



Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés

Cours des opérations unitaires II

Réalisé par Dr. Lamia KHENNICHE

PREAMBULE

Le présent polycopie présente le programme de cours destiné aux étudiants de master1 en Génie des Procédés des matériaux et à tous ceux qui s'intéresseront aux opérations unitaires mécaniques comme la fragmentation et l'agglomération des solides, thermique faisant intervenir les phénomènes de transferts de matière et thermique simultanément, c'est le cas du séchage convectif des solides et le refroidissement des installations industrielles via les tours de refroidissement. La séparation membranaire et la filtration également sont abordées.

Contenu de la polycopie

Le contenu de ce cours est consacré aux opérations unitaires mécaniques utilisées pour modifier la taille des solides (fragmentation et agglomération), aux opérations unitaires thermiques employées pour séparer des mélanges de type fluide/solide (séchage des solides et opérations d'humidification) en plus des opérations utilisées pour la séparation fluide /fluide (séparation membranaire).

L'opération de fragmentation est abordée dans le premier chapitre ; Des généralités sur l'opération ainsi que les Conditions et techniques de broyage ; les différents types d'appareillage ont été développés ; les lois permettant de calculer l'énergie de broyage ont été également abordées avec applications numériques.

La seconde opération est l'agglomération des solides ; opération inverse de la fragmentation puisqu'il s'agit d'augmenter la taille des solides par création de différents types de ponts. Différents points ont été abordés en commençant par des généralités sur l'opération ; les mécanismes d'agglomération et en citant les différents types d'agglomération à savoir : Agglomération sans compression (granulation) ; Agglomération avec compression ; Enrobage)

L'opération du séchage des solides a été introduite dans le troisième chapitre. Plusieurs points importants en rapport avec cette opération ont été développés à savoir ; Des généralités sur le séchage ; les différents types de sècheurs ; comment choisir un sècheur ; les modes de séchage (continu, discontinu, contre-courant, co-courant, par convection, conduction etc...) ; les mécanismes de séchage ; établir des bilans matière et enthalpique au niveau d'un sècheur et enfin étudier la cinétique du séchage et calculer de la vitesse et la durée de séchage.

Les opérations d'humidification sont également abordées ; nous avons présenté les caractéristiques de l'air, nous avons parlé de la psychrométrie de l'air humide. Les différents types d'opération d'humidification ont été également cités en plus des opérations de déshumidification.

PREAMBULE

Des notions de base : définitions, différentes classifications, le choix d'une tour de refroidissement et le dimensionnement d'une tour de refroidissement à garnissage ont été développés le quatrième chapitre.

Le dernier chapitre est consacré à l'opération de séparation membranaire. Des notions de base, les mécanismes de séparation par membrane, classification des membranes, modes de fonctionnement ont été abordés.

SOMMAIRE

	INTRODUCTION GENERALE	1
	CHAPITRE I : RAPPELS THERMODYNAMIQUES	
I.	Equilibre liquide-vapeur	3
I.1	Corps pur et changement de phase	3
I.2.	Equilibre liquide-vapeur, vapeurs sèche et vapeurs saturantes	3
I.3	Étude des mélanges binaires idéals	5
I.3.a	Loi de Dalton	5
I.3.b	Loi de Raoult	5
I.4	Mélange air-vapeur d'eau	6
I.4.a	Températures et humidités	7
I.4.b	Changements d'état des Corps Purs – Règle des phases	8
I.5.	Règle de Gibbs	8
	CHAPITRE II : PROCEDES D'AGGLOMERATION ET DE FRAGMENTATION DES SOLIDES	
II.1	Introduction	9
II.2	Définition de l'agglomération des solides	9
II.3	Intérêt du procédé d'agglomération	9
II.4.	Agglomération sèche et humide	10
II.5	Mécanismes d'agglomération	10
II.6	Adjuvants d'agglomération	12

II.6.1	Lubrifiant	13
II.6.2.	Liants	13
II.7	Agglomération sans compression : Granulation humide	14
II.8.	Agglomération avec compression	15
II.8.1	Briquetage	15
II.8.2	Frittage	15
II.8.3	Extrusion	16
II.8.4	Pastillage	17
II.9	Enrobage	18
II.10	Objectifs visés par la fragmentation	20
II.11	Définition de la fragmentation	20
II.12	Fracture et mécanismes de rupture des matériaux	21
II.13	Modes de fragmentation	22
II.13.1	La compression (écrasement	22
II.13.2	La percussion (ou choc)	23
II.13.3	Le cisaillement	
II.13.4	L'attrition ou abrasion (usure par frottement)	23
II.14	Les grandeurs caractéristiques	24
II.14.1	Taux de réduction	24
II.14.2	Energie de fragmentation	24
II.15	Types d'appareils	26
II.15.1	Appareils fonctionnant par compression et écrasement	26
II.15.2	Appareils fonctionnant par impact- percussion	28

II.15.3	Appareils fonctionnant par attrition et frottement	31
II.15.4	Appareils fonctionnant par coupure / cisaillement	31
II.16	Application de l'opération de fragmentation dans l'industrie	32
II.17	Classification des solides	33
II.17.1	Type de circuits de fragmentation	33
II.17.1.a	Circuits ouverts	33
II.17.1.b	Circuits fermés	33
II.17.2	Classification par la taille des particules	34
II.17.3	Classification par propriété magnétique et électrostatique	35
II.18	Appareillage de tamisage	35
CHAPITRE IV : OPERATIONS D'HUMIDIFICATION		
III.1	Généralités	38
III.2	Types d'air	38
III.2.1	Air sec	38
III.2.2	Air humide	38
III.2.3	Air saturé	39
III.3	Paramètres caractérisant l'air humide	39
III.3.a.	La pression partielle de vapeur d'eau et d'air sec	39
III.3.b	La pression partielle de vapeur saturée	40
III.3.c	La température sèche	40
III.3.d	La température humide	40
III.3.e	Humidité absolue et humidité relative de l'air	41

III.3.f	L'enthalpie spécifique de l'air humide	42
III.3.J	Le volume Le volume spécifique	43
III.3. h	Point de rosée	43
III.4	Température de saturation adiabatique et température du thermomètre humide	45
III.5	Diagramme psychrométrique	48
III.6	Psychromètres	53
III.7	Exercices d'application	56
III.8	Généralités sur les opérations de l'humidification	56
III.8.1	Humidification isotherme	57
III.8.2	Humidification adiabatique	58
III.8.3	Humidification par évaporation	58
III.8.4	Humidification par pulvérisation d'eau	59
III.9	Les évolutions de l'air humide par pulvérisation	60
III.9.1	Humidification et réchauffement	61
III.9.2	Humidification seule	61
III.9.3	Humidification et refroidissement	62
III.9.4	Refroidissement à humidité constante	62
III.9.5	Déshumidification et refroidissement	62
III.10	Définition de la déshumidification de l'air	62
III.10.1	Déshumidification par refroidissement	63
III.10.2	Déshumidification par absorbant liquide (absorption)	64
III.10.3	Déshumidification par adsorbant solide (adsorption)	65
	ANNEXE	

	Chapitre IV : OPERATION DE SECHAGE DES SOLIDES	
V.1	Introduction	68
V.2	Définition du séchage	69
V.3	Comment se présente l'eau dans un matériau	70
IV.4.	Intérêt du séchage	71
IV.5	Terminologie liée au solide à sécher	72
IV.5.1	Humidité	72
IV.5.2	Taux d'humidité	72
V.5.3	Humidité relative	72
IV.5.4	Hygroscopicité	72
IV.5.5	Taux d'humidité à l'équilibre	73
IV.5.6	Matériau anhydre	73
IV.6	Cinétique de séchage	74
IV.6.1	Comportement d'un solide humide au contact de l'air	74
IV.6.1.a	Séchage et mouillage d'un solide	74
IV.6.2	Activité de l'eau dans les solides	75
IV.6.3	Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau	77
IV.6.4	Types de séchage	78
IV.6.4.1	Séchage par convection	79
IV.6.4.2	Séchage par conduction	80
IV.6.4.3	Séchage par rayonnement	81

IV.6.4.4.	Séchage sous vide	82
IV.6.4.5	Séchage par perte diélectrique	82
IV.6.4.6	Séchage par lyophilisation	82
IV.6.5	Modes de séchage	82
IV.6.5.1	Séchage mécanique	82
IV.6.5.2	Séchage chimique	83
IV.6.5.3	Séchage thermique	84
IV.6.5.3.a	Séchage par ébullition	84
IV.6.5.3.b	Séchage par entraînement	85
IV.6.6	Choix du procédé de séchage	86
IV.6.7	Cinétique de séchage	86
IV.6.7.1	.Période de mise en température (Phase 0)	88
IV.6.7.2	Période à allure constante (Phase 1)	88
IV.6.7.3	Période de ralentissement (Phase 2)	89
IV.6.8	La durée de séchage	89
IV.6.8.1	Calcul de la durée de séchage pour la période à flux d'évaporation constant (t_1)	90
IV.6.8.2	Calcul de la durée de séchage pour la période à flux d'évaporation ralenti (t_2)	90
IV.6.9	Influence des caractéristiques de l'air sur la cinétique de séchage	91
IV.6.9.1	Influence de la température de l'air	91
IV.6.9.2	Influence de la vitesse de l'air	92
IV.6.9.3	Influence de l'humidité de l'air	92
IV.6.10	Bilan Matière d'un Séchoir fonctionnant à courants-croisés	92
Chapitre V : TOURS DE CONTACT GAZ-LIQUIDE		

V. 1	Introduction	94
V.2	Définition de la tour de refroidissement	94
V.3	Classification des tours de refroidissement	95
V.3.1	Classification suivant la nature des échanges	95
V.3.1.a	Tours de refroidissement humide	95
V.3.1.b	Tours de refroidissement sèches	95
V.3.1.c	Tours de refroidissement hybrides	96
V.3.2	Classification suivant le mode de refroidissement de l'eau	97
V.3.2 b.	Tour de refroidissement à circuit fermé	97
V.3.3	Classification suivant l'appel d'air	97
V.3.3.a	Tour de refroidissement à ventilation naturelle	97
V.3.3.b	Tour de refroidissement à tirage mécanique	98
V.3.4	Classification suivants la circulation d'air	99
V.3.4.a-	Courants parallèles	99
V.3.4.a-	Courants parallèles	99
V.3.4.b	Contre courants	99
V.3.4. c	Ecoulement à courants croisés	99
V.4	Choix du type de refroidissement	100
V.5	Théorie des phénomènes de transferts dans les tours de refroidissement	101
V.6	Bilan massique et thermique d'une tour de refroidissement	102
V.7	Dimensionnement d'une tour de refroidissement / Application : Calcul de la hauteur de la tour	105

Chapitre VI : SEPARATION PAR FILTRATION MEMBRANAIRE		
VI.1	Introduction	109
VI.2	Historique sur le procédé	109
VI.3	Définition de procédé membranaire	110
VI.4	Définition d'une membrane	110
VI.5	Mécanismes de séparation	111
VI.6	Classification des membranes	112
VI.6.1	Matériaux membranaires selon le type du matériau constituant la membrane	112
VI.6.1.1	Les membranes minérales (ou inorganique)	112
VI.6.1.2	Les membranes organiques	112
VI.6.2	Classification selon leur porosité	113
VI.6.2.1	Membranes poreuses	113
VI.6.2.2	Membranes denses	113
VI.6.3	Classification selon la morphologie	113
VI.6.3.1	Membranes asymétriques (ou anisotropes)	113
VI.6.3.2	Membranes à structure symétrique (ou isotropes)	113
VI.6.3.3.	Membranes à charge électrique	114
VI.6.4	Classification d'après la géométrie des modules	115
VI.7	Modes de fonctionnement	117
VI.7.1	La filtration frontale	117
VI.7.2	La filtration tangentielle	118
VI.8	De la théorie au transfert membranaire	119

SOMMAIRE

VI.8.1	Le colmatage	119
VI.8.1.1	Flux volumique de perméation	120
VI.8.1.2	Transfert de solvant à travers la membrane	121
VI.8.2	La sélectivité	122
VI.8.3	Pression transmembranaire (PTM)	123
VI.8.4	Le flux de permeal	124
VI.8.5	Le taux de rétention	124
VI.8.6	Résistance hydraulique de la membrane (R_m)	125

INTRODUCTION GENERALE

La transformation de matières premières en produits finis implique généralement des processus purement mécaniques : découpage, triage, comptage, transport, mise en contact... Toutes ces opérations sont regroupées sous l'appellation d'Opérations **Unitaires Mécaniques** (OUM) dans la mesure où elles ne mettent en jeu que des phénomènes mécaniques, par opposition aux transferts de chaleur ou encore aux transferts de matière entre phases (mis en jeu dans les Opérations Unitaires de Transfert : (OUT)

Le Tableau 1 illustre trois types d'opérations fondamentales : modification de taille, séparation, mélange. Ces opérations mécaniques peuvent intervenir isolément (fragmentation, tamisage, décantation, filtration,...), mais également au sein d'autres opérations unitaires (agitation de la cuve d'un réacteur, écoulement à travers le garnissage d'une colonne à distiller, fluidisation pour le séchage,...). Ainsi les opérations unitaires mécaniques concernent presque tous les appareillages du génie des procédés : réacteurs, séparateurs, appareils pour la mise en forme de produits et appareils de liaison.

Tableau 1. Différents types d'opérations unitaires mécaniques d'après Midoux

	type d'opérations	dénomination	exemple
modification de taille	RÉDUCTION		
	liquides	dispersion	séchage
	matériaux durs	broyage	traitement de minerais ; préparation en vue du retraitement du combustible nucléaire
	matériaux consistants	découpage	traitement de fibres végétales
	AUGMENTATION		
	solides	mise en granulés coagulation agglomération extrusion	engrais lait produits pharmaceutiques plastiques
séparations	liquide / liquide	séparation gravitaire	séparation des solutions aqueuses de produits organiques
	liquide / solide	décantation ; centrifugation ; filtration ; flottation ; pressage	} traitement des eaux usées filtration des solutions de cristallisation traitement des minerais traitement de pulpes végétales
	solide / solide	classification	triage de grains en fonction de la taille, la densité, la forme, ...
	...		
mélange	phases solubles	agitation	dilution de solutions concentrée ; réactions chimiques homogènes
	phases insolubles	mélange homogénéisation mise en suspension	extraction liquide-liquide émulsification cristallisation ; réaction avec catalyseur hétérogène
	systèmes consistants	pétrissage	préparation de polymères, pâtes

En plus des propriétés physico chimique telles que : masse volumique, viscosité, capacité calorifique, conductivité thermique, les propriétés d'un solide pulvérulent dépendent également dans une large

mesure de la forme, de la taille des grains, et de leur état de surface, ajouté à cela sa résistance mécanique. La résistance mécanique d'une particule correspond à plusieurs propriétés :

- dureté : on la quantifie soit par des essais de rayure par différents matériaux (dureté de Mohs), soit à partir de l'empreinte laissée par une pointe de diamant (dureté de Knoop) ;
- abrasivité : elle correspond à la rugosité (dimension ET forme) de la surface des particules. Il n'existe pas de test normalisé pour quantifier l'abrasivité, bien que cette notion soit importante. On peut imaginer de mesurer l'usure d'un morceau de bois agité dans la poudre dont on veut estimer l'abrasivité ;
- rigidité : c'est la résistance à la traction, la flexion, voire l'écrasement. Elle est mesurée à l'aide du module d'élasticité du matériau (module d'Young) ;
- ténacité : c'est la résistance à la cassure. Elle est quantifiée en mesurant l'énergie nécessaire pour provoquer une déformation permanente ;
- friabilité : c'est la résistance à l'attrition, c'est-à-dire la perte de petits fragments sous l'effet des chocs.

Lorsque un ensemble de particules est considéré, il est dit ; *population de particules*. Celle-ci est peut être définie par plusieurs caractéristiques telles que : la granulométrie, la masse volumique, la surface spécifique, la distribution de la taille des pores et des propriétés liées à l'écoulement (coulabilité, compression, adhésion..).

On souhaite généralement fabriquer un produit avec une taille moyenne, et éventuellement une distribution de tailles ou une surface spécifique, données. Ceci soit pour préparer un produit avant un traitement (augmenter la réactivité d'un solide consommable, faciliter le transport d'une poudre, par exemple) ou pour finaliser un produit avant sa vente (obtenir l'intensité voulue pour la couleur de pigments, un goût particulier du chocolat ou du thé, une bonne résistance d'un ciment, par exemple).

Pour se faire, on procède à la réduction de la taille initiale d'un produit. Cette opération est appelée ; la fragmentation.

Rappels thermodynamiques

I. Equilibre liquide-vapeur

I.1. Corps pur et changement de phase

Un corps pur peut exister sous trois phases différentes : solide, liquide et gaz. Quand elles coexistent, ces phases se distinguent par des propriétés physiques différentes (masse volumique, indice de réfraction...).

Il est d'usage de nommer vapeur l'état gazeux d'un corps qui est liquide ou solide aux conditions usuelles (20 °C et 1 bar environ). Par exemple, on parle de vapeur d'eau. Il est alors d'usage de parler de condensation (et non de liquéfaction) pour le passage de l'état gaz à l'état liquide d'une vapeur : l'azote se liquéfie, tandis que la vapeur d'eau se condense.

La vaporisation, ou passage d'un corps de la phase liquide à la phase vapeur, peut avoir lieu selon deux processus distincts :

- Dans le cas de l'ébullition la transition liquide-vapeur du corps pur a lieu au sein même du liquide, ce qui y provoque des bulles de gaz.
- Dans le cas du phénomène d'évaporation, la transition liquide-vapeur n'a lieu qu'à l'interface entre les deux phases. Il concerne une situation spécifiquement hors équilibre.

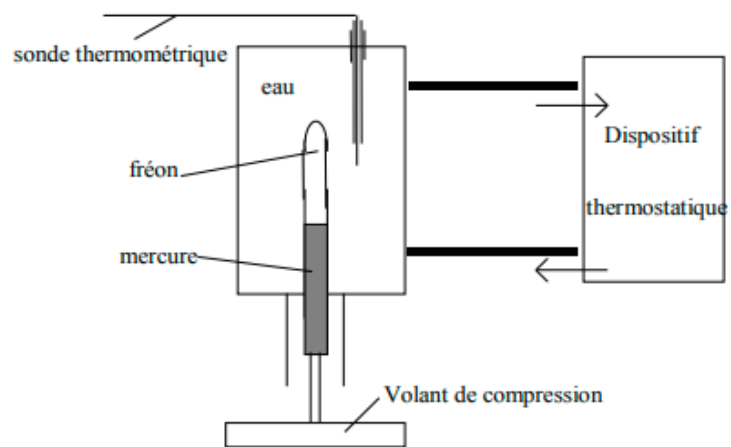
I.2. Equilibre liquide-vapeur, vapeurs sèche et vapeurs saturantes

Cet équilibre peut être étudié expérimentalement au moyen d'un appareil nommé « machine de Cailletet ». Il permet d'opérer des transitions de phases liquide-gaz sur l'échantillon de fluide contenu dans l'éprouvette, placé au sein d'un bain thermostaté (en l'occurrence de l'hexafluorure de soufre SF₆). L'appareil comprend une éprouvette graduée, en verre épais et résistant contenant le fluide à étudier, fixée sur une chambre de pression en acier inoxydable. Un manomètre fixé sur celle-ci permet de connaître la pression. Le fond de la chambre est fermé par une membrane déformable qui assure une parfaite étanchéité. Elle contient du mercure et une déformation vers le haut de la membrane chassera le mercure dans l'éprouvette en comprimant le gaz. Cette déformation est obtenue en tournant le volant situé à la base de l'appareil, celui-ci agissant sur la membrane par l'intermédiaire d'un piston.

Une jaquette transparente est placée autour de l'éprouvette. Un appareillage annexe permet d'y faire circuler un courant d'eau dont la température (lue sur le thermomètre) est imposée par un dispositif thermostatique. Un dispositif optique permet de projeter l'image de l'éprouvette sur un écran.

Réalisons une compression isotherme pour le corps pur. A l'état initial, le fluide est entièrement vaporisé. En l'absence de phase liquide en interaction avec cette phase gazeuse, on parle de vapeur sèche. A température fixée $T = T_0$, les variations du volume de l'échantillon entraînent des variations inverse de la pression. Le fluide a alors un comportement thermoélastique assimilable à celui d'un gaz parfait, d'équation d'état $PV = nRT$.

On réduit progressivement le volume, en augmentant corrélativement la pression, jusqu'à l'apparition d'une première goutte de liquide. On note alors la valeur de la pression. La vapeur devient saturante, ce qui change totalement le comportement du fluide. On a alors coexistence en équilibre de phases liquide et vapeur. On constate alors que tant que vapeur et liquide coexistent en équilibre, la pression va conserver une même valeur, à température donnée : $P = P_{\text{sat}}(T)$.



Cette pression de vapeur saturante ne dépend que de la température et de la nature du corps pur. En particulier, elle est indépendante de la proportion de liquide et de vapeur pour cet échantillon de fluide diphasé. En diminuant progressivement le volume, on observe que proportion de liquide dans le fluide augmente corrélativement.

Le passage liquide-vapeur pour une pression partielle P_i inférieure à la pression de vapeur saturante $P_{\text{sat}}(T)$ est le **phénomène d'évaporation**. C'est une transition hors équilibre. **La vaporisation** n'a lieu qu'à l'interface liquide/vapeur. Sa cinétique est conditionnée par le surface d'échange liquide-vapeur. L'évaporation de l'eau d'un lac, le séchage du linge, la régulation thermique du corps par sudation correspondent à ce phénomène.

Pour l'ébullition, de la vapeur se forme au sein même du liquide (formation de bulles). L'ébullition apparaît lorsque la pression de vapeur saturante atteint la valeur de la pression totale de l'atmosphère située au-dessus du liquide. Elle peut s'obtenir en augmentant la température du liquide (ce qui fait croître la valeur de $P_{\text{sat}}(T)$), ou en diminuant la pression au-dessus du liquide.

Exemples : l'ébullition de l'eau est obtenue sous la pression atmosphérique moyenne (101325 Pa) à la température de 100 °C ; la pression de vapeur saturante de l'eau vaut alors 101325 Pa. L'ébullition d'un

solvant organique volatil, comme l'éther de diéthyne, peut aisément être obtenue à température ambiante grâce à la dépression créée par une trompe à eau

I.3. Étude des mélanges binaires idéals

On appelle mélange binaire liquide - vapeur idéal tout mélange de deux corps A et B se trouvant sous deux phases : liquide et vapeur. La phase gazeuse : formée des vapeurs des deux corps, se comporte comme un mélange de gaz parfait. La phase liquide forme une solution idéale des deux corps supposés complètement miscibles

Les lois qui régissent les équilibres liquide-vapeur sont décrites pour les systèmes idéaux par les relations de Dalton, Raoult et Henry.

I.3.a. Loi de Dalton

La pression totale d'un mélange de gaz parfaits (A et B) est la somme des pressions partielles de tous les gaz en présence :

$$P_{\text{totale}} = P_A + P_B$$

La pression partielle de chaque gaz est égale à la pression qu'il exercerait s'il occupait seul le récipient :

$$P_A = \frac{n_A RT}{V}$$

Chaque pression partielle est liée à la fraction molaire y_A du gaz en question et à la pression totale par la relation :

$$P_A = y_A P_{\text{totale}}$$

I.3.b. Loi de Raoult

La loi de Raoult relie la pression partielle P_A d'un composant dans la phase vapeur à sa composition dans la phase liquide x_A suivant l'équation suivante :

$$P_A = x_A P_A^\circ$$

Avec

P_A° : Tension de vapeur du composant " A " pris à l'état pur à la température du système ;

x_i : Fraction molaire de i dans la phase liquide.

I.4. Mélange air-vapeur d'eau

L'air sec est un mélange composé d'azote, d'oxygène et de traces d'autres gaz. L'air dans l'atmosphère contient de la vapeur d'eau (ou de l'humidité) et est appelée air atmosphérique. Par ailleurs, l'air qui ne contient aucune trace d'humidité est appelé air sec. Dans les applications relatives au conditionnement d'air, on traite habituellement l'air comme un mélange gazeux constitué d'air sec et de vapeur d'eau.

La composition de l'air sec demeure inchangée, alors que la teneur en humidité varie selon les transferts de vapeur d'eau à la surface des terres, des océans, des rivières ou des lacs, ou encore selon l'eau évaporée d'une casserole, vaporisée dans une douche ou évaporée par le corps humain.

L'enthalpie de l'air sec est alors estimée avec l'expression :

$$h_{\text{air sec}} = c_p T = 1.005 T \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

et sa variation est :

$$\Delta h_{\text{air sec}} = c_p \Delta T \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

Dans la plage de température de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, la vapeur d'eau peut également être traitée comme un gaz parfait. À $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, la pression de saturation de l'eau est de 12.3 kPa. Si sa pression demeure inférieure à cette valeur, la vapeur d'eau peut être considérée comme un gaz parfait avec une marge d'erreur de 0.2 %. Par conséquent, l'air atmosphérique se comporte comme un mélange de gaz parfaits dont la pression est égale à la somme des pressions partielles de l'air sec (P_{AS}) et de la vapeur d'eau (P_v), soit :

$$P_{\text{totale}} = P_{\text{AS}} + P_v$$

La pression partielle de la vapeur d'eau est habituellement appelée pression de vapeur. Puisque la vapeur d'eau dans l'air atmosphérique est un gaz parfait, son enthalpie n'est fonction que de la température, c'est-à-dire $h = f(T)$.

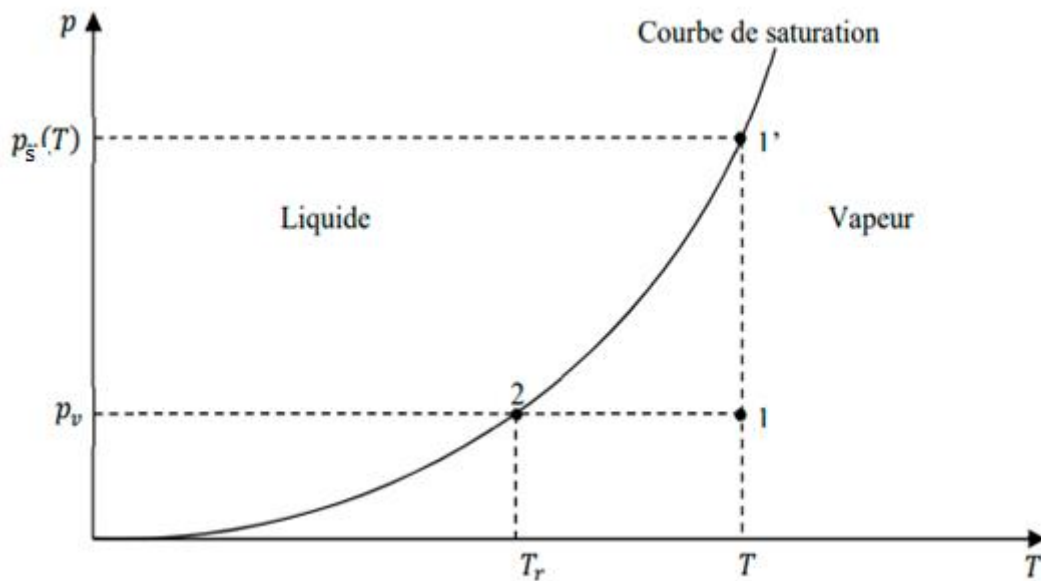
L'enthalpie de la vapeur d'eau à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ est de 2500.9 kJ/kg. La chaleur massique moyenne c_p de la vapeur d'eau dans la plage de température de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ est de 1.82 kJ/kg. $^{\circ}\text{C}$. Alors, l'enthalpie de la vapeur d'eau entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ peut être exprimée en fonction de la température selon l'équation suivante :

$$h_g(T) = 2500.9 + 1.82 T \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

La vapeur d'eau saturée existe seulement à une température et à une pression où l'eau à l'état liquide et la vapeur à l'état gazeux peuvent coexister ensemble. C'est-à-dire qu'on obtient la vapeur d'eau saturée lorsque la vitesse de vaporisation de l'eau est égale à la vitesse de sa condensation.

I.4.a. Températures et humidités

Représentons dans un diagramme (P, T) le point 1 représentatif de la vapeur d'eau de pression partielle P_v contenue dans l'air de température T et de pression totale P_{totale} :



$p_s(T)$ est la pression de saturation (d'équilibre liquide-vapeur) de la vapeur d'eau à la température T .

La formule de Dupré est valable entre -50°C et $+200^\circ\text{C}$ pour calculer $p_s(T)$:

$$p_s(T) = \exp \left[46,784 - \frac{6435}{T + 273,15} - 3,868 \ln (T + 273,15) \right]$$

Où : T Température en $^\circ\text{C}$, $p_s(T)$, pression de saturation en mmHg

Si l'on refroidit l'air à pression constante, son humidité relative va augmenter jusqu'à atteindre la valeur 100% au point 2 sur la courbe de saturation. Il se produit un équilibre vapeur-liquide et les premières gouttes d'eau condensée vont apparaître, la température du point 2 est appelée la température de rosée T_r de l'air. Elle est définie par :

$$p_v = p_s(T_r)$$

I.4.b.Changements d'état des Corps Purs – Règle des phases

Toute substance composée d'une seule espèce est dite corps pur ; Tout système constitué d'une seule phase est système monophasique et donc homogène. Un système formé de l'eau bouillante et de la vapeur d'eau, est un système diphasique, une phase liquide, et une autre de vapeur.

Chaque phase d'un système thermodynamique est caractérisée par des variables thermodynamiques indépendantes, volume, pression et température. Ces variables thermodynamiques indépendantes peuvent être déterminées par la règle de Gibbs

I.5. Règle de Gibbs

La règle de Gibbs a pour but la détermination du nombre de variables d'états indépendantes d'un système thermodynamique dit variance du système ; qui n'est autre que le nombre de variables qu'il est possible de modifier dans un système, sans changer la nature et le nombre de phases qu'il contient, ni la nature ou le nombre de constituants qui le composent. C'est donc le nombre de variables intensives et indépendantes d'un système, qui déterminent la nature de ce système, indépendamment des proportions des différents constituants dans les différentes phases du système.

En l'absence de réactions chimiques entre les corps purs, la variance s'exprime par la relation :

$$v = C + 2 - \phi$$

La quantité (2) correspond aux deux variables intensives T et P déterminante pour la nature du système

Avec :

v : Variance du système thermodynamique.

c : Nombre des constituants chimiques différents.

ϕ : Nombre de phases (solide, liquide et vapeur).

Dans l'état diphasé d'un corps pur : $C = 1$ et $\phi = 2$ donnent $v = 1$; les variables T et P étant liées par la relation $P = P_{\text{sat}}(T)$, le système est monovariant. On ne peut pas modifier T sans modifier P, mais la répartition du corps pur entre les phases liquide et gaz peut évoluer à volonté.

Dans le cas d'un gaz parfait ou réel, nous avons un seul constituant $c=1$ et une seule phase et donc $\phi = 1$, la variance du système

$$v = 1+2- 1$$

$$v = 2$$

Le système est dit bivariant : il peut y avoir deux variables indépendantes qui gèrent le gaz ; telles que (P,T) ou (P,V) ou (T,V).

PROCEDE D'AGGLOMÉRATION DES SOLIDES

I.1.INTRODUCTION

De nombreuses industries font appel à des procédés d'augmentation de taille de particules : pour éviter les poussières (risque d'inhalation ou d'explosion), pour uniformiser la taille de populations de particules, pour faciliter la manipulation de poudre, ...

Le mécanisme de l'agglomération met en jeu des forces électrostatiques, des forces de Van der Waals, des forces capillaires (en présence de liants), des ponts solides (obtenus par compression ou frittage). Les différents mécanismes seront développés ultérieurement.

II.2. Définition de l'agglomération des solides

L'agglomération, ou encore la granulation, est définie comme étant un procédé d'augmentation de la taille moyenne de la distribution des particules et au cours duquel ces particules vont être associées pour former des agglomérats de taille supérieure, dans lesquels la particule initiale originale peut encore être identifiée (figure II.1).

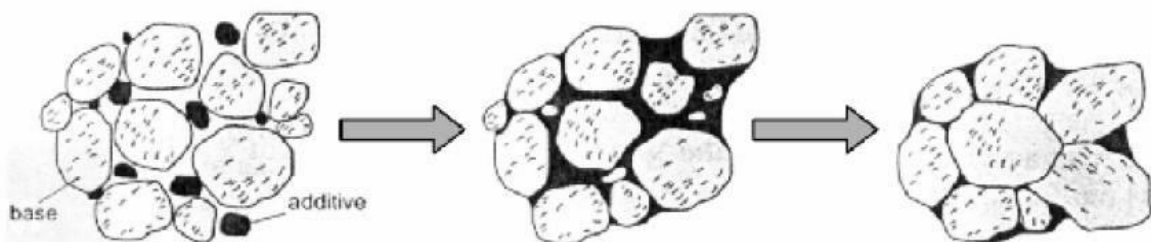


Figure II.1. Exemple d'agglomération de particules solides

II.3. Intérêt du procédé d'agglomération

La prépondérance de l'agglomération dans de nombreux secteurs industriels a renforcé l'intérêt d'une meilleure maîtrise de ce procédé. Sa maîtrise représente un enjeu technologique majeur en raison de son fort impact sur la qualité des produits agglomérés qui se manifeste comme suit :

- L'amélioration des propriétés d'écoulement des poudres,

-La réduction des poussières : réduction des pertes, des risques d'explosion et des risques d'atteinte des personnels par inhalation de fines particules,

-L'amélioration de la qualité du mélange (lorsque plusieurs poudres sont agglomérées ensemble) par l'atténuation des risques de ségrégation de ses composants

-L'amélioration des propriétés d'instantanéité de la poudre

Outre l'enjeu technologique, la maîtrise de l'agglomération présente également un enjeu économique puisque tous les secteurs pourvoyeurs de matière agglomérée sont extrêmement concurrentiels (les industries minérales, agro-alimentaires, pharmaceutiques, chimiques et les industries phyto-sanitaires où 60% des matières premières manipulées sont sous forme de particules

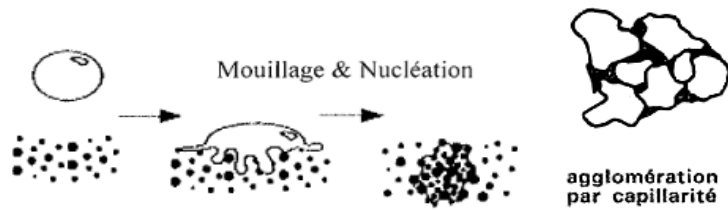
II.4. Agglomération sèche et humide

Les techniques d'agglomération peuvent être classées en deux grandes catégories selon que le procédé est réalisé à sec (par technologie de pressage, d'extrusion, etc.) ou par voie humide, en présence d'un liant de granulation.

II.5. Mécanismes d'agglomération

Il existe plusieurs modes d'agglomération ; ils varient suivant les caractéristiques désirées des agglomérats ou des grains et suivant les matières mises en œuvre. On peut distinguer cinq groupes différents selon la nature des forces de liaison mises en jeu :

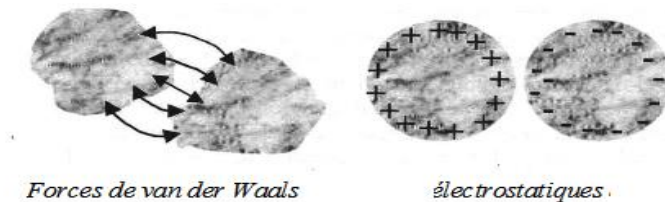
1. Liaisons solides entre particules élémentaires ; (fusion complète, frittage, cristallisation par refroidissement de substances dissoutes dans un liquide, réaction chimique, collage).
2. Agglomération par des liquides fluides ; Des liquides fluides non visqueux peuvent servir de liant intergranulaire entre différentes particules grâce aux forces capillaires (mouillage). L'agent mouillant le plus courant est l'eau. Les espaces existant entre les fines particules sont peu à peu remplis par les liquides qui, grâce aux forces capillaires, maintiennent les particules agglomérées. Au fait, l'agent mouillant produit La tension superficielle nécessaire à la réunion puis à la cohésion et donne Un film liquide plus au moins continu autour des particules exemple simple; préparation du béton hydraulique.



3. Agglomération par des liquides visqueux ; L'agglomération par des liquides très visqueux est de deux types : le liant visqueux met en œuvre de fines couches de liant qui, adhérant au solide, pénètre entre les particules et permet d'obtenir un produit plastique ayant la forme souhaitée ; tels que les bitumes et les goudrons.

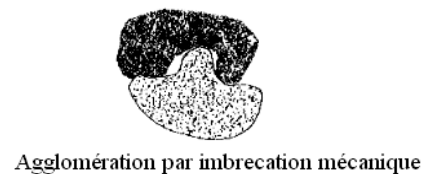


4. Forces intermoléculaires et électrostatiques; soit une attraction moléculaire de type Van der Waals intervenant pour des fines $<100 \mu\text{m}$ et assez rapprochées (portée de l'ordre de 10nm), sinon les charges électrostatiques des poussières résultant par le frottement des unes sur les autres assurent une attraction; la résistance des agglomérés formés est toutefois assez faible



5. Enchevêtrement / imbrication mécanique

Certaines particules peuvent donner lieu à un enchevêtrement (imbrication) par agitation (mélangeage). C'est le cas des textiles non-tissés ou des particules qui peuvent s'emboîter les unes dans les autres.



Les différents mécanismes cités précédemment ont lieu avec ou sans pontage ; Le phénomène de pontage peut se produire soit en phase vapeur (ponts fluides), soit au sein de la phase solide (ponts solides).

Les « ponts solides » apparaissent dans le cas du frittage, des réactions chimiques aux points de contact, du durcissement de liant et de la cristallisation du matériau dissous.

Les « ponts fluides » sont dus aux forces de capillarité entre les particules et le fluide ou le liant à haute viscosité.

Là où il n'existe pas de « ponts », **les forces de Van der Waals** représentent la principale force d'agglomération. Différents exemples de mécanismes d'agglomération sont illustrés par la figure suivante:

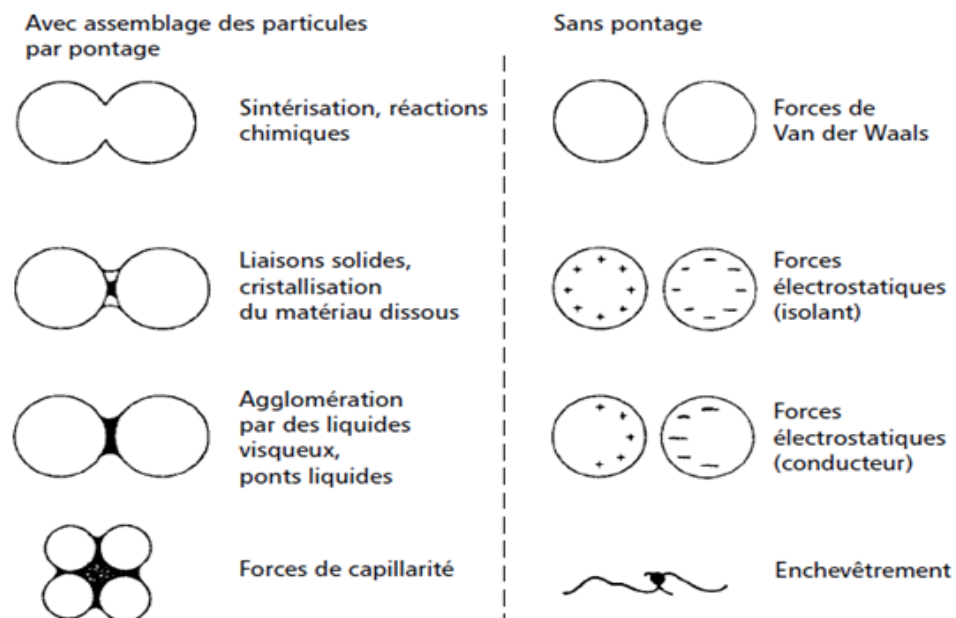


Figure II.2. Différents modes d'agglomération des solides

II.6. Adjuvants d'agglomération

Afin de faciliter la préparation des agglomérats on utilise des excipients appelés adjuvants.

