##### U F R: DE SCIENCES DES MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES

***Rapport d’activité présenté par :***

***EL OUARDI EL MOKHTAR***

## Juin 2004

## *TRAITEMENT THERMIQUE DES PHOSPHATES :*

***SECHAGE - CALCINATION***

# *SOMMAIRE*

# *I/ GENERALITES SUR LES PHOSPHATES*

### *I-1/ Composition du minerai avant traitement*

#### *I-2 / Différentes phosphates de calcium*

#### *I-3/ caractéristiques du phosphate noir*

#### *I-4/ Analyse chimique*

###### *I-5/ intérêt des phosphates*

***I-6/Consommation Mondiale De P2O5***

*I-7/ Autres intérêts des phosphates*

*****I-8/ Transformation des phosphates bruts*****

### *I-9/ Le potentiel de production phosphate du groupe OCP*

*I-10/ Présentation des sites miniers*

## *II/ CALCINATION DES PHOSPHATES*

#### *II-1/ but du calcination*

###### *II-2/ principe du calcination*

###### *II-3/ description*

*III-4/Notion De Base Sur Le Calcul Du Bilan Thermique*

*III/ NOTION SUR LA FLUIDISATION*

*III-1/ Définition*

###### *III-2/ Fluidisation Solide–Gaz*

*III-3/ Avantage Et Inconvénient De La Fluidisation*

*III-4/ Propriétés Fondamentales De La Fluidisation*

*IV/ SECHAGE DES PHOSPHATES*

# *IV-1/ Définition*

*III-2/ But Du Séchage*

# *IV-3/Diversité Des Situations Industrielles*

## *IV-4/ Nature Des Produits A Traiter*

# *IV-5/ Problématique Du Séchage*

### *IV-6/ Caractérisation Des Solides(Phosphates) Humides*

#### *IV-8/ Méthodes De Séchage*

#### *IV-9/ Bilan Thermique*

###### *IV-10/ Méthodologie De Mise En Place D Une Opération De Séchage*

### *IV-11/ Equipements Annexes Des Sécheurs*

*V/ ENVIRONNEMENT*

# *VI/ CONCLUSION & PERSPECTIVES*

*VII/ BIBLIOGRAPHIE*

*****INTRODUCTION GENERALE*****

*Comme tout minerai, les phosphates doivent subir des traitements avant d’être utilisés, traitements physiques (broyage, calcination, lavage, séchage) et chimiques (attaque du minerai par l’acide sulfurique) qui nécessitent des investissements importants et une maîtrise de ces technologies. Il en résulte différents produits : phosphates de calcium, acide phosphorique, anhydride phosphorique et toute une gamme d’engrais phosphatés répondant aux normes et besoins de l’agro-industrie….Nous nous intéressons par la suite aux traitements thermiques des phosphates (Séchage ou Calcination),qui joue un rôle primordial aux processus des transformations ultérieur. Ce qui exige une maîtrise globale des procédés de traitement thermique des phosphates ainsi que les différentes disciplinent qui interviennent.*

*Dans ce rapport ; on va faire une étude bibliographique concernant les traitements thermiques des phosphates.*

# I/ GENERALITES SUR LES PHOSPHATES

### I-1/ Composition du minerai avant traitement

En général un minerai brut de phosphate se compose de trois parties :

\* Les phosphates purs.

\* Les impuretés(les stériles).

\* L'eau.

**a/** **Le Phosphate pur**

C'est la partie noble qui représente la fraction lourde du minerai c à d le % le plus élevé en phosphate tricalcique caractérisé par sa teneur en BPL.

Il est constitue de débris osseux et des grains phosphatés de l'ordre de 200 µm appelés colites entourées par la gangue(argile, calcaire).

**b/** **Les stériles**

On appelle stériles tout corps contenu dans le minerai qui n'est pas du phosphate pur sauf l'eau.

**Exemple :** Argile, Calcaire, Silex, Matière organique…

Les grains de phosphate se trouvent agglomérer avec d'autres constituant dont on cherche l'élimination d'une certaine partie par des traitements appropriés.

Les constituants externes s'appellent exogangue : Silicate,(Argile), des sulfates, (gypse),silice(quartz).

Les constituants internes s'appellent l’endogangue, se sont des inclusions centrales(internes) ou périphériques aux grains de phosphates(matière organique).

La connaissance au préalable de la nature des stériles contenue dans le minerai phosphaté est très importante parce qu’elle permet de déterminer exactement le type de traitement approprié à ce minerai.

