiration des plantes. La chaleur nécessaire à cette transformation est prise en grande partie au liquide qui se refroidit, et conservée par la vapeur d'eau, sous forme de « chaleur latente » de vaporisation qui représente une source d'énergie considérable disponible dans l'atmosphère.
- **La condensation, créatrice des nuages, du brouillard et des précipitations**, se produit lorsqu'une masse d'air se refroidit en dessous de son « point de rosée ». Ce phénomène, pour se déclencher, exige la présence de « noyaux de condensation » formés par les impuretés de l'atmosphère. Il libère une quantité de chaleur égale à la chaleur latente de vaporisation.

2°) LES MOUVEMENTS VERTICAUX

Lorsqu'une masse d'air rencontre une montagne, ou se réchauffe par la base, il se produit des courants verticaux. Il est nécessaire, pour expliquer de nombreux phénomènes météorologiques, d'étudier le comportement d'une particule d'air lorsqu'elle s'élève ou s'abaisse dans l'atmosphère. Nous supposons, en première approximation, qu'elle se déplace de façon adiabatique c'est-à-dire sans échanges de chaleur avec les particules environnantes. Cela a lieu d'ailleurs dans la plupart des cas de mouvements atmosphériques verticaux.

● PREMIER CAS : LA PARTICULE D'AIR EST NON SATURÉ .

La particule d'air non saturé, en s'élevant, se détend, donc elle se refroidit. En descendant elle est comprimée donc elle se réchauffe. Cette variation ou gradient vertical de température, est voisine de 1°C par 100 mètres d'altitude.

● DEUXIEME CAS : LA PARTICULE D'AIR EST SATURÉ .

En s'élevant la particule d'air saturé, se refroidit par détente, la température de son « point de condensation » diminue et l'excédent de vapeur d'eau se condense.

Cette condensation libère une certaine quantité de chaleur qui est absorbée par la particule ; la variation de température avec l'altitude sera moindre que dans le premier cas. Elle sera en moyenne de 0,6°C par 100 mètres d'altitude : elle ne sera pas constante, car, plus la particule

d'air saturé s'élève en altitude plus sa teneur en vapeur d'eau diminue, et plus la chaleur libérée est négligeable.

IV- LES PROCESSUS DE CONDENSATION

1°) LES GENERALITES ET LES CAS D'EXCEPTION

La saturation est la condition nécessaire au déclenchement d'une condensation ; mais toutefois deux (2) états d' « exception » dits métastables existent :

- a) ● **LA SURSATURATION** : il est assez fréquent dans les hautes couches, que la température soit au-dessus du point de rosée sans qu'on observe une condensation. La raison est l'absence ou l'insuffisance de noyaux de fixation.
- b) ● **LA SURFUSION**
Propriétés des gouttelettes d'eau de rester liquides à des températures inférieures à 0°C. Ce phénomène est assez courant dans les nuages entre 0°C et -18°C.

La saturation des particules d'air humide est entraînée par les transformations suivantes :

- c) soit que le rapport r de mélange atteint la valeur du rapport saturant r_w par augmentation de la quantité de vapeur d'eau contenue dans la particule.

$$R = m \text{ vap d'eau} / m \text{ vap d'air sec}$$

- c) Soit que le rapport r_w de mélange saturant nécessaire à la saturation diminue sans que le rapport r de mélange change.

2°) SATURATION ET CONDENSATION PAR REFROIDISSEMENT A PRESSION CONSTANTE .

Lorsque la température s'abaisse jusqu'au point de rosée il y a saturation et $r=r_w$, si la température continue de s'abaisser encore cela se fait moins vite (avec un dégagement de chaleur latente). La vapeur d'eau excédentaire se condense et pour chaque kilogramme d'air sec, il y a condensation de $(r-r_w)$ grammes d'eau.