Leur choix doit tenir compte :

- des propriétés du matériau mis en forme : mouillabilité, solubilité, réactivité avec l'adjuvant, etc.;
- du procédé de mise en forme : température, viscosité, pouvoir lubrifiant du liant, etc.;

- des propriétés exigées de l'agglomérat : solidité, tenue en température, dispersibilité, solubilité, résistance à l'abrasion et aux manutentions, etc.;
- du prix de revient de la mise en forme.

II.6.1. Lubrifiants

Les lubrifiants sont utilisés essentiellement dans les types d'agglomération employant la pression : briquetage, extrusion, pastillage. Les lubrifiants internes (appelés encore régulateurs d'écoulement ou plastifiants) sont mélangés intimement aux matériaux à agglomérer à une dose de l'ordre de 0,5 à 2 %. Ils favorisent, d'une part la coulabilité des particules lors du remplissage du moule, d'autre part le réarrangement des particules, première phase du pressage. Les lubrifiants externes sont appliqués, par pulvérisation ou par projection électrostatique, sur les surfaces des filières et des moules. Ils densifient parfois la peau de l'agglomérat, aidant le démoulage, et ils réduisent le frottement sur la surface du moule ou de la filière et, par-là, l'usure de ceux-ci. Tous les liquides (eau, huile minérale, silicones, etc.) qui peuvent former un film continu résistant aux conditions d'agglomération (température, pression) réduisent les frottements et peuvent être considérés comme des lubrifiants ; dans la pratique, ils ne sont utilisés qu'à froid et sous des pressions limitées. Les lubrifiants solides (talc, graphite, les stéarates, le bisulfure de molybdène, paraffines) sont utilisés dans le cas de pressions élevées (de l'ordre de 104 bars).

II.6.2. Liants

Un liant est une substance de base dans de nombreux produits utilisés en construction ainsi qu'en génie chimique, ayant la propriété d'agglomérer des particules entre elles soit par des forces d'adhésivité, soit par réaction chimique. Il existe plusieurs liants ; les liants minéraux (ex. argiles, silicates), es liants d'origine végétale ou animale (celluloses modifiées, gélatines, colles..) et des liants organiques synthétiques (polymères [acrylique, urée-formol, polyéthylène, polystyrène, polyester, polyacétate de vinyle polyacrylate] et cires).

Les liants sont des adjuvants qui augmentent les forces de liaison des agglomérats formés. On les classe en général en 3 groupes :

- réactifs chimiques (les ciments)
- liants épais (argiles, gels, amidon)
- liants filmogènes (l'eau, la mélasse, la bentonite, du glucose, divers silicates, des colles, des alcools et divers solvants).

D'une manière générale, il existe deux types d'agglomération de solides :

- Agglomération sans compression
- Agglomération avec compression

II.7. Agglomération sans compression : Granulation humide

La granulation consiste à transformer en petits grains souvent, des matières généralement pulvérulentes pour en faciliter l'emploi et la conservation. Cette opération est très employée dans l'industrie des fertilisants, en pharmacie et dans l'industrie des matières plastiques.

Cette opération est très employée dans l'industrie des fertilisants, en pharmacie et dans l'industrie. Elle consiste à transformer en petits grains souvent, des matières généralement pulvérulentes pour en faciliter l'emploi et la conservation. Cette technique concerne les mélanges solides pulvérulents qui sont transformés en agrégats solides souvent poreux de forme régulière et d'une certaine taille, par exemple de 5 à 50 mm.

À partir d'une poudre sèche, l'agglomération se fait généralement en introduisant dans un appareil équipé d'un système d'agitation, d'une part la poudre sèche, d'autre part une petite quantité d'un liquide qui est généralement de l'eau (de 7 à 30 % en volume). On ajoute souvent au liquide de toutes petites quantités d'additifs (solvant approprié ou divers liants).

Cette technique se fait suivant les étapes suivantes :

- 1- Le mouillage** : la poudre est mouillée par une phase liquide qui peut être un solide fondu, une solution ou une suspension contenant ou non un liant,
- 2- La croissance des granulés**: sous l'effet de l'addition de liquide et de l'agitation de la masse granulaire, les particules mises en mouvement rencontrent le liquide puis d'autres particules ce qui conduit au phénomène d'agglomération.
- 3- Le séchage** : cette opération permet l'évaporation du liquide présent dans les agglomérats humides conduisant à la formation de ponts solides. Ces derniers assurent la cohésion finale des agglomérats.

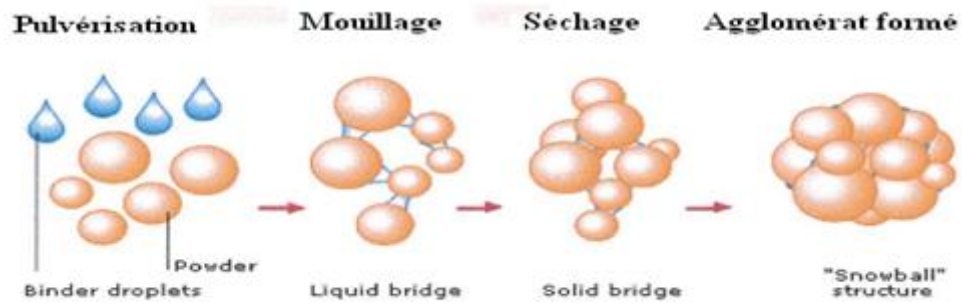


Figure II.3. Granulation par voie humide

II.8. Agglomération avec compression

L'agglomération par compression a d'abord été mise au point pour les produits qu'il n'était pas possible d'humidifier ou de ramollir par début de fusion ou addition de produits facilement fusibles, ainsi que pour la récupération des fines sèches.

Les opérations avec compression regroupent plusieurs méthodes suivantes :

II.8.1. Briquetage

Cette opération s'effectue par compression du produit pulvérulent sous pression entre deux cylindres, tournant en sens inverse, en ajoutant éventuellement des liants, le plus souvent de l'eau. Le compactage par voie sèche est réservé aux substances qui ne supportent pas la voie humide ou le séchage qui la termine (cas de l'agglomération des engrais, de certains métaux (Sn, Pb, Al), dans l'industrie chimique pour le compactage du chlorure de sodium)

II.8.2. Frittage

Ce type d'agglomération traite essentiellement les produits fondus ou sous forme de solution ou de suspension. Le frittage est un traitement thermique effectué à une température au-dessous du point de fusion du composant principal du matériau qui permet la génération de liaisons fortes entre les particules par diffusion de matière. Le frittage peut se faire en phase solide ou en présence d'une phase liquide (Figure II.4).

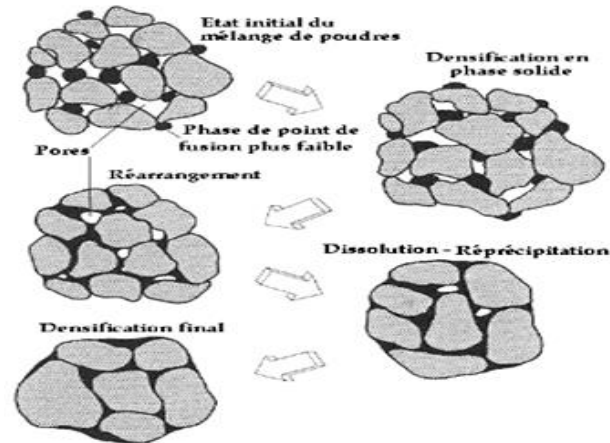
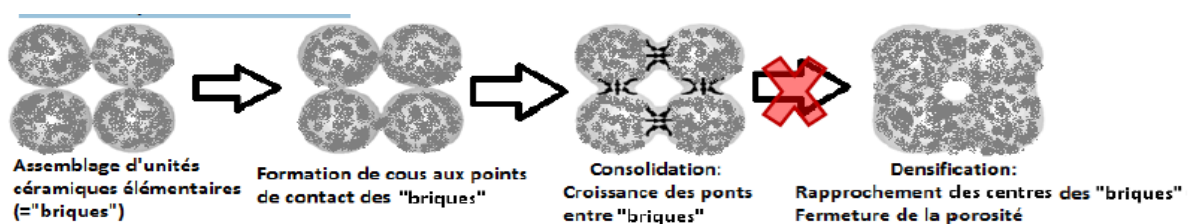


Figure II.4. Frittage phase liquide d'un mélange de poudres

La première étape du **frittage en phase liquide** est caractérisée par une augmentation très rapide de la densité apparente du matériau. Ce phénomène est lié à l'apparition de la phase liquide qui, jouant le rôle de lubrifiant, permet le glissement des particules les unes sur les autres sous l'effet des différentes contraintes existant au sein de l'empilement. Cette étape n'intervient pratiquement pas lors du frittage en phase solide

Industriellement **le frittage en phase solide** est le plus utilisé, surtout pour la fabrication de pièces métalliques, car le changement de dimensions est faible. Le frittage avec phase liquide est surtout utilisé pour la fabrication de composites de matrice métallique ou céramique



Le frittage doit permettre la formation de ponts au niveau du contact entre les « unités céramiques » avec une densification limitée afin de conserver un taux de porosité élevé.

II.8.3. Extrusion

Opération d'accroissement de la taille par compactage sans l'ajout d'un agent liant car le produit concerné est sensible à l'humidité et à la chaleur ; Il s'agit d'unir une poudre (ou d'un mélange) uniquement par agglomération des particules de solides sous l'action d'une contrainte mécanique. Dans

ce cas, la granulation est effectuée sans apport de liant sous forme de liquide de mouillage, ou avec l'aide d'un agent liant sec (amidon, gélatines, sucres, dérivés celluloses...). Ce procédé permet donc d'éviter l'étape de séchage. Il est mis en œuvre dans des presses à rouleaux. La poudre ou le mélange de poudres est alimenté via une trémie avec une vis sans fin entre deux rouleaux qui entraînent et compriment la poudre en réduisant le volume disponible et en exerçant une force déterminée sur le matériau (figure II.5).

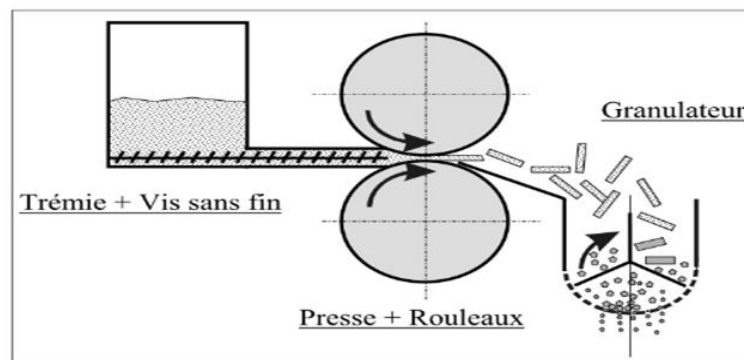


Figure III.5. Granulation sèche

II.8.4.Pastillage

Le pastillage consiste à assembler des particules de poudre sous une forme cylindrique de faible hauteur. La masse des pastilles ou comprimés est comprise entre 50 mg et quelques grammes. Le mélange, généralement bien formulé (cas d'un médicament formé par un principe actif, des diluants, lubrifiants, agglutinants, éventuellement déliants, ou désintégrant de formulation) est granulé, puis comprimé dans des machines entre deux poinçons; la pression de compression est de l'ordre de 200 à 10 000 bars. Les diluants sont des poudres inertes : amidon, sucre, produits minéraux (sels de Ca ou Mg); les proportions peuvent varier entre 10 et 90 %, rarement plus. La dilution est nécessaire soit parce que le produit actif a une trop grande activité, soit parce que les comprimés qu'il permettrait d'obtenir auraient un volume inadéquat pour une dose donnée de substance active.

Cette technique est utilisée afin de réunir des particules solides d'origine quelconque pour augmenter leur masse volumique et que l'on appelle le *compactage*. Le compactage peut également être une opération essentielle et obligatoire, empêchant toute friabilité, et au contraire exigeant une bonne résistance pour l'obtention de produit poreux (comme par exemple dans la préparation des pastilles de

matériaux en poudre en vue de les analyser par infrarouge, les produits cosmétiques.....les sols....les déchets. Comme il est montré sur la figure II.7.

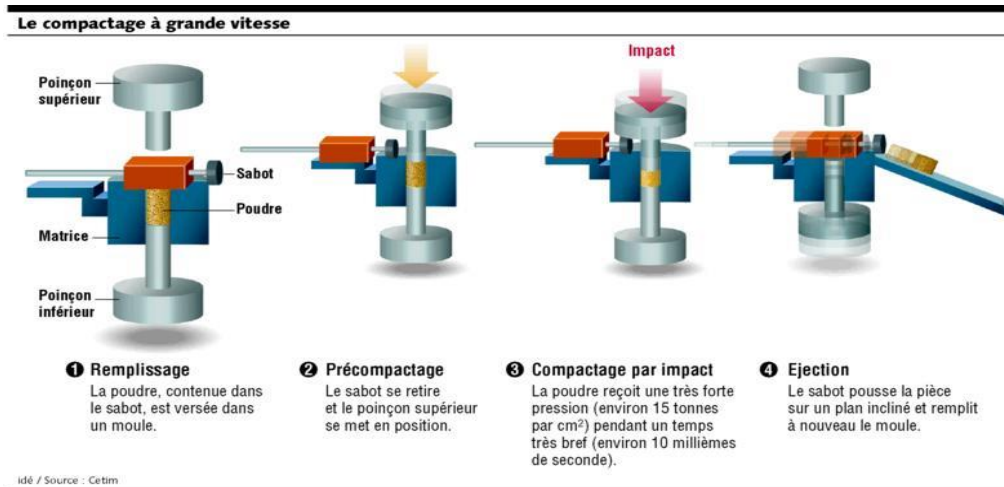


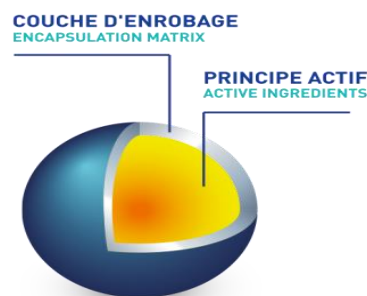
Figure II.6. Granulation avec compression

II.9. Enrobage

L'enrobage consiste à recouvrir un support solide (agglomérat) à l'aide d'une couche de produit plus ou moins épaisse et chimiquement inerte.

Le but de l'enrobage est de :

- permettre la libération maîtrisée ou ciblée d'un produit (principe actif) ;
- protéger l'agglomérat contre les agents extérieurs (humidité, oxygène, lumière, chocs, etc.) ;
- améliorer la coulabilité ou réduire le mottage ;
- masquer l'odeur, le goût ou la couleur, améliorer l'aspect, permettre l'identification du principe actif.



On distingue communément deux techniques d'enrobage : la *dragéification* et le *pelliculage* ou *l'enrobage à l'aide d'un produit filmogène*. Le principe est de répartir une dispersion ou une solution d'enrobage sur une masse de noyaux maintenus en mouvement, afin de permettre une répartition homogène de l'enrobage. Le solvant sera évaporé durant l'opération de séchage, ce qui permettra la

formation de l'enrobage. Pour obtenir un film d'épaisseur maîtrisée, il faut que la taille des gouttelettes soit proportionnelle à celle des agglomérats.

On peut réaliser aussi un enrobage de matières plastiques sur des objets immergés dans un lit fluidisé. Lorsqu'un objet chaud est plongé dans un lit fluidisé de particules plastiques, les particules se ramollissent, fondent et forment un revêtement autour de la surface de l'objet. Ce revêtement est robuste et durable et il peut être épais.

Exemple d'application : fertilisant pour gazon



les engrais à libération lente et contrôlée confèrent au gestionnaire de gazon un contrôle total. Ceci permet une diffusion efficace et précise des nutriments adaptée spécifiquement à votre gazon. des granulés d'azote sont tout d'abord enrobés de soufre. Les granulés sont ensuite encapsulés dans une membrane en polymère biodégradable.

L'infiltration d'humidité à travers cette membrane externe en polymère entraîne la libération d'azote. En fonction de l'épaisseur de l'enrobage, la libération de l'azote peut durer jusqu'à six mois. Même importantes, les variations de température ou d'humidité du sol n'occasionnent pas de grands changements dans le profil de libération de l'azote. Poly S garantit une croissance régulière et un gazon sain et bien vert, même dans des conditions de croissance chaudes et humides, ou sèches et froides.

PROCEDE DE FRAGMENTATION DES SOLIDES

II.10 Objectifs visés par la fragmentation

Les opérations de fragmentation, qui conduisent à réduire les dimensions caractéristiques d'un matériau solide, peuvent avoir divers objectifs parmi lesquels on peut citer de faciliter le stockage, le transport, le triage, le mélange (homogénéité) ou la dissolution, la réactivité chimique pour avoir une texture spécifique (granulométrie/ surface spécifique).

On distingue les termes suivants relatifs à cette réduction de taille:

- **Débitage:** réduction des gros blocs issus de mine ou de carrière en éléments de dimensions supérieures à 100 mm
- **Concassage:** réduction à des dimensions allant de 25 à 100 mm
- **Granulation:** réduction à des dimensions allant de 6.3 à 25 mm
- **Broyage:** réduction à des dimensions comprises entre 0.4 et 6.3 mm
- **Pulvérisation:** production de particules inférieures à 0.4 mm
- **micronisation:** réduction à des dimensions de l'ordre du micron
- **Défibrage:** fragmentation des matières fibreuses (bois, végétaux, ...)
- **Déchiquetage:** réduction par hachage des matières flexibles
- **Découpage:** sciage ou cisaillement pour obtenir des fragments réguliers

II.11. Définition de la fragmentation

La fragmentation mécanique des solides peut se définir comme l'ensemble des opérations (concassage, broyage,...) ayant pour but de réaliser, grâce à l'application des contraintes mécaniques externes soit :

- la division d'une masse en fragments, de dimension maximale déterminée

- la réduction d'un solide déjà fragmenté en éléments de plus petit volume (taille).

Considérons un corps solide de dimension moyenne quelconque soumise à une force extérieure (F_e) de module supérieur à sa résistance à la fragmentation (R). Il y a donc écrasement de ce corps par rupture de sa forme de liaison interne (F_i), entraînant la formation d'autres nouveaux corps solide de forme réduite.

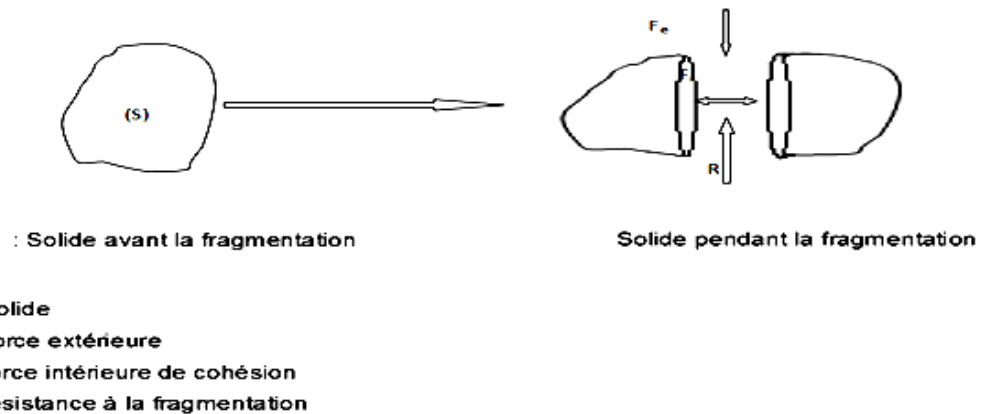


Figure II.7. Fragmentation d'un solide

II.12. Fracture et mécanismes de rupture des matériaux

L'application d'une contrainte croissante à un solide, engendre dans celui-ci des déformations qui aboutissent à la fragmentation. Pour des cas idéaux, la courbe représentant la déformation en fonction de la contrainte (figure II.8) permet de distinguer deux grands domaines.

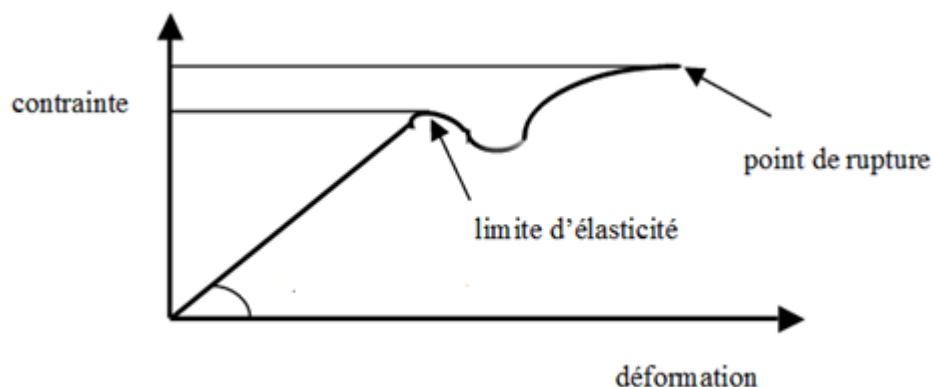


Figure II.8. Relation contrainte/ déformation d'un matériau

- Dans une première zone, la déformation est une fonction linéaire de la contrainte, la déformation y est élastique et donc réversible.
- Si on augmente la contrainte et que l'on dépasse un point appelé limite d'élasticité, on entre dans un domaine dit de plasticité, dans lequel les déformations sont irréversibles. Ce domaine de plasticité se termine par un point de rupture ; la cassure du matériau intervient au franchissement de ce point.

Les courbes déformation-contrainte, (figure précédente permettent de classer les matériaux en trois grandes catégories :

- Les matériaux "fragiles" (cassants) ne présentent pas de domaine d'élasticité, ils se brisent au choc sans absorber beaucoup d'énergie ; les morceaux peuvent être réassemblés comme un puzzle pour redonner la forme initiale : le verre.
- Les matériaux "semi-fragiles" ces matériaux se cassent en présence de défauts (une entaille peut conduire à la rupture) avec un début de déformation plastique : Le mortier
- Les matériaux "malléable" qui présentent une grande plasticité et présentent de grandes déformations avant d'atteindre le point de rupture : L'or et l'argent.

Des forces de contact appliquées sur un volume solide créent dans celui-ci un réseau de fissures qui va, de par sa densité et son orientation, conditionner la taille et la forme des fragments qui résulteront après la rupture du matériau. Le résultat d'une opération de fragmentation est donc la conséquence d'une part des propriétés du solide fragmenté, et d'autre part de l'orientation et de l'intensité des contraintes que lui appliquent l'outil de fragmentation.

II.13. Modes de fragmentation

La fragmentation des solides est réalisée au cours d'opérations mécaniques qui, selon la nature de la matière et le type d'appareil utilisé, font appel à différents types de contraintes (figure II.9), à savoir :

II.13.1. La compression (écrasement), notamment dans le concassage ; c'est une opération de fragmentation ayant lieu entre une plaque fixe et une autre mobile afin d'obtenir des gros fragments, en utilisant des concasseurs à mâchoires ; (cas de produits durs et cassants) (figure II.9. A).

II.13.2. La percussion (ou choc), surtout dans la pulvérisation, mais aussi dans le broyage moyen ou fin; elle se fait par choc (figure II.9.B), sous l'action d'un corps broyant (figure II.9.C) ou même lors de la percussion de deux particules se déplaçant à grande vitesse (figure II.9.D) Méthode indiquée pour des produits durs et semi-durs

II.13.3. Le cisaillement ; obtenu lorsque le solide est placé entre deux parties légèrement décalées sur lesquelles on exerce une force opposée qui va partager le matériau. Ce mode est associé à l'arrachement, notamment pour les matières molles et friables (figure II.9.E).

II.13.4. L'attrition ou abrasion (usure par frottement) dans le broyage moyen ou fin de produits tendres. Il résulte du mouvement obtenu par glissement de deux parties rigides entre lesquelles sont placées des particules solides (figure II.9.F).

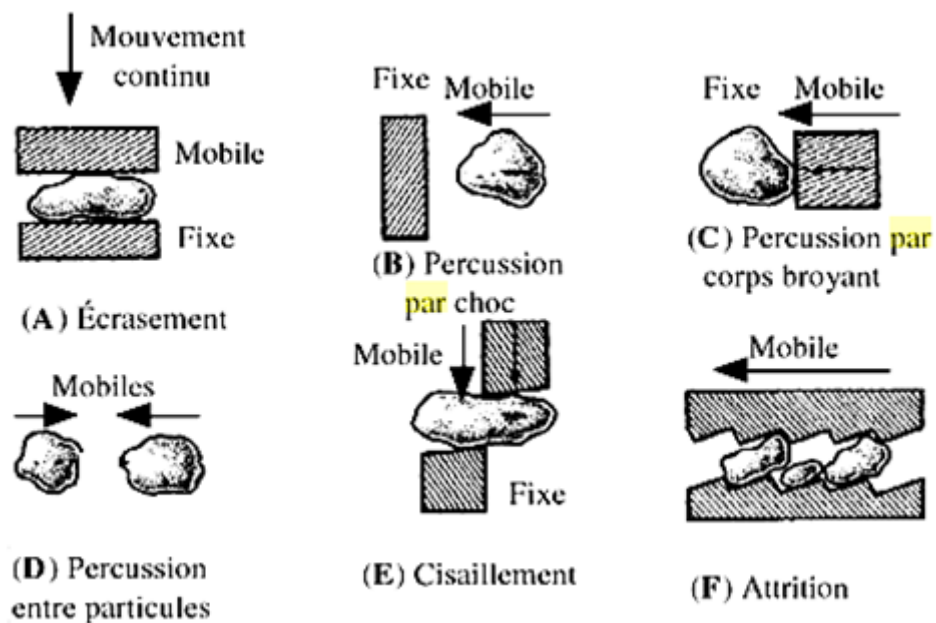


Figure II.9. Différents modes de fragmentation des solides

Ces divers modes d'action peuvent être mis en œuvre seuls ou simultanément.

Pour les substances très dures, la compression et la percussion, sont très efficaces. Pour les substances friables, le processus par cisaillement est préférable.

II.14. Les grandeurs caractéristiques

Pour caractériser une opération de broyage, on définit deux grandeurs spécifiques.

II.14.1. Taux de réduction

Ce facteur se définit comme le rapport des dimensions des particules (D) avant et après fragmentation (d) selon la relation suivante:

$$R = D/d$$

D : diamètre moyenne des morceaux d'alimentation [mm] ;

d : diamètre moyen des morceaux après traitements [mm] :

D et d sont des paramètres fondamentaux pour l'opération de fragmentation.

II.14.2. Energie de fragmentation

L'énergie de fragmentation (E) dépend fortement des propriétés du solide à fragmenter, du taux de réduction et de l'appareil utilisé. On dispose de lois empiriques pour calculer l'énergie E requise par unité de masse pour passer d'un diamètre de particules D à un diamètre d après fragmentation :

- la loi de Rittinger, où l'énergie dépensée est proportionnelle à la somme des nouvelles surfaces créées :

$$E = k_R \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$$

- la loi de Kick, suppose que l'énergie dépensée est proportionnelle au volume du corps fragmenté :

$$E = k_K \cdot \ln \left(\frac{D}{d} \right)$$

- la loi de Bond, est réputée plus précise que les deux précédentes :

$$E = k_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right)$$

Les "constantes" k_R , k_K et k_B sont caractéristiques du produit et de l'appareil.

Il faut savoir que l'énergie nécessaire à la fragmentation n'est qu'une faible partie de l'énergie dépensée (moins de 3%), le reste sert à vaincre les frottements, déplacer les produits, absorber les déformations élastiques..

Limites et domaine de validité des lois d'évaluation de l'énergie de fragmentation

- **Loi de Rittinger**
- utilisée pour une granulométrie faible ; particules fines de l'alimentation
- **$dp < 0.05 \text{ mm}$**
- énergie surestimée pour les grosses particules.
- **Loi de Kick**
- La loi de Kick est principalement valable pour le broyage grossier impliquant la rupture par déformation
- **$dp > 50 \text{ mm}$**
- **Loi de Bond**
- La loi de Bond est utilisable dans une gamme de taille intermédiaire entre les lois de Rittinger et de Kick.
- **$0.05 < dp < 50 \text{ mm}$.**

Avec d_p ; diamètre moyen des particules de l'alimentation

Il existe toute une panoplie d'appareils qui permettront de réduire les dimensions d'un solide. Chaque appareil recouvre un domaine d'utilisation spécifique et il est nécessaire de prendre en compte des critères tels que :

-la taille des fragments et le degré de finesse que l'on veut avoir

L'aptitude à la fragmentation de la substance à traiter (la finesse, la dureté et l'humidité du produit)

- La production horaire escomptée
- le cout en investissement...etc

En réalité, c'est les contraintes dimensionnelles des produits qui conditionnent le choix de l'appareil adéquat. Ces appareils de fragmentation peuvent être ainsi classés en quatre classes conduisant à des solides de plus en plus fin :

- 1- Les concasseurs : pour une fragmentation grossière
- 2- Les broyeurs : pour obtenir une fragmentation assez fine
- 3- Les pulvérisateurs : pour avoir des poudres assez fines

4- Les désintégrateurs : pour fragmenter les matières fibreuses.

II.15. Types d'appareils

II.15.1.Appareils fonctionnant par compression et écrasement

a. Concasseurs à mâchoires

Ce type d'appareil fonctionne par une simple compression et ils sont utilisés pour les matières dures. Le solide est comprimé entre une mâchoire fixe striée et une mâchoire mobile disposée en V et animée d'un mouvement alternatif oscillant. Le concassage se produit par compression entre les deux mâchoires et le produit est éliminé par gravité. C'est un appareil robuste qui peut réduire des solides de plusieurs tonnes en fragments de 100 à 200 cm (Figure II.10).

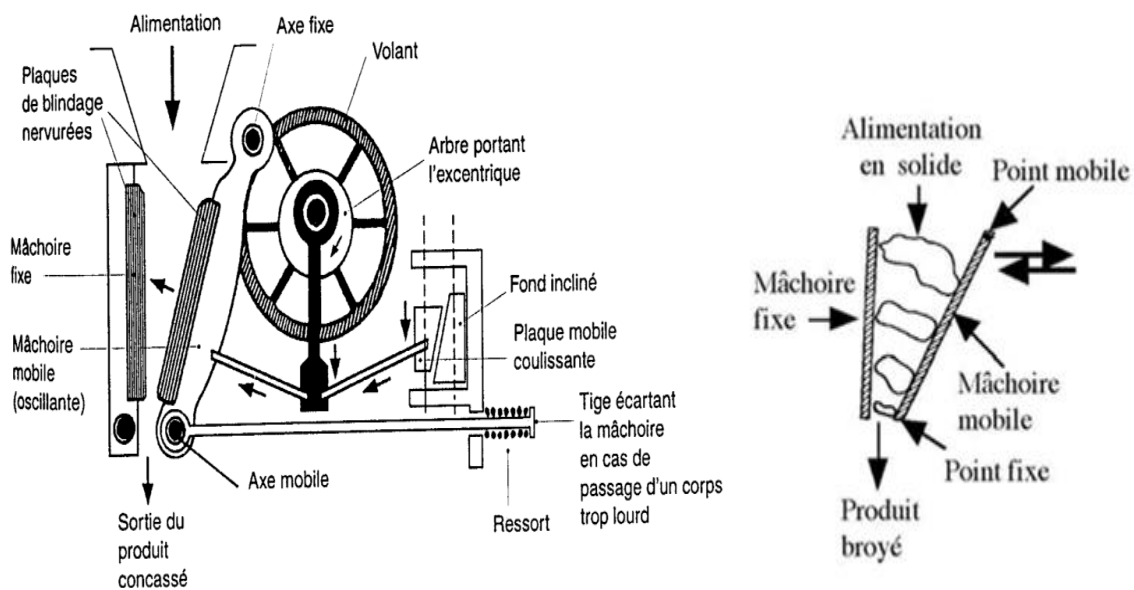


Figure II.10. Concasseur à mâchoires

b. Concasseurs giratoires

Les concasseurs giratoires sont, eux, constitués de deux cônes emboîtés tournant et oscillant dans une cuve très robuste. Le cône extérieur est fixe et son sommet est dirigé vers le bas. Le sommet du cône intérieur mobile est dirigé vers le haut. Comme les axes des deux cônes ne coïncident pas exactement,

le mouvement de précession rapproche et écarte les parois. Les matières à concasser sont fragmenter par écrasement entre les deux cônes fixes striés à l'intérieur de laquelle se déplace un rouleau tronconique inversé par rapport à la paroi et animé d'un mouvement excentrique (figure II.11). Cet appareil est utilisé pour les produits durs et permet de traiter des produits de plus faible dimension.

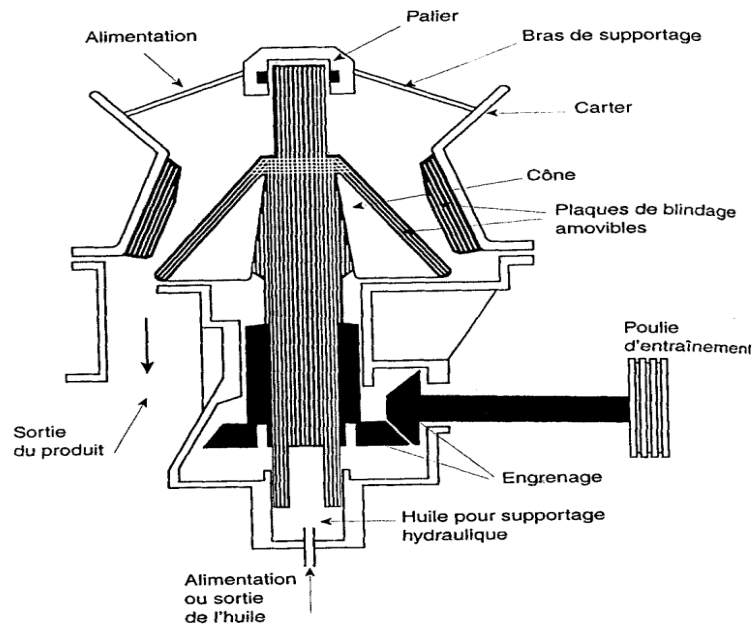


Figure II.11. Concasseur giratoire

c. Broyeurs à meules

Les broyeurs à meules (bowl mills) opèrent par écrasement de la matière entre un ou plusieurs rouleaux et une piste circulaire. La pression est obtenue soit par gravité (meules lourdes) soit par la force centrifuge, soit par des ressorts. Il existe plusieurs types de broyeurs à meules, comme il est mentionné ci-après. Enfin le broyeur à cylindres convient pour les matériaux friables ; les cylindres peuvent être lisses ou non, il y a alors attrition en plus de la compression), ils tournent en sens opposé, et généralement à la même vitesse (figure II.12).

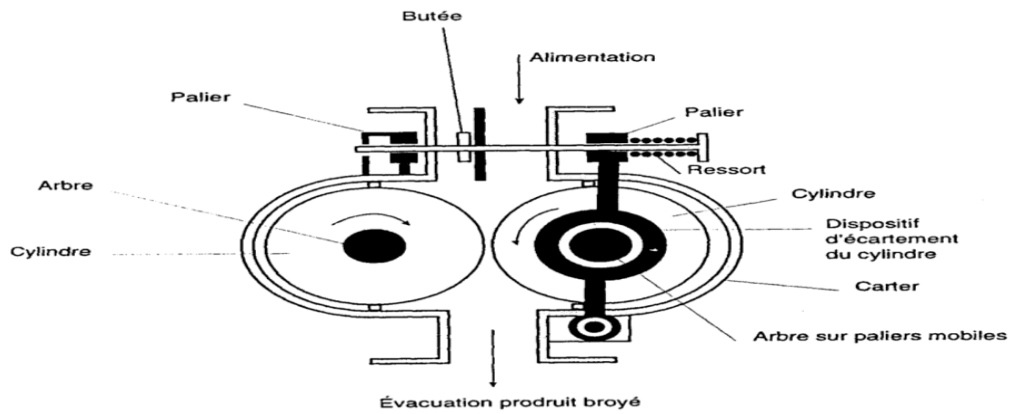
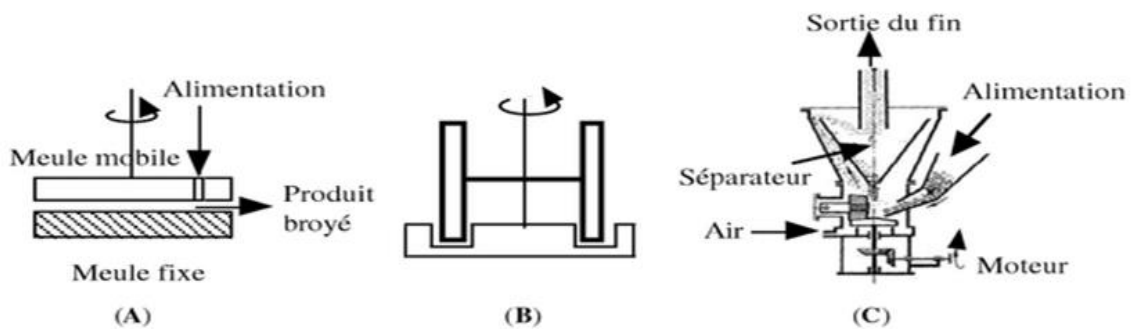


Figure II.12. Broyeur à cylindre

Selon la disposition des cylindres, on peut avoir différentes configurations du broyeur figure II.13.



Broyeurs (d'après R. Darrigo, 1970, *Notions de Génie Chimique, 1-Traitement des solides*, Armand Colin Éd. Paris).

(A) À meules horizontales ; (B) À meules verticales ; (C) À meules fixes et à sole mobile.

Figure II.13. Différentes configurations des broyeurs cylindriques

II.15.2. Appareils fonctionnant par impact- percussion

La fragmentation dans le broyeur à marteaux (Figure II.14) est obtenue par chocs répétés contre les parties fixes ou mobiles. Lorsque le produit est suffisamment fin, il est recueilli à travers la grille inférieure.

Ce type de broyeur convient pour des produits friables.

Le principe du broyeur à broches (Figure II.15) est similaire, toutefois les broches sont fixes. Ce broyeur convient pour des matières fibreuses.

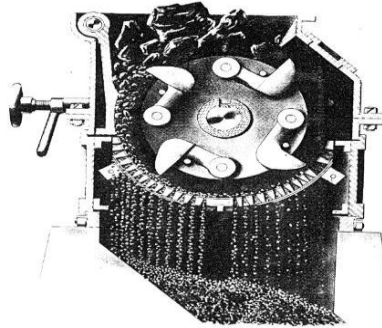


Figure II.14. Broyeur à marteaux

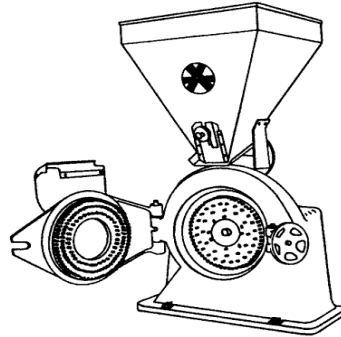


Figure II.15. Broyeur à broches

Le broyeur à boulets est très utilisé pour obtenir des produits fins. Son principe est représenté sur la Figure II.116. Pour un bon fonctionnement, le taux de remplissage ne soit pas excéder 30 %. Comme illustré sur la Figure 10, la vitesse de rotation doit être judicieusement choisie afin que les chocs soient efficaces.

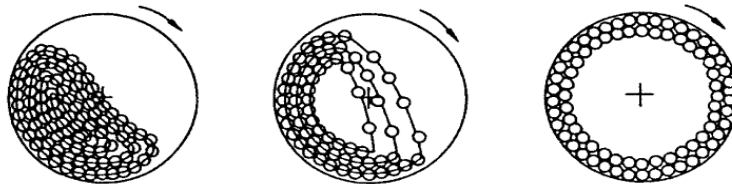


Figure II.16. Mouvement des boulets

Le broyeur à boulets (figure II.17) est simple à mettre en œuvre, mais il consomme beaucoup d'énergie. Le matériau des boulets doit être compatible avec la charge à broyer, car leur usure provoque une pollution du produit. Enfin ce type de broyeur provoque un échauffement intense, que doit pouvoir supporter le produit.