**Exemple :**

Les gros stériles(bloc de silex…) sont éliminés par un traitement mécanique(épierrage, et criblage).

Un minerai phosphaté contenant l’exogangue(Argile) nécessite un enrichissement par lavage.

Un minerai phosphaté contenant l’endogangue nécessite un enrichissement par calcination pour éliminer les matières organiques.

**c/ Humidité**

C’est la quantité d’eau contenu dans un minerai phosphaté; on distingue:

* L’humidité d’hydratation qui varie entre 16 et 22%, elle s’élimine par séchage.
* L’humidité de constitution: cette humidité entre dans la structure même des molécules, elle ne peut être éliminée que par calcination.

#### I-2 / Différentes phosphates de calcium

* phosphate tricalcique :

Sa formule chimique est Ca3 (PO4)2, insoluble dans l’eau.

* phosphate bicalcique :

Sa formule chimique est Ca2H2 (PO4)2, insoluble dans l’eau.

* phosphate monocalcique :

Sa formule chimique est CaH4 (PO4)2, soluble dans l’eau.

**1/ Teneur en BPL ( Bone, phosphate oflane : Ph. de chaux des os)**

On caractérise le minerai de phosphate par sa teneur en phosphate tricalcique (BPL) qui s’exprime en pourcentage.



**2/ Relation teneur P2O5 et BPL**

Ca3 (Po4)2 a pour masse molaire 310g

P2O5 a pour masse molaire 142g

##### Ca=40g

##### P=31g

O=16g

Le rapport 

Pour un BPL de 67,84 % on a  de P2o5

#### I-3/ caractéristiques du phosphate noir

**1/ caractéristiques physiques**

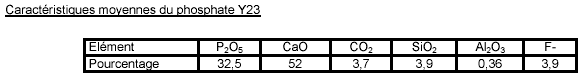
Densité brut 1,2 à 1,8

Granulométrie brut : 0,250 avec bloc de calcaire, silex jusqu’à 500 µm

Humidité 16 à 22%

Température de prise en masse : > 700

Chaleur massique 0,241 kcal/kg °C ( 0 à 700°c)



#### I-4/ Analyse chimique

Méthode chimique utilisée pour déterminer les différents éléments contenus dans un minerai et ce dans le but d’opter pour un traitement ultérieur adéquat, qui répond aux exigences du client.

###### I-5/ intérêt des phosphates

L’intérêt des phosphates, dont plus de 80% de la production mondiale est utilisée par l’agriculture, tient au fait que toutes les plantes, cultivées où non, ont un besoin incontournable de phosphore pour leur croissance et leur existence. Comme il n’y a aucun produit de substitution, les phosphates se révèlent être indispensables à la vie du monde végétal. Si qualitativement le phosphore doit impérativement être présent dans le sol pour assurer la vie des végétaux, son abondance favorise le développement quantitatif de ceux-ci et donc permet l’accroissement de la production agricole qui peut répondre dès lors à la progression des besoins alimentaires mondiaux.

Il en résulte une augmentation de la demande en engrais phosphatés, que reflète la production mondiale de phosphates. Celle-ci était de 42 MT en 1960, 77 MT en1969, 110 MT en 1974, 132 MT en 1980, 162 MT en 1990, 133 MT en 1996 et de 128 Millions de Tonnes en 2001.

**I-6/Consommation Mondiale De P2O5   
Chiffres en millions de tonnes**

N.B. **P2O5**, l’anhydride de phosphate, dérive du minerai de phosphate brut, celui ci contenant en moyenne 30% de **P2O5**. Une tonne de **P2O5** nécessite donc trois tonnes de phosphates bruts pour sa fabrication.

Dans le tableau ci-dessous, le total mondial est supérieur à l’addition de la colonne car certains pays sont comptabilisés plusieurs fois. Ex : la consommation en **P2O5** de l’Europe apparaît sous ce nom et sous le terme « pays développés ».