A) BRUME ET BROUILLARD DE RAYONNEMENT

Lorsque le ciel est clair et en l'absence de rayonnement solaire suffisant la nuit en particulier où il y a déficit radiatif du sol, la température s'abaisse et peut rejoindre le point de rosée. Ceci sur terre. En l'absence totale du vent c'est la rosée. Si le vent est très faible, le refroidissement communiqué aux très basses couches entraîne brume ou brouillard (visibilité horizontale inférieure à 1 kilomètre), selon la teneur en eau condensée (de l'ordre de 0,5gr/Kg d'air sec). Ainsi le brouillard de rayonnement se produit pendant les nuits claires, lorsque le sol, perdant sa chaleur par rayonnement, refroidit par contact la couche d'air adjacente. Il est surtout fréquent en automne et en hivers (nuits plus longues, humidité plus fortes), aux latitudes hautes et moyennes et plus rare sous les tropiques. Son épaisseur varie, en moyenne, de 20 à 200 mètres, et dépasse rarement 350 mètres. Son développement en altitude est favorisé par une faible brise, provoquant une turbulence légère. Le brouillard de rayonnement est surtout dense au lever du jour. Il se dissipe ensuite sous l'influence des rayons solaires qui réchauffent la surface terrestre, sauf lorsque le pouvoir calorifique est insuffisant (hiver). La dissipation du brouillard de rayonnement peut être provoquée aussi par le vent.

En terrain accidenté , le brouillard de rayonnement occupe surtout les cuvettes et les vallées dans lesquelles l'air froid , plus lourd , s'écoule par pesanteur . Les brouillards de rayonnement , qui se forment dans les régions côtières , dérivent parfois sur les eaux voisines , les eaux étroites en particulier (Pas de Calais). Ils sont également fréquents au – dessus des ports entourés de collines boisées , ou près d'une zone industrielle . Les aires anticycloniques sur les continents et les dorsales d'air froid qui suivent une dépression , sont favorables à la formation des brouillards de rayonnement .

B) LE BROUILLARD D'ADVECTION

Lorsque la masse d'air chaud et humide arrive au contact d'une surface relativement froide , l'air à ce contact , subit un refroidissement qui se propage dans les basses couches r devient égale à r_w et il y a condensation . Les brouillards d'advection sont fréquents sur mer , même par grand vent . Exemples :

- masses d'air tropical maritime T_m se déplaçant sur mer vers les régions plus au Nord où la température est plus froide .
- masses d'air restées au contact de courants marins chauds et qui s'en échappent ou rencontrent un courant froid . (Gulf Stream et le courant froid du Labrador).
- brouillards côtiers lorsqu'il existe une différence importante de température entre le continent et la mer et que le vent souffle de la surface chaude (terre) vers la surface froide (mer) .
- Le phénomène des brouillards côtiers est accentué lorsque les vents de terre chassent les eaux de surface vers le large remplacées par l'eau plus froide (upwelling).

Ainsi le brouillard d'advection est le type de brouillard le plus fréquent en mer dans les 4/5 des cas . il se produit dans les courants d'air relativement chauds et humides qui se déplacent au dessus de la mer plus froide . Sa formation est favorisée par l'existence d'une grande différence positive entre la température de l'air et celle de la mer . Les brouillards d'advection se produisent en particulier :

↳ sur les cotes où vents chauds , soufflant de terre , tendent à provoquer la dérive des eaux de surface et leur remplacement par des eaux profondes , plus froides (par exemples : cotes occidentales soumises aux alizés, Maroc, Californie, Chili).

↳ Sur les cotes où des vents soufflant de la mer , et transportant un air chaud et humide , rencontrent des eaux plus froides ; le brouillard ainsi formé , peut se dissiper , le jour , au – dessus des terres voisines réchauffées par l'insolation diurne , et s'y propager, la nuit , lorsqu'elles se refroidissent (par exemple : courants du sud-ouest , en provenance de la région des Açores , abordant la Grande Bretagne , au printemps et au début de l'été).

↳ Au large , quand l'air ayant séjourné au-dessus d'une surface chaude , se déplace au-dessus d'une surface froide. Par exemple , lorsque des vents du Sud , ou du Sud-ouest , poussent vers le courant froid du Labrador l'air qui a séjourné au-dessus des eaux tièdes du Gulf –Stream , provoquant ainsi les brumes qui règnent dans la région de Terre- Neuve.(un jour sur deux pendant les mois d'été). Les mêmes conditions se présentent dans la zone des Aléoutiennes , quand l'air chaud venant du Sud se refroidit au contact des courants boréaux du Pacifique.

Les brouillards d'advection sont sin épais que parfois , la pomme des mats d'un navire émerge à leur sommet ; mais en général leur épaisseur est de l'ordre de 500 mètres. Voir les

figures annexées au présent cours , certaines donnent la fréquence des brouillards d'advection en été.