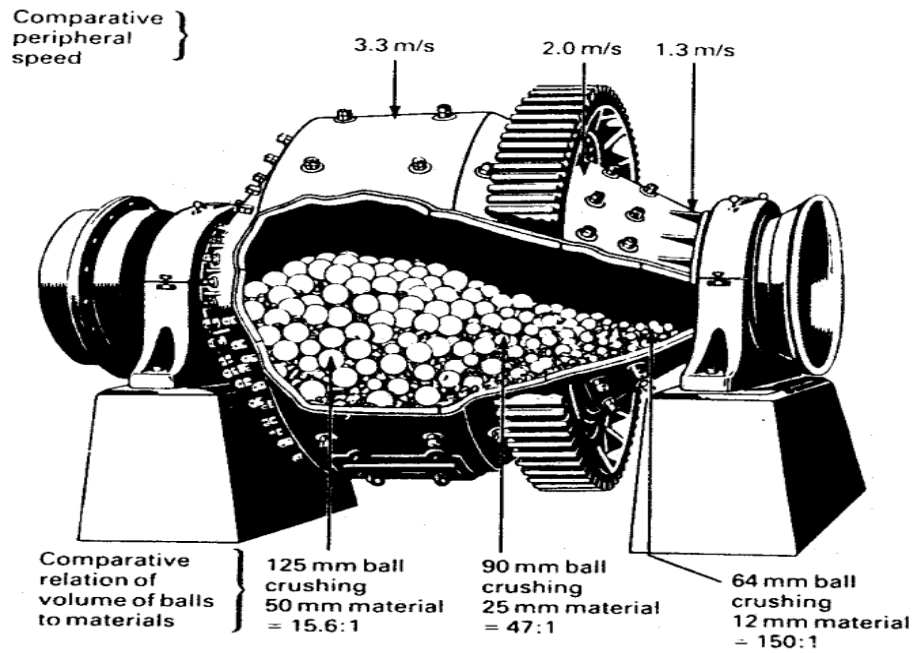


Figure II.71. Broyeurs à boulets

Le broyeur à barres est représenté sur la Figure II.18. Il repose sur le même principe que le broyeur à boulets. La différence vient simplement de l'utilisation de barre plutôt que de boulet. Les barres sont généralement faite en acier très résistant (Haut % Carbone). Vu la forme géométrique du corps broyeur, le broyeur à barres permet d'obtenir des granulats globalement plus gros et plus hétérogènes

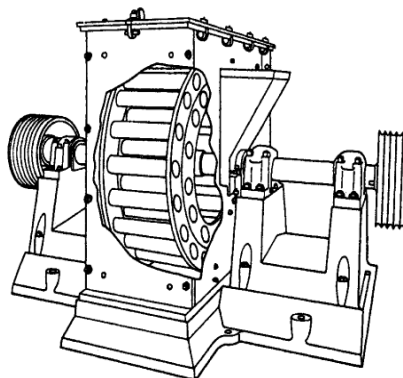


Figure II.18. Broyeur à barres

Concernant ce type d'appareils, la vitesse de rotation efficace du broyeur est définie par l'équation suivante ;

$$\omega_{\text{efficace}} = \frac{23}{\sqrt{R - r}} = \frac{32}{\sqrt{D - d}}$$

où R et D sont le rayon et le diamètre du broyeur et r et d le rayon et le diamètre des boulets.

La vitesse critique est donnée par l'équation ci-dessous ;

$$\omega_{\text{Critique}} = \frac{29,01}{\sqrt{R - r}}$$

II.15.3. Appareils fonctionnant par attrition et frottement

. Le broyeur à jet d'air (Figure II.19) permet d'obtenir des poudres très fines (microniques).

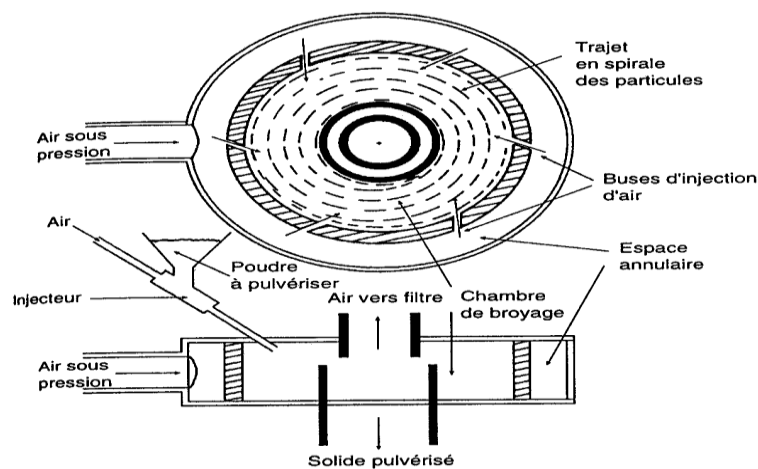


Figure I.19. Broyeur à jet d'air

II.15.4. Appareils fonctionnant par coupure / cisaillement

Le broyeur à couteaux (Figure II.20) est constitué de lames montées sur un rotor (ou un stator).

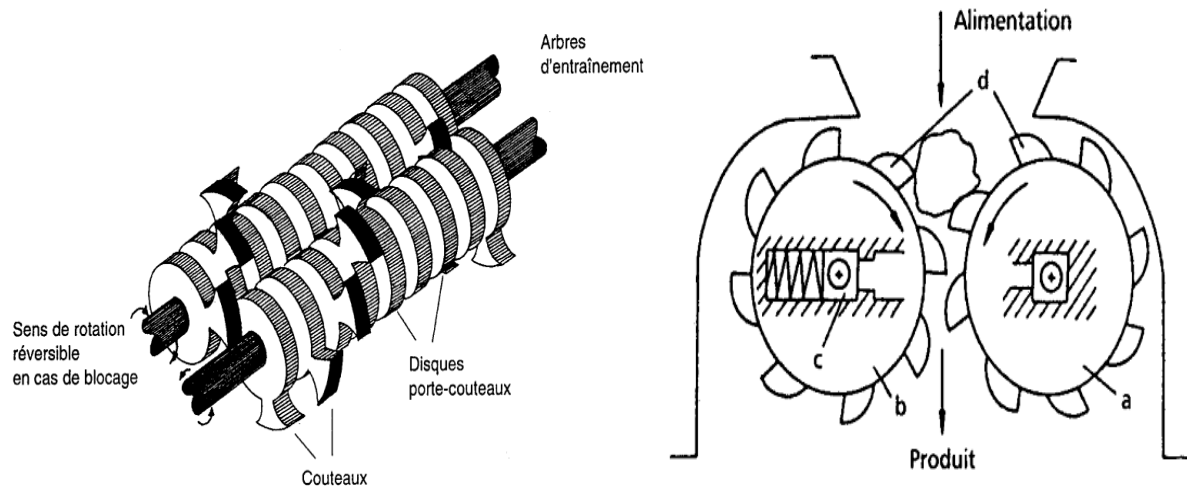


Figure II.20. Broyeur à couteaux

II.16 Application de l'opération de fragmentation dans l'industrie

Cette opération est importante dans le domaine de l'industrie puisqu'elle contribue énormément en assurant :

- La réduction du volume, donc des frais de stockage.
- La résolution du problème de la récupération des fines particules produites notamment lors d'un broyage;
- La suppression de la poussière et de tous ses inconvénients qui peuvent être très importants, notamment sur plan de l'hygiène, de la sécurité et de l'environnement, surtout s'il s'agit de produits toxiques ou inflammables;
- Une meilleure coulabilité qui permet de rendre plus facile les conditions de transport et de manutention.
- Le maintien de l'uniformité du produit, notamment s'il est formé d'un mélange hétérogène;
- La facilité du dosage du produit lorsqu'il est utilisé par fractions correspondant à un nombre limité des agglomérats formés (produits alimentaires et pharmaceutiques par exemple);
- Une réponse à la demande lorsqu'une forme compacte déterminée est indispensable pour l'utilisation (pâtes alimentaires, bonbons).

II.17. Classification des solides

La fragmentation des particules est aléatoire, car elle dépend largement de la probabilité d'impact entre corps broyants et particules. Le produit obtenu contient alors un large spectre de dimensions de particules. Il est donc habituel de coupler les broyeurs à des unités de classification par dimensions (hydrocyclones ou tamis vibrants) pour obtenir un produit mieux calibré. Un broyeur ne peut en une seule passe pulvériser complètement le matériau entrant. Il faut donc procéder à une séparation et à un recyclage, ou encore laisser stagner le produit non conforme à l'intérieur du broyeur jusqu'à l'obtention du résultat désiré, en n'extrayant de la machine (par un courant d'air dosé) que les seuls produits ayant atteint la finesse souhaitée.

II.17.1. Type de circuits de fragmentation

On fait la distinction entre une fragmentation en circuit ouvert (produits passant une seule fois dans un broyeur donné) et une fragmentation en circuit fermé (produits contrôlés dès leur sortie du broyeur avec retour à l'entrée de ce dernier des fragments insuffisamment réduits).

II.17.1.a. Circuits ouverts

Dans les circuits ouverts, le produit du fragmenté constitue aussi le produit du circuit. Dans ce type de circuit sans classificateur, on ne peut régler la granulométrie du produit qu'en agissant sur les variables d'entrée de l'appareil. Le débit d'alimentation doit être assez faible pour assurer aux particules un temps de séjour dans la machine qui permette d'éliminer les plus grosses particules, mais cela peut donner lieu au sur-broyage d'autres particules. En général, on obtient des répartitions granulométriques de grande dispersion et une utilisation non optimale de l'énergie de l'opération.

II.17.1.b. Circuits fermés

Dans les circuits fermés, le matériau de dimensions convenables est immédiatement retiré du circuit par un classificateur alors que les morceaux grossiers retournent au broyeur (*charge circulante*) (figure II.21).

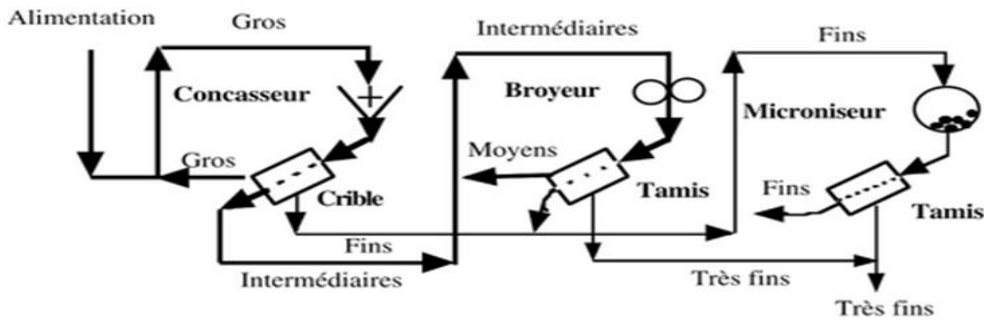


Figure II.21. Fragmentation en circuit fermé

La propriété qui diffère d'une particule à l'autre peut être la taille, la masse volumique, voire les deux, ou encore une propriété magnétique ou électrostatique. Ces différences ont été exploitées pour séparer les particules obtenues par fragmentation.

II.17.2. Classification par la taille des particules

Appelée tamisage ; c'est la plus ancienne des méthodes d'analyse granulométrique et de classification de particules. Elle possède des avantages de simplicité et de rapidité de mise en œuvre. La base de la méthode est le triage de particules par des tamis avec des ouvertures de taille déterminée. Les toiles de tamis, ces surfaces utilisées pour la classification qui en constituent la partie essentielle, sont souvent fabriquées par tissage de fils métalliques. Une fraction de particules X_R est retenue par le fond du tamis. Cette fraction est appelée **refus** (**R** ; X_R). L'autre fraction traverse (X_P) les ouvertures ; elle correspond au **passant** (ou **tamisat**, (**P** ; X_P)). La forme des ouvertures est le plus souvent carrée et est appelée **maille** (figure II.22). Mais il existe des ouvertures circulaires que l'on rencontre fréquemment dans les tamis industriels constitués de plaques métalliques perforées. Dans le domaine des matériaux, les particules ne sont pas forcément sphériques. Elles peuvent avoir par exemple des formes lamellaires ou allongées.

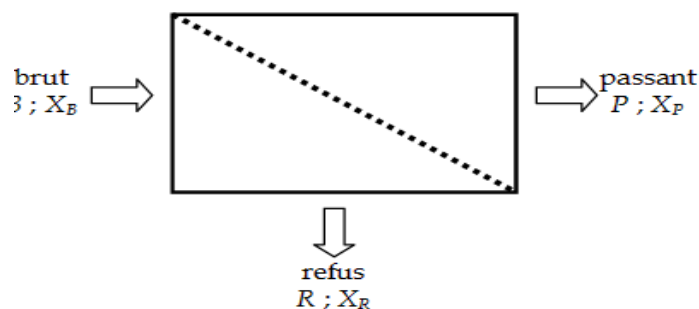


Figure II.22. Principe du tamisage (P : masse des fragments passant le tamis avec une fraction X_P , R : masse des fragments retenus par le tamis avec une fraction X_R)

II.17. 3. Classification par propriété magnétique et électrostatique

1. Le tri magnétique (Figure II. 25) est notamment exploité pour les ordures. Il faut une source de champ magnétique, une zone où ces forces agissent, un dispositif de circulation et des pots de récupération

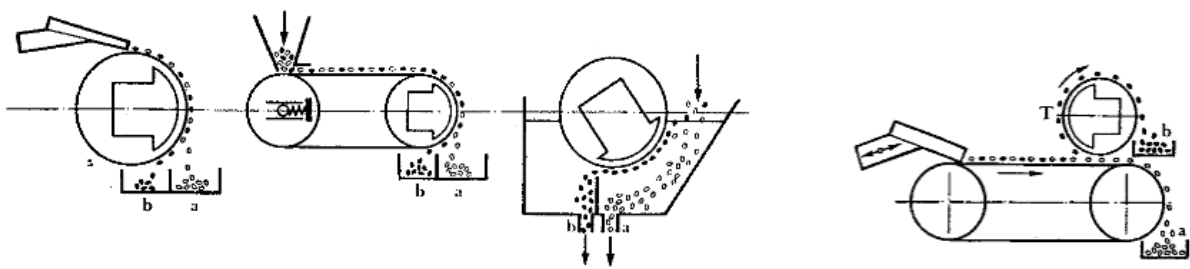


Figure II.25. Principe des appareils de tri magnétique

2. Pour effectuer un tri électrique, soit on exploite l'éventuelle différence de conductivité des différents types de particules (Figure II.26.a), soit on communique une charge électrique aux particules non conductrices, le plus souvent par frottement (Figure II.26.b), ou encore par ionisation.

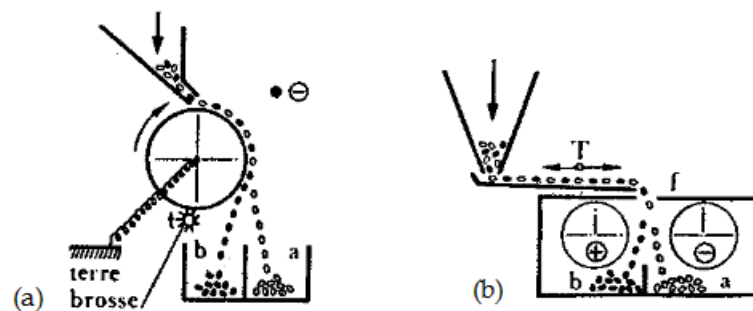


Figure II.26. Séparation par la différence de conductivité (a). Séparation de particules non-conductrices

II.18.Appareillage de tamisage

Les appareillages pour le tamisage doivent répondre à certains critères à savoir ; une surface tamisante importante, le déplacement du brut par inclinaison, favoriser l'accès des particules à la surface tamisante par rotation ou vibrations et assurer le décolmatage par brossage ou injection d'air comprimé à contre-courant. Il existe par conséquent diverses technologies de tamis industriels.

1. Dans certains appareils rudimentaires (cribles) on jette simplement le brut (particules assez grosses) sur une surface inclinée immobile ;
2. les tamis vibrants (Figure II .23) permettent de traiter des particules de 0,3 à 120 mm, avec des débits pouvant atteindre plusieurs centaines de tonnes par heure. Le déplacement du brut est obtenu grâce à l'inclinaison du tamis. Pour obtenir parallèlement plusieurs classes de particules, on les superpose, comme illustré sur la Figure II.23.

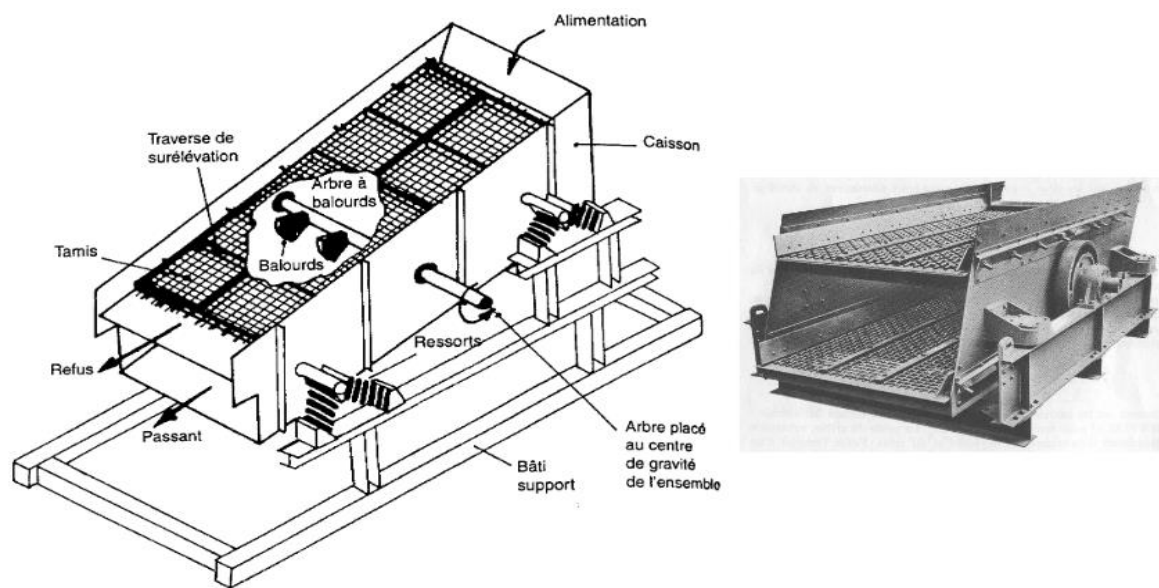


Figure II. 23. Tamis vibrant Principe de fonctionnement et appareillage

3. Les tamis rotatifs, également appelés tambours ou trommels (Figure II.24) ont généralement une plus faible capacité et une plus faible efficacité que les tamis vibrants, mais ils permettent d'obtenir plusieurs classes avec un encombrement réduit. Le déplacement est obtenu soit par l'inclinaison du tambour, soit par sa forme conique. Pour obtenir plusieurs classes de particules, on augmente la taille des orifices de l'entrée vers la sortie (Figure II.24), ou bien on superpose des tambours concentriques.

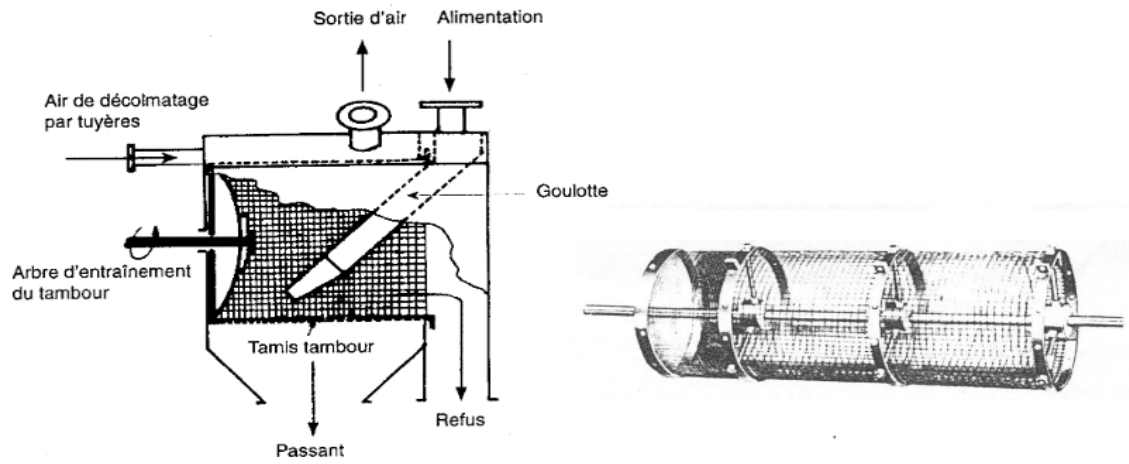
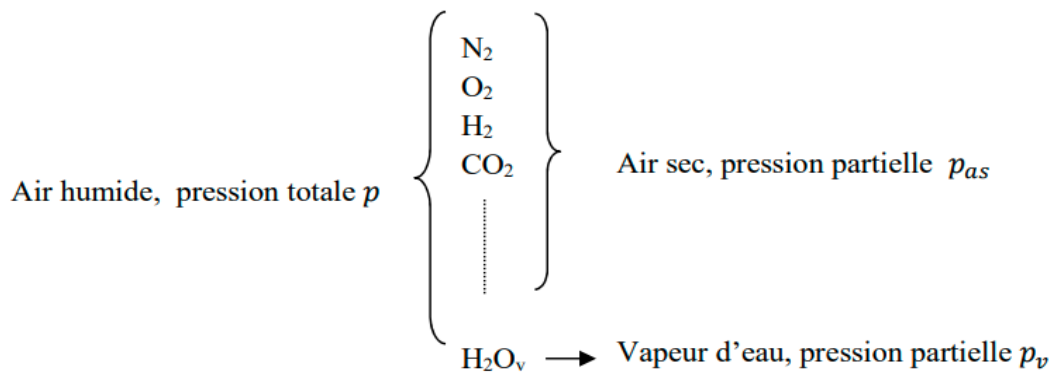


Figure II. 24. Tamis rotatif, principe et appareillage

OPERATIONS D'HUMIDIFICATION

III.1. Généralités

Les principaux constituants de l'air sont l'oxygène, l'azote et la vapeur d'eau. Chaque constituant s'y trouve avec une concentration P .



III.2. Types d'air

III.2.1. Air sec

On appellera air sec un air ne contenant pas de vapeur d'eau. L'air sec est un mélange de gaz dans des proportions connues et invariables. (on supposera cet air non pollué par des fumées). La composition de l'air sec est : environ 78 % d'azote et 21 % d'oxygène. D'autres gaz (gaz rares, CO_2 ... etc...) entrent dans la composition dans de très petites proportions. Ces pourcentages s'entendent comme fractions molaires non comme pourcentages en masse.

III.2.2. Air humide

L'air qui nous entoure est généralement humide dans des proportions variables bien que toujours très petites, c'est à dire qu'il contient une petite quantité de vapeur d'eau sous faible pression partielle.

— L'air sec est loin de son point critique et sera assimilé au gaz parfait.

— La vapeur d'eau est sous très faible pression partielle (qq millibars) et sera ainsi assimilée à un gaz parfait bien que proche de la saturation

L'air humide est un mélange de deux gaz (d'air sec et de la vapeur d'eau) assimilés à des gaz parfaits à une température T et occupant un même volume V . Alors d'après la loi de DALTON :

La pression du mélange est égale à la somme des pressions partielles des deux constituants :

On écrit : $P = P_{AS} + P_V$

Avec

P : La pression totale de l'air humide

P_{AS} : La pression partielle de l'air sec

P_V : La pression partielle de la vapeur d'eau

III.2.3. Air saturé

La quantité de vapeur d'eau présente dans l'air humide (ou encore sa pression partielle) varie de 0 à une valeur maximum dépendant de la température. On dit que l'air est saturé lorsque la pression partielle de la vapeur d'eau est égale à la pression de vapeur saturante correspondant à la température T de l'air humide. Cet état représente la limite supérieure de la quantité de vapeur d'eau pouvant être présente dans l'air à cette température. Toute quantité d'eau rajoutée en maintenant la température ne peut l'être que sous forme liquide. En effet on voit bien sur le diagramme des phases présenté sur la figure IV.1 que si l'on est à la température T_0 la pression de la vapeur d'eau ne peut dépasser $P_{vs}(T_0)$. A une pression supérieure, l'eau ne peut être qu'à l'état liquide.

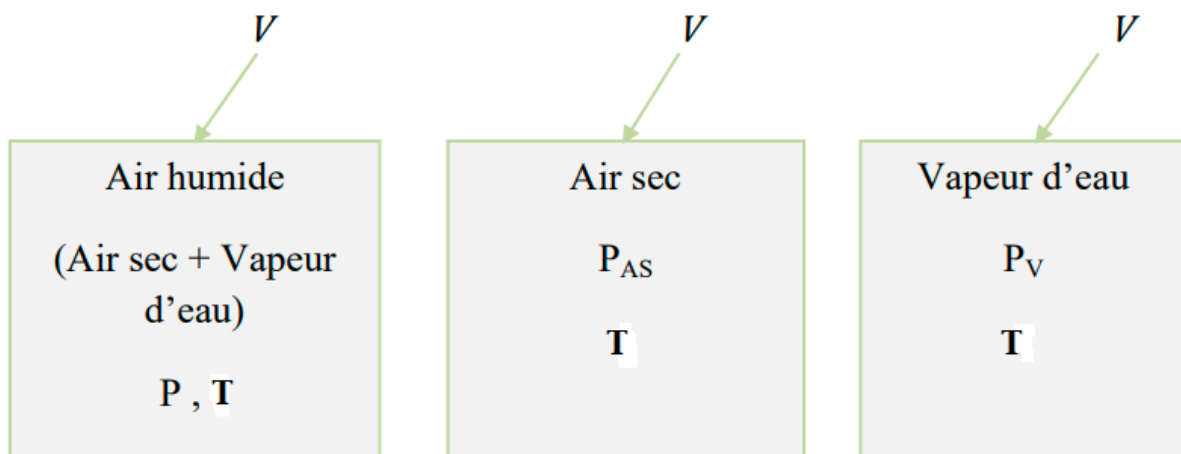


Figure IV. Air humide

III.3. Paramètres caractérisant l'air humide

III.3. a. La pression partielle de vapeur d'eau et d'air sec

La masse de vapeur d'eau dans l'air humide est directement liée à la pression partielle de la vapeur d'eau P_V . La pression partielle d'un composant d'un mélange assimilé à des gaz parfaits est la pression qu'aurait ce composant s'il occupait seul le volume total du mélange, à même température.

D'après l'équation d'état des gaz parfaits, on peut écrire :

$$P_v = \frac{m_v R_v T}{V} \quad \text{pour la vapeur d'eau} \quad R_v = \frac{R}{M_v}$$

$$P_{AS} = \frac{m_{AS} R_{AS} T}{V} \quad \text{pour l'air sec} \quad R_{AS} = \frac{R}{M_{AS}}$$

Avec M_v : masse de vapeur d'eau dans l'air humide

M_{AS} : masse de l'air sec

R_v et R_{AS} : les constantes massiques de la vapeur d'eau et de l'air sec respectivement [J / kg K]

R : la constante universelle des gaz parfaits [J / mole .K]

M_v et M_{AS} : les masses molaires de la vapeur d'eau et de l'air sec respectivement [kg / mole]

$$\text{ON obtient : } P = \left(\frac{m_{AS} R_{AS} + m_v R_v}{V} \right) T$$

III.3. b. La pression partielle de vapeur saturée

C'est la pression de vapeur maximale que l'air peut supporter à une température donnée. Si on désire augmenter quantité de vapeur, cette vapeur passe à l'état de s saturée est notée PVS, elle s'exprime en [Pa]

III.3. c. La température sèche

Elle est définie comme étant la température réelle de l'air humide T observée à l'aide d'un capteur de température ou par un thermomètre non affecté par l'humidité d'air. On la mesure avec le thermomètre peut-être à mercure ou à alcool. Ces derniers, pour la mesure, utilisent le principe de dilatation sous l'effet de la température (figure III.2)

III.3. d. La température humide

C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'une gaze mouillée, balayé par de l'air en mouvement et protégée du rayonnement. À la surface du thermomètre à bulbe humide, l'eau se vaporise. La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air. L'ensemble thermomètre sec plus thermomètre humide est appelé Psychromètre noté T_h exprimée en °C ou en K (figure III.2).

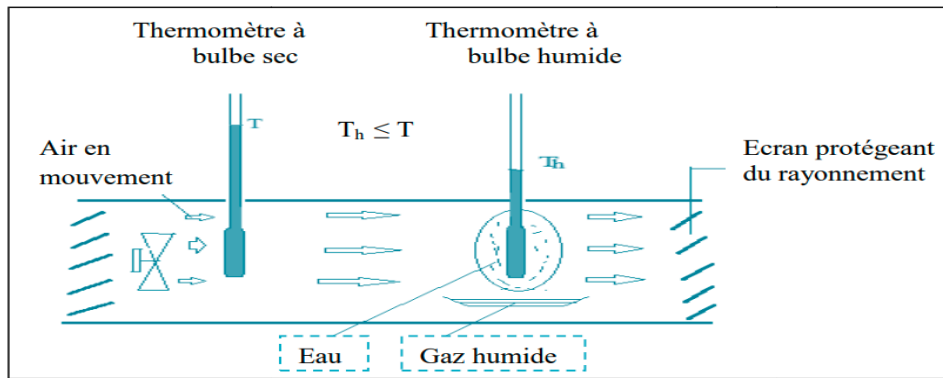


Figure III.2. Principe du Psychromètre

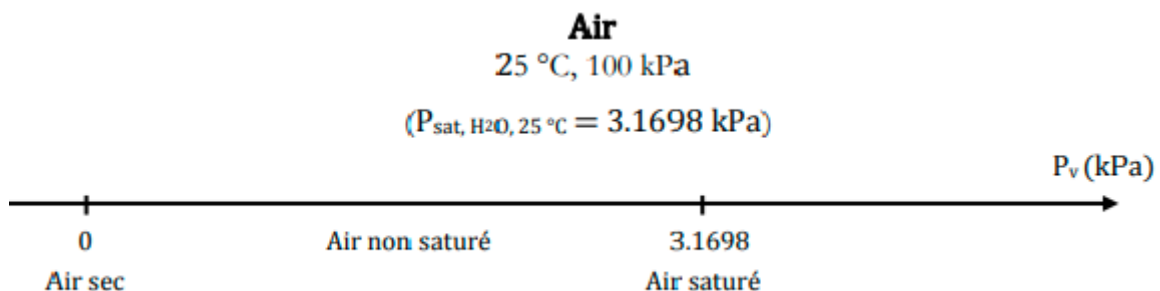
III.3.e. Humidité absolue et humidité relative de l'air

La quantité de vapeur d'eau dans l'air peut être exprimée en termes d'humidité absolue ou d'humidité relative. L'humidité absolue est définie comme le rapport de la masse de vapeur à la masse d'air sec, soit :

$$Y = \frac{m_v}{m_a} \quad [\text{kg de vapeur d'eau/ kg d'air sec}]$$

Parce que la vapeur d'eau et l'air sec se comportent comme un gaz parfait, l'humidité absolue peut aussi être exprimée en termes de pressions :

$$Y = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a}$$



Considérons, par exemple, 1 kg d'air sec. Cet air ne contient, par définition, aucune humidité. Son humidité absolue est donc de zéro. On se met alors à y ajouter continûment de la vapeur d'eau. Son humidité absolue augmente et, à un certain point, l'air ne peut plus absorber d'humidité sans qu'il y ait condensation. L'air est saturé de vapeur : on appelle cet air "air saturé". On peut estimer la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air saturé se trouvant à une température et à une pression données en

remplaçant la pression de vapeur P_v dans l'équation 8 par la pression de saturation $P_{sat} = P_g$ déterminée pour cette même température :

$$Y_{sat} = \frac{0.622 P_{sat}}{P - P_{sat}}$$

La quantité d'humidité dans l'air agit sur le bien-être physique. En fait, le bien-être dépend de la quantité d'humidité que l'air contient (m_v) par rapport à la quantité maximale qu'il peut contenir ($m_{sat} = m_g$) à la même température. Le rapport de ces deux quantités est défini comme l'humidité relative Φ :

$$\Phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{P_g v / R_v T} = \frac{P_v}{P_g}$$

Application

Air

25 °C, 1 atm

($m_a = 1 \text{ kg}$; $m_v = 0.01 \text{ kg}$; $m_{vmax} = 0.02 \text{ kg}$)

Humidité absolue : $Y = 0.01 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg air sec}}$

Humidité relative : $\Phi = 50 \%$

En résumé, l'**humidité absolue** est la quantité de vapeur dans 1 kg d'air sec, alors **que l'humidité relative** est le rapport de la quantité de vapeur dans l'air à une température à la quantité maximale de vapeur que peut contenir l'air à la même température.

L'**humidité relative** varie de 0 pour l'air sec à 1 pour l'air saturé. On constate aussi que la quantité d'humidité que l'air atmosphérique peut contenir dépend de la température. Ainsi, l'humidité relative de l'air varie selon la température, même lorsque l'humidité absolue demeure constante.

III.3.f. L'enthalpie spécifique de l'air humide

Par définition, l'enthalpie spécifique de l'air humide, notée h , représente la quantité de chaleur (sensible + latente) contenue dans un air humide dont la masse d'air sec est de 1 kg .

-**Enthalpie spécifique de l'air sec h_{AS}** : Elle représente la quantité de chaleur qu'il faudrait fournir à 1 kg d'air sec pour élever sa température de 0 à T.

$h_{AS} = c_{pAS} T$, c_{pAS} : Capacité thermique massique de l'air sec

-Enthalpie spécifique de la vapeur d'eau h_v

Elle représente la chaleur totale qu'il faut fournir à 1 kg d'eau pris à 0°C pour le porter à l'état de vapeur à la température T

$$H_v = m_v c_{p_v} T + m_v L_v$$

$$h_v = c_{p_v} T + L_v$$

c_{p_v} : Capacité thermique massique de la vapeur d'eau [J / kg °C].

L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau [J / kgV]

-Enthalpie de l'air humide

Un mélange d'air humide contenant m_{AS} [kg] d'air sec et m_v [kg] de vapeur d'eau présente une enthalpie totale :

$$H = H_{AS} + H_v$$

$$H = m_{AS} c_{p_{AS}} T + m_v (c_{p_v} T + L_v)$$

L'enthalpie spécifique de l'air humide se calcule comme suit :

$$h = \frac{H}{m_{AS}} = c_{p_{AS}} T + Y(c_{p_v} T + L_v)$$

Avec h_{AS} et h_v : les enthalpies spécifiques de l'air sec et de la vapeur d'eau respectivement

III.3.J. Le volume Le volume spécifique

Le volume spécifique de l'air humide : C'est le volume occupé par le poids d'un kilogramme d'air sec dans un ensemble de conditions spécifiques

$$v = \frac{V}{m_{AS}} = \frac{1}{\rho}$$

Avec ρ : La masse volumique de l'air humide

III.3. h. Point de rosée

L'été, durant le jour, le soleil évapore l'eau, l'air atmosphérique est chauffé et se charge d'humidité. La nuit, la température de l'air atmosphérique baisse et son humidité relative augmente. Lorsqu'elle atteint 100 %, l'air atmosphérique ne peut plus retenir l'humidité. Toute baisse additionnelle de température entraîne de la condensation. La rosée du matin provient de l'humidité dans l'air qui, durant la nuit, s'est

condensée sur des surfaces froides comme le sol. À plus basse température, l'humidité dans l'air peut même se sublimer et former du givre.

Le point de rosée $T_{\text{rosée}}$ est défini comme la température à laquelle la condensation commence à se manifester lorsque l'air est refroidi à pression constante

Point de rosée = Température de saturation de la vapeur d'eau, qui correspond à la pression de vapeur, soit :

$$T_{\text{rosée}} = T_{\text{sat},P_v}$$

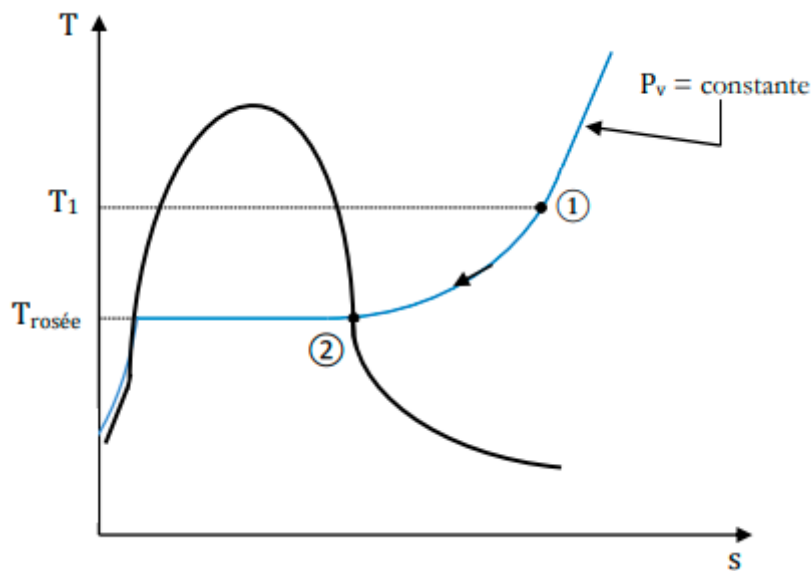


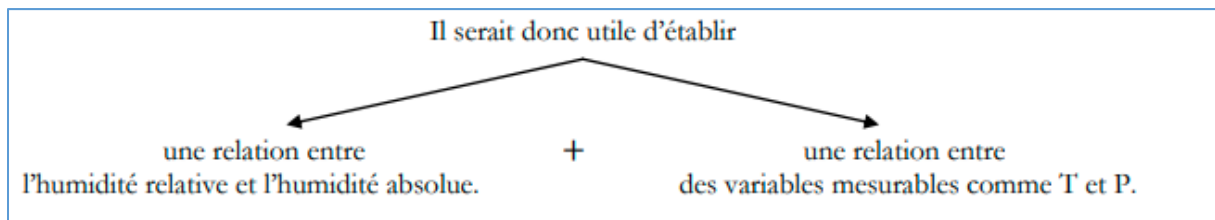
Figure III.3. Évolution de refroidissement de l'air atmosphérique à pression constante et point de rosée dans le diagramme T – s de l'eau.

Le phénomène est présenté sur la figure III.3. Au départ, l'air atmosphérique se trouve à la température T_1 . À mesure qu'il est refroidi à pression constante ($P_v = \text{constante}$), sa température baisse pour atteindre la température T_2 . C'est la température de saturation de la vapeur d'eau, c'est-à-dire le point de rosée. Si la température descend au-dessous de ce point, la vapeur d'eau dans l'air se condense. Pendant que la vapeur d'eau se condense, l'air demeure saturé ($\phi = 100\%$), et la pression partielle P_v diminue. L'évolution suit la courbe de vapeur saturée. La température de l'air atmosphérique demeure alors égale au point de rosée.

On peut aussi observer le phénomène de condensation de la vapeur d'eau sur un contenant de boisson qui sort du réfrigérateur. Si la température du contenant est inférieure au point de rosée, alors la vapeur d'eau dans l'air se condensera sous forme de gouttelettes sur ses parois.

III.4. Température de saturation adiabatique et température du thermomètre humide

L'humidité relative (ϕ) et l'humidité absolue (Y) sont deux variables indispensables pour décrire les mélanges air-vapeur d'eau.