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **1960** | **1970** | **1975** | **1980** | **1985** | **1991** | **1995** | **2001** |
| **PAYS DEVELOPPES** | 9.7 | 17.6 | 19.8 | 22.2 | 22.3 | 17.8 | 12.1 | 11.1 |
| **PAYS EMERGENTS** | 1.1 | 3.5 | 6.0 | 9.8 | 11.2 | 17.5 | 18.9 | 21.3 |
| **EUROPE** | 3.9 | 5.9 | 5.4 | 5.9 | 5.3 | 4.2 | 3.6 | 3.1 |
| **AMERIQUE DU NORD** | 2.6 | 4.7 | 5.2 | 5.7 | 4.5 | 4.4 | 4.8 | 4.4 |
| **ASIE** | 1.0 | 2.7 | 3.9 | 6.3 | 7.5 | 12.1 | 15.0 | 16.0 |
| **TOTAL MONDIAL** | **10.7** | **21.1** | **25.8** | **32.0** | **33.5** | **35.3** | **31.0** | **32.4** |

La lecture des chiffres de la consommation de phosphates fait apparaître :

**Pour les pays développés, un accroissement de la demande en phosphates jusqu’en 1991, puis une baisse de cette même demande une augmentation ininterrompue de la demande des pays émergents,** **une multiplication par trois des besoins mondiaux de phosphates.**

Ces faits s’expliquent ainsi : au sortir de la deuxième guerre mondiale, les économies occidentales, dont l’agro-industrie, connaissent une période d’expansion soutenue. L’Europe veut être auto-suffisante sur le plan alimentaire, puis exportatrice de produits agricoles. Les rendements agricoles explosent. Durant cette même période, les économies des pays émergents décollent lentement. Ce sont donc les pays riches qui sont les plus importants utilisateurs de phosphates.

Dans les années 80, la tendance s’inverse. Dans le monde occidental, la productivité agricole et la population, après le baby boom, stagnent et des questions environnementales, posées par l’utilisation massive des engrais, apparaissent. A l’inverse, beaucoup de pays émergents, dont l’économie repose en grande partie sur l’agriculture et dont la population continue de croître, voient leurs rendements et production agricoles s’amplifier. Il en résulte une forte demande d’engrais, phosphatiers ou non, alors que les pays occidentaux réduisent la leur. Une inversion des courbes de consommation entre ces deux mondes s’est opérée durant les années 80. Il y a eu un transfert important de phosphates des pays riches vers les pays moins riches et en même temps une pause de la demande mondiale en phosphates.

Ainsi, la Chine consommait 0.5 million de tonnes de phosphates en 1960 et 20 millions de tonnes en 2001, alors qu’en France, aux mêmes dates, les chiffres étaient de 1.5 million de tonnes après un pic de consommation de 5.5 millions de tonnes en 1985.

Concernant les types de gisements de phosphates, ceux-ci sont au nombre de quatre : les phosphates sédimentaires qui fournissent 80% des minerais, les phosphates d’origine ignée qui donnent 15% du phosphate extrait dans le monde. Les 5% restants ont des origines diverses : guano et scories sidérurgiques.

I-7/ Autres intérêts des phosphates

En dehors du rôle fondamental du phosphore dans la production agricole, les 15% des phosphates d’usage non agricole sont utilisés dans la métallurgie (alliage), l’industrie chimique (pesticides, détergents), pétrolière (lubrifiant) , alimentaire et pharmaceutique.

Par ailleurs les phosphates bruts renferment, outre du phosphore, raison de leur exploitation, différents corps simples. Parmi ceux-ci, l’uranium accompagne la plupart du temps les phosphates sédimentaires quelle que soit leur localisation géographique. Bien qu’étant présent à faible dose, quelques centaines de ppm (partie par million), l’uranium des phosphates peut être récupéré à l’occasion de la fabrication d’acide phosphorique (H3PO4). Cette récupération est apparue économiquement rentable depuis une vingtaine d’années. Ainsi, en 1980, 12% de l’uranium utilisé dans le monde provenait du traitement des phosphates .

D’autres métaux se trouvent présents dans les phosphates. Il en est ainsi de l’aluminium, du fer, du magnésium qui ne trouvent pas d’emploi, et du cadmium qui fait partie des métaux dits lourds et peut rendre le minerai impropre à un usage agricole. C’est pourquoi la commission européenne a approuvé le 31 mai 2002 l’interdiction des engrais phosphatés à forte teneur en cadmium .

****I-8/ Transformation des phosphates bruts****

Comme tout minerai, les phosphates doivent subir des traitements avant d’être utilisés, traitements physiques (broyage, calcination, lavage, séchage) et chimiques (attaque du minerai par l’acide sulfurique) qui nécessitent des investissements importants et une maîtrise de ces technologies. Il en résulte différents produits : phosphates de calcium, acide phosphorique, anhydride phosphorique et toute une gamme d’engrais phosphatés répondant aux normes et besoins de l’agro-industrie.