C) LES BROUILLARDS D'ÉVAPORATION

Au contact air-eau ,il y a toujours évaporation si l'air n'est pas saturé. A l'inverse de l'advection si l'air froid humide s'écoule au-dessus d'une masse chaude , le refroidissement au sein de cette évaporation peut amener une condensation c'est le cas typique des régions polaires où l'air froid après un long trajet sur la surface glacée, arrive sur la mer .

Les brouillards et brume d'évaporation ne sont pas dus à la condensation de la vapeur d'eau d'une masse d'air. La brume d'évaporation se forme lorsqu'un vent très froid passe au-dessus d'une mer relativement chaude. La mer s'évapore et forme des « fumées arctiques » que l'on rencontre dans les mers polaires et fjords et en hiver en Manche et en Mer du Nord. La brume sèche est due aux poussières des régions désertiques transportées à grandes distances par les courants aériens .

D) BROUILLARDS DE MÉLANGE

Le système de mélange apparaît dans tous les processus précédents ; mais le mélange pur assez rare se produit par turbulence , brassage entre deux masses d'air de températures assez voisines , très proches de la saturation , les limites frontales en particulier .

Dans la formation du brouillard de mélange , le refroidissement de la masse d'air chaud , humide et stable , est obtenu par mélange avec une autre masse d'air humide , mais nettement plus froide . Ce type de brouillard se voit à la rencontre des masses d'air chaud et froid c'est-à-dire sur les fronts .

3°) SATURATION ET CONDENSATION PAR DÉTENTE

Lorsqu'une particule d'air humide est soulevée ,elle subit une détente donc un abaissement de température sans que sa teneur d'origine en vapeur d'eau change .

Au départ nous avons la température , le rapport de mélange r , le rapport de mélange saturant r_w

. Si la température baisse le rapport de mélange saturant r_w s'abaisse sans que r change donc r_w rejoint r donc de la saturation on atteint le point de condensation . si la détente continue , il y a condensation d'une quantité de vapeur d'eau $r - r_w$ (avec une petite chaleur latente appelée chaleur latente de condensation .

Considérons par exemple l'ensemble de particules qui constituent une masse d'air . Chaque masse d'air se différencie par sa température, son humidité, (il faut entendre par masse d'air au sens de la circulation générale) . Ces masses d'air entrent en contact suivant des zones de transition souvent étroites qu'on appelle surfaces de discontinuité. Le long de ces surfaces l'air le plus chaud, aussi le plus humide , le moins dense subit un lent soulèvement qui entraîne des phénomènes de condensation à grandes échelles .

- les ascendances synoptiques lentes mais de grande étendue engendrent des nuages de grande extension horizontale à des altitudes variées .
- Les ascendances locales au sein d'une masse d'air déclenchent des formations nuageuses isolées dont base se trouve au niveau de condensation .(voir figure sur la convection) .

• **Les ascendances forcées sur une pente montagneuse** sont la représentation typique d'une condensation. (voir figure effet de FOEHN).

Ces condensations donnent les nuages qui sont formés de fines gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace maintenus dans les ascendances . Bien que nombreuses , ces gouttelettes ne constituent qu'une faible partie de l'air nuageux . Certains s'évaporent , d'autres grossissent et tombent par leur poids . il y a une constante évolution de l'état de ces gouttelettes d'eau .

Ce phénomène est accéléré dans le cas des nuages à grand développement vertical (cumulonimbus) . Il faut souligner que dans la machine thermique les mouvements verticaux sont très rapides .

Certains facteurs agissent sur la tension de vapeur d'eau saturante .Les fines gouttelettes d'eau sont des solutions chimiques (salines) . Les gouttes ont un rayon de courbure $r_w >$ à la surface plane . Jusqu'à -10°C la surfusion est courante et le nuage ne contient que de l'eau liquide . Au dessous de -10°C le nuage contient des cristaux de glace . L'ensemble est soutenu par des courants ascendants .

V- INSTRUMENTS DE MESURE

1°) LES HYGROMETRES

Les hygromètres peuvent être chimiques , à absorption , à condensation , à enregistreurs ou hydrographes. Les hygromètres chimiques et à condensation ne sont pas utilisés dans les stations météorologiques . On utilise bien que rarement les hygromètres à absorption .