On peut estimer ϕ en déterminant le point de rosée à l'aide duquel, on obtient la pression de vapeur P_v et l'humidité relative ϕ en découle. Cette approche est simple mais guère pratique ; Une autre façon d'estimer l'humidité absolue ou relative est de recourir à une évolution de saturation adiabatique (figure IV.4 ci-dessous)

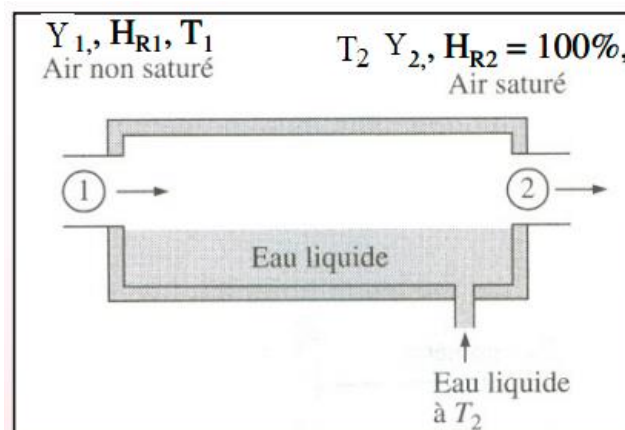


Figure III.4. Évolution de saturation adiabatique (saturateur adiabatique).

Un écoulement en régime permanent d'air humide, dont la température T_1 est connue et l'humidité absolue Y_1 est inconnue, pénètre dans une conduite adiabatique dans lequel se trouve un réservoir d'eau liquide. À mesure que le mélange gazeux s'écoule au-dessus de la surface de l'eau, de l'eau s'évapore et se mélange à l'air. La quantité d'humidité dans l'air croît durant l'évolution, et sa température diminue car une partie de la chaleur latente d'évaporation de l'eau provient de l'air. Si la conduite est suffisamment longue, l'air qui en émerge devient saturé ($H_R = 100\%$) à la température de T_2 .

La température T_2 est appelée *température de saturation adiabatique*

Si de l'eau d'appoint est ajoutée dans la conduite pour compenser le taux d'évaporation à la température T_2 , on peut décrire l'évolution avec écoulement en régime permanent dans le conduit en dressant des bilans massique et énergétique.

Le bilan massique pour l'air sec se lit :

$$m_{a1} = m_{a2} = m_a \dots\dots\dots(1)$$

Cette relation signifie que le débit massique d'air sec demeure constant.

Le bilan massique pour l'eau est :

$$m_{v1} + m_{ev} = m_{v2} \dots\dots\dots(2)$$

m_{v1} : débit massique de vapeur à l'état 1 (kgvapeur/h)

m_{v2} : débit massique de vapeur à l'état 2 (kgvapeur/h)

m_{ev} : débit massique de l'eau qui s'évapore (kgH₂O/ h)

En d'autres termes, le débit massique de vapeur dans l'air augmente selon le taux d'évaporation d'eau

La masse de la vapeur peut être exprimée en fonction de l'humidité absolue:

$$m_v = m_{as} Y \dots\dots\dots(3)$$

On peut réécrire le bilan précédent en introduisant les humidités absolues comme :

$$m_a Y_1 + m_{ev} = m_a Y_2 \dots\dots\dots(4)$$

Soit

$$m_{ev} = m_a (Y_2 - Y_1) \dots\dots\dots(5)$$

Le bilan énergétique est :

$$E_{ent} = E_{sort} \dots\dots\dots(6)$$

$$m_a h_1 + m_{ev} h_{ev} = m_a h_2 \dots\dots\dots(7)$$

Donc

En combinant les equations 5 et 7 On obtient :

$$m_a h_1 + m_a (Y_2 - Y_1) h_{ev} = m_a h_2$$

En divisant le tout par le débit d'air sec , on obtient :

$$h_1 + (Y_2 - Y_1) h_{ev} = h_2$$

On exprime h_1 et h_2 à l'aide de l'expression en introduisant les cp

$$(C_p T_1 + Y_1 h_1) + (Y_2 - Y_1) h_{ev} = C_p T_2 + Y_2 h_2$$

On obtient :

Y_2 est l'humidité à la saturation, donc elle peut être exprimée à l'aide de la relation suivante :

$$Y_2 = Y_s = 0,622 \frac{P_s}{P_2 - P_s}$$

Le calcul de Y_2 permettra de calculer par la suite Y_1 , à l'aide de la relation :

$$Y_1 = \frac{c_p (T_2 - T_1) + Y_2 h_{ev}}{h_v - h_{ev}}$$

La chaleur latente de vaporisation de l'eau (h_{ev}) est donnée par l'équation :

$$h_{ev} = \lambda = 2495,280 - ,2 346T$$

Tableau III.1 . Variables de la vapeur d'eau saturée

Température $T, ^\circ\text{C}$	Pression de saturation P_{sat}, kPa	Volume massique m^3/kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg		
		Liquide saturé v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide saturé u_f	Évaporation u_{fg}	Vapeur saturée u_g	Liquide saturé h_f	Évaporation h_{fg}	Vapeur saturée h_g
0,01	0,6117	0,001000	206,00	0,000	2 374,9	2 374,9	0,001	2 500,9	2 500,9
5	0,8725	0,001000	147,03	21,019	2 360,8	2 381,8	21,020	2 489,1	2 510,1
10	1,2281	0,001000	106,32	42,020	2 346,6	2 388,7	42,022	2 477,2	2 519,2
15	1,7057	0,001001	77,885	62,980	2 332,5	2 395,5	62,982	2 465,4	2 528,3
20	2,3392	0,001002	57,762	83,913	2 318,4	2 402,3	83,915	2 453,5	2 537,4
25	3,1698	0,001003	43,340	104,83	2 304,3	2 409,1	104,83	2 441,7	2 546,5
30	4,2469	0,001004	32,879	125,73	2 290,2	2 415,9	125,74	2 429,8	2 555,6
35	5,6291	0,001006	25,205	146,63	2 276,0	2 422,7	146,64	2 417,9	2 564,6
40	7,3851	0,001008	19,515	167,53	2 261,9	2 429,4	167,53	2 406,0	2 573,5
45	9,5953	0,001010	15,251	188,43	2 247,7	2 436,1	188,44	2 394,0	2 582,4
50	12,352	0,001012	12,026	209,33	2 233,4	2 442,7	209,34	2 382,0	2 591,3
55	15,763	0,001015	9,5639	230,24	2 219,1	2 449,3	230,26	2 369,8	2 600,1
60	19,947	0,001017	7,6670	251,16	2 204,7	2 455,9	251,18	2 357,7	2 608,8
65	25,043	0,001020	6,1935	272,09	2 190,3	2 462,4	272,12	2 345,4	2 617,5
70	31,202	0,001023	5,0396	293,04	2 175,8	2 468,9	293,07	2 333,0	2 626,1
75	38,597	0,001026	4,1291	313,99	2 161,3	2 475,3	314,03	2 320,6	2 634,6
80	47,416	0,001029	3,4053	334,97	2 146,6	2 481,6	335,02	2 308,0	2 643,0
85	57,868	0,001032	2,8261	355,96	2 131,9	2 487,8	356,02	2 295,3	2 651,4
90	70,183	0,001036	2,3593	376,97	2 117,0	2 494,0	377,04	2 282,5	2 659,6
95	84,609	0,001040	1,9808	398,00	2 102,0	2 500,1	398,09	2 269,6	2 667,6
100	101,42	0,001043	1,6720	419,06	2 087,0	2 506,0	419,17	2 256,4	2 675,6
105	120,90	0,001047	1,4186	440,15	2 071,8	2 511,9	440,28	2 243,1	2 683,4
110	143,38	0,001052	1,2094	461,27	2 056,4	2 517,7	461,42	2 229,7	2 691,1
115	169,18	0,001056	1,0360	482,42	2 040,9	2 523,3	482,59	2 216,0	2 698,6
120	198,67	0,001060	0,89133	503,60	2 025,3	2 528,9	503,81	2 202,1	2 706,0

Si l'air qui entre dans le saturateur est déjà saturé, alors la température de saturation adiabatique $T_2 = T_1$ (température à l'entrée) et $Y_1 = Y_2$. *En général, la température de saturation adiabatique se trouve entre la température à l'entrée et le point de rosée. Celle-ci est dite la température du thermomètre humide T_{humide} .* Un dispositif plus compact et plus pratique permet la mesure la T_{humide} est appelé le thermomètre à bulbe humide (figure III.5).

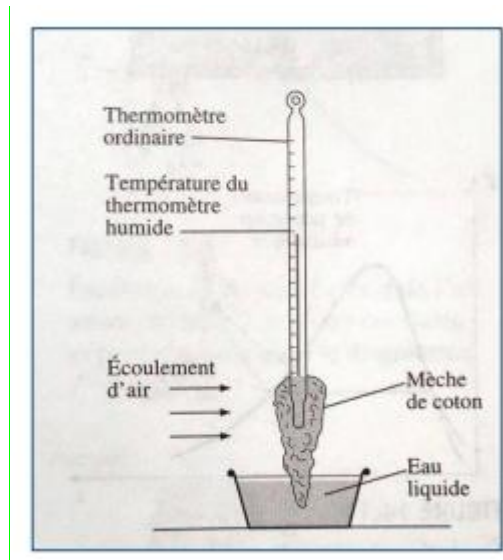


Figure III.5. Dispositif pour mesurer la température humide.

Le principe de fonctionnement est similaire à celui du saturateur adiabatique. Lorsque l'air s'écoule autour de la mèche de coton humide, de l'eau dans le coton s'évapore. La température de l'eau descend alors, ce qui crée une différence de température entre l'air et l'eau. Après un certain temps, la chaleur, perdue par l'évaporation de l'eau s'équilibre avec la chaleur extraite de l'air et la température de l'eau se stabilise. La température lue au thermomètre est la température humide.

III.5. Diagramme psychrométrique

L'état de l'air atmosphérique sous une pression donnée est défini au moyen de deux variables thermodynamiques intensives et indépendantes. À partir de cette information, on peut déterminer les autres variables thermodynamiques en recourant à des tables et à des relations thermodynamiques. Bien qu'ils ne soient pas difficiles à effectuer, les calculs des variables thermodynamiques sont longs et fastidieux, en particulier lorsqu'on analyse et conçoit un système de conditionnement d'air, par exemple. C'est pourquoi toutes les variables thermodynamiques de l'air atmosphériques ont été regroupées, par commodité, en un seul diagramme appelé **diagramme psychrométrique**.

Le diagramme psychrométrique correspond à la pression atmosphérique de 1 atm (101.325 kPa) est illustré à la figure IV.6. Des diagrammes psychrométriques correspondant à d'autres pressions atmosphériques sont aussi disponibles.

Les points saillants du diagramme psychrométrique sont mis en évidence à la figure III.6.

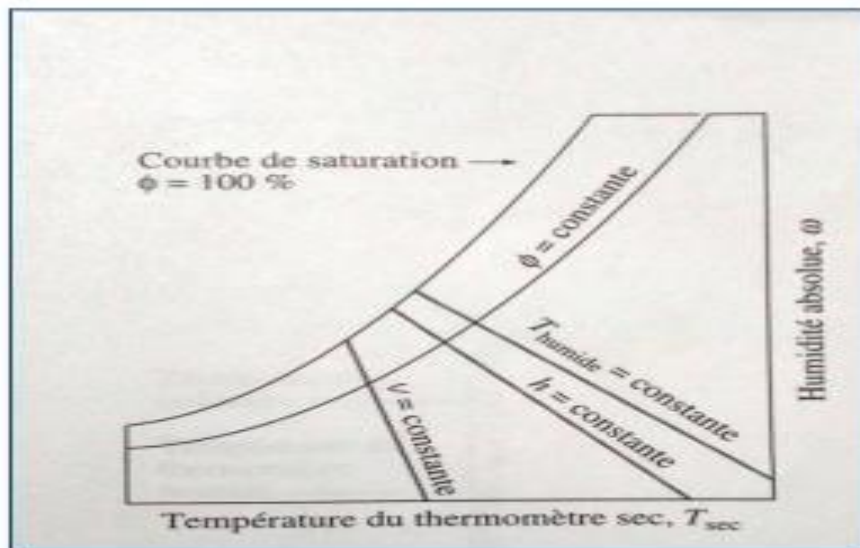


Figure III.6. Schéma du diagramme psychrométrique

La température du thermomètre sec (T_{sec}) : se trouve le long de l'axe horizontal.

- L'humidité absolue (Y) : est déclinée le long de l'axe vertical à la droite.
- La courbe de saturation ($\phi = 100\%$) : apparaît à gauche du diagramme. Les autres courbes d'humidité relative constante ont la même allure.
- Les lignes de température constante du thermomètre humide (T_{humide}), d'enthalpie constante (h) et de volume massique (v) : sont obliques. À la saturation :

$$T_{sec} = T_{humide} = T_{rosée}$$

Mollier a, le premier, représenté les variations d'état de l'air humide dans une construction graphique dite diagramme psychrométrique de l'air humide. Il s'agit d'un diagramme à axes obliques où l'enthalpie de l'air h est portée en ordonnée et la teneur en eau x en abscisse. L'obliquité des axes est déterminée de manière à ce que l'isotherme à 0°C soit perpendiculaire à l'axe des ordonnées.

En connaissant deux d'entre elles, il est possible de déterminer l'état exact d'un air donné. On utilise le diagramme de l'air humide, également appelé diagramme psychrométrique, pour calculer les évolutions d'un air humide plutôt que d'utiliser des calculs algébriques.

Les diagrammes de l'air humide sont **généralement** établis pour une pression atmosphérique normale de 101325 [Pa] et pour des températures entre -20°C à 50°C . Toutefois des exceptions existent puisqu'il existe d'autres diagrammes qui fonctionnent à de fortes températures..

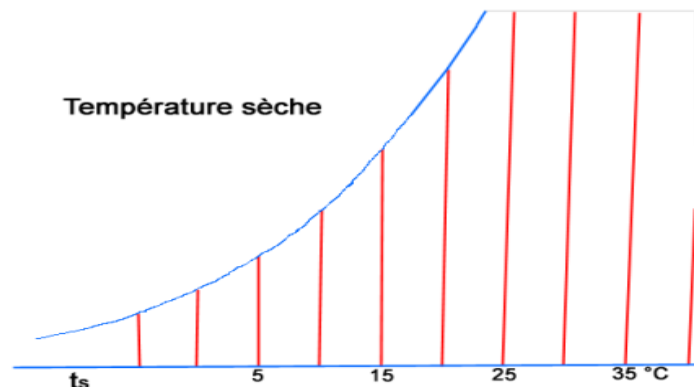
Pour faciliter la représentation des transformations de l'air au cours du procédé du séchage des corps humides, on utilise le "diagramme psychométrique" de l'air humide.

Un tel diagramme précise, pour tous les états que peut occuper l'air humide, ses caractéristiques physiques :

Lecture de la Température de bulbe sec sur le diagramme

L'axe horizontal représente une grandeur fondamentale du diagramme psychométrique que l'on appelle plus couramment : température sèche : T_s en °C.

Les lignes verticales, appelées isothermes sont des lignes où la température sèche est constante.

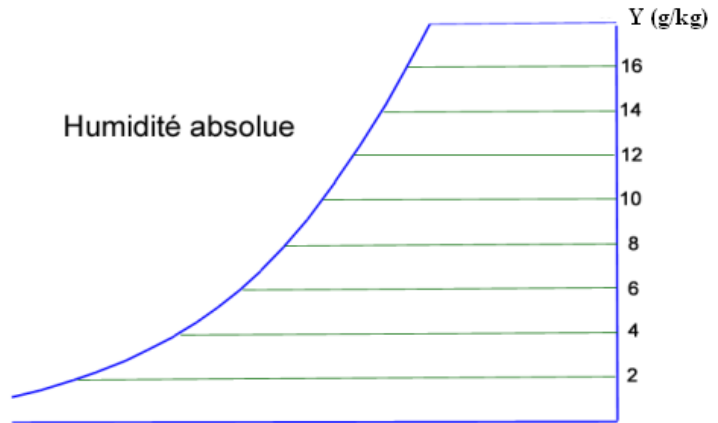


Lecture de l'humidité absolue de l'air sur le diagramme

L'axe vertical de droite représente cette autre grandeur fondamentale qui indique la teneur en vapeur d'eau de l'air considéré.

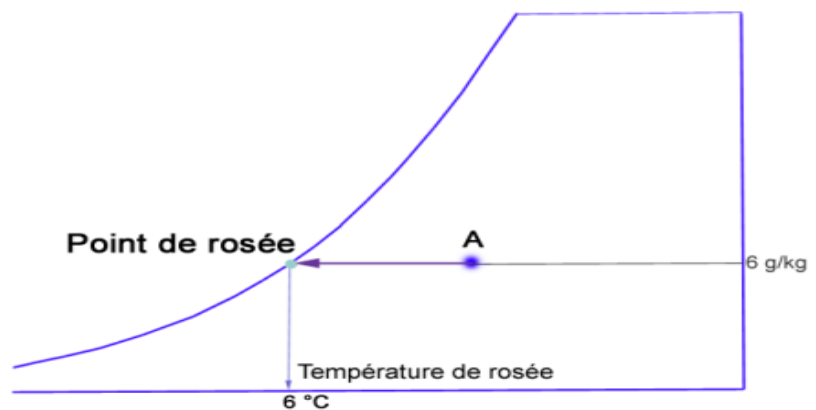
L'humidité absolue Y_a s'exprime en gramme d'eau par kilogramme d'air (g/kg).

Les lignes horizontales, appelées isohydes, sont des lignes à teneur en vapeur d'eau constante.



Lecture de la Température de rosée sur le diagramme

Si on se déplace à partir d'un point A du diagramme, sur une isohydre, de droite à gauche on atteint la courbe de saturation en un point appelé point de rosée, dont la température lue sur l'axe horizontal est la température de rosée de A : T_r .

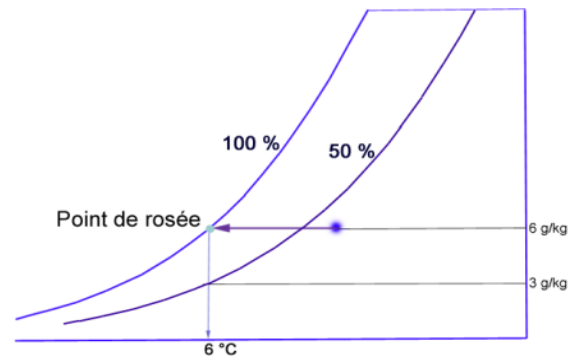


Lecture de l'humidité relative sur le diagramme

L'air situé sur la ligne de saturation, citée plus haut, est saturé de vapeur d'eau. On dit que son humidité relative ϕ est de 100 %. C'est une ligne à humidité relative constante.

Si l'on divise la teneur en vapeur d'eau par deux, l'air se trouve sur une ligne saturée de moitié, c'est-à-dire à $\phi = 50\%$ (on peut écrire aussi : $H_r = 50\%$).

On peut tracer ainsi un réseau de courbes à différentes valeurs d'humidité relative constante.

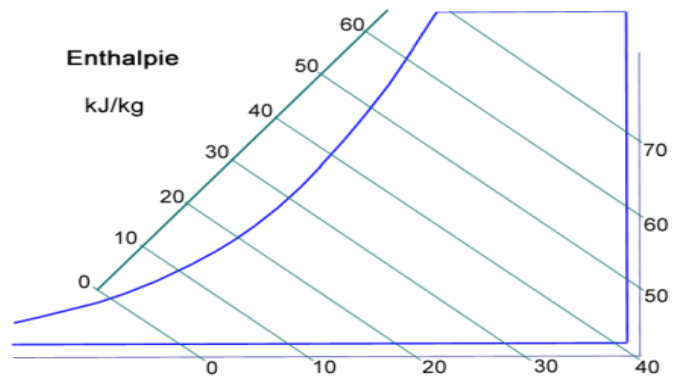


Lecture de l'enthalpie de l'air humide sur le diagramme

L'enthalpie h est la quantité de chaleur totale de l'air humide considéré. Elle s'exprime en kJ/kg (ou en kcal/kg, autrefois).

On considère que, l'air dont sa température $T_s = 0\text{ °C}$ et sa teneur en vapeur d'eau $Y_a = 0\text{ g/kg}$, a une enthalpie $H = 0\text{ kJ/kg}$.

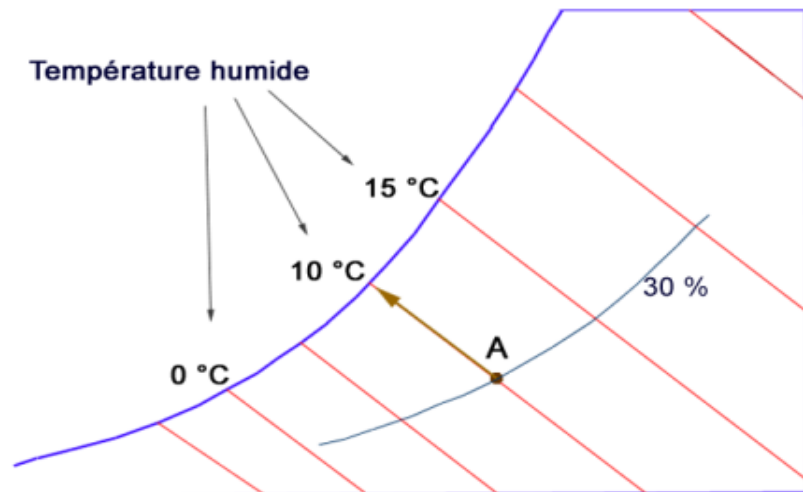
Le réseau de droites obliques perpendiculaires à l'échelle des enthalpies constitue des lignes à enthalpie constante, appelées isenthalpes.



Température de bulbe humide

Si d'un point A du diagramme on se déplace sur une isenthalpe, on atteint la courbe de saturation en un point dont la température lue sur l'axe horizontal est appelée communément température humide t_h du point initial considéré.

On mesure les températures sèche et humide au moyen d'un appareil comportant deux thermomètres, appelé psychromètre.



III.6. Psychromètres

Faut savoir qu'une température humide est une grandeur mesurable au moyen d'un appareil appelé «psychromètre»

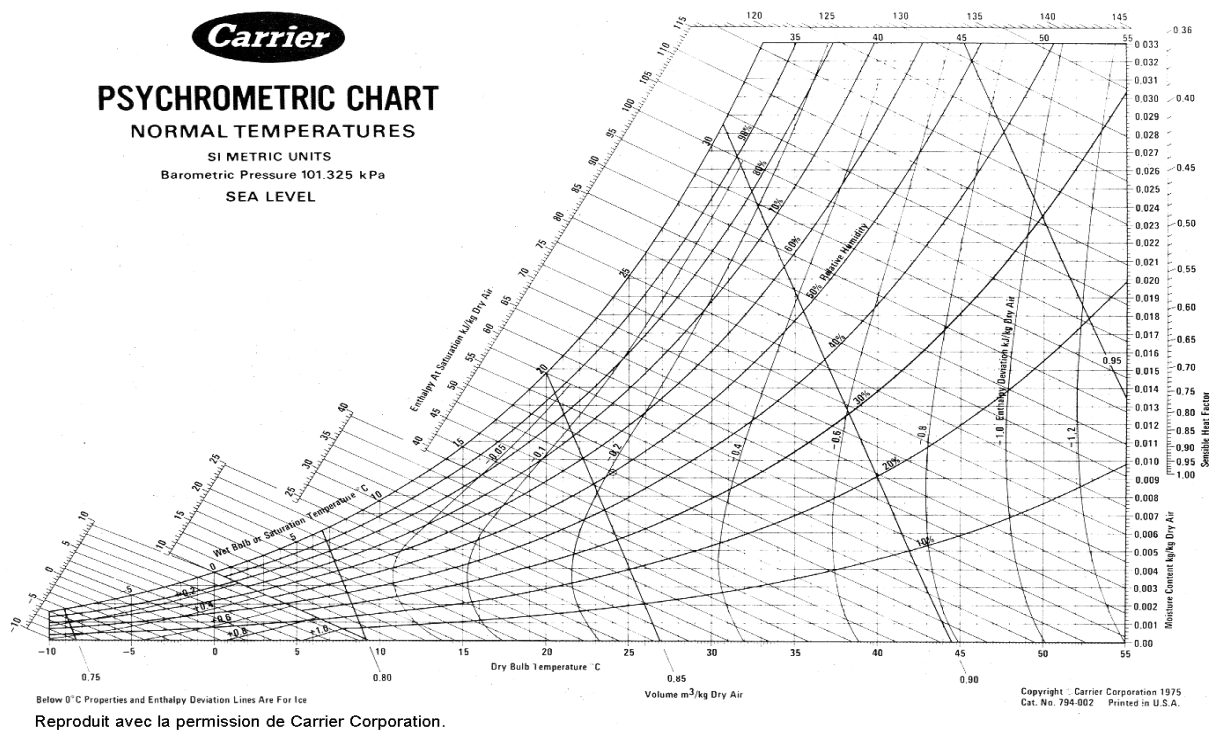
Il en existe plusieurs types et formes même si le principe est le même.

En voici quelques exemples :

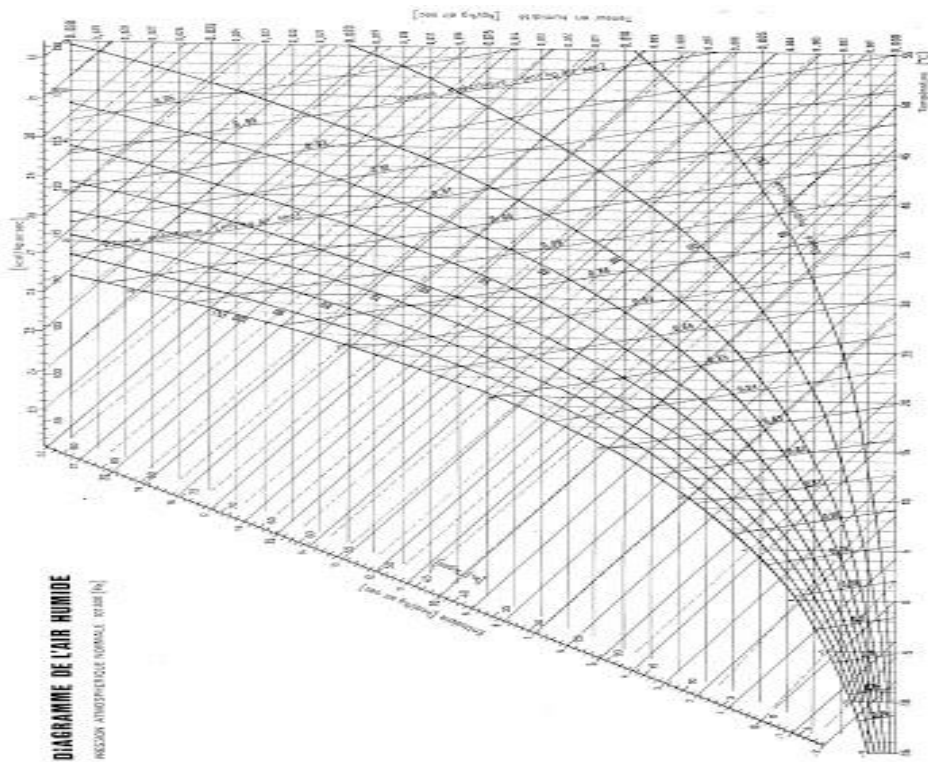
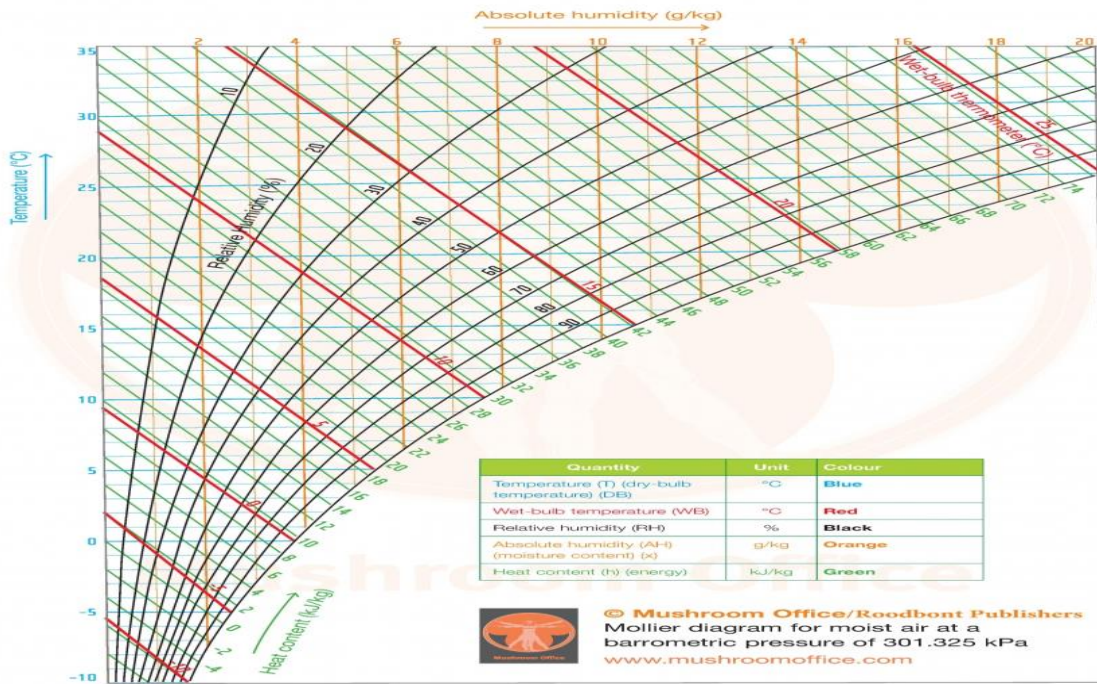




Voici quelques types de diagrammes psychromètres



Mollier diagram



III.7.Exercices d'application

Exercez-vous en répondant aux questions ci-dessous en utilisant le diagramme psychrométrique

Exemple n°1 :

En utilisant le diagramme ci-dessous, comparer les teneurs en vapeur de saturation pour de l'air à 0 °C, 10 °C , 20 °C et 30°C.

Exemple n°2 :

1-Si la température de l'air est de 20 °C et son hygrométrie ϕ de 50 %, quel serait la valeur de Y?

2- Si la température de l'air est de 35 °C et son hygrométrie ϕ de 30 %, Y?

3- L'air saturé (100%) à 12°C, contient Y?

4- Si la température de l'air est de 39°C avec une teneur en humidité de 23 g/kgas
Quelle serait la valeur de l'humidité relative de cet air.

La réponse des deux exemples se trouve dans l'annexe à la fin du cours

En voici deux exercices

EXERCICE 1

Dans un local, on relève au psychromètre : $T_s = 22,2^\circ\text{C}$ et $T_h = 17^\circ\text{C}$

Rechercher les caractéristiques de l'ambiance du local considéré.

$\phi=60\%$ $h_s=47.8 \text{ kJ/kg as}$ $T_r=14^\circ\text{C}$ $Y=0.01005 \text{ kg eau/kg as}$ $V_s=0.85 \text{ m}^3/\text{kg as}$

EXERCICE 2

Même question avec $T_s = 0^\circ\text{C}$ et $\phi = 80 \%$

$Y=0.0029 \text{ kg eau/kg as}$ $T_h=-1^\circ\text{C}$ $T_r=-3^\circ\text{C}$ $H_s=7 \text{ kJ/kg as}$ $V_s=0.778 \text{ m}^3/\text{Kg as}$

III.8.Généralités sur les opérations de l'humidification

L'humidification consiste tout simplement à apporter, dans un volume de gaz donné, en général de l'air, une certaine quantité d'eau. C'est dans le conditionnement d'air que l'humidification trouve son application la plus commune, aussi bien dans la climatisation de confort que dans la climatisation industrielle. Elle intervient partout, dans les hôpitaux, les salles informatiques, laboratoires, musées et autres espaces où le contrôle du niveau d'humidité est essentiel pour la santé, le stockage ou la

fabrication. Cependant, dans l'industrie, l'humidification n'est pas simplement un moyen de contrôler une ambiance, elle constitue le principe même de certains procédés comme le séchage de produits, le dessalement par un procédé d'humidification – déshumidification...

Dans les opérations de conditionnement d'air, l'humidification est réalisée soit de manière isotherme, soit de manière adiabatique.

III.8.1. Humidification isotherme

L'humidification isotherme procède par injection de vapeur d'eau dans un courant d'air ou directement dans la chambre ; la vapeur est produite en portant à ébullition une certaine quantité d'eau au moyen d'un système électrique (résistances, électrodes) (Figures III.7 a et b) ou, pour de plus grosses installations, à l'aide de chaudières à vapeur. Dans ce cas, l'humidification s'accompagne seulement d'une très légère augmentation de la température (Figure III.7 c), étant donné que la quantité de vapeur injectée, généralement à sa température d'ébullition normale, est très petite devant le volume d'air qui la reçoit

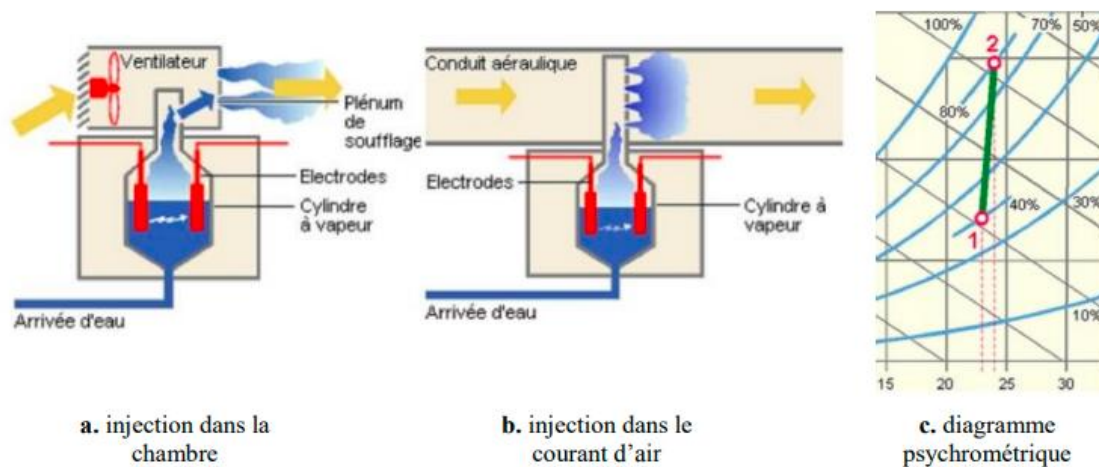


Figure III.7. Humidification par injection de vapeur, principe et représentation sur un diagramme psychrométrique

Dans les systèmes où l'humidification par apport de vapeur est utilisée, on assiste à une réduction des risques de bio-contamination, puisque l'eau est portée à ébullition, et à une meilleure précision des régulations de l'hygrométrie. En revanche, des puissances électriques importantes sont souvent nécessaires.

III.8.2. Humidification adiabatique

L'humidification adiabatique consiste en la pulvérisation de gouttelettes d'eau dans l'air à humidifier, ces gouttelettes s'évaporent en empruntant de la chaleur à l'air, ce dernier va se refroidir et son humidité augmenter, la chaleur sensible qu'il perd en se refroidissant est compensée par la chaleur latente qu'il gagne en s'humidifiant, si bien que son enthalpie reste constante lors de cette transformation comme le montre la figure III.8. En d'autres termes, l'humidification adiabatique consiste à ajouter de l'humidité à l'air au détriment d'une baisse de sa température. Comme le processus se fait à enthalpie constante, l'air doit être suffisamment chaud afin d'absorber assez d'humidité pour atteindre l'humidité relative adéquate. Par conséquent l'air entrant doit être préchauffé avant l'humidification.

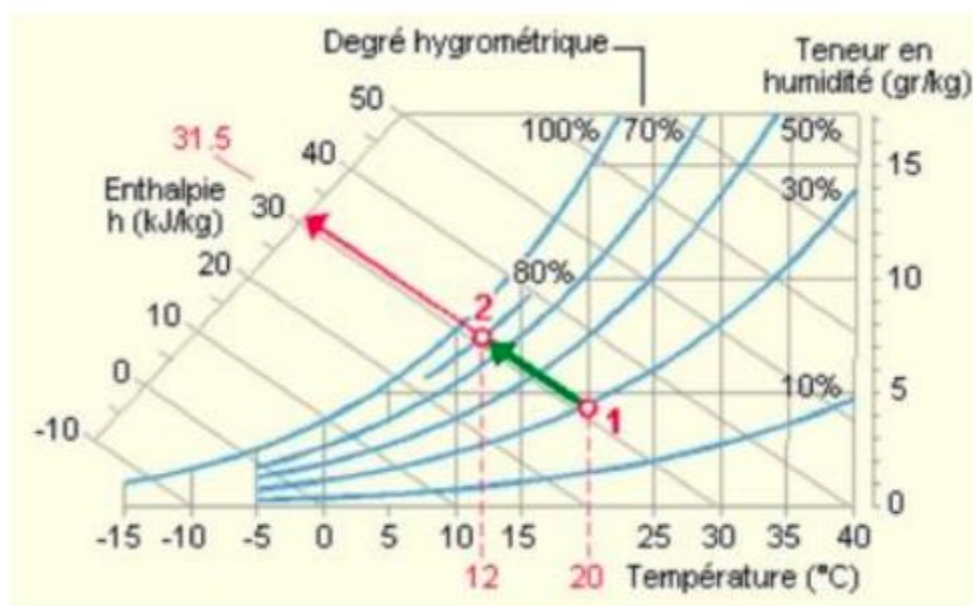


Figure.III.8. Représentation d'un processus d'humidification adiabatique sur un diagramme psychrométrique

III.8.3. Humidification par évaporation

Elle consiste à faire passer des débits d'air importants par le biais d'une ventilation sur une très grande surface mouillée, alimentée en eau (nids d'abeille, nattes humidificatrices, matériaux absorbants...) (Figure III.9). Il en résulte l'évaporation d'une quantité d'eau importante, d'où une augmentation de l'humidité absolue de l'air et, si la température de l'eau est maintenue constante, également de son humidité relative.

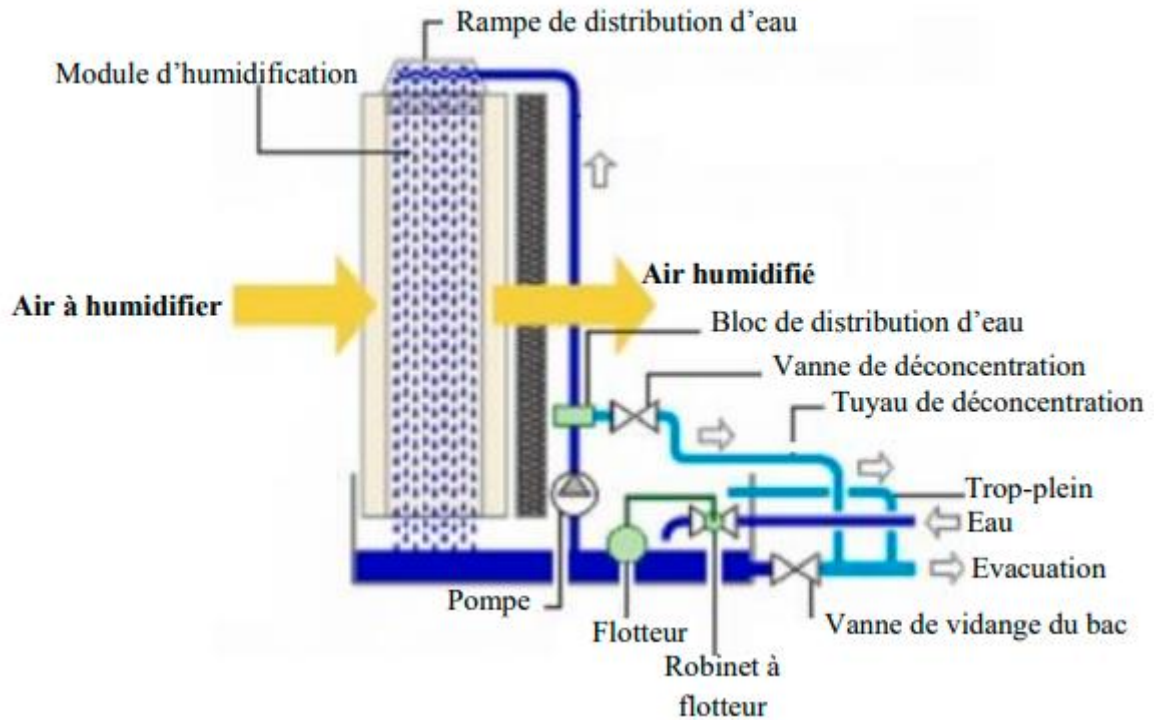


Figure.III.9 .Schéma de principe d'une installation d'humidification par évaporation

L'efficacité d'un tel humidificateur sera accrue si la surface d'eau exposée est grande, si le débit d'air qui brasse cette surface est important et si la température de l'air est élevée. Ce principe entraînant un refroidissement de l'air nécessite un réchauffement en amont afin de maintenir une température ambiante constante. Il est indispensable d'assurer un contrôle et une maintenance très rigoureuse des équipements, car :

- Les surfaces humides présentent un terrain favorable au développement des moisissures, bactéries et autres micro-organismes ;
- L'évaporation provoque des dépôts consécutifs à la cristallisation ;
- La ventilation de l'air favorise les dépôts de poussière.

III.8.4.Humidification par pulvérisation d'eau

C'est un procédé adiabatique au cours duquel l'eau est pulvérisée en fines particules propulsées dans l'air au moyen de buses à air comprimé ou de coupelles rotatives. Ces aérosols en suspension dans l'air passent ensuite de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur d'eau) sans aucun apport d'énergie externe. Plus réduite est la dimension des aérosols, meilleur sera le rendement du système. Comme dans le cas précédent, il est nécessaire de réchauffer préalablement l'air afin de compenser le refroidissement adiabatique.

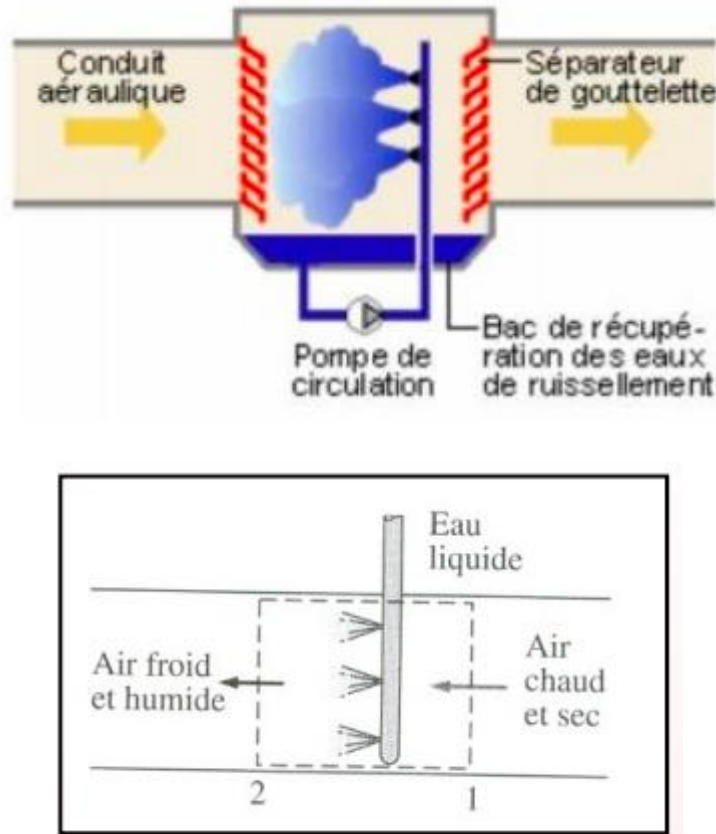


Figure.III.10. Schéma de principe d'un humidificateur par atomisation

Certaines gouttelettes risquent de ne pas s'évaporer, constituant ainsi des zones humides pouvant être le siège de formation de micro-organismes, il est donc vital d'assurer un bon entretien du système. Par ailleurs, si l'eau n'est pas déminéralisée, des particules minérales se diffusent dans l'air ambiant et se déposent en fine poussière blanche dans les locaux, et à la surface des objets et équipements.

III.9. Les évolutions de l'air humide par pulvérisation

Lors de pulvérisation de l'eau en très fines gouttelettes dans l'air humide, il y aura un échange de matière et de chaleur entre les deux ce qui entraîne une évolution pour l'air humide, c'est à dire un changement de certaines caractéristiques thermodynamiques de l'air humide. Selon les caractéristiques thermodynamiques initiales de l'air humide, la température des gouttelettes d'eau et le débit d'eau pulvérisé, on distingue cinq évolutions possibles pour l'air humide représentée dans le diagramme suivant :

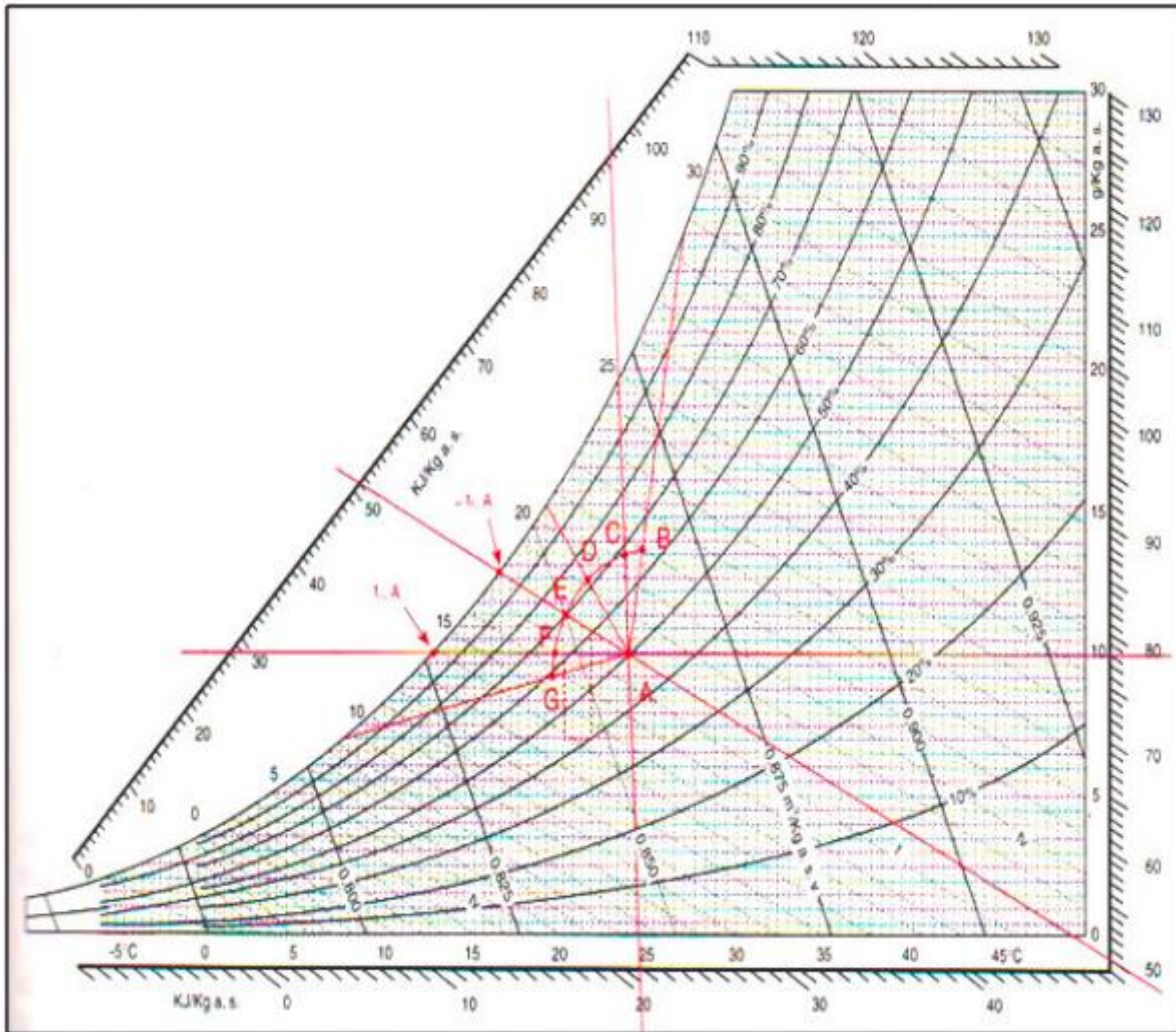


Figure III.11. Les évolutions dans le diagramme de l'air humide en pulvérisation.

III.9.1. Humidification et réchauffement (de point A vers le point B)

Elle se déroule lorsque la température des gouttelettes (T_g) est supérieure à la température sèche (T_s) de l'air humide, alors on aura une augmentation des paramètres suivants : température sèche (T_s) et humide (T_h), enthalpie spécifique (h) et la l'humidité absolue (ω).

III.9.2. Humidification seule (de point A vers le point C)

Cette évolution se déroule lorsque la température des gouttelettes est égale à la température sèche de l'air humide. La chaleur nécessaire pour la vaporisation des gouttelettes est acquise de l'air humide ce qui provoquerait une chute légère de sa température sèche (T_s) et humide (T_h), et une augmentation de son humidité absolue (ω) et relative (ϕ).

III.9.3. Humidification et refroidissement (de point A vers le point D)

Dans cette évolution, la température des gouttelettes d'eau (T_g) est inférieure à la température sèche (T_s) de l'air humide et supérieure à sa température de rosée (T_r). Cela provoquerait un refroidissement de l'air humide dû à la chaleur gagnée par les gouttelettes d'eau pour leur vaporisation, sans qu'il y ait condensation de certaine quantité de vapeur dans l'air humide car la température des gouttelettes (T_g) est supérieure à la température de rosée (T_r), de l'air humide (c'est à dire la température d'équilibre est comprise entre les deux : $T_r < T_g < T_s$)

III.9.4. Refroidissement à humidité constante (de point A vers le point F)

Dans cette transformation la température des gouttelettes d'eau (T_g) est égale à la température de rosée de l'air humide (T_r). $T_g < T_s$ ce qui provoquerait un refroidissement de l'air humide (diminution de la température sèche et humide) sans qu'il y ait ni condensation ni humidification (humidité absolue constante $\omega = C_{ts}$, c'est à dire que les gouttelettes reste suspendue dans l'air humide comme un brouillard. Au cours de cette transformation il y a aussi une diminution d'enthalpie spécifique (h) et une augmentation d'humidité relative (ϕ).

III.9.5. Déshumidification et refroidissement (de point A vers le point G)

Lorsqu'on a la température des gouttelettes d'eau (T_g) est inférieure à la température de rosée de l'air humide, alors l'air humide se refroidie sous l'effet de l'apport de chaleur gagnée dans les gouttelettes d'eau. Ce refroidissement amène la température de l'air humide jusqu'à la température de rosée (T_r), et tout apport supplémentaire de chaleur provoquerait la condensation d'une partie ou de toute la vapeur de l'air humide selon la quantité de chaleur apportée par les gouttelettes.

Au cours de cette transformation, l'évolution des caractéristiques thermodynamiques sont comme suit :

- Diminution de : température sèche (T_s) et humide (T_h), de l'humidité absolue (ω), d'enthalpie spécifique (h).
- Augmentation de : l'humidité relative (ϕ).

III.10. Définition de la déshumidification de l'air

La déshumidification de l'air consiste à abaisser la teneur en humidité (r) contenue dans l'air. A cette fin, trois principes sont à la disposition du concepteur :

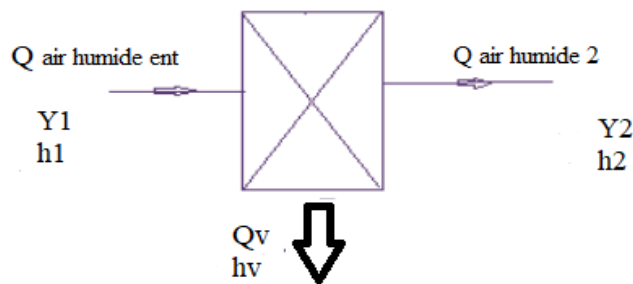
- Déshumidification par refroidissement ;

- Déshumidification par absorbant liquide ;
- Déshumidification par adsorbant solide.

III.10.1. Déshumidification par refroidissement

Le principe consiste à refroidir l'air à une température inférieure à sa température de rosée en utilisant un échangeur appelé 'batterie froide'. L'air ainsi refroidi perd une partie de sa vapeur d'eau : il y a alors condensation. Le fluide de refroidissement circulant dans l'échangeur appelé aussi : batterie froide humide, est soit de l'eau glacée distribuée à partir d'une production de froid centralisée, soit par le fluide frigorigène.

Il s'agit là le plus souvent de l'évaporateur d'un groupe frigorifique. L'eau de condensation doit être évacuée vers une vidange.



Bilan sur l'échangeur

Le débit d'eau condensé : $Q_v = Q_{as} (Y_1 - Y_2)$

D'après le bilan énergétique :

$$h_1 Q_{as} = P_{éch} + h_2 Q_{as} + Q_v h_v$$

La puissance nécessaire de l'échangeur est donnée comme suit ;

$$P_{éch} = (h_1 - h_2) Q_{as} - Q_v h_v$$

si on néglige la quantité de vapeur d'eau condensée, la puissance de l'échangeur sera égale à :

$$P_{éch} = (h_1 - h_2) Q_{as}$$

Avec :

h_1 et h_2 : enthalpie de l'air à l'entrée et à la sortie de l'échangeur respectivement

Y_1 et Y_2 , humidité absolue de l'air à l'entrée et à la sortie de l'échangeur, respectivement

Q_v et h_v , sont débit et enthalpie de la vapeur d'eau condensée à la sortie de l'échangeur, respectivement

Qas : débit de l'air sec

La détermination du point de sortie de l'échangeur sera possible en se basant sur le diagramme de l'air, qui nécessite la connaissance de deux paramètres ;

Le point FPT (Fin du Processus Théorique) qui est situé sur la courbe de saturation ($\Phi = 100\%$). Sa température dépend de la nature du fluide de refroidissement :

-dans le cas d'un fluide frigorigène, $T_{FPT} = T_E$ (température d'évaporation);

-dans le cas d'une batterie à eau, $T_{FPT} = (T_e - T_s)/2$ où T_e et T_s représentent la température d'entrée et de sortie de l'eau dans l'échangeur.

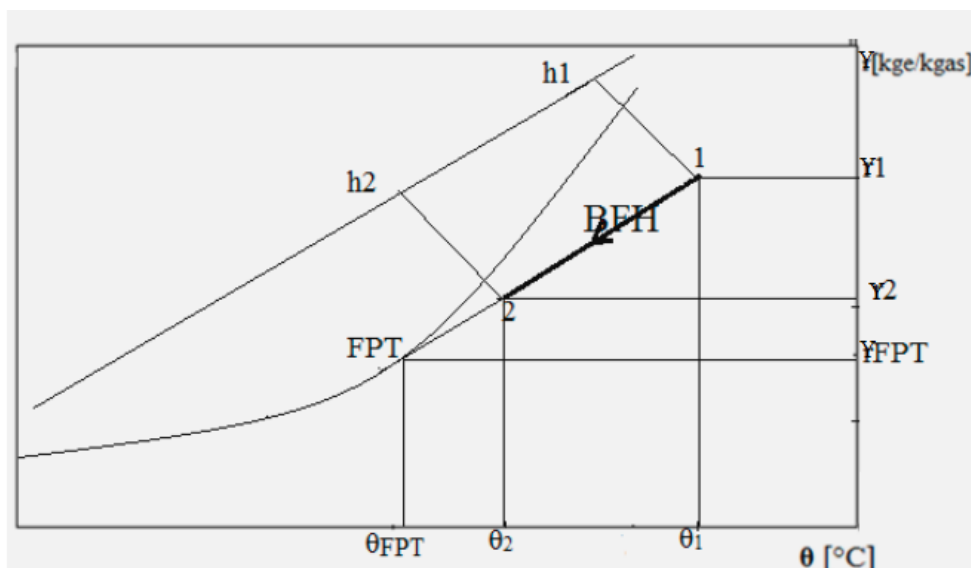


Figure III.12. Evolution d'air dans une batterie froide humide (BFH)

Cette déshumidification s'accompagne d'une baisse importante de la température : il est donc nécessaire de réchauffer l'air pour compenser. Ce qui entraîne un coût énergétique élevé. La maintenance de l'équipement nécessite des professionnels en froid. Ajouté à cela, Il faut noter aussi que pour une température ambiante inférieure à 16 °C, la déshumidification par refroidissement a un très mauvais rendement car, à ces faibles températures, il est plus difficile d'en extraire la vapeur d'eau

III.10.2. Déshumidification par absorbant liquide (absorption)

Dans cette technique, on utilise la propriété de certains corps hygroscopiques dont la pression de vaporisation est inférieure à celle de l'eau pure. Ils sont généralement utilisés en solution aqueuse et ils prennent le nom d'absorbant liquide.

Plus la concentration en absorbant liquide est élevée, plus la pression de vapeur saturante est faible, mais la cristallisation du mélange introduit une limite à la concentration de l'absorbant. Le corps le plus utilisé

est le chlorure de lithium (LiCl) à une concentration de 40 % en volume, qu'il convient de régénérer lorsqu'ils arrivent à saturation.

Le débit d'eau condensé : $Q_v = Q_{as} (Y_1 - Y_2)$

Pour avoir les autres caractéristiques, on utilise l'expression de l'efficacité du déshumidificateur E

$$E = \frac{h_{FPT} - h_1}{h_2 - h_1} \text{ ou encore } E = \frac{T_{FPT} - T_1}{T_2 - T_1}$$

Ce procédé permet de sécher l'air jusqu'à 0.003 kge/kgas et consomme moins d'énergie mécanique que la déshumidification par refroidissement. D'autre part, le chlorure de lithium a des propriétés bactéricides très intéressantes. Par contre, les contraintes de maintenance (contrôle de la concentration, encrassement des échangeurs, corrosion...) ont fait un système pratiquement abandonné à l'heure actuelle au profit des adsorbants solides.

III.10.3. Déshumidification par adsorbant solide (adsorption)

L'adsorption est un phénomène physico-chimique entraînant la fixation de molécules de vapeur d'eau sur la surface d'un solide (matériau hygroscopique). Ce matériau est caractérisé par une très grande porosité, et une surface d'échange très élevée (de l'ordre de 600 m² /g d'adsorbant).

Sa cavité est si petite qu'elle possède les propriétés des tubes capillaires (Le diamètre est de l'ordre de quelques Angström. Dans un tube capillaire, la pression est d'autant faible que le diamètre est petit). Les corps les plus utilisés sont : l'alumine activée, le chlorure de lithium, le gel de silice, et le tamis moléculaire.

Le tamis moléculaire est réservé aux applications à très bas teneurs en humidité. Le gel de silice couvre le domaine le plus large. Le chlorure de lithium est intéressant pour ces propriétés bactéricides.

Le procédé est le suivant: une roue comportant de grandes surfaces d'échanges tourne très lentement (5 à 10 tours/heure). De l'air humide passe au travers d'un secteur de la roue. Le matériau (l'adsorbant) de la roue se charge en humidité. La rotation de la roue amène ensuite ce secteur en contact avec de l'air chaud et sec. Une fois que cet adsorbant se sature, on doit le régénérer pour éliminer l'humidité : cette régénération est assurée par le passage d'air réchauffé à une température souvent supérieure à 60 °C. Cet air chaud chargé en humidité est évacué à l'extérieur.

Le débit d'eau condensé est: $Q_v = Q_{as} (Y_1 - Y_2)$

Pour l'allure de l'évolution, on constate une température à la fin du processus un peu supérieure à la température correspondant à l'évolution isenthalpique. Cet apport de chaleur provient du phénomène d'adsorption et des forces superficielles (chaleur de réaction). D'autre part, la régénération de l'absorbant nécessite de le chauffer, ce qui va entraîner un échauffement supplémentaire de l'air à la sortie. On peut retenir pour valeur pratique du rapport:

$$j = \frac{(h_2 - h_1)}{(Y_2 - Y_1)} = -1300 \text{ kJ/kg}$$

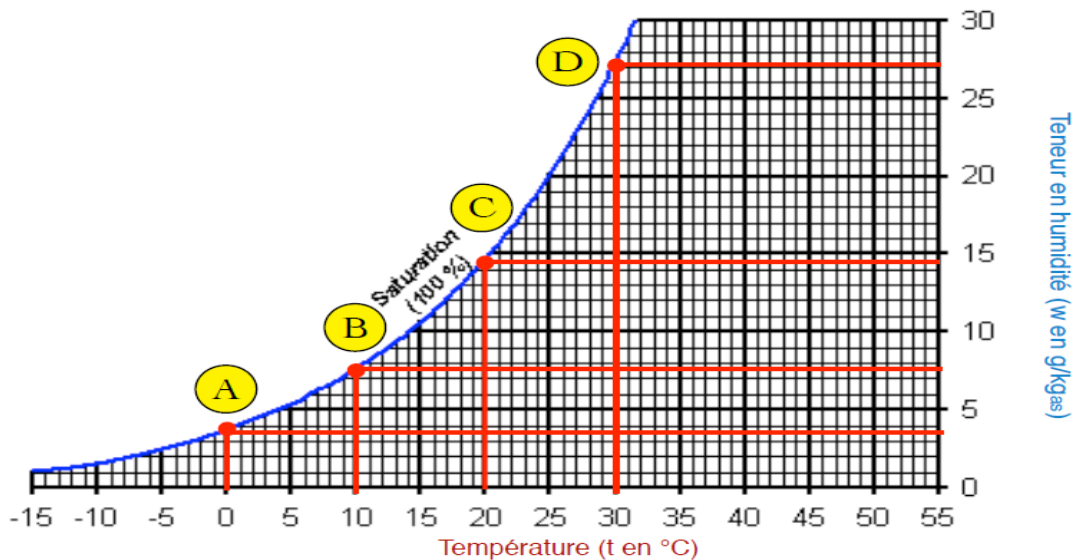
Ce procédé s'impose chaque fois qu'une teneur en humidité très faible est requise. Il permet d'obtenir un air quasiment sec.

ANNEXE

Corrigé de l'exemple 1

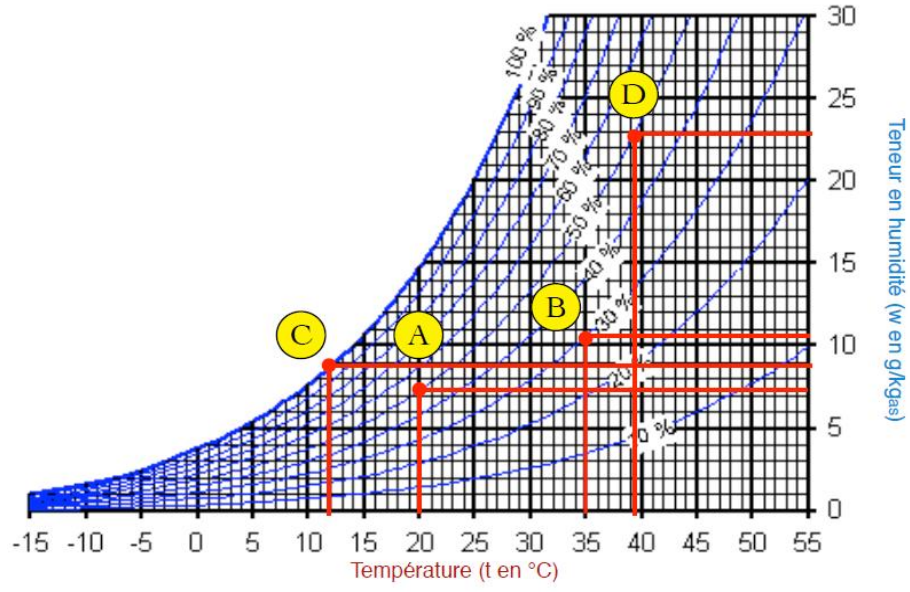
Les teneurs en humidité à la saturation pour l'air sont :

- à 0 °C : 3,8 g/kg (point A du diagramme)
- à 10 °C : 7,8 g/kg (point B du diagramme)
- à 20 °C : 14,8 g/kg (point C du diagramme)
- à 30 °C : 27,2 g/kg (point D du diagramme)



Corrigé de l'exemple 2

- 1- sa teneur en humidité est de 7,2 g/kgas environ: **Point A**
- 2- sa teneur en humidité est de 10,5 g/kgas environ: **Point B**
- 3- environ 8,9 g/kgas : **Point C**
- 4- l'hygrométrie φ est de 50%



OPERATION DE SECHAGE DES SOLIDES

IV.1.Introduction

Le séchage des matériaux est une méthode ancestrale utilisée jusqu'au jour d'aujourd'hui, consistant à étaler en plein air les produits à sécher. C'est une technique facile et pas coûteuse, néanmoins elle peut causer des pertes importantes. Un tableau comparatif a été dressé mettant en évidence les avantages et les inconvénients du séchage à l'air libre et sous séchoir. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires.

Le séchage est une des opérations unitaires les plus communes dans l'industrie, tout secteur confondu. Il apparaît sous de multiples techniques, en fonction de la diversité des produits traités : obtenir la bonne tenue d'une couche de peinture, pour assurer la conservation sur de longues périodes d'un amas de grain de maïs, conférer sa stabilité mécanique à un carreau de plâtre, réussir un comprimé...etc) exemple en figure 1.

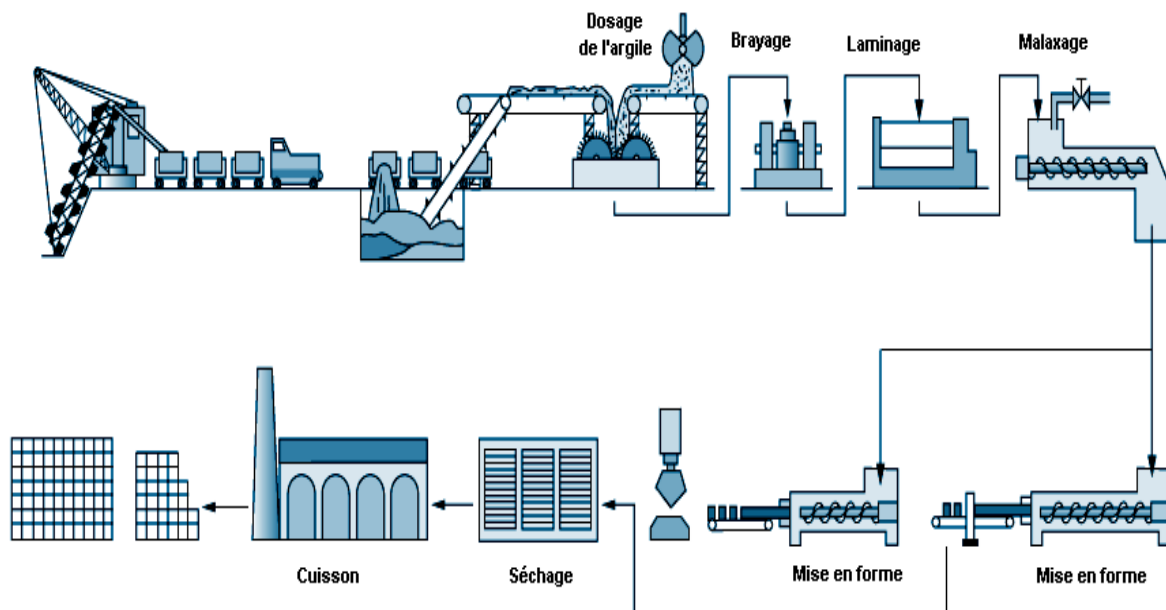


Figure IV.1. Différentes étapes de la mise en comprimé d'un médicament

Il faut savoir que l'opération de séchage est non seulement nécessaire à la fabrication d'un produit, mais conditionne également sa qualité finale.

Il permet de réduire considérablement la masse et le volume des produits ce qui facilite leur transport, stockage et manutention. Il sert aussi à stabiliser, transformer et à donner une texture ou une fonctionnalité particulière au produit. Le séchage est utilisé pour des produits très différents comme les matériaux granulaires, les produits liquides, les matériaux pâteux et bien d'autres.



Figure IV.2. Séchage de bois

Néanmoins, Le choix d'une technologie de séchage résulte d'un compromis technique et économique. Il repose sur plusieurs critères comme le mode de fonctionnement du séchoir, le temps de séjour, l'état du matériau dans le séchoir, la structure du produit humide, etc.

Dans ce qui suivra, nous allons définir cette opération unitaire si importante, citer les différents types de séchage, la cinétique de séchage et présenter quelques équipements illustrant quelques types de séchoirs

IV.2. Définition du séchage

Le séchage est défini comme étant l'opération unitaire qui consiste à éliminer totalement, ou partiellement le solvant, très souvent l'eau, contenu à l'intérieur d'un matériau poreux. Cette opération est caractérisée par des transferts couplés de chaleur, de masse et de quantité de mouvement. Il s'agit d'une séparation thermique, où il faut fournir une énergie équivalente à l'énergie de vaporisation de l'eau pour qu'elle quitte le produit, celui-ci passant d'un état initial dit « humide » à l'état final dit « sec ». Le corps humide mis en jeu peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide (sauf dans le cas particulier de la déshydratation d'un liquide non volatile : séchage des huiles), ce qui distingue le séchage de la concentration d'un liquide par évaporation, cas dans lequel le produit final est un concentré liquide. Le produit final solide peut être éventuellement divisé ou pulvéulent.

Le matériau à traiter est fait de deux constituants (Figure IV. 3) :

- la matière sèche : c'est la partie du produit à conserver, soit parce qu'elle a de la valeur, soit pour la traiter séparément du liquide.
- L'eau : elle se vaporise et quitte le produit sous forme de vapeur.

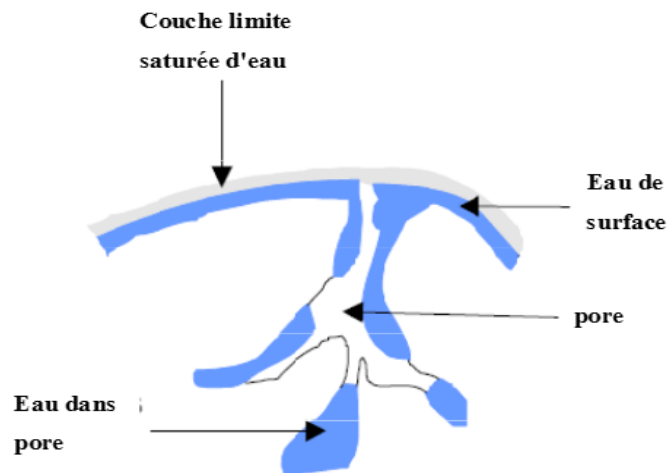


Figure IV. 3. Composition d'un solide humide

IV.3. Comment se présente l'eau dans un matériau

Dans un matériau, l'eau peut se présenter sous trois états ; eau libre (eau capillaire), eau liée (eau adsorbée) et vapeur d'eau (Figure IV.4) :

- L'eau libre remplit la majeure partie des vides de la structure. Elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire ; la quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu (ϵ).
- L'eau liée est adsorbée sur et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants. Elle aussi liée à la taille des pores qui indique la proportion eau liée/eau libre dans le matériau (un produit constitué de "petits pores" aura, à l'échelle macroscopique, un caractère hygroscopique plus marqué que s'il était constitué de "gros pores").
- La vapeur d'eau mélangée à l'air sec (mélange parfait) occupe les espaces vides non occupés par l'eau liquide.

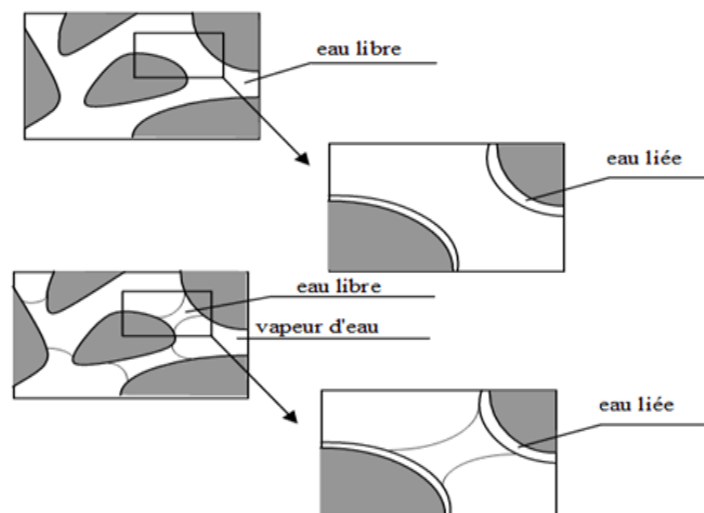


Figure IV.4. Différentes formes d'eau dans un matériau

Si la pression de vapeur P_m (pression de vapeur à la surface du solide mouillé) du liquide associé au solide est différente de P_v (phase gaz) il s'établit entre les deux phases en présence, un transfert de matière tendant vers un état d'équilibre qui est atteint lorsque $P_v = P_m$

- Si $P_v > P_m$, ce transfert d'humidité s'effectue de l'atmosphère gazeuse vers le solide ce qui correspond à un phénomène d'humidification du solide.
- Si $P_v < P_m$, le transfert de matière s'effectue du solide vers la phase gazeuse et correspond à une élimination de l'humidité du solide.
- Lorsque $P_v = P_m$, l'état d'équilibre est atteint et il n'y a plus de transfert de matière entre les phases solide et gazeuse.

IV.4. Intérêt du séchage

Le séchage a pour intérêt :

- D'alléger les produits ; Diminuer la masse et le volume des produits pour réduire leur encombrement et faciliter leur transport.
- D'assurer et de permettre la conservation des produits par diminution de l'activité de l'eau.
- Donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit (flocons de purée de pomme de terre, café lyophilisé.....etc.).

Toutefois le séchage :

* modifie le produit dans sa forme, sa texture, son goût, ses qualités, ce qui est souvent considéré comme un inconvénient.

* Il est coûteux, notamment en énergie.

IV.5. Terminologie liée au solide à sécher

IV.5.1. Humidité

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

IV.5.2 Taux d'humidité

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité **par rapport à la matière sèche** ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kgde matière sèche}$).

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

M_h : Masse du matériau humide

M_s : Masse du matériau sec.

V.4.3. Humidité relative

L'humidité relative d'un solide appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau est le rapport entre la masse du liquide contenue dans le produit et la masse du matériau humide.

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h}$$

IV.5.4. Hygroscopicité

Après essorage ou égouttage, la présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur P_m (pression de vapeur à la surface mouillée) qui est fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides (figure IV.5).

a - Lorsque le liquide adhère à la surface externe d'un solide, il est retenu par des forces superficielles peu intenses : la tension de vapeur P_m du liquide n'est alors fonction que de la température et elle est égale à la tension maximale de la vapeur du liquide à température considérée.

b - Lorsque les pores présentés par le solide sont extrêmement fins, les forces capillaires sont intenses et peuvent retenir en profondeur de notables quantités d'humidité. Dans un tel cas, la tension de vapeur P_m du liquide est inférieure à sa tension maximale à la même température, et le solide est dit hygroscopique.

Plusieurs exemples de produits sont donnés sur la figure suivante :

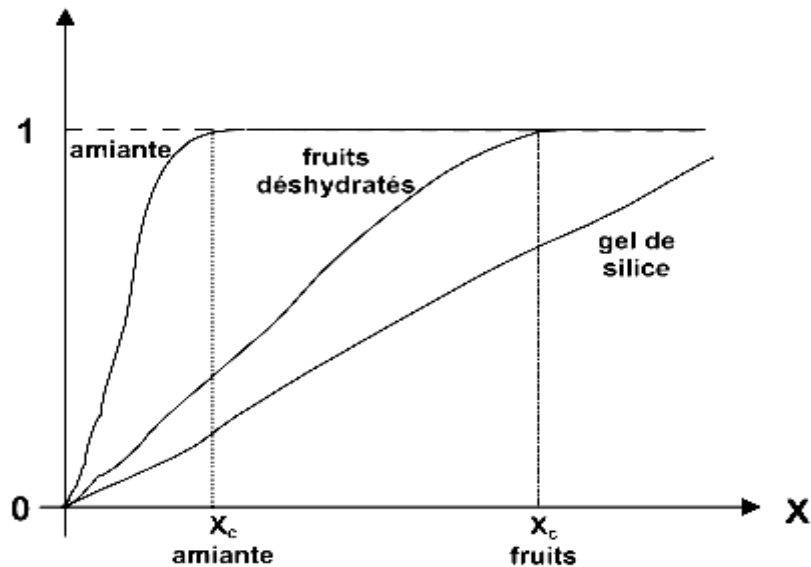


Figure IV.5. Hygroscopie de quelques matériaux

On s'aperçoit qu'en réalité tous les solides ont une certaine hygroscopicité. En dessous d'une humidité relative du solide inférieure à X_c (l'humidité d'un solide en équilibre avec de l'air saturé ($\varphi=100\%$) à la limite du domaine d'hygroscopicité), on observe que le solide humide est en équilibre avec un air non saturé en eau (humidité relative inférieure à 1). Bien entendu dans le cas de composés comme l'amiante, l'hygroscopicité est négligeable. Par contre elle est marquée pour des solides poreux, des gels, des produits alimentaires déshydratés.

IV.5.5. Taux d'humidité à l'équilibre

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température.

IV.5.6. Matériau anhydre

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul. Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur. Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

IV.6. CINETIQUE DE SECHAGE

IV.6.1. Comportement d'un solide humide au contact de l'air

IV.6.1.a. Séchage et mouillage d'un solide

On note X_c l'humidité d'un solide en équilibre avec de l'air saturé ($\varphi = 1$) à la limite du domaine d'hygroscopicité. On considère ce solide d'humidité $X < X_c$ placé dans des courants d'air d'humidités relatives φ_1 et φ_2 . A cette humidité X correspond une humidité relative φ de l'air à l'équilibre. On examine sur l'isotherme de la figure IV.6 suivante les différents transferts d'eau possibles entre le solide et le courant d'air suivant les valeurs respectives de l'humidité relative de l'air et de l'humidité du solide.

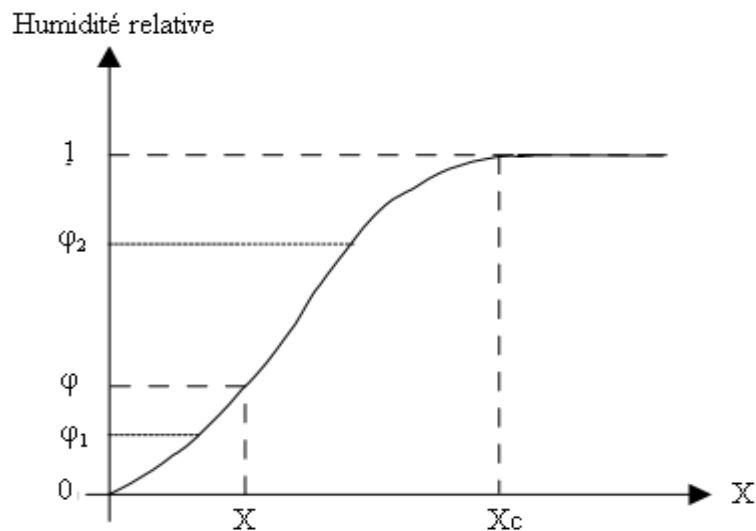


Figure IV.6. Isotherme d'un solide mouillé

On observe les deux comportements suivants :

$\varphi_1 < \varphi \Rightarrow$ désorption de l'eau donc séchage

$\varphi_2 > \varphi \Rightarrow$ adsorption de l'eau donc mouillage du solide

Il en ressort qu'un solide dans le domaine hygroscopique placé dans de l'air humide va absorber de l'eau jusqu'au moment où son humidité correspondra à l'équilibre avec l'air. La conséquence de ceci est que le stockage de composés hygroscopiques peut entraîner la formation d'agglomérats de solide dus à l'adsorption d'eau.

Si un solide d'humidité $X > X^*$ est soumis à un courant gazeux constant d'humidité relative ϕ , il perd de l'eau jusqu'à ce que son humidité devienne égale à X^* (humidité du solide correspondant à l'équilibre avec l'air). Même en prolongeant le passage du courant gazeux on ne peut sécher plus et descendre en dessous de X^* (Figure IV,7).

L'intervalle $X - X^*$ correspond à l'humidité libre c'est à dire à l'humidité susceptible d'être enlevée au solide placé dans de l'air d'humidité relative ϕ (Figure IV.7).