A) LES HYGROMETRES A ABSORPTION OU A CHEVEUX

Les hygromètres à absorption ou à cheveu puisqu'ils sont une imitation parfaite du cheveu humain dans la mesure où ils peuvent s'allonger ou se raccourcir en fonction de l'humidité relative ; avec un dispositif permettant l'enregistrement . c'est le plus ancien hygromètre et le plus connu . Pourvu d'une baguette ou stylet indique sur une échelle plus ou moins exacte , appelée baromètre bien que ce soit un hygroscopie .

B) L'HYGROMETRE ENREGISTREUR OU HYDROGRAPHE

IL est tout simplement un hygromètre à absorption muni d'un stylet et d'un tambour entraîné dans un mouvement uniforme par un moteur comme tous les enregistreurs à graphie sur papier gradué en 24Heures ou en 7 jours .

2°) LE PSYCHROMETRE

Il se compose d'un jeu de (2) deux thermomètres égaux . L'un appelé thermomètre sec , nous donne la température de l'air et l'autre thermomètre humide , a le tube recouvert d'une fine toile peu épaisse (mousseline) constamment humidifiée d'eau distillée. L'eau qui pénètre dans la mousseline , s'évapore et dérobe de la chaleur au thermomètre humide en le faisant descendre . Cette descente de température dépend de l'humidité relative . Ainsi nous avons d'un coté la température du thermomètre sec et de l'autre celle du thermomètre humide .

Avec ces données , nous entrons dans les tables psychromètre avec :

- D'une part la température du thermomètre humide et
- D'autre part la différence entre la température du thermomètre sec et celle du thermomètre humide

Et nous obtenons ainsi la table de lecture de l'humidité relative .

Cela nous permet également de calculer approximativement la température(du point de) la rosée. Pour ce faire nous prenons la différence de température des deux thermomètres et nous la soustrayons de la température du thermomètre humide. Le résultat obtenu est celui de la température (du point de) la rosée.

EXEMPLE : thermomètre sec 9°C , thermomètre humide 7°C

$T^{\circ}\text{sec} - T^{\circ}\text{humide} = 9^{\circ}\text{C} - 7^{\circ}\text{C} = 2^{\circ}\text{C}$ La température de la rosée = $T^{\circ}\text{humide} - 2 = 5^{\circ}\text{C}$

$$T^{\circ}\text{de la rosée} = T^{\circ}\text{humide} - (T^{\circ}\text{sec} - T^{\circ}\text{humide}) = 2T^{\circ}\text{humide} - T^{\circ}\text{sec} .$$

VI- HUMIDITE DANS LES CALES ET VENTILATION DE LA CHARGE DES NAVIRES

1°) HUMIDITE DANS LES CALES DES NAVIRES

Quand un navire se déplace d'un climat à un autre ayant des caractéristiques différentes , il se trouve confronté à d'importants changements de température et d'humidité . S'il a chargé dans des zones froides et qu'il se dirige vers des zones tempérées , la température de l'air à l'intérieur de la cale sera moindre par rapport à celle de l'extérieur . Si cet air extérieur entre dans la cale , il se refroidira et produira des condensations s'il atteint la température de rosée . Le même phénomène se produira s'il a chargé dans des zones tempérées et se dirige vers les zones froides . L'air qui vient de l'extérieur est plus froid et lorsqu'il se mélange à celui qui se trouve déjà à l'intérieur des cales , il le refroidira peu à peu ce qui entrainera une condensation de l'air . Sous l'effet de l'humidité , ces condensations provoqueront des dommages dans la charge qui peuvent être graves. Pour les éviter , il faut procéder à la ventilation de la cale en prenant des précautions afin qu'il ne se produise pas de condensations .

2°) VENTILATION DE LA CHARGE

Ventiler consiste à substituer l'air de la cale , plus ou moins chargé ou vicié , par de l'air pur .

Si la ventilation est naturelle , il faut le faire en maintenant toujours la température de la cale au dessus du point de rosée. En règle générale , il vaut mieux, ne pas ventiler si la température à l'intérieur de la cale est en dessous du point de rosée de l'air se trouvant à l'extérieur. Dans le cas contraire , on peut ventiler en toute sécurité . Les navires modernes ont un système de ventilation artificielle qui permet de faire circuler à travers les cales de l'air préalablement desséché , afin d'éviter le danger de la condensation .