On distingue l'humidité liée ($X < X_c$) et l'humidité non liée ($X > X_c$) : l'humidité liée correspond au domaine hygroscopique du solide.

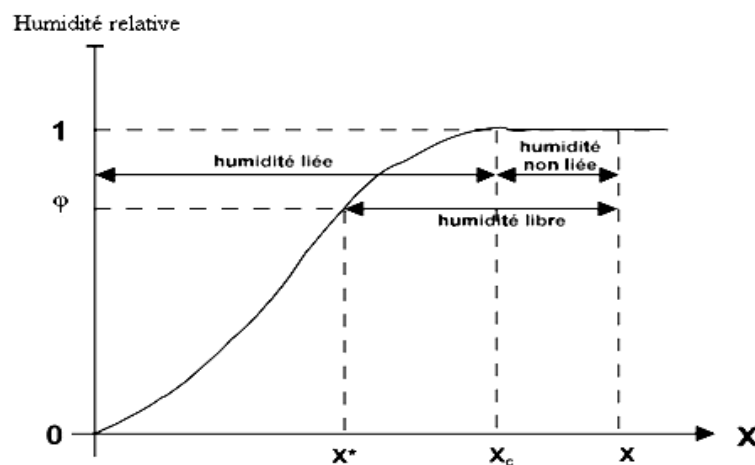


Figure IV.7. Différents types d'humidité dans un matériau humide

IV.6.2. Activité de l'eau dans les solides

La plupart des matériaux, poudres et liquides sont hygroscopiques et ils contiennent de l'eau. Cette humidité a une grande influence sur leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques et elle a même une incidence sur le prix de vente de certains produits (par exemple, le prix du maïs payé au céréalier est pondéré en fonction de sa teneur en eau). Mais la teneur en eau ne suffit pas pour expliquer l'influence réelle de l'eau sur un produit : elle ne permet pas de connaître la stabilité ou la durée de conservation d'un aliment, par exemple.

On utilise pour cela un deuxième paramètre : l'**activité de l'eau**. A_w (water activity), l'activité de l'eau est aussi appelée "humidité relative d'équilibre" (HRE), ou "eau libre", ou encore "eau disponible". Elle indique le "degré de liberté de l'eau absorbée dans un matériau. L'activité de l'eau est un facteur essentiel de qualité pour les produits pharmaceutiques : pour de nombreux médicaments, la valeur A_w constitue un important facteur de qualité. La valeur A_w a une influence directe sur certaines caractéristiques des comprimés.

La mesure de l'activité de l'eau fournit aussi des informations utiles sur certaines propriétés comme la cohésion, la capacité de stockage et de coagulation ou d'écoulement de poudres, comprimés ou l'adhésion de revêtements ect...



Elle représente le rapport entre la pression de la vapeur d'eau du matériau (pression de la vapeur d'eau à la surface du produit) et la pression de la vapeur d'eau pure à la même température θ_0 .

$$A_w = \frac{\text{pression partielle de l'eau dans l'aliment à } \theta_0}{\text{pression partielle de l'eau pure à } \theta_0}$$

La valeur de l'activité de l'eau varie entre 0 pour un produit sec au point que toute l'eau est liée au matériau. Elle est égale à 1 car l'eau pure et sans soluté, difficile à atteindre et surtout à maintenir.

La valeur optimale pour la conservation des produits biologiques, sans additif ni réfrigération, correspond à une activité de l'eau située entre 0.25 et 0.35; la croissance des bactéries est généralement limitée lorsque l'activité de l'eau descend en dessous de 0.90 de même les moisissures et les levures sont inhibées respectivement, vers une activité de 0.70 et 0.80.

IV.6.3. Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau

Pour un matériau, les courbes donnant la teneur en eau (X en kg d'eau par kg de matière sèche) en fonction de l'activité de l'eau dans un produit pour une température donnée, sont appelées isothermes de désorption (cas du séchage) ou d'adsorption (cas de la réhumidification).

Pour chaque valeur de l'activité (A_w) d'un produit, l'isotherme donne la teneur en eau d'équilibre (X^*) du produit à une température donnée. Ces deux courbes d'isothermes (Figure IV.8) ont généralement des allures différentes (effet hystérésis) car le séchage d'un produit entraîne des modifications de structure et de porosité irréversible

La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit. Elle permet de calculer la teneur en eau d'équilibre X^* du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau X du produit à la fin du séchage.

La détermination de cette courbe consiste à placer un échantillon du produit dans une atmosphère à humidité relative connue jusqu'à l'équilibre (masse de l'échantillon inchangée) à ce moment on relève la valeur de l'humidité absolue d'équilibre du produit, ce qui représente un point de la courbe.

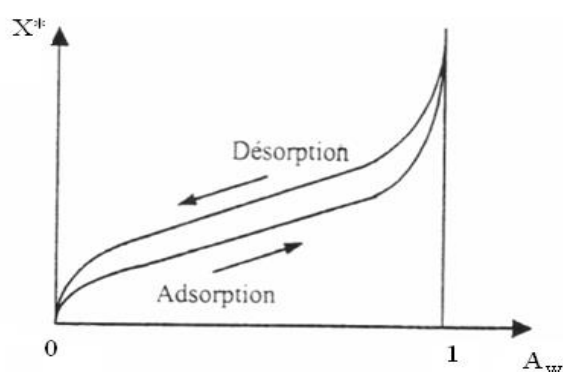


Figure IV.8. Isotherme d'adsorption et de désorption

Les isothermes d'adsorptions/ désorption se composent de trois zones, chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit.

*Zone1 ($A_w < 0.3$) : correspond à l'eau "fortement liée" dite aussi eau de constitution. L'eau est intimement liée aux composantes biochimiques par des liaisons covalentes; cette eau n'est pratiquement pas disponible comme solvant ou réactif et correspond à la première couche (monocouche) qui entoure la matière sèche d'aliment.

*Zone 2 ($0.3 < A_w < 0.7$): correspond à l'eau "faiblement liée", sous forme de couche polymoléculaire (multicouche) recouvrant partiellement la surface du substrat sec.

*Zone3 ($A_w > 0.7$): correspond à l'eau "libre" ou eau "liquide" qui n'est retenue à la surface du substrat sec que par des liaisons hydrogènes. Cette eau est disponible tant comme solvant que réactif. C'est uniquement sous cette forme que l'eau est utilisée par les micro-organismes et peut permettre les réactions enzymatiques.

IV.6.4.Types de séchage

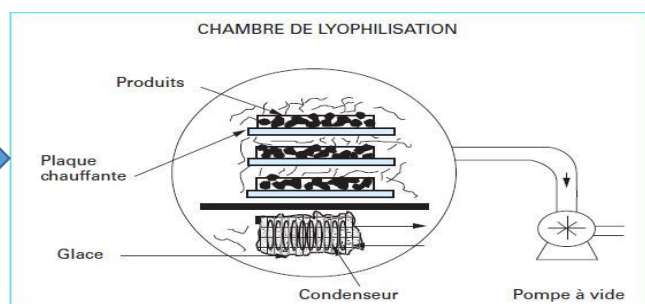
La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur : convection - conduction – rayonnement (figure IV.9).



Le séchage au soleil de raisins



Le séchage dans une étuve



Séchage par lyophilisation

Figure IV.9. Différents modes de séchage

IV.6.4.1. Séchage par convection

En séchage industriel, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de film ou de plaques.

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = h A (T_a - T_{\text{sup}}) \dots\dots\dots (*)$$

avec :

- Q quantité de chaleur transférée par unité de temps en (W) ;
- A surface d'échange en (m²) ;
- T_a – T_{sup} écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température superficielle du produit à sécher (K);
- h coefficient d'échange par convection (W · m⁻² · K⁻¹).

L'application au séchage de cette formule appelle les quelques remarques ci-après.

- La surface d'échange offerte par le produit à sécher n'est pas toujours très bien définie. Dans le cas de solides granulaires, dont la granulométrie n'est pas homogène, on définit un diamètre moyen des particules. Le principe du calcul consiste à diviser la répartition granulométrique en tranches. À chaque tranche correspond un diamètre moyen d_{pi} mais aussi un pourcentage X_i de la masse totale sur laquelle l'analyse granulométrique a été effectuée. Ainsi, le diamètre moyen d'un ensemble de particules sera égal à :

$$(d_p)_{\text{moy}} = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{d_{pi}}}$$

En supposant que les particules sont sphériques, la surface spécifique de la couche est alors :

$$a = \frac{6}{(d_p)_{\text{moy}}}$$

(a : mètres carrés par mètre cube de produit).

D'après la formule (*), la quantité d'énergie transférée au produit à sécher est d'autant plus importante que la surface de transfert est, elle-même, importante. Donc la diminution de la taille des particules du produit sera un facteur d'amélioration du séchage. De plus, elle facilitera la diffusion de l'humidité vers la surface des particules.

- L'écart ($T_a - T_{sup}$) n'est pas constant le long du sécheur. En effet, la température du produit augmente généralement au cours du séchage, alors que celle des gaz de séchage diminue. L'intégration de cet écart sur toute la durée du séchage en considérant (h) constant conduit à exprimer la quantité de chaleur échangée en fonction de la moyenne logarithmique des écarts de température à l'entrée et à la sortie de l'appareil. D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température entre le gaz et le produit est augmentée. Toutefois, la thermosensibilité du produit, caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter, limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage.

IV.6.4.2. Séchage par conduction

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont soit aspirées (séchage par ébullition), soit entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage par entraînement (séchage convectif).

Ce type de sécheur est donc très intéressant lorsque l'on désire réduire la quantité d'effluents gazeux rejetés. Le flux thermique (en W/m^2) est donné par la relation :

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dT_s}{dl}$$

Avec :

λ : conductivité thermique de la pellicule de produit ou de gaz à travers laquelle s'effectue le transfert ($W.m^{-1}.K^{-1}$),

$\frac{dT_s}{dl}$: gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

Dans le cas des sécheurs à tambours, les gradients de température sont très importants au niveau de la pellicule de produit. De plus, il est impossible de définir un coefficient d'échange produit/paroi.

Pour les sécheurs à plateaux à vis chauffante ou pour les sécheurs à tubes de vapeur, c'est l'épaisseur de la couche de gaz à travers laquelle s'effectue le transfert qui est inconnue.

On préfère donc, en définissant un coefficient d'échange global α' , recourir à une expression analogue à celle utilisée pour la convection :

$$Q = h' A' (T_F - T_{pr}) \dots\dots\dots(**)$$

avec :

- Q : quantité de chaleur échangée par unité de temps (W) ;
- A' : surface de transfert effectif offerte par l'appareil (m^2) ;
- T_F température locale du fluide chauffant(K) ;

- T_{pr} : température locale du produit (K).

Lorsque l'on généralise la formule (***) à tout le sécheur, l'écart ($T_F - T_{pr}$) est remplacé par la moyenne des écarts à l'entrée et à la sortie de l'appareil.

Le coefficient global d'échange par conduction h' résulte de trois autres coefficients :

- h_i : coefficient d'échange interne entre le fluide chauffant et la paroi ;
- h_p : coefficient de transmission de la paroi (égal au rapport de la conductivité thermique à l'épaisseur de la paroi) ;
- h_s : coefficient d'échange entre la paroi et le produit.

Ces coefficients sont reliés entre eux par l'expression suivante :

$$\frac{1}{h'} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_p} + \frac{1}{h_s}$$

IV.6.4.3. Séchage par rayonnement

Ce mode de séchage est destiné aux produits en plaque (carton, viande) ou en film (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faible épaisseur (1 à 2 cm) (cigarettes). L'énergie est apportée au produit à sécher par des ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques, soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Suivant la longueur d'onde ou la fréquence des radiations émises, on distingue les infrarouges et les radiofréquences.

Comment cela se passe ? On sait que toute surface dont la température est supérieure au zéro absolue émet un rayonnement capable de se transformer en chaleur, et que l'émittance énergétique totale d'une surface ou flux de chaleur émis par l'unité d'aire de cette surface, est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de la surface. Il en résulte que dans de nombreux séchoirs, une fraction plus au moins grande du flux de chaleur reçu par la matière est transmise par rayonnement et il convient, surtout si la température des parois est élevée, d'en tenir compte dans le calcul du flux, pour éviter un échauffement excessif de la matière.

Mais, indépendamment de ces séchoirs où l'énergie rayonnée n'est qu'accessoire, on réalise des séchoirs où le rayonnement (micro-onde ou infrarouge à partir de surface surchauffée ou de lampe) constitue pratiquement le seul mode de transmission de chaleur. Une surface portée à une température suffisamment élevée émet un rayonnement infrarouge qui sera absorbé d'une façon plus ou moins complète par le produit à sécher.

IV.6.4.4. Séchage sous vide

Le point d'ébullition d'un liquide s'abaissant lorsqu'on diminue la pression, le séchage réalisé sous vide provoque l'ébullition rapide du liquide à éliminer. L'opération qui s'effectue alors par vaporisation s'en trouve accélérée et la durée du séjour de la matière dans le séchoir écourtée. Ce mode opératoire rend ainsi possible le séchage de substances thermosensibles, difficile à traiter sous pression normale, en raison du séjour plus ou moins long qu'elles devraient subir à température élevée.

IV.6.4.5. Séchage par perte diélectrique

Le séchage par pertes diélectriques est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectrique). On l'obtient en plaçant la matière à sécher dans un champ électrique alternatif à très haute fréquence (1 à 30 Mhz). Un tel champ existe entre les armatures d'un condensateur plan relié à un générateur. Sous l'action de ce champ, les molécules du diélectrique se polarisent et sont contraintes de changer de polarité à chaque alternance. Ce changement de polarité provoque des vibrations mécaniques des dipôles moléculaires qui causent des frictions inter atomiques et inter-moléculaires engendrant de la chaleur qui sert à l'échauffement régulier de la matière.

IV.6.4.6. Séchage par lyophilisation

C'est un séchage s'effectuant sous une pression très réduite, inférieure à celle qui correspond au point triple du fluide qui constitue l'humidité à évacuer. Cette humidité se trouve donc congelée et son élimination se produit directement de la phase solide à la phase vapeur, sans passer par l'état liquide, c'est-à-dire par sublimation à basse température. Cette méthode de séchage étant évidemment très onéreuse ne peut s'appliquer qu'à des matières qui, en raison de leur fragilité à la chaleur ne supportent pas les méthodes habituelles de séchage par exemple: les substances biologiques (plasma sanguin, cellules...), produits pharmaceutiques (antibiotiques), produits alimentaires (café, lait, jus de fruit...).

IV.6.5. Modes de séchage

On peut distinguer divers procédés de séchage.

- Les procédés mécaniques (décantation, filtration et compression centrifugation).
- Les procédés thermiques par élévation de température et diminution de la pression de vapeur de la phase gazeuse. L'humidité est extraite par évaporation et diffusion.

IV.6.5.1. Séchage mécanique

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation,...).

Certains processus de préconcentration et de préséchage peuvent se réaliser sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement. Le tableau IV.1 suivant en donne quelques exemples :

Opération	Technique	Mécanisme	Applications
Concentration	Centrifugation	Sédimentation forcée	Jus de tomate
	Filtration	Tamisage	Boues résiduelles
	Ultrafiltration	Tamisage moléculaire	Lactosérum, blanc d'œuf
Séchage	Egouttage	Gravité	Fromage
	Essorage	Tamisage	Cristaux de sucre
	Pressage	Expression	Fourrages

L'élimination d'eau par voie mécanique se caractérise essentiellement par trois points l'opposant nettement aux techniques faisant appel aux transferts de chaleur.

a- Caractère limité

Les techniques citées plus haut ne permettent d'éliminer qu'une partie de l'eau libre des produits traités puisque l'eau adsorbée ne pourra pas être extraite par ce procédé. Aucun procédé mécanique ne permet d'abaisser l'humidité d'un produit au-delà de 60%.

b- Faible sélectivité

L'inconvénient des procédés mécaniques se retrouve sur le plan qualitatif dans la mesure où la phase éliminée n'est pas de l'eau pure mais est constituée par une dispersion ou une solution plus ou moins riche en extrait sec. C'est le cas notamment de l'ultrafiltration dont le perméat contient toutes les espèces dissoutes de masses moléculaires inférieures au point de coupure de la membrane. Seule, l'osmose inverse peut être considérée comme pratiquement sélective.

c- Faible consommation d'énergie

Cette caractéristique résulte des deux précédents. Le fait que seule la fraction aqueuse non liée soit éliminée implique une consommation moindre d'énergie. D'autre part, les processus thermiques d'élimination d'eau doivent leur relative sélectivité à un changement d'état des fractions aqueuses très coûteux en énergie, ce qui n'est pas le cas des procédés par voie mécanique. L'osmose inverse constitue à cet égard un cas intermédiaire intéressant. Une opération d'élimination d'eau par voie mécanique consomme de 2 à 35 kwh par tonne d'eau éliminée (par exemple, 15 à 25 kwh dans le cas des presses).

IV.6.5.2. Séchage chimique

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants tel que le chlorure de calcium, qui sert à extraire l'eau. $MgSO_4$ anhydre, Na_2SO_4 anhydre....etc.

IV.6.5.3. Séchage thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une «activation» de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur.

Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne :

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le coeur du produit.
- Transfert de masse interne, du coeur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur.

IV.6.5.3.a. Séchage par ébullition

L'ébullition d'un liquide se produit lorsque sa température est telle que la pression de vapeur P_V de l'eau de ce liquide est égale à la pression totale ambiante P : $P_V = P_t$

L'ébullition proprement dite (formation de bulles de vapeur d'eau) est plus difficile à observer dans les solides ou les corps pâteux que dans les liquides.

L'allure à laquelle s'évapore l'eau est déterminée par l'allure d'apport de la chaleur latente d'évaporation. Cet apport est effectué :

- * Par conduction, à partir d'une surface chauffée au contact du produit.
- * Par génération interne de chaleur due à l'exposition à un rayonnement infrarouge, ou de micro-ondes ou par un chauffage diélectrique.
- * Par convection, à partir de vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide chauffant.

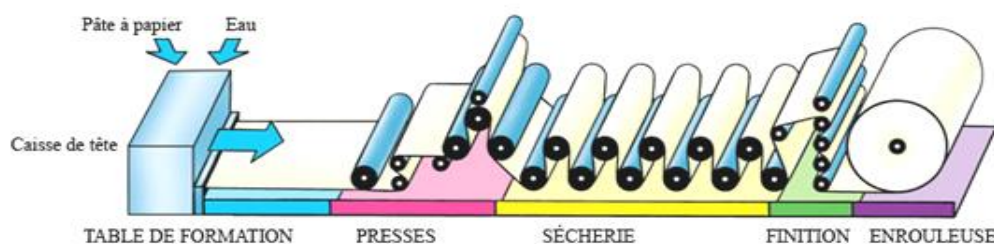


Figure IV.10. Procédé de fabrication du papier

Dans l'exemple précédent, la sécherie (Figure IV.10) est l'étape où la feuille est séchée contre des tambours de fonte chauffés intérieurement à la vapeur.

IV.6.5.3.b. Séchage par entraînement

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air ou dans un autre gaz suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que :

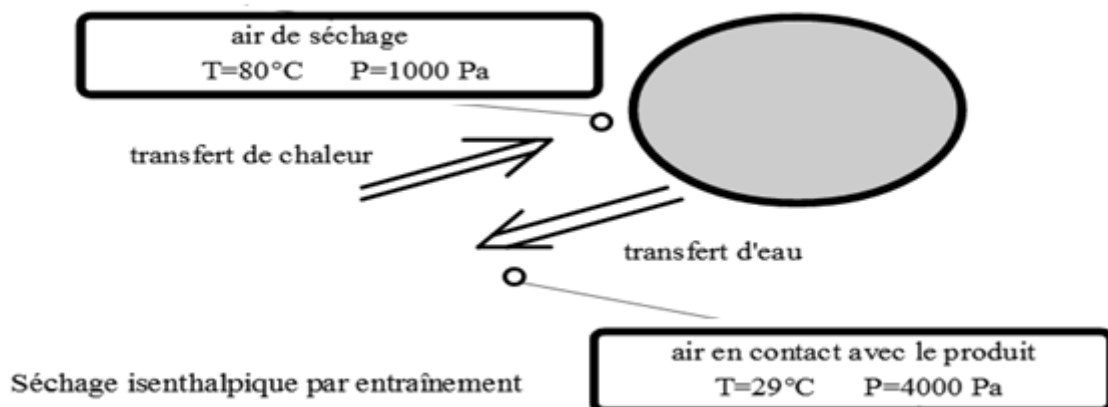
- * Un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de températures.
- * Un transfert d'eau de matière du matériau vers l'air de séchage.

La chaleur transmise par l'air permet l'évaporation de l'humidité du produit séché dont la température est celle de l'air humide (T_h). Le séchage peut donc être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur.

Il est important de souligner que la température de surface du produit séché est inférieure ou égale à celle de l'air de séchage.

Le séchage est dit « **isenthalpique** » si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par l'air chaud. L'air sert donc à la fois de fluide chauffant et de gaz vecteur pour l'eau éliminée : entrant sec et chaud dans le séchoir, il en ressort humide et moins chaud.

Un exemple typique du début de séchage d'un produit très hydraté, est donné en Figure ci-dessous. Les concentrations de l'air en eau sont exprimées en pressions partielles d'eau (en Pascal).



Le séchage peut se faire en co-courant ou à contre-courant (figure IV.11) :

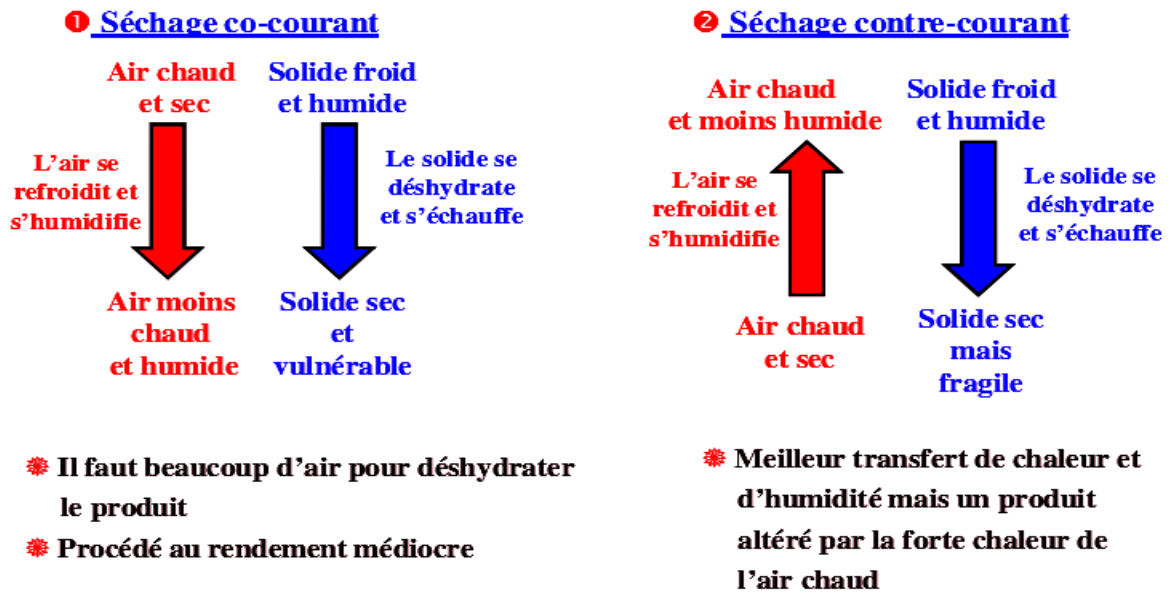


Figure V.11. Différents modes de séchage

IV.6. 6.Choix du procédé de séchage

Le choix de l'appareil adéquat pour sécher un produit donné se fait sur la base de certains facteurs :

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale.
- Le débit de produit exigé.
- La sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.
- La sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité,...)

IV.6.7.Cinétique de séchage

L'humidité dans un corps humide peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière comme illustré dans la figure V.12 ci-dessous.

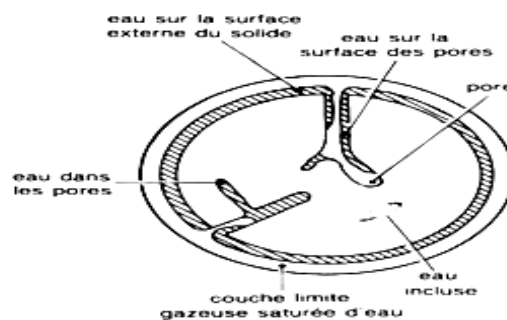


Figure IV.12. L'état de l'eau dans un solide humide en coupe

L'étude de la cinétique de séchage de différents produits est basée sur la représentation de l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'échange du matériau ($\text{kg}_{\text{d'eau}} / \text{m}^2 \text{ s}$) en fonction du temps (Figure IV.12). Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit pendant l'opération de séchage en fonction du temps. Les courbes de cinétique de séchage varient suivant le produit à sécher et peuvent présenter une à trois périodes.

La meilleure façon de caractériser le comportement d'un produit au cours du séchage consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalles de temps réguliers.

Dans le cas des produits alimentaires par exemple, pour chaque produit il existe une valeur d'humidité optimale d'équilibre pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses propriétés organo-leptiques et nutritionnelles.

Deux types de courbes permettent de décrire l'évolution du produit au cours du séchage :

- la teneur en eau du produit (X), en fonction du temps (t) obtenue directement à partir de l'enregistrement de la masse au cours du temps, connaissant la teneur en eau initiale du produit
- la vitesse de séchage ($-\frac{dX}{dt}$) en fonction du en fonction du temps t ou même la courbe proposée par Krisher ($-\frac{dX}{dt}$) en fonction de l'humidité X du produit.

Les courbes théoriques obtenues permettent classiquement de distinguer trois périodes (Figure IV.13) :

- la phase transitoire de mise en température du produit à sécher (**Phase 0**) ;
- la phase à vitesse de séchage constante (**Phase 1**) ;
- la phase à vitesse de séchage décroissante (**Phase 2**) ;

C: est le point critique du séchage

Toutes ces étapes ne sont pas systématiquement observables, puisque la première étape peut être tellement rapide surtout quand il s'agit de matériaux avec une épaisseur très faible (une couche de peinture par exemple) et donc elle peut ne pas être observable, autrement dit négligeable devant le reste des étapes.

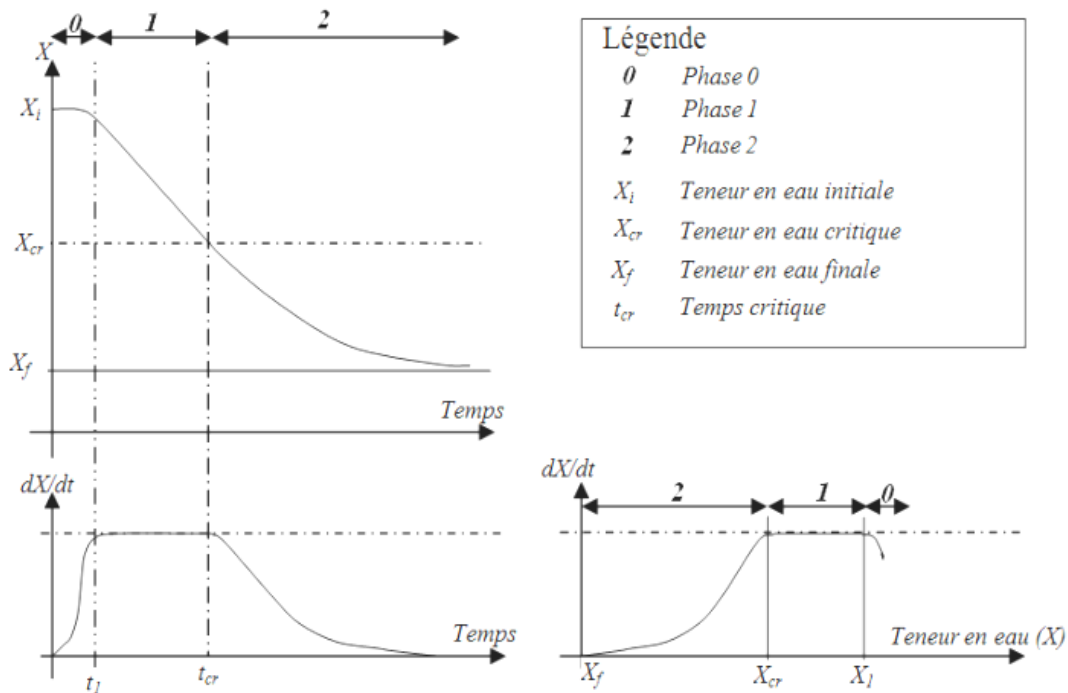


Figure IV.13 : Courbes de cinétique de séchage

IV.6.7.1. Période de mise en température (Phase 0)

C'est une période de mise en température du produit à sécher et elle n'est pas spécifique à l'opération de séchage. Durant cette période, le produit s'échauffe jusqu'à atteindre la température du bulbe humide (T_h) caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global.

IV.6.7.2. Période à allure constante (Phase 1)

Cette période de séchage à vitesse constante correspond à l'évaporation de l'eau libre (l'eau superficielle). Le liquide remonte en surface sous l'action des forces d'aspiration des capillaires et il se renouvelle à une vitesse suffisante pour former une pellicule continue et compenser l'évaporation. Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air et le produit est entièrement utilisé pour l'évaporation de l'eau ; le séchage est dit isenthalpique. Lorsque l'humidité superficielle du solide n'est pas renouvelée avec une vitesse suffisante pour maintenir en surface une pellicule continue du liquide, la vitesse de séchage cesse d'être constante. Pour les produits alimentaires et biologiques, on n'observe en général pas de période de séchage à vitesse constante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure du produit suite à la migration des solutés qui obstruent les pores et le durcissement et la rétraction de la surface du produit

IV.6.7.3. Période de ralentissement (Phase 2)

La première période de ralentissement commence lorsque la surface du matériau en contact avec l'air chaud atteint soit le seuil hygroscopique, autrement dit, toute l'eau libre a été éliminée en surface. Le front de séchage qui se trouvait en surface migre vers l'intérieur du produit. Dans cette phase, ce sont les différentes résistances internes du produit aux transferts de chaleur et de matière qui contrôlent la vitesse de séchage. Ces résistances seront d'autant plus grandes que le front de séchage se situe loin de la surface externe du produit. Lorsqu'il ne subsiste plus que de l'eau liée, la seconde phase de ralentissement commence. Le séchage est terminé lorsque le solide a atteint sa teneur en eau d'équilibre dans les conditions opératoires considérées. Si le matériau est non hygroscopique, cette seconde période n'existe pas : la première zone de décroissance se poursuit jusqu'au terme du séchage.

IV.6.8. La durée de séchage

Vue la forme de la courbe de séchage, le temps de séchage doit être déterminé séparément pour les trois phases de séchage. La première phase est très rapide et parfois inexistante donc la durée de séchage est donnée par la phase de séchage à vitesse constante et à vitesse décroissante.

La durée de séchage pendant la phase à vitesse constante (2) peut être calculée, pour un sécheur donné fonctionnant en continu, en effectuant un bilan sur l'appareil (Figure IV.14).

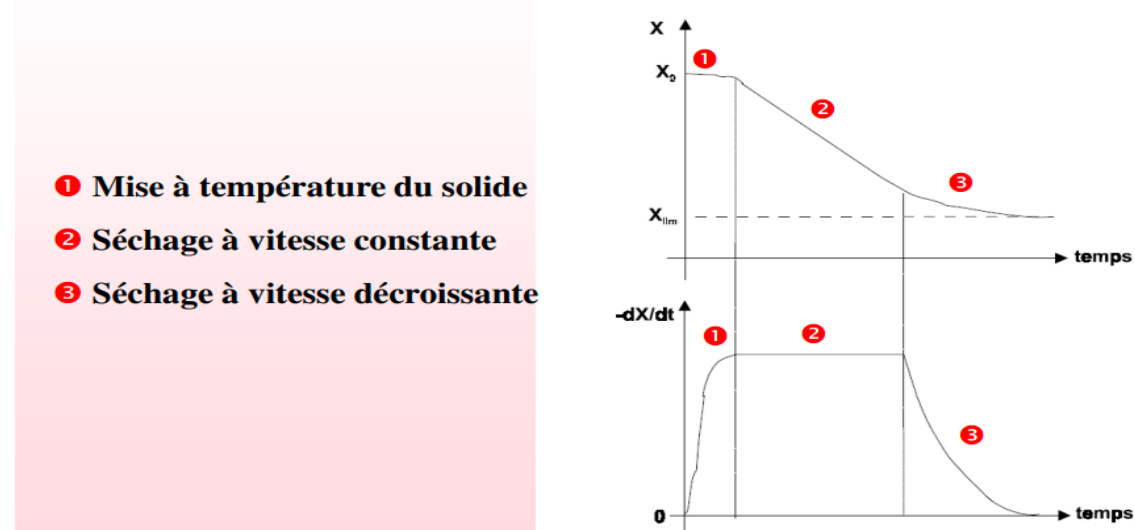


Figure IV.14 : Détermination de la durée de séchage

IV.6.8.1. Calcul de la durée de séchage pour la période à flux d'évaporation constant (t_1)

La vitesse de séchage : $v = - \frac{dX}{dt} = k$

Où X est la teneur en eau du matériau ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}$ de matière sèche)

$$v = \frac{X_0 - X_{CR}}{t_0 - t_1} = -k$$

$$\frac{X_0 - X_{CR}}{t_0 - t_1} = -k$$

$$\frac{X_0 - X_{CR}}{t_1} = k$$

$$t_1 = \frac{1}{k} (X_0 - X_{CR}) \text{ par unité de masse}$$

où X_{CR} est la teneur en eau critique du matériau

Considérant le bilan pour une masse de matériau sèche m_s

$$\text{La durée } t_1 = \frac{m_s}{k} (X_0 - X_{CR})$$

IV.6.8.2. Calcul de la durée de séchage pour la période à flux d'évaporation ralenti (t_2)

$$V = - \frac{dX_s}{dt} = f(X)$$

$$\int_0^{t_f} dt = - \int_{X_{CR}}^{X_f} \frac{dX_s}{f(X)}$$

En assimilant $f(X)$ à une droite de la forme $aX + b$

✓ détermination des constantes a et b

À l'équilibre, la vitesse de séchage est nulle $\frac{dX}{dt} = 0$ et $X = X_{eq}$

$$\text{À } X = X_{CR} \quad v = - \frac{dX}{dt} = k$$

La résolution du système d'équations précédent donne :

$$a = \frac{k}{X_{CR} - X_{eq}} \quad \text{et} \quad b = - \frac{k}{X_{CR} - X_{eq}} X_{eq}$$

En remplaçant dans l'expression de la vitesse

$$- \frac{dX}{dt} = \frac{k}{X_{CR} - X_{eq}} X - \frac{k}{X_{CR} - X_{eq}} X_{eq}$$

$$-\frac{dX}{dt} = \frac{k}{X_{CR}-X_{eq}} (X - X_{eq}) = f(X)$$

Calculons l'intégrale précédente :

$$\int_0^{t_f} dt = - \int_{X_{CR}}^{X_f} \frac{dX_s}{aX+b}$$

$$\int_0^{t_f} dt = - \int_{X_{CR}}^{X_f} \frac{dX}{\frac{k}{X_{CR}-X_{eq}}(X-X_{eq})} = - \frac{1}{k} (X_{CR} - X_{eq}) \int_{X_{CR}}^{X_f} \frac{dX}{X-X_{eq}}$$

$$t_2 = \frac{1}{k} (X_{CR} - X_{eq}) \ln(X - X_{eq})$$

$$t_2 = \frac{1}{k} (X_{CR} - X_{eq}) \ln \left(\frac{X_{CR}-X_{eq}}{X_f-X_{eq}} \right) \quad \text{durée par unité de masse de matière sèche}$$

Donc pour une masse de matière sèche m_s

$$t_2 = \frac{m_s}{k} (X_{cr} - X_{eq}) \ln \left(\frac{X_{cr}-X_{eq}}{X_f-X_{eq}} \right)$$

La durée globale de l'opération de séchage est :

$$t = t_1 + t_2$$

$$t = \frac{m_s}{k} (X_0 - X_{CR}) + \frac{mm_s}{k} (X_{CR} - X_{eq}) \ln \left(\frac{X_{CR}-X_{eq}}{X_f-X_{eq}} \right)$$

$$t = \frac{m_s}{k} \left[(X_0 - X_{CR}) + (X_{CR} - X_{eq}) \ln \left(\frac{X_{CR}-X_{eq}}{X_f-X_{eq}} \right) \right]$$

IV.6.9. Influence des caractéristiques de l'air sur la cinétique de séchage

IV.6.9.1. Influence de la température de l'air

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit, apport qui croît avec la température de l'air. Plus la température de l'air est grande, plus la chaleur cédée au produit est grande et donc l'élimination de l'humidité du matériau est grande. La température utilisée doit être fixée en dessous de celle qui peut altérer la qualité du produit séché.

IV.6.9.2. Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air influe effectivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par le transport interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible.

IV.6.9.3. Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. Il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente

IV.6.10. Bilan Matière d'un Séchoir fonctionnant à courants-croisés

Etablissons le bilan matière du séchoir représenté ci-dessous (Figure IV.15)

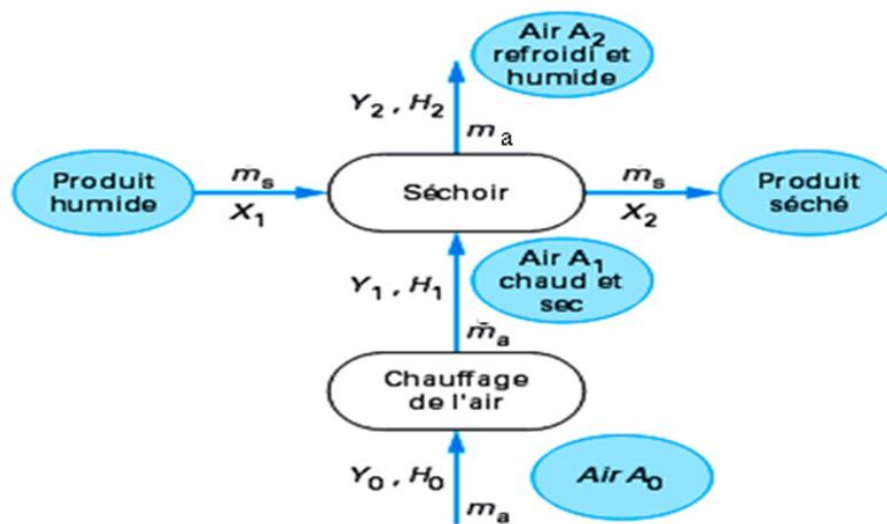


Figure IV.15. Séchoir fonctionnant à courants croisés

Les bilans s'écrivent sur la base de la matière sèche et de l'air sec.

• **Bilan de matière sur le produit à sécher**

Le matériau humide entre dans le séchoir avec une masse (m_1) et une humidité (X_1) ; il ressort avec une masse plus faible (m_2) et une humidité résiduelle (X_2). La masse d'eau éliminée est m_{eau} et la masse du matériau complètement sec est m_s , on peut écrire :

$$m_{eau} = m_1 - m_2 = m_s (X_1 - X_2) \dots\dots\dots(1)$$

• **Bilan sur l'air de séchage**

De même pour l'air ; si on considère que le débit de l'air humide à l'entrée et à la sortie du système sont respectivement m_{a1} et m_{a2} ; Y_1 et Y_2 , l'humidité absolue de l'air à l'entrée et à la sortie du système respectivement :

$$m_{a2} = m_{a1} + m_{eau} \text{ donc } m_{eau} = m_{a2} - m_{a1}$$

Appelons m_a le débit de l'air sec, le bilan précédent s'écrira donc :

$$m_{eau} = m_a(Y_2 - Y_1) \dots\dots\dots(2)$$

de (1) et (2), il en sort que l'eau cédée par le matériau est reçue par l'air; le débit d'eau s'écrit alors :

$$m_{eau} = m_a (Y_2 - Y_0) = m_s (X_1 - X_2)$$

- m_a : masse de l'air sec, Y_0, Y_1, Y_2 représente l'air de séchage à l'entrée, à la sortie du réchauffeur et à la sortie du séchoir
- m_s ; masse du produit sec; X_1 et x_2 représente la teneur en humidité du produit à l'entrée et à la sortie du séchoir.

Étant donné que l'humidité de l'agent de séchage est la même à l'entrée et à la sortie du réchauffeur, on a $Y_1 = Y_0$. Il s'ensuit que le débit du liquide à éliminer est :

$$m_{eau} = m_a (Y_2 - Y_1) = m_s (X_1 - X_2)$$

Bilan thermique sur l'air circulant dans le séchoir

Ce qui entre = Ce qui sort

$$m_a H_0 + Q = m_a H_1 = m_a H_2$$

avec :

- ✓ Q : la quantité de chaleur nécessaire pour le chauffage de l'agent de séchage (l'air)
- ✓ $m_a H_0$: le flux de chaleur apporté par le gaz à l'entrée dans le réchauffeur.

H_1 et H_2 sont égaux si on considère que le séchage se fait de **manière isenthalpique**;

La quantité de chaleur Q nécessaire pour le chauffage de l'agent de séchage est égale à ;

$$Q = m_a (H_1 - H_0) = m_a (H_2 - H_0)$$

Pour obtenir l'élimination de 1 kg de vapeur d'eau, on doit fournir un flux de chaleur :

$$q = \frac{Q}{m_{eau}} = \frac{m_a}{m_{eau}} (H_2 - H_0) \quad \text{d'où}$$

$$q = \frac{(H_2 - H_0)}{(Y_2 - Y_1)}$$

TOURS DE CONTACT GAZ-LIQUIDE

V.1.Introduction

Un système de refroidissement industriel est un système destiné à extraire le trop-plein de chaleur d'un fluide par échange calorifique avec de l'eau ou de l'air, de manière à abaisser la température de ce fluide à une température bien déterminée. Les systèmes de refroidissement sont fondés sur les principes de la thermodynamique. La température du procédé et la capacité de refroidissement nécessaire doivent être garanties à tout moment pour améliorer l'efficacité du procédé industriel ou de fabrication et réduire la perte de produit et les émissions rejetées dans l'environnement. Plus les procédés sont sensibles à la température, plus le rôle de ce paramètre est important. Le climat local constitue également un facteur important en matière de refroidissement parce qu'il influence la température des réfrigérants que sont l'eau et l'air. Avant de choisir le type de refroidissement nécessaire pour le processus, il faut prendre en compte les contraintes liées au site comme la législation locale, les critères environnementaux et le niveau de chaleur résiduelle.

En apparence gratuits mais vu la rareté de l'eau et la pollution de l'air, le jour viendra où leur utilisation demandera des traitements et de la régénération. Toutefois, pour faire fonctionner correctement des grandes installations industrielles à grand puissance et à grand débit ou la température de l'air extérieur peut conduire à ces températures élevées, il sera nécessaire faire appel à des systèmes de refroidissement économiseurs d'eau. Les tours de refroidissement s'inscrivent dans ce contexte. Ce chapitre sera consacré à ce type de matériel sous toutes les coutures.

V.2. Définition de la tour de refroidissement

Les tours de refroidissement sont utilisées pour refroidir un liquide ou un gaz à l'aide d'un fluide de refroidissement. Elles peuvent être considérées comme des échangeurs de chaleur utilisés pour la dissipation de larges charges thermiques vers l'atmosphère. Les quantités de chaleur à évacuer étant importantes donc les systèmes de refroidissement doivent être prévus en conséquence ; Les moyens de refroidissement de telles installations sont le plus souvent l'air ambiant. Le principe de la tour de refroidissement signifie que l'eau coule tandis que l'air est poussé vers le haut par un ventilateur ; ces systèmes permettent d'économiser à un certain pourcentage l'utilisation de l'eau froide neuve. Les tours de refroidissement sont des

équipements courants, présents dans des installations de climatisation, ou dans des procédés industriels et énergétiques. La figure V.1 illustre une tour de refroidissement.



Figure V.1. Photo réelle de tour de refroidissement

Une tour de refroidissement peut désigner tout système ou dispositif industriel utiliser pour réduire la consommation d'eau utilisée pour:

- La condensation de la vapeur d'eau dans le cas de centrales thermiques
- Le refroidissement d'appareillages ou équipements travaillant sous sollicitations thermiques
- La condensation de fluides frigorigènes dans le cas de pompes à chaleur.

V.3. Classification des tours de refroidissement

Il existe plusieurs critères de classement des tours de refroidissement. Par mieux on cite :

V.3.1. Classification suivant la nature des échanges

V.3.1.a. Tours de refroidissement humide

Le refroidissement évaporatif (Figure V.2- a), est basé sur le contact direct entre l'air et l'eau. L'air avide d'humidité, évapore une partie de l'eau à refroidir en prélève la « chaleur latente de vaporisation » qui conduit au refroidissement recherché. Par ce principe, la température de sortie de l'eau avoisinerait la température humide de l'air. Cependant, ce type d'installation nécessite un traitement d'eau pour assurer le bon fonctionnement et aussi réduire les défauts majeurs rencontrés (coût d'entretien, calcaire, algue, corrosion et bien sûr légionellose).

V.3.1.b. Tours de refroidissement sèches

Dans ce cas (Figure V.2-b), il n'y a aucun contact physique entre le fluide refroidi (eau) et le refroidisseur (air). Le transfert de chaleur se fait à travers une paroi qui sépare les deux fluides,

l'eau circule à l'intérieur des tubes d'un échangeur alors que l'air ambiant brasse l'échangeur du côté extérieur. Ce type de système s'applique principalement dans le domaine de la climatisation pour des puissances relativement faibles, aussi lorsque la quantité d'eau disponible sur site est limitée. En effet, on ne peut pas avoir des températures de refroidissement aussi basses que celles obtenues par refroidissement évaporatif. Par ailleurs, ce type de tours de refroidissements est réalisable beaucoup plus sous des climats froids ou en période hivernale pour lesquels la température de l'air ambiant est inférieure à la température de l'eau à atteindre.

V.3.1.c. Tours de refroidissement hybrides

Une tour hybride (Figure V.2-c), allie les deux modes refroidissement sec et humide, constituée d'une batterie sèche située au sommet de la tour couplée à un corps d'échange sur lequel l'eau à refroidir est pulvérisée. Ce choix se justifie par considérations environnementales qui limitent par exemple la consommation d'eau en été ou la formation d'un panache de vapeur condensée par temps humide et froid en hiver.

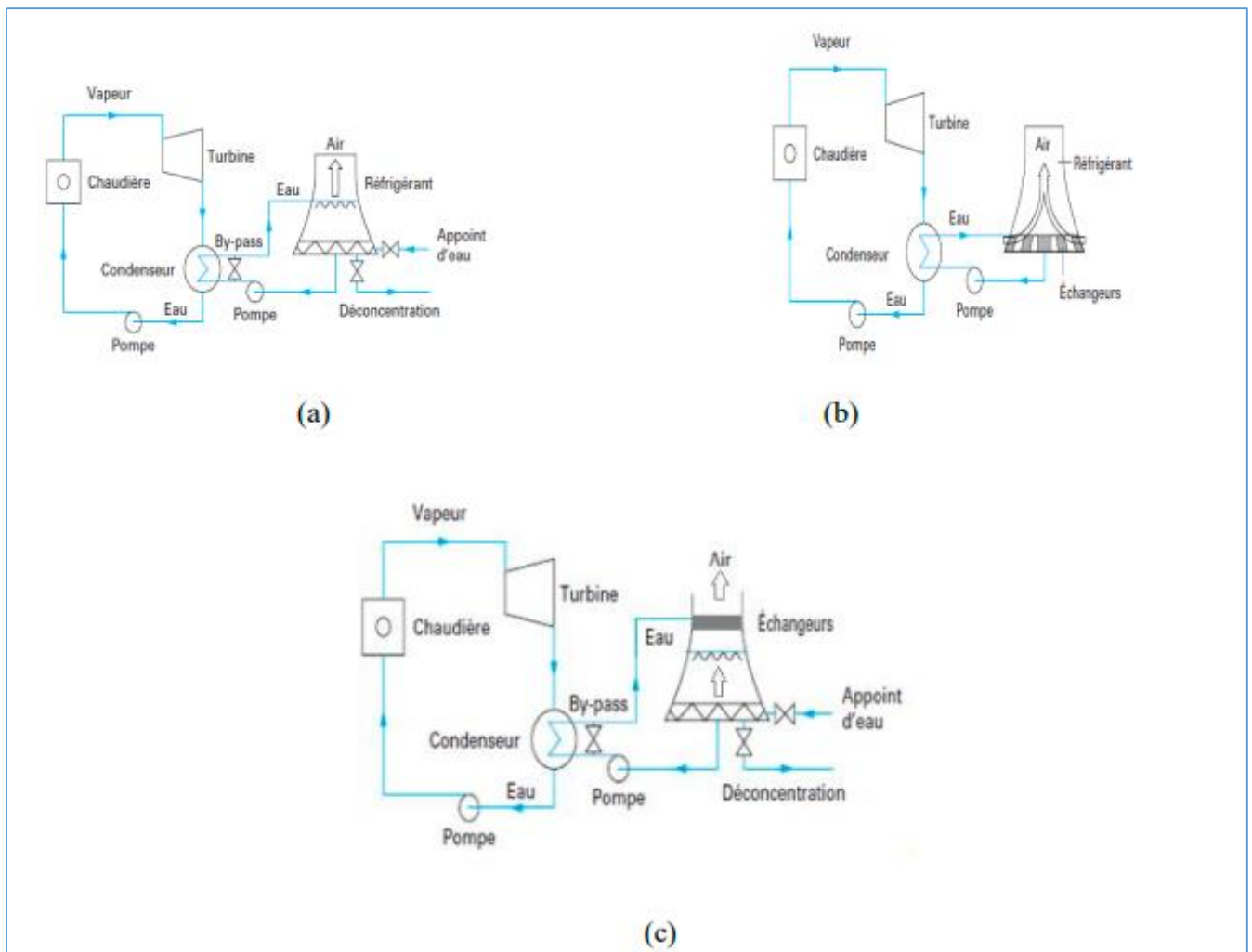


Figure V.2. Types de tours de refroidissement selon la nature d'échange

V.3.2. Classification suivant le mode de refroidissement de l'eau

Il en existe deux modes :

V.3.2.a. Tour de refroidissement à circuit ouvert

Ce type d'installation (Figure V.3-a), ne requiert pas un échangeur intermédiaire, l'eau chaude en provenance de l'installation à refroidir est directement pulvérisée en fine gouttelettes dans une tour de refroidissement pour assurer son refroidissement.

V.3.2 b. Tour de refroidissement à circuit fermé

Dans ce système (Figure V..3-b), l'eau à refroidir, en provenance d'un condenseur ou d'une quelconque installation qu'elle refroidie, traverse un échangeur de chaleur intermédiaire alimenté à contre-courant par de l'eau froide en provenance d'une tour de refroidissement.

On distingue alors deux circuits d'eau :

- Un circuit dit primaire dans lequel circule, en circuit fermé, l'eau de refroidissement des installations annexes.
- Un circuit dit secondaire, véhiculant de l'eau en circuit ouvert dans une tour de refroidissement, qui assure le refroidissement de l'eau en circulation dans le circuit primaire.

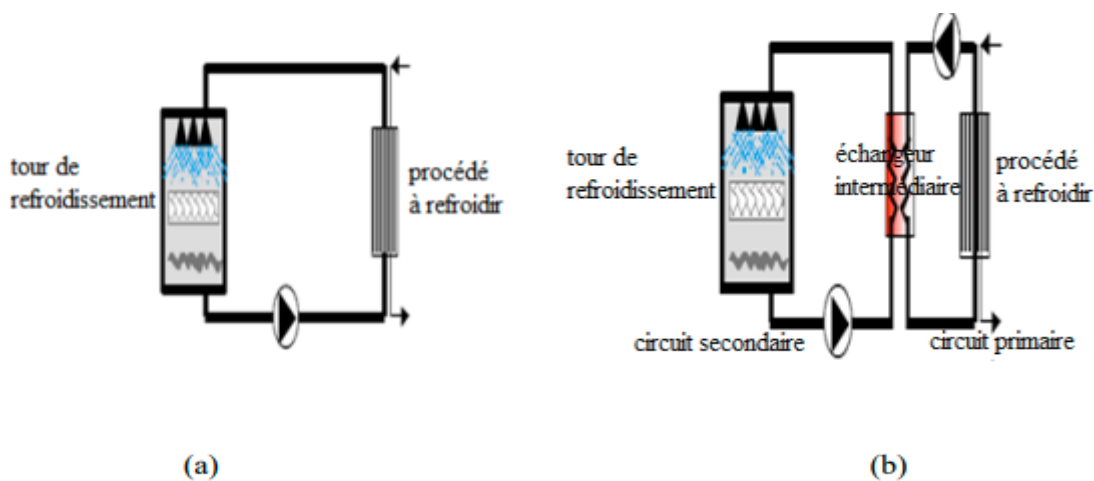


Figure V. 3. Types de tours selon le mode de refroidissement de l'eau

V.3.3. Classification suivant l'appel d'air

V.3.3.a. Tour de refroidissement à ventilation naturelle

Pour ce type de Tours à tirage naturelle (Figure VI.4-a), le courant d'air est provoqué naturellement par la différence de températures entre l'air ambiant et l'air plus chaud à l'intérieure de la tour de refroidissement. En effet, l'air chaud chargé en humidité entame son ascension vers le sommet de la tour. L'air extérieur, frais et plus lourd, est alors aspiré du coté inférieur de la tour. Ce mode de circulation est exploité dans de grandes tours utilisées par les centrales électriques. Les débits d'air

circulant dans ces tours peuvent atteindre $30\,000\text{m}^3/\text{s}$ pour un diamètre de base d'environ 130 m et une hauteur de plus de 160m. Son exécution dépend en grande partie de la direction et de la vitesse du vent. Bien que son fonctionnement ne nécessite pas un apport considérable en énergie électrique, sa puissance thermique reste relativement modeste.

V.3.3.b. Tour de refroidissement à tirage mécanique

En raison des difficultés et coûts énormes de construction de grandes tours à tirage naturelle, les constructeurs ont préféré les remplacer par de petites tours. Cependant, la différence de densité de l'air dans ces tours ne suffit pas à assurer le tirage naturel, des ventilateurs veillent alors à renouveler l'air en son sein. On parle alors de convection forcée.

Il y a deux classes différentes de tours à tirage mécanique :

- **Les tours à tirage forcé** (obligatoire) : elles ont un ou plusieurs ventilateurs situés à la base de la tour (Figure V.4-b). Lors du fonctionnement, les ventilateurs génèrent des vitesses réduites de courants d'air horizontaux puis verticaux.
- **Les tours à tirage induit** : Elles disposent d'un ou plusieurs ventilateurs placés au sommet de la tour (Figure V.4-c). Elles permettent l'évacuation de l'air à vitesses conséquentes et limite le retour d'air en sortie qui peut réduire l'efficacité de refroidissement de la tours de refroidissement.

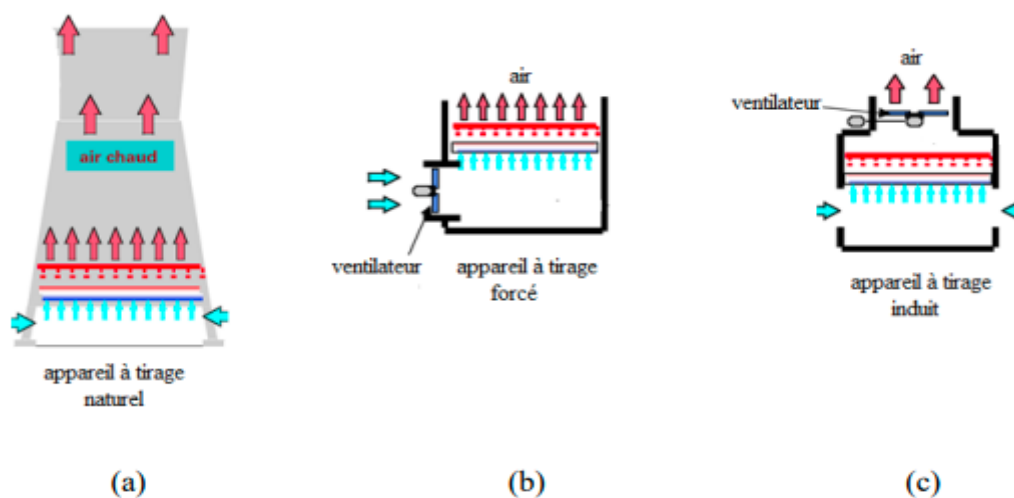


Figure V.4. Types de tour selon l'appel d'air

V.3.4. Classification suivants la circulation d'air

V.3.4.a- Courants parallèles

Dans ce cas, l'eau et l'air s'écoulent verticalement dans la tour et dans le même sens (de haut en bas).

V.3.4.b. Contre courants

Figure V.5-a représente le fonctionnement à contre-courant ; Dans ce type d'écoulement, l'air est animé d'un mouvement ascendant à travers le corps d'échange, alors que l'eau ruisselle de haut en bas sur ce même corps. Cette configuration est la plus répandue car elle procure à la tour une meilleure efficacité. Les modèles de calculs développés pour ces deux configurations d'écoulements, sus citées, sont unidimensionnels.

V.3.4. c. Ecoulement à courants croisés

L'air circule horizontalement alors que l'eau, pulvérisée en fines gouttelettes, chute librement (Figure V.5-b). Cette configuration d'écoulement implique un modèle de calcul bidimensionnel. Généralement on rencontre dans les tours de refroidissements soit des écoulements à contre courants, soit à courants croisés. Cependant, le fonctionnement à contre-courant offre 25% de plus d'efficacité.

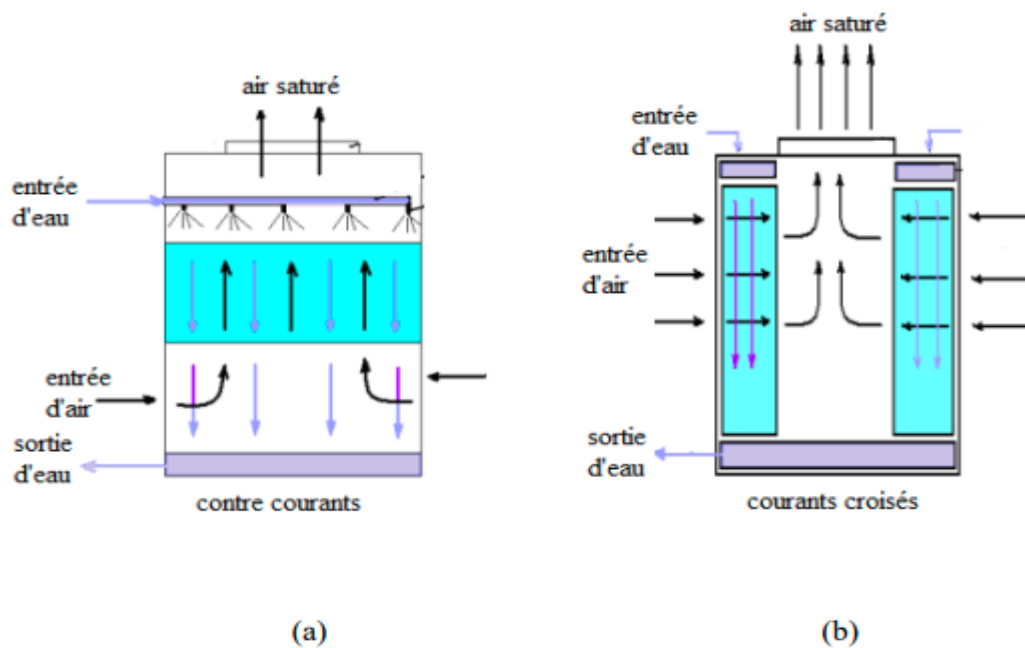


Figure V.5. Types de tours selon la circulation d'air

V.4. Choix du type de refroidissement

D'une manière générale, les paramètres à considérer lors d'une sélection des systèmes de refroidissement techniquement envisageables sont les suivantes :

- La température de retour du fluide désirée,
- La puissance thermique totale du procédé à refroidir,
- Le débit d'eau ou fluide circulant dans la tour qui dépendra de l'écart de température souhaité pour le fluide venant du procédé à refroidir,
- Le temps de fonctionnement de la machine à refroidir,
- Les conditions climatiques, la disponibilité en eau et les besoins d'espace et lors de sa conception, il faut considérer :
 - La quantité, la qualité et les coûts du fluide de refroidissement disponible (eau et air),
 - La taille disponible (aire, hauteur, poids des installations de refroidissement), – les effets sur l'environnement,
 - Les effets météorologiques,
 - Les dépenses en capital pour les systèmes de refroidissement, les pompes, le traitement des conduits et de l'eau,
 - Les coûts de fonctionnement des pompes, des ventilateurs et du traitement de l'eau,
 - Les coûts annuels de maintenance et de réparation.

En général, les coûts de maintenance pour les systèmes à air sont considérés comme inférieurs, car le traitement antitartre et le nettoyage mécanique de la surface de l'eau n'est pas nécessaire,

- Les paramètres de fonctionnement tels que la durée de vie minimale, le temps de fonctionnement annuel, la charge moyenne dans le taux de production thermique et le débit d'eau. Il est nécessaire également de surdimensionner le système de refroidissement au moment de sa phase d'installation pour prévenir à une augmentation de la capacité de production. Cela ne va pas suffire pour une grande extension mais peut servir jusqu'à l'ajout d'une nouvelle tour. A part le choix de la tour, on doit faire aussi le choix des matériaux à utiliser.

Les matériaux dépendront du :

- Type de fonctionnement de la tour,
- Niveau de pression,
- Composition et corrosivité de l'eau de refroidissement,
- Composition et corrosivité du fluide à refroidir,
- Longévité de la conduite.

L'utilisation des matériaux sensibles à la corrosion nécessite un traitement sévère de l'eau qui circule dans le circuit. Généralement, on utilise souvent de l'acier carbone, l'acier galvanisé, l'aluminium/laiton, le cuivre/nickel, les types adaptés d'acier inoxydable et le titane.

V.5. Théorie des phénomènes de transferts dans les tours de refroidissement

Les profils de la température et de la concentration en termes d'humidité sont représentés à l'interface eau-gaz la (Figure V.6). La vapeur d'eau diffuse de l'interface vers la phase gazeuse avec un force motrice dans la phase gazeuse de $(\phi_i - \phi_G)$, il n'y a pas de transfert de masse dans la phase liquide, puisque l'eau est un liquide pur. La force motrice de la température est $(T_L - T_i)$, dans la phase liquide et $(T_i - T_G)$ en K ou °C dans la phase gazeuse. La chaleur sensible s'écoule du liquide vers l'interface ; elle s'écoule également de l'interface vers la phase gazeuse. La chaleur latente quitte également l'interface dans la vapeur d'eau ; se diffusant dans la phase gazeuse.

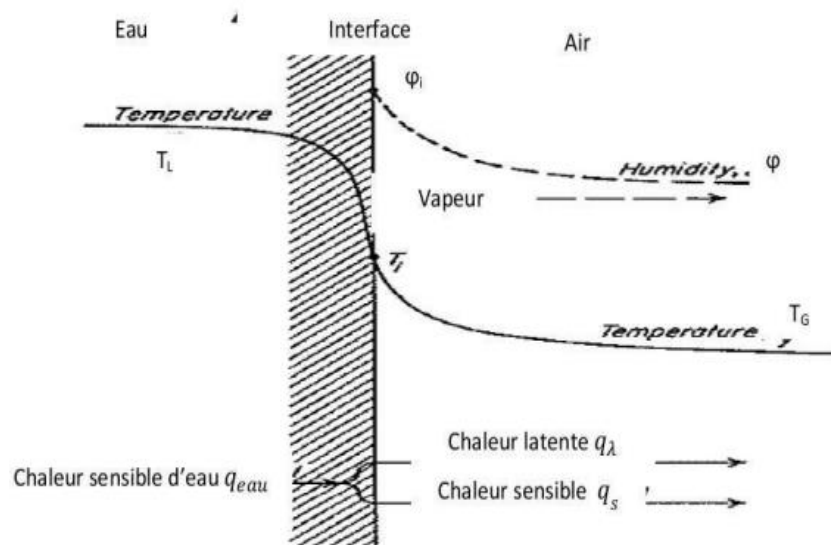
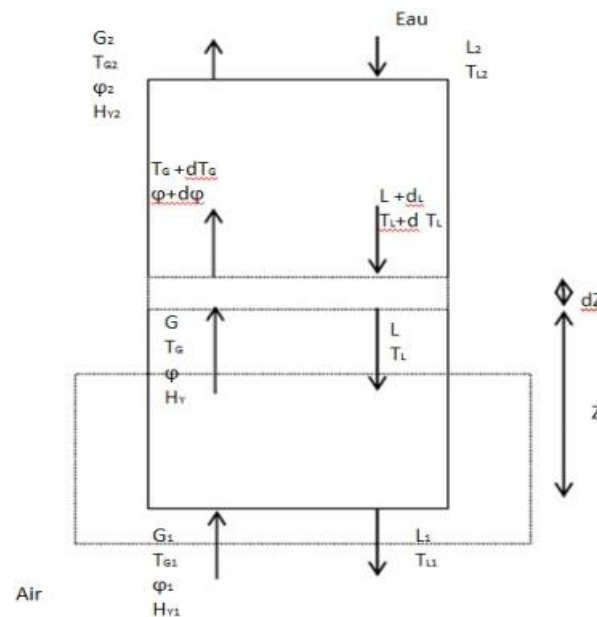


Figure V.6. Profils de la température et de la concentration en partie supérieure de la tour de refroidissement.

V.6. Bilan massique et thermique

Considérons une tour de refroidissement sous forme d'une colonne à garnissage fonctionnant à contre-courant. La surface interfaciale entre l'air et l'eau est inconnue. Le processus est supposé adiabatique. Les différents flux et variables sont figurés dans le Schéma suivant :



Avec :

- L : Débit de l'eau
- G : Débit d'air sec
- T_L : Température de l'eau
- T_G : Température de l'air
- ϕ : Humidité de l'air
- H_y : Enthalpie du mélange air-vapeur d'eau

L'enthalpie totale du mélange air-vapeur d'eau s'écrit :

$$H_y = C_{p\text{airsec}} * (T_G - T_0) + \phi * C_{p\text{vapeur}} * (T_G - T_0) + \phi \lambda(T_0)$$

Avec :

$C_{p\text{airsec}}$: la capacité calorifique de l'air sec	$C_{p\text{vapeur}}$: la capacité calorifique de la vapeur
T_G : La température de l'air sec	Φ : l'humidité absolue de l'air
T_0 : température de référence.	λ : Chaleur latente

Le bilan thermique global autour de la zone inférieure de la colonne (partie encadrée sur la figure) s'écrit:

$$G*(Hy-Hy1)=L C_{peau} (T_L-T_{L1})$$

Avec : $C_{peau} = 4,187 \text{ kJ/Kg.K}$

Cette équation représente la droite opératoire du processus.

Le bilan différentiel sur la tranche dz s'écrit :

$$L*C_{peau}* dT_L=G*dHy$$

- Le flux de chaleur sensible transféré de l'eau vers l'interface est :

$$q_{eau}/S = L C_{peau} dT_L=G dHy=h_{eau} a dz (T_L-T_i)$$

Avec :

dTL : la température de l'eau sur la tranche dZ	S : la section droite de la tour.
dHy l'enthalpie de mélange l'air vapeur sur la tranche dz	a : Surface de la tour
heau le coefficient de transfert thermique	$h_{eau} a$: Coefficient du transfert thermique volumique en phase liquide (W/m ³ K)

- Le flux de chaleur sensible de l'interface vers la phase gazeuse est :

$$q_s/S =H_G a (T_i-T_G) dz$$

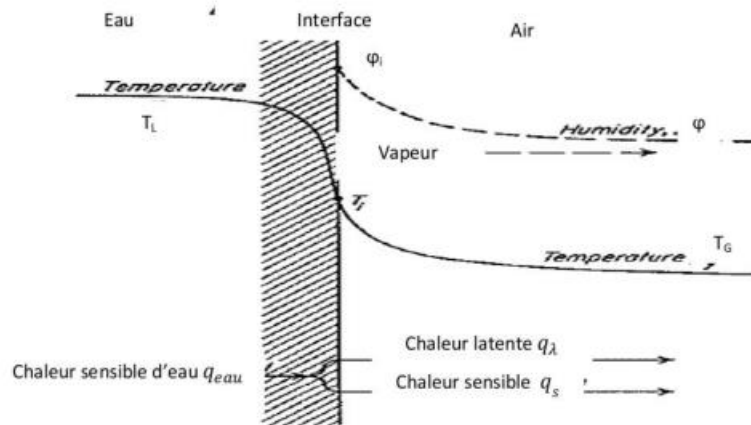
Avec :

HG : le coefficient d'échange thermique en présence de transfert de masse	T _G : la température de l'air
T _i : la température du film	a : surface de la tour

$H_G a$: Coefficient du transfert thermique volumique en phase gazeuse (W/m³.K) Le flux thermique dû à la chaleur à la chaleur latente est :

$$q_{\lambda}/S =Ky a (T_o) (\phi_i-\phi_G) dz$$

Ky : étant la conductance liée au transfert de masse,	Φ_i : étant l'humidité à la saturation du film
$\lambda(T_o)$: la chaleur latente à la température de référence	ϕ_G étant l'humidité de l'air



Or :

$$q_{eau} = q_{\lambda} + q_s$$

Soit :

$$G dHy = Ky a (T_o)(\phi_i - \phi_G) dz + h_G a (T_i - T_G) dz$$

En régime turbulent, h_G et K_y sont liés par la corrélation suivante:

$$h_G / (Ky Ch) = [Sc / Pr]^{2/3} = Le = 1$$

Avec :

Ch : La capacité calorifique de l'air

Lewis (Le) : est un nombre sans dimension comparant la diffusivité de masse avec la diffusivité thermique.

Schmidt (Sc) : est un nombre sans dimension qui représente le rapport entre la diffusivité de quantité de viscosité cinétique et la diffusivité massique.

Prantel (Pr) : est un nombre sans dimension qui représente le rapport entre la diffusivité de quantité de viscosité cinétique et la diffusivité thermique.

Il se trouve que pour le mélange eau-air, $Le = 1$ tant que $T_{eau} < 50^\circ C$.

Donc :

$$G dHy = Ky a [(Ch T_i + (T_o) \phi_i) - (Ch T_G + \lambda(T_o) \phi_G)]$$

$$G dHy = Ky a dz (H_{yi} - H_{yG})$$

L'intégration de cette équation donne :

$$Z = G / (K_y a) \int_{H_{y1}}^{H_{y2}} dH_y / (H_{yi} - H_y)$$

$$\int_0^Z dZ = Z = \frac{G}{M_B * K_G * a * P_{totale}} \int_{H_{y1}}^{H_{y2}} \frac{dH_y}{H_{yi} - H_y}$$

$$-\frac{h_{eau} * a}{K_G * a * M_B * P_{totale}} = \frac{H_{yi} - H_y}{T_i - T_L}$$

V.7. Dimensionnement d'une tour de refroidissement / Application : Calcul de la hauteur de la Tour

Une étude de dimensionnement d'une tour refroidissement à garnissage fonctionnant à contre –courant a été réalisée et les données de ce problème sont les suivants :

$$G = 1,356 \text{ kg d'air sec / s * m}^2$$

$$T_{G1} = 29,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_H = 23,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L = 1,356 \text{ kg d'air sec / s * m}^2$$

$$T_{L1} = 29,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{L2} = 43,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_{totale} = 101325 \text{ Pa}$$

$$\text{la pente} = -\frac{h_{eau} * a}{K_G * a * M_B * P_{totale}} = 4,187 * 10^4 \text{ J/kg * K}$$

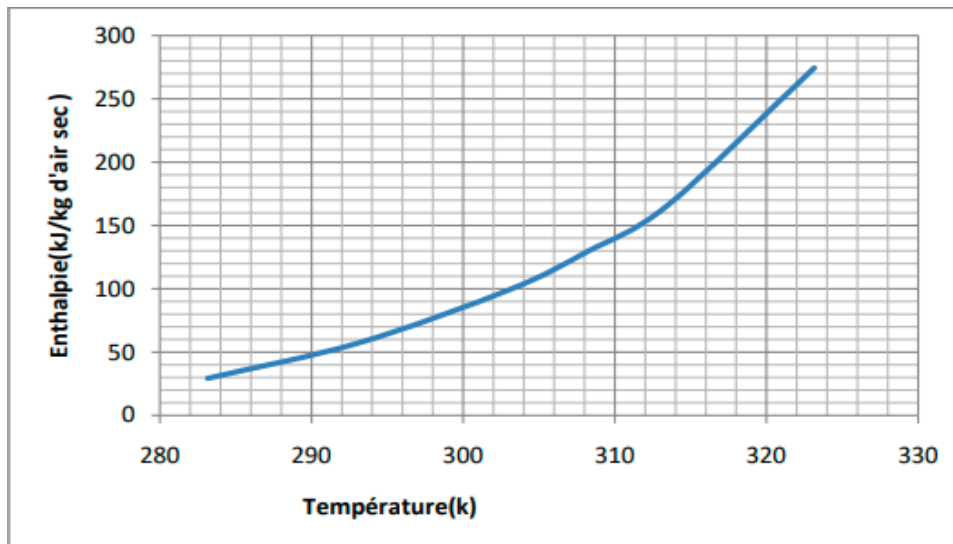
$$K_G * a = 1.207 * 10^{-7} \text{ kg * mol/s * m}^3 * \text{Pa}$$

$$C_L = 4,187 \text{ kJ/kg * k.}$$

On trace la courbe d'équilibre $H_y = f(T_i)$ ensuite on calcule la pression de saturation, l'humidité absolue et l'enthalpie de saturation correspondantes à différentes températures. On obtient le tableau suivant :

Tableau VI.2 : Résultat obtenus à partir les Excel

Température en($^{\circ}C$)	Température en(K)	pression en(Pa)	Humidité absolue($kg_d'eau / kg_d'air sec$)	Enthalpie ($kJ/kg_d'air sec$)
10	283,15	1227,9932	0,00763072	29,28092886
20	293,15	2338,79971	0,01469633	57,41397052
30	303,15	4246,02296	0,2720492	99,73475703
35	308,15	5627,80977	0,0365789	129,0803447
40	313,15	7383,44728	0,04888682	166,1617922
50	323,15	12349,8351	0,08633417	274,3217162

**Figure V.11** : Courbe de saturation.

Calcul de la pression à l'entrée de la tour :

On a :

$$\ln P_{sat} = C_8/T_H + C_9 + C_{10} * T_H + C_{11} * T_H^2 + C_{12} * T_H^3 + C_{13}(T_H)$$

$$P_{sat} = 2967,237134 \text{ Pa}$$

En utilisant l'équation $\phi_{sat} = f(P_{sat})$, on obtient alors la valeur ϕ_{sat} :

$$\phi_{sat} = 0,622 * \frac{2967,237134}{101325 - 2967,237134}$$

$$\phi_{sat} = 0,01876437 \text{ kg d'eau /kg d'air sec}$$

On remplace la valeur ϕ_{sat} dans la relation de l'enthalpie et on obtient :

$$H_{y1} = 1,005 + 0,01876437 * 1,88 * 23,9 + 0,01876437 * 2501,4$$

$$\text{Donc : } H_{y1} = 71,7998169 \text{ kJ/kg d'air sec}$$

Les valeurs de ϕ_1 et H_{y2} sont ainsi obtenues :

$$\phi_1 = (71,7998169 - 1,005 * 29,4) / (1,88 * 29,4 + 2501,4) = 0,016526491 \text{ kg d'eau /kg d'air sec}$$

$$H_{y2} = \frac{1,356 * 4,187}{1,356} * (43,3 - 29,4) + 71,7998169$$

$$H_{y2} = 129,9991109 \text{ kJ/kg d'air sec}$$

Le calcul de l'intégrale $\int_{H_{y1}}^{H_{y2}} \frac{dH_y}{H_{yi} - H_y}$ permet de déterminer la hauteur Z de la tour de refroidissement à garnissage, en procédant par la méthode graphique.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

$$H_{yi} - H_y = \frac{h_{eau} * a}{K_G * a * M_B * P_{totale}} * (T_i - T_L)$$

Tableau V.3 . Résultat obtenus à partir les Excel et MATALB

$T_L(^{\circ}C)$	$H_y \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgd' air sec}} \right)$	$T_i(^{\circ}C)$	$H_{yi} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgd' air sec}} \right)$	$H_{yi} - H_y$	$\frac{1}{H_{yi} - H_y}$
29,4	71,7998169	28,87029198	93,97870961	22,17889271	0,0450879
32	82,6860169	31,41099282	107,3477475	24,66173061	0,04054865
35	95,2470169	34,30004915	124,5539591	29,30694224	0,03412161
38	107,8080169	37,13873653	143,8691193	36,06110243	0,02773071
40,5	118,27555169	39,46208124	161,7331762	43,45765927	0,0230109
43,3	129,991169	42,01461135	183,8183396	53,81922271	0,01858072

$$\int_{H_{y1}}^{H_{y2}} \frac{dH_y}{H_{yi} - H_y} = 1,8328$$

Donc :

$$Z = \frac{1,356}{29 * 1.207 * 10^{-7} * 101325} * 1,8328$$

$$Z = 7,0144 \text{ m}$$

SEPARATION PAR FILTRATION MEMBRANAIRE

VI.1.Introduction

Ces dernières années, la technologie de séparation par l'utilisation de matériaux membranaires a connu de grandes applications dans les processus industriels. Ces procédés membranaires sont largement utilisés dans la purification, la concentration et le fractionnement de mélanges liquides/liquides, gaz/liquide, solide/liquide et même gaz/gaz. Actuellement, les techniques membranaires trouvent des applications dans des domaines auparavant dominés par des procédés plus conventionnels, tels que la distillation, l'absorption, l'adsorption, l'extraction et la filtration. Les procédés de séparation membranaire sont aujourd'hui considérés comme des technologies avancées, performantes et avantageuses à l'usage industriel. Dans la suite du cours, nous allons présenter l'historique de la séparation membranaire, la définition d'une membrane, la classification des membranes et les différentes techniques membranaires, la géométrie des modules membranaires, et les modes d'écoulement du fluide à travers la membrane.

VI.2. Historique sur le procédé

Les études systématiques des phénomènes membranaires remontent aux philosophes scientifiques du 18^{ème} siècle. Par exemple, Abbé Nolet a inventé le mot « osmose » pour décrire la perméation de l'eau à travers un diaphragme en 1748. À cette époque, les membranes n'avaient pas d'applications industrielles ou commerciales, mais étaient utilisées comme outils de laboratoire pour développer des théories en physique et en chimie. Les mesures de la pression osmotique des solutions effectuées avec des membranes par Traube et Pfeffer ont été utilisées par Van't Hoff en 1887 pour développer sa loi limite, qui explique le comportement des solutions diluées idéales. Ces travaux ont conduit directement à l'équation de Van't Hoff. À peu près à la même période, le concept d'une membrane semi-perméable parfaitement sélective a été utilisé par Maxwell et d'autres pour développer la théorie cinétique des gaz.

Les premières expériences ont été réalisées avec différents diaphragmes d'animaux. Plus tard, les membranes au collodion (nitrocellulose) ont été préférées, car elles pouvaient être reproduites. En 1907 Bechhold a mis au point une technique pour préparer des membranes de nitrocellulose d'une taille de pore spécifique. Ces travaux ont été approfondis et ont conduit à la commercialisation de membranes de nitrocellulose microporeuses au début des années 1930. Au cours des 20 années suivantes, la technologie de microfiltration membranaire a été étendue à d'autres polymères tels que l'acétate de cellulose. La première application significative des membranes a été le test de potabilité de l'eau à la fin de la seconde Guerre mondiale. Le transfert de la séparation membranaire de l'échelle du laboratoire à l'échelle

industrielle a été rendu possible par la découverte au début des années 1960 du procédé Loeb-Sourirajan pour la fabrication de membranes d'osmose inverse anisotropes sans défaut et à haute teneur en CO₂. Ces membranes sont formées d'une fine surface sélective reposant sur un support microporeux plus perméable assurant la stabilité mécanique. Actuellement, les opérations membranaires occupent une place croissante en dessalement et traitement des eaux, en séparation gazeuse, en agro-alimentaire, en relation directe avec des grands besoins sociétaux. De plus, elles s'étendent désormais au traitement des gaz, à la production d'énergie, à la médecine (organes artificiels) et dans divers secteurs industriels (pâtes et papiers, pétrochimie, textile, chimie et biotechnologies). Un besoin en membranes de plus en plus performantes en terme de sélectivité, jusqu'à la reconnaissance moléculaire, se fait donc sentir.

VI.3. Définition de procédé membranaire

Un procédé de séparation est une technique ou une technologie permettant de transformer un mélange de substances en deux ou plusieurs composants distincts (figure VI.1). Les buts de ce type de procédé peuvent être divers:

- Purification: des impuretés doivent être extraits du composé d'intérêt
- Concentration: élimination d'une partie du solvant
- Fractionnement: séparation d'un mélange complexe en plusieurs mélanges différents.

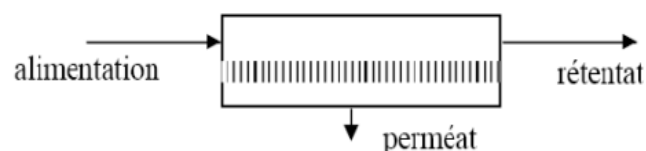


Figure VI.1. Représentation schématique d'un procédé de séparation membranaire

VI.4. Définition d'une membrane

Une membrane est une barrière de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres d'épaisseur, c'est une structure dont les dimensions latérales sont très grandes devant son épaisseur, et qui, sous l'effet d'une variété de forces motrices, va permettre ou interdire le passage de certaines espèces entre deux milieux qu'elle sépare. La force de transfert recouvre le gradient de pression partielle, de concentration ou de potentiel électrique. La phase retenue constitue alors le rétentât (ou concentrât) alors que la phase ayant traversé la membrane s'appelle le perméat (ou filtrat).

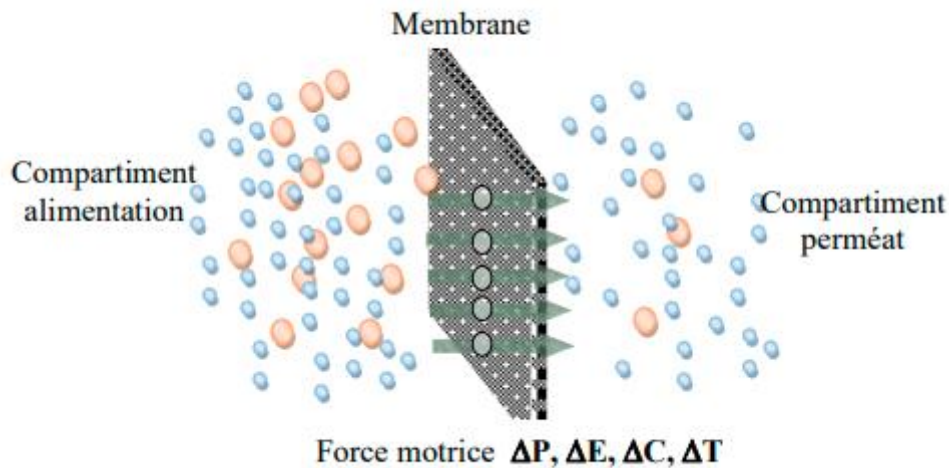


Figure VI.2. Principe de séparation par membrane

Les forces de transfert peuvent être :

- Un gradient de pression : dans le cas de microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF), osmose inverse (OI)
- Un gradient de concentration : dialyse, hémodialyse et membranes liquides
- Un gradient d'activité combinant pression et concentration : pervaporation (PV),
- Un gradient de potentiel électrique : Electrodialyse (ED)

VI.5 Mécanismes de séparation

Les mécanismes de séparation par membrane sont complexes, d'une manière simplifiée, deux principaux mécanismes gouvernent la séparation :

- **Un mécanisme physique** : le tamisage (la rétention complète d'une substance donnée si sa taille est plus grande que la taille des pores de la membrane, ou une rétention partielle dans le cas contraire)
- **Un mécanisme chimique** : basé sur les différentes interactions et affinités entre la substance et la membrane, le taux de séparation d'une substance dépend des caractéristiques de la membrane (porosité, charge, hydrophobicité), des caractéristiques de la substance (masse molaire ou taille, charge, hydrophobicité) et des conditions d'opération (pH, force ionique, pression, température).

VI.6. Classification des membranes

Il existe une panoplie de membranes qui se différencient les unes des autres par leur nature, leur structure et leur géométrie. La différence des caractéristiques chimiques et structurales des matériaux leur confèrent des performances de séparation identifiées en les rendant aptes à réaliser des séparations spécifiques dans divers domaines tels que industrie alimentaire, traitement des eaux usées, industrie chimiques ect ... Les membranes peuvent être donc classées de différents aspect ;

VI.6.1. Matériaux membranaires selon le type du matériau constituant la membrane

Les membranes utilisées dans les procédés de filtration peuvent être de natures organiques, minérales ou hybrides, homogènes ou plus généralement composites. Les membranes organiques sont fabriquées à base de polymères tels que le polyamide, la polysulphone, la polyéthersulphone... tandis que les membranes inorganiques sont constituées de matériaux céramiques tels que l'alumine, le dioxyde de titane ou la zircone. Historiquement, les membranes organiques furent les premières à être synthétisées

VI.6.1.1. Les membranes minérales (ou inorganique)

Ces membranes présentent une structure à la fois composite et asymétrique : elles sont composées d'un support macroporeux à base d'alumine ou de carbone sur lequel sont déposées un nombre variable de couches d'oxydes minéraux (aluminium, ZrO_2 , TiO_2 ...). Le rôle de ces couches filtrantes de faible épaisseur est d'assurer la séparation des solutés grâce à un rayon de pore adapté, alors que le support assure la résistance mécanique. Ces membranes peuvent travailler dans des conditions plus sévères que les membranes organiques grâce à leur résistance mécanique, chimique et thermique (jusqu'à $P = 40$ bar, $T = 120^\circ C$ et $pH = 1-14$). Ceci justifie leur utilisation dans des applications mettant en jeu des milieux "agressifs" et/ou non aqueux. D'une manière générale les membranes minérales sont essentiellement sous forme tubulaire. Elles présentent l'avantage d'une bonne résistance chimique, mais l'inconvénient majeur d'une faible compacité (surface filtrante par rapport au volume occupé en (m^2/m^3)).

VI.6.1.2. Les membranes organiques

Elles sont fabriquées à base d'acétate de cellulose ou à partir de polymères de synthèse. Parmi les polymères les plus utilisés, on rencontre entre autres, les polysulfones, les polyamides aromatiques, les polyimides, les polyéthersulfones, les polycarbonates, ainsi que des polymères fluorés possédant principalement une structure asymétrique. Le plus souvent un premier polymère présentant une structure macroporeuse est utilisé comme support (polyester, ...) et un second polymère forme la couche active de la membrane. La gamme de polymères disponibles permet d'avoir un éventail varié d'applications (on choisit un polymère selon ses propriétés pour répondre à un problème donné). Les membranes organiques sont les plus utilisées malgré leurs résistances thermiques et chimiques relativement limitées car elles sont nettement moins chères que les membranes minérales. L'élaboration des membranes céramiques de microfiltration a ainsi permis d'étendre la technologie de la filtration membranaire à

différents secteurs industriels et par conséquent d'augmenter significativement le nombre des applications des procédés membranaires.

VI.6.2 Classification selon leur porosité

La porosité d'une membrane est définie comme le rapport du volume des espaces vides sur le volume total de la matrice.

VI.6.2.1. Membranes poreuses

Selon le type de membranes, le diamètre moyen des pores peut varier du nanomètre jusqu'à quelques dizaines de micromètres. L'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) distingue trois catégories de pores

- a-Micropores pour des diamètres inférieurs à 2 nm
- b- Mésopores pour des diamètres compris entre 2 et 50 nm
- c- Macropores pour des diamètres supérieurs à 50 nm

VI.6.2.2. Membranes denses

Cette membrane consiste en un film dense à travers lequel le perméat est transporté par diffusion sous l'effet d'une force de pression, de concentration ou de gradient de potentiel électrique. La séparation des composés d'un mélange est directement reliée à leur diffusivité et leur solubilité à travers la membrane. Ainsi, une membrane dense peut séparer des composés de taille voisine si leur solubilité (concentration dans la membrane) diffère.

VI.6.3. Classification selon la morphologie

Les membranes peuvent être classées en fonction de leur structure :

VI.6.3.1. Membranes asymétriques (ou anisotropes)

Dont la structure varie d'une couche à l'autre (Figure VI.3.a). Celles-ci présentent une structure hétérogène. Il peut s'agir de membranes constituées d'un même matériau mais de porosité variant de façon graduelle suivant leur épaisseur ou de membranes composées de plusieurs couches de différents matériaux (on parle alors de membranes composites). Toutes les membranes de nano filtration disponibles sur le marché possèdent une structure asymétrique car celle-ci permet l'obtention de flux volumiques plus importants par rapport à une structure symétrique.

VI.6.3.2. Membranes à structure symétrique (ou isotropes)

Dont la structure est homogène sur toute l'épaisseur (Figure VI.3.b) sont composées d'un même matériau ayant une porosité sensiblement uniforme dans toute l'épaisseur. Elles peuvent être denses ou poreuses. Dans ce cas la membrane, dans toute son épaisseur, forme la couche sélective.

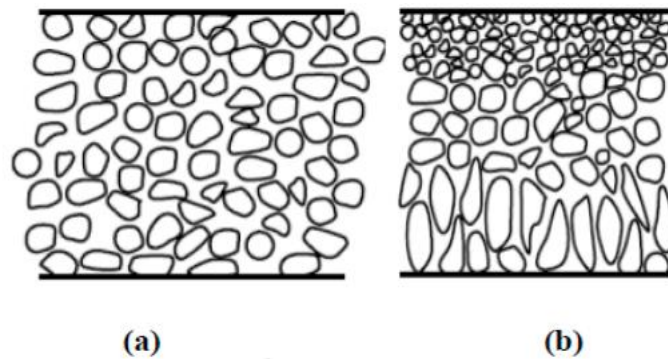


Figure VI.3. Représentation schématique des différentes structures membranaires
(a) Membrane symétrique (b) Membrane asymétrique

Une membrane asymétrique est en général constituée d'une couche support macroporeuse (assurant une bonne résistance mécanique) et d'une couche active (régissant les propriétés de rétention) entre lesquelles s'insèrent une ou plusieurs couches intermédiaires dont le rôle est de permettre le dépôt de la couche active et sa tenue en pression (Figure VI.4).

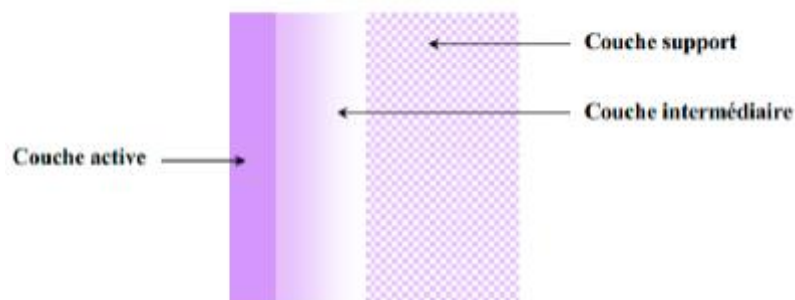


Figure VI.4. Représentation schématique d'une membrane multicouche

VI.6.3.3. Membranes à charge électrique

Ces membranes peuvent être denses ou poreuses. Les parois des pores sont chargées d'ions positifs ou négatifs ; d'où la séparation avec ces membranes est basée principalement sur la répulsion d'ion de même charge, mais aussi par la taille des pores. (Figure VI.5)

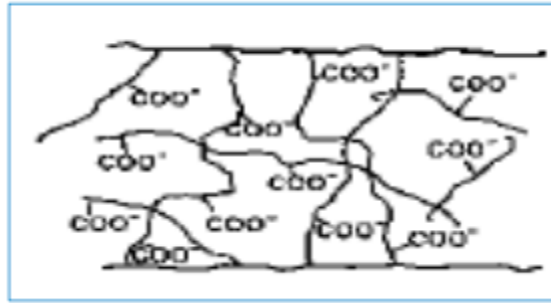
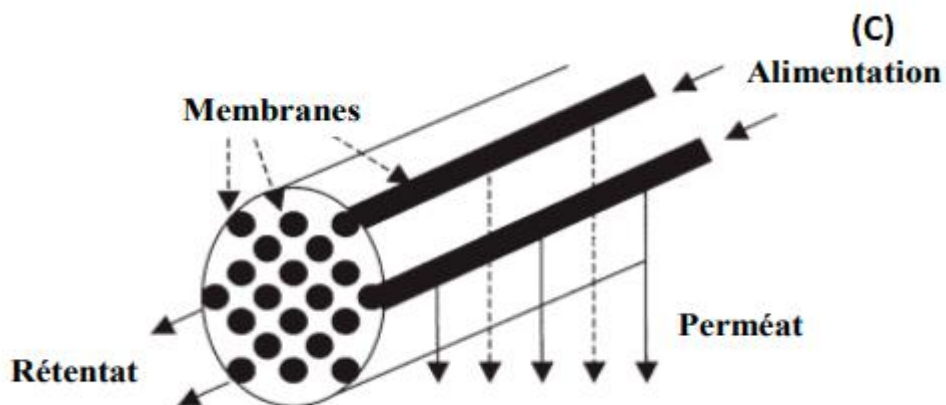
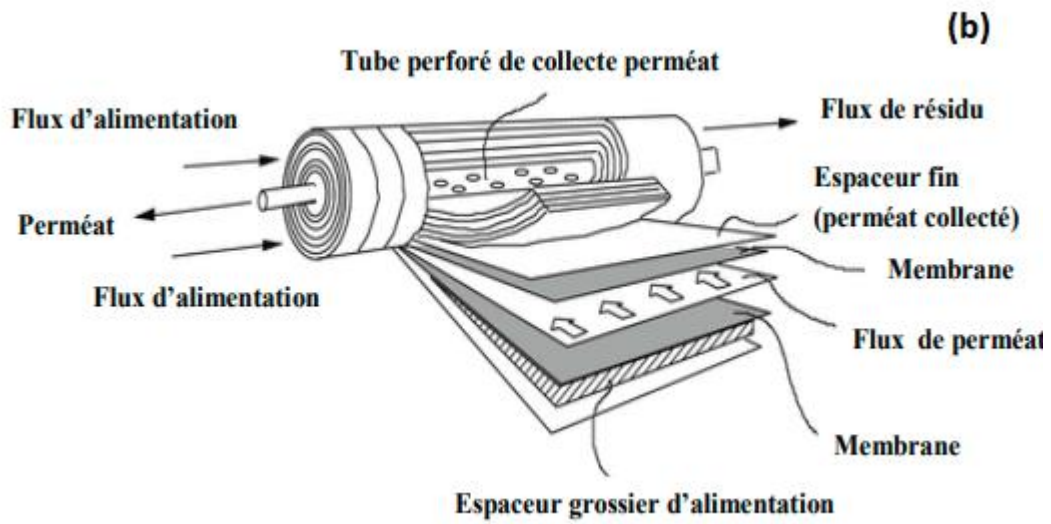
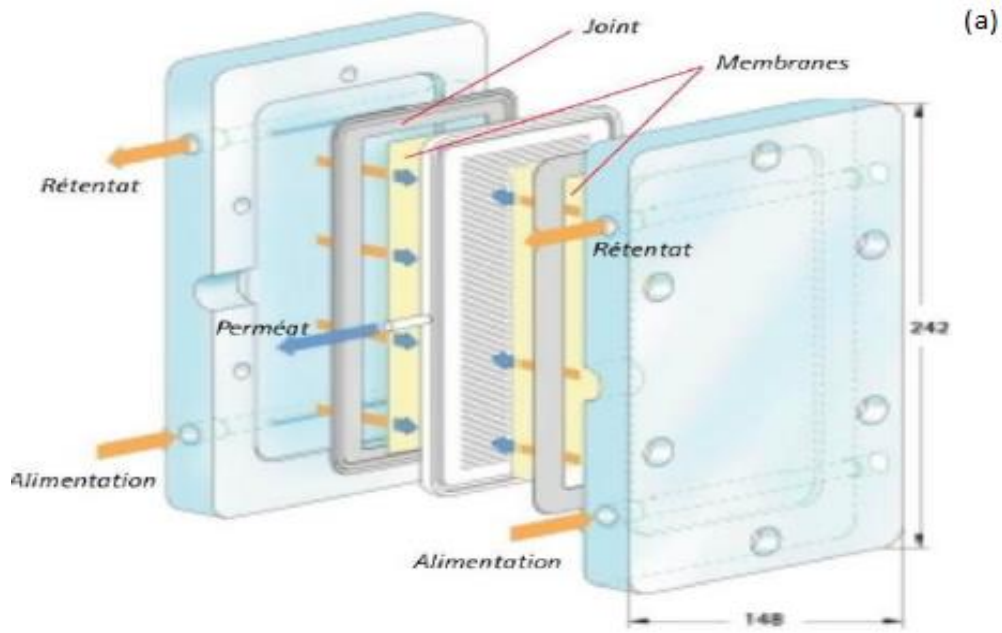


Figure VI.5. Membrane à charge électrique

VI.6.4. Classification selon la géométrie des modules

Afin d'être utilisées à l'échelle industrielle ou au laboratoire, les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Les membranes peuvent se présenter sous forme de feuilles (membranes organiques), de plaques (membranes céramiques), de tubes (membranes organiques et céramiques) ou de fibres creuses (membranes organiques et céramiques). Dans un procédé de séparation membranaire, la surface de filtration est organisée en modules qui peuvent être de différentes géométries :

- Module plan (figure VI.6.a)
- Module spiralé (figure VI.6.b)
- Module tubulaire (figure VI.6.c)
- Fibre creuse (figure VI.6.d)



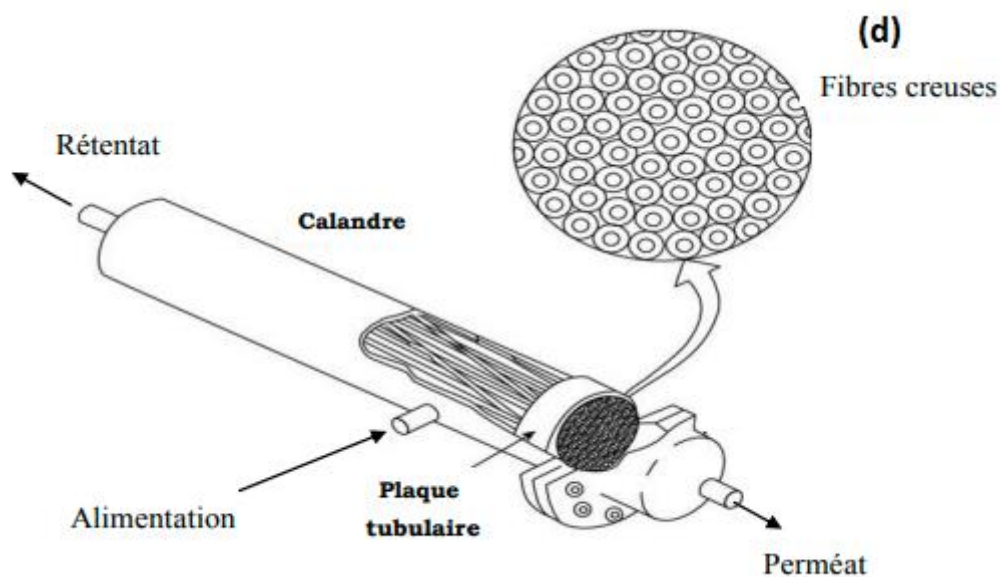


Figure VI.6. schéma du module plan Ray-Flow (a) , schéma du module spiral (b) , : schéma de module tubulaire en céramique (c), schéma de Module fibres creuses (d).

VI.7. Modes de fonctionnement

Les membranes peuvent être utilisées en filtration selon deux fonctionnements principaux :

- La filtration frontale.
- La filtration tangentielle.

VI.7.1. La filtration frontale

La filtration frontale sur support est l'un des principaux modes adoptés en filtration membranaire à côté de la filtration tangentielle et est caractérisée par le passage perpendiculaire du mélange à séparer par convection sous l'action de la différence de pression transmembranaire comme décrit dans la Figure VI.7

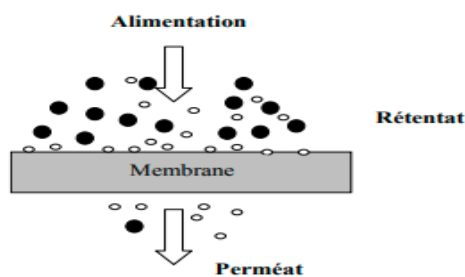


Figure VI.7. Présentation du fonctionnement de la filtration frontale

Cette technique est utilisée en traitement de l'eau pour sa potabilisation, mais aussi dans le secteur médical pour enlever toute trace de virus ou de bactérie d'une eau qui est faiblement colmatant.

VI.7.2. La filtration tangentielle

Est un procédé de filtration destiné à séparer les particules d'un liquide par leur taille. Elle est appelée cross-flow filtration en anglais. Dans ce mode le fluide circule parallèlement à la surface de la membrane (Figure VI.8) avec une vitesse moyenne V , imposant ainsi un gradient de cisaillement à la surface de la membrane qui limite ainsi l'accumulation de matière. En filtration tangentielle lors d'un changement de pression, les espèces arrivant près de la membrane ainsi que le dépôt (dans le cas où il y en a un) mettent un certain temps à se construire, durant cette phase, le flux décroît. Ensuite, un équilibre peut être atteint et le flux peut se stabiliser dans un état stationnaire. La filtration tangentielle est souvent utilisée en industrie car elle permet de travailler, une fois que le régime est établi (entre quelques minutes et quelques heures), avec un flux de perméation à peu près constant. La filtration tangentielle est par contre utilisée quasi systématiquement lorsque les fluides ont des taux de matière en suspension (MES) élevés.

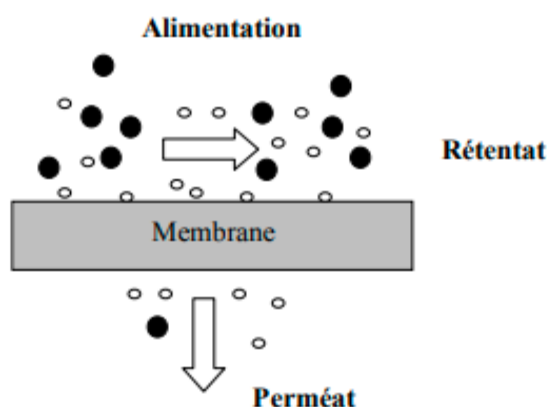


Figure VI.8. Principe de fonctionnement de la filtration tangentielle

Le flux d'alimentation est parallèle au perméat (Figure VI.9); trois possibilités se présentent:

- Ecoulement à co-courant (figure VI.9.a) : Les flux d'alimentation et de perméat s'écoulent dans la même direction de part et d'autre des fibres, cet écoulement est également nommé écoulement parallèle ;
- Ecoulement à contre-courant (figure VI.9.b): les deux flux d'alimentation et de perméat circulent chacun d'un côté de la membrane mais dans des directions opposées ;
- Ecoulement à courants croisés (figure VI.9.c) : une des phases s'écoule parallèlement aux fibres creuses tandis que la seconde circule de manière perpendiculaire aux fibres.

La Figure VI.9 illustre les géométries d'écoulement dans les techniques de séparation membranaires

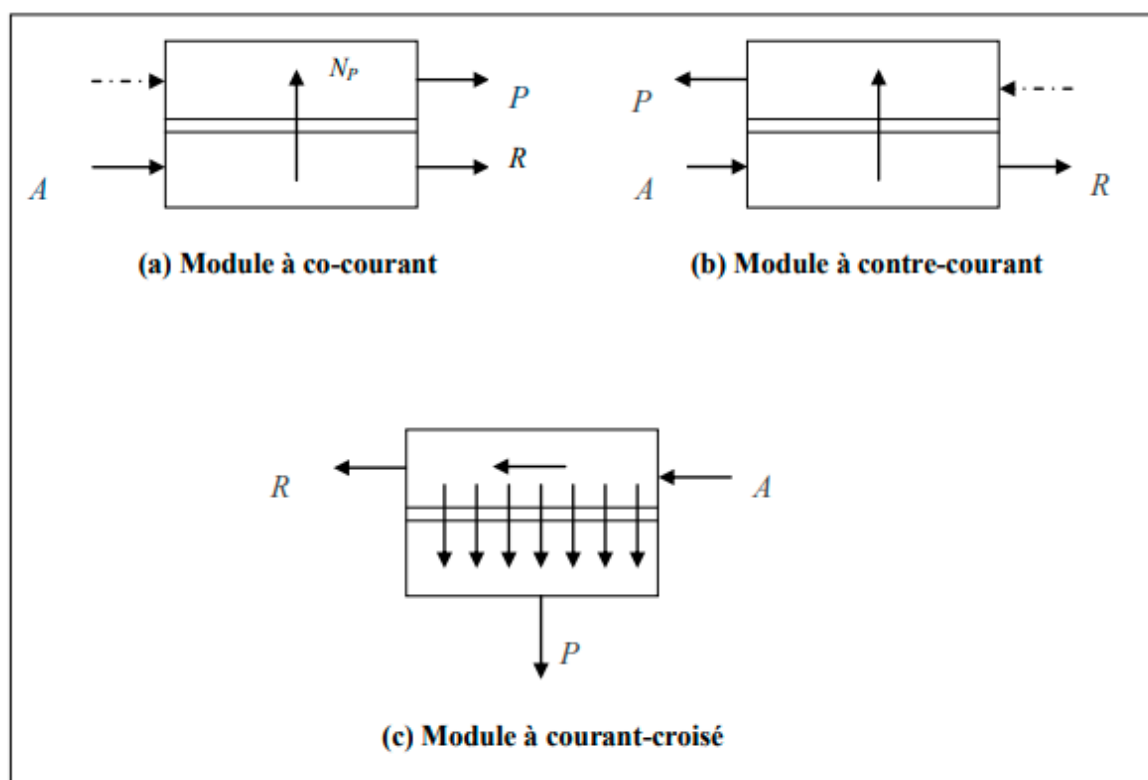


Figure VI.9. Schéma des différents modes d'écoulements dans les modules membranaires.

VI.8. De la théorie au transfert membranaire

Les procédés de filtration membranaire mettent en œuvre des fluides composés de particules, colloïdes, macromolécules et électrolytes. L'accumulation de matière et sa rétention au voisinage de la membrane où la concentration est élevée est alors très complexe et donc très difficile à simuler et prédire. Il est cependant utile de connaître les principales lois permettant de décrire ces phénomènes afin de bien comprendre et appréhender les phénomènes mis en jeu.

VI.8.1. Le colmatage

Le fonctionnement d'un procédé de filtration membranaire est conditionné par le colmatage qui est le phénomène qui s'oppose à la filtration. En effet, au cours de l'utilisation, la matière retenue par la membrane s'accumule (phénomène de polarisation expliqué par l'étude du transfert de la matière vers la membrane réduisant ainsi le flux de perméat et donc la productivité du procédé (loi de filtration – transfert de solvant à travers la membrane).

VI.8.1.1. Flux volumique de perméation

Le flux volumique de perméation du solvant correspond au débit volumique () par unité de surface (S) de la membrane au cours de la filtration. Cette grandeur souvent notée J_w , est déterminée par la formule suivante :

$$J_w = \frac{Q_w}{S}$$

où J_w est exprimé en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

- Q_w en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

- S en m^2 .

a- Loi de Darcy et perméabilité hydraulique

La loi de Darcy pour un fluide de viscosité dynamique μ (Pa.s), en écoulement dans un milieu poreux exprime le flux volumique du fluide en fonction du gradient de pression, dP/dx ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$) suivant l'épaisseur x du milieu poreux

$$J_w = - \frac{k_p}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

où k_p est le coefficient de perméabilité de Darcy (m^2).

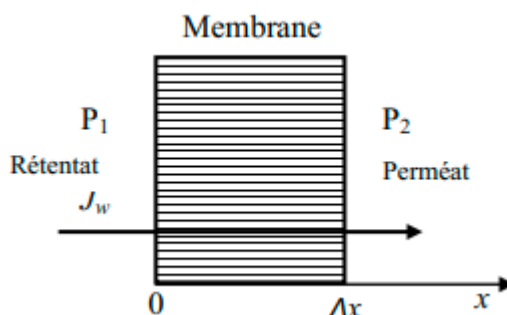


Figure VI.10. Représentation de la couche active d'une membrane perméable d'épaisseur moyenne Δx

En considérant que la pression varie de façon linéaire dans le matériau filtrant, l'intégration de la relation de Darcy sur l'épaisseur Δx du matériau (m) donne :

$$J_w = \frac{k_p}{\Delta x} \frac{\Delta P}{\mu}$$

où $\Delta P = P_1 - P_2$, est la pression transmembranaire.

Le rapport $k_p/\Delta x$ correspond à la perméabilité hydraulique au solvant de la membrane notée L_p et exprimée en m (ou $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ de membrane). Ainsi, le flux de perméation du solvant J_w à travers une membrane poreuse peut s'exprimer par :

$$J_w = \frac{L_p}{\mu} \Delta P$$

Par ailleurs, en considérant la membrane comme un milieu poreux dont les pores sont cylindriques et uniformément dispersés de rayon r_p , et que l'écoulement peut être considéré comme un écoulement de Poiseuille, le flux de perméation au solvant peut s'exprimer par :

$$J_w = \frac{\pi N_p r_p^4}{8\mu \Delta x} \Delta P = \frac{L_p}{\mu} \Delta P$$

On en déduit alors l'expression de la perméabilité :

$$L_p = \frac{\pi \cdot r_p^4 N_p}{8\Delta x}$$

avec , le nombre de pores par unité de surface membranaire exprimé par la relation suivante :

$$N_p = \frac{4\varepsilon}{\pi \tau r_p^4}$$

Avec,

- la porosité de la membrane (ε) (rapport du volume total des pores sur le volume apparent)
- la tortuosité (τ) (rapport de la longueur d'un pore à l'épaisseur de la membrane) $\tau = 1$, pour des pores supposés cylindriques

Le flux de perméation au solvant peut être exprimé à partir des relations précédentes par :

$$J_w = \frac{\pi r_p^4 \Delta P \varepsilon}{8 \mu \Delta x}$$

VII.8.1.2. Transfert de soluté vers la membrane

La séparation induit une accumulation de matière qui, en régime permanent, est décrite par un bilan entre l'apport de matière à la membrane par la perméation, J , et la diffusion, D , qui limite l'accumulation en générant un transfert depuis les zones concentrées à la membrane vers la solution. Ce bilan conduit à la relation suivante :

$$\frac{c_m - c_p}{c_0 - c_p} = e^{\frac{J\delta}{D}}$$

où C_m , C_0 et C_p sont respectivement les concentrations en solution, à la membrane et dans le perméat (figure VI.11) et δ , l'épaisseur de la couche limite de diffusion qui est relié à la vitesse tangentielle à la membrane dont le calcul peut se faire via des corrélations adimensionnelles. Le produit $J\delta/D$ représente un nombre de Péclet qui traduit l'effet relatif de la perméation par rapport à la diffusion dans le film : l'accumulation est d'autant plus importante que ce nombre est élevé.

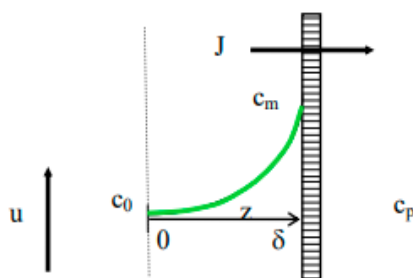


Figure VI.11. Evolution de la concentration au voisinage d'une membrane

Cependant, si la concentration à la membrane dépasse une valeur critique, la matière peut s'agréger (colloïdes), gélifier (macromolécules) ou encore précipiter (sels ...). Il est alors nécessaire de prendre en compte une résistance supplémentaire qui va alors dépendre du temps de filtration.

VI.8.2. La sélectivité

Une membrane retient des solutés selon :

- leur taille : c'est l'effet stérique qui résulte de la structure « tamis » du matériau
- leur charge : une membrane peut être chargée générant ainsi des interactions électrostatiques avec des composés chargés
- leur hydratation : dans le cas de petit soluté le cortège d'eau d'hydratation qui l'entoure peut participer à la rétention.

Dans le cas d'une rétention stérique, il est possible d'estimer à partir de considérations basées sur l'écoulement du solvant et du soluté dans un pore de rayon, r_s , de définir le taux de rejet par la loi de Ferry :

$$R = 1 - \frac{C_P}{C_m} = (1 - (1 - \lambda^2))^2$$

Où

$\lambda = \frac{r_s}{r_p}$ est le rapport du rayon du soluté sur le rayon du pore. L'évolution du taux de rejet en fonction de λ selon cette relation est représentée sur la figure VI.12

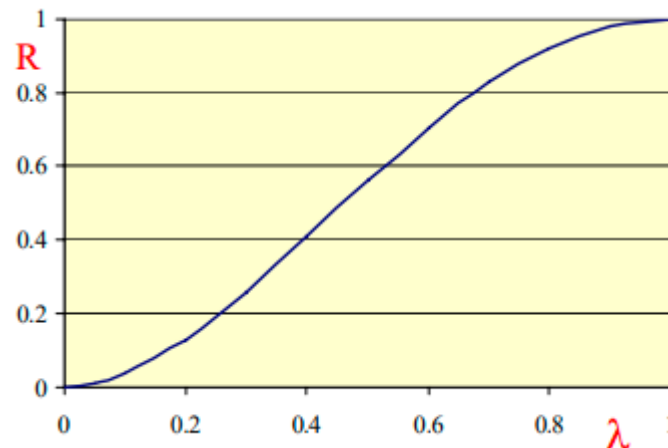


Figure VI.12. Evolution du taux de rejet en fonction du ratio rayon de soluté/ rayon du pore

Une membrane n'est donc pas un séparateur séparant « parfaitement » les espèces par taille : le transfert d'un soluté deux fois plus petit que le pore est réduit de 40 %. Il faut, pour en rajouter encore sur « l'imperfection » des membranes, garder à l'esprit qu'une membrane possède une distribution de taille de pore ! Les conditions opératoires, et plus particulièrement le flux, ont un effet important sur le taux de rejet. En effet, le taux de rejet observé expérimentalement est défini par rapport à la concentration en solution, C_0 .

VI.8.3. Pression transmembranaire (PTM)

La PTM est une force motrice qui permet le transfert à travers une membrane. Elle peut être définie par la différence de pression (pression de rétentat et pression de perméat) selon l'équation suivante :

$$PTM = P_{\text{rétentat}} - P_{\text{perméat}}$$

Et

$$PTM = (P_{\text{relative}} + P_{\text{atmosphérique}})_{\text{Rétentat}} - (P_{\text{relative}} + P_{\text{atmosphérique}})_{\text{perméat}}$$

- P : pression absolue (Pa, unité usuelle = bar = 10^5 Pa)

- P_{relative} : est lue au manomètre.

A l'exception de la microfiltration, dans la plupart des cas, le compartiment perméat est ouvert à l'air et donc à la pression atmosphérique, ce qui implique $(P_{\text{relative}} + P_{\text{atmosphérique}})_{\text{perméat}} = p_{\text{perméat}}^{\text{relative}} = 0$,

$$PTM = p_{\text{rétentat}}^{\text{relative}}$$

En raison des pertes de charges dans les modules, la pression dans le rétentat ($P_{\text{rétentat}}$) chute entre l'entrée et la sortie de la membrane. Il est donc nécessaire d'avoir des capteurs de pression à l'entrée et à la sortie des modules et la pression moyenne du rétentat $P_{\text{rét}}^{\text{moyenne}}$ est généralement donnée par :

$$P_{retentat}^{moyenne} = PTM = \frac{P_{entree} + P_{sortie}}{2}$$

VI.8.4. Le flux de perméat

C'est le débit à travers la membrane par unité de surface géométrique. Dans le cas d'une membrane poreuse, il peut être défini par la relation de Poiseuille (Équation I.5) en considérant que la membrane est un réseau de capillaires cylindriques de rayon constant et que l'écoulement y est laminaire

$$J_w = \frac{Q}{S} = \frac{\pi N_p r_p^4}{8 l \mu} \frac{PTM}{\pi r_p^2} = \frac{N_p r_p^2}{8 l \mu} PTM$$

J_w

: flux (m/s unité usuelle : L. h⁻¹ m⁻²).

Q : débit (m³ /s).

S : surface géométrique de la membrane (m²).

N_p : nombre de pores par unité de surface.

r_p : rayon des pores (cylindrique) (m).

l : épaisseur de la membrane (m) .

μ : viscosité dynamique du solvant (Pa. s).

PTM : pression transmembranaire (Pa) (unité usuelle = bar)

VII.8.5. Le taux de rétention

Également appelé taux de rejet, il s'agit d'une mesure quantitative des propriétés de tamisage moléculaire de la membrane. C'est une grandeur adimensionnelle qui représente le pourcentage d'une molécule considérée, retenue par la membrane. Le taux de rétention d'une espèce chimique, déterminé expérimentalement (R_{obs}), est calculé à partir des concentrations du soluté dans le rétentat (C_R) et le perméat (C_P)

$$R_{obs} = 1 - \frac{C_P}{C_R}$$

R_{obs} : est une grandeur fonction des conditions hydrodynamiques de la filtration (vitesse de circulation, mode d'écoulement, géométrie de la membrane). Cependant il ne tient pas compte de l'accumulation possible de molécules au niveau de la surface membranaire. Ce phénomène, nommé polarisation de concentration, influence significativement le transfert des espèces filtrées au voisinage de la membrane. Il fera l'objet d'une description détaillée par suite. Un taux de rétention intrinsèque (R_{int}) permet alors une description au plus près des conditions réelles de filtration. Il est décrit tel que

$$R_{int} = 1 - \frac{C_P}{C_m}$$

Avec, C_m : la concentration de soluté aux abords de la membrane. Toutefois, son calcul nécessite une connaissance exhaustive des conditions hydrodynamiques de filtration. Une membrane donnée va retenir des solutés selon sa structure, mais également selon les propriétés des solutés. Taille (encombrement stérique), charge (interactions électrostatiques avec des membranes pouvant être chargées) et couche de solvation (influence fonction de la taille des solutés et de la nature du solvant) sont les principaux facteurs influents. Dans le cas de membranes poreuses et d'une séparation exclusivement stérique (tamisage moléculaire), le taux de rétention peut être décrit par la loi de Ferry où λ est le rapport du rayon du soluté sur le rayon d'un pore de la membrane

$$(\lambda = r_s / r_p).$$

$$R_{int} = (1 - \lambda)^2$$

Notons que cette relation ne tient pas compte des éventuels défauts ni de la distribution de la Taille des pores des membranes lorsqu'elles sont de structure poreuse.

VI.8.6. Résistance hydraulique de la membrane (R_m)

La résistance hydraulique (R_m) d'une membrane peut être définie comme étant sa résistance à l'écoulement du fluide à filtrer à travers cette membrane. La résistance d'une membrane est l'inverse de sa perméabilité (A).

$$R_m = \frac{1}{A} = \frac{S \Delta P_m}{Q_p}$$

Cette relation nous permet de calculer de façon pratique la résistance d'une membrane à partir des mesures de flux de perméat et de la pression transmembranaire.

En supposant que les pores d'une membrane soient cylindriques et rectilignes, la loi de Poiseuille permet d'exprimer la résistance d'une membrane comme :

$$R_m = \frac{8 \cdot e_m}{\pi \cdot n_p \cdot r_p^4}$$

e_m : est l'épaisseur de la couche active de la membrane

n_p : est le nombre de pores par unité de surface.

r_p : est le rayon des pores.