### I-9/ Le potentiel de production phosphate du groupe OCP

Le potentiel de production de phosphate du Groupe OCP est de 28 millions de tonnes provenant des différentes mines données en annexe I. Une partie de cette production (43 %) est enrichie par lavage, un autre partie (11 %) enrichie à sec, alors que 9 % sont enrichis par calcination. Le reste est séché uniquement.

Ce potentiel a pu être atteint grâce, en particulier à l'investissement dans la mine de Sidi Chennane lancé en pleine dépression du marché en 1992 et mis en production en 1995.

Pour répondre en permanence aux besoins de ses clients, le Groupe OCP développe, en continu, des qualités marchandes de phosphates de mieux en mieux adaptées à leurs besoins, aussi bien du point de vue technique qu’environnemental.

I-10/ Présentation des sites miniers

I-10-1/ Khouribga

Le site minier de Khouribga compte trois zones d’extraction en découverte où huit couches phosphatées sont exploitées, dans les mines de Mera El Arech et Sidi Chennane et deux couches sont exploitées à Sidi Daoui.

Ces couches différent par leurs puissances et leurs caractéristiques chimiques et physico-chimiques. Elles subissent différents modes de traitement, à savoir :

* le lavage,
* l’enrichissement à sec,
* la calcination,
* le séchage.

Le transport du minerai extrait vers les usines de traitement est assuré par un réseau de convoyeurs d’une longueur totale de 200 Km .

La capacité totale des stocks de reprise et d’homogénéisation et des stocks de produits finis est d’environ 4 millions de tonnes.

***I-10-2/ Gantour***

Concernant le bassin de Gantour, l’OCP dispose de deux sites d’exploitation minière, Benguerir et Youssoufia.

A Benguerir, six couches phosphatées sont exploitées en découverte dans deux panneaux.

A Youssoufia, quatre recettes sont exploitées en souterrain. L’ouverture d’un panneau en découverte aura lieu incessamment.

Les phosphates extraits, de caractéristiques diverses, subissent l’un des modes de traitement suivants :

* la calcination,
* le lavage,
* le séchage.

Le transport de la mine vers les usines de traitement est assuré par train ou par convoyeur à bande

La capacité totale de stockage est d’environ 1 million de tonnes.

***I-10-3/ Boucraa***

La mine de Boucrâa comprend deux zones d’extraction en découverte où une seule couche est récupérée.

Le minerai extrait est transporté par liaison de convoyeurs sur une distance de 100 Km jusqu’aux usines de traitement situées à Laâyoune. Le traitement consiste en un lavage et un séchage.

La capacité totale de stockage et d’environ 1 million de tonnes.

## II/ CALCINATION DES PHOSPHATES

#### II-1/ but du calcination

Le but de calcination est d’augmenter la teneur en BPL du phosphate tout en brûlant les matières organiques contenues dans le produit .

La combustion des matières organiques apporte une grand part de l’énergie nécessaire à la décomposition des carbonates, à l’élimination de l’eau de constitution à la formation des silicates, et à la combustion des sulfures, le supplément est apporté par le fuel.

###### II-2/ principe du calcination

PROCEDE DE CALCINATION DORR-OLIVER

**PRINCIPE D.O**

Le procédé utilisé pour la calcination du phosphate noir est basé sur la mise en œuvre du principe de la fluidisation.

Les opérations sont effectuées dans trois sections :

* Section de préchauffage et de classification
* Section de calcination
* Section de refroidissement

1. **Section de préchauffage et de classification**

Le préchauffage et le séchage sont réalisés dans un préchauffeur R 336 par les gaz chauds provenant des réacteurs de calcination et de refroidissement.

Les particules entraînées par les gaz de fluidisation passent dans un système de classification qui se compose et de classificateurs.

**b)** **Section de calcination**

Dans cette section le minerai préchauffé est calciné par la combustion des matières organiques contenues dans le phosphate et un appoint de fuel-oil lourd N° 2

La calcination s’effectué dans un calcinateur à lit fluidisé à une température de 700°c à 750°c

**c)**  **Section de refroidissement**

Le minerai calciné est refroidi successivement dans trois réacteurs en cascade et à lit fluidisé:

* Le prérefroidisseur R338
* Le refroidisseur 1 R 339-1
* Le refroidisseur 2 R 339-2

###### II-3/ description

**(schéma)**

##### III-3.1/ circuit phosphate

Dans le préchauffeur, le phosphate humide subit un préchauffage et un séchage à 120°c par les gaz chauds (de Tg = 550°c) provenant des réacteurs et de post-refroidisseur n° 1.

Les particules qui se trouve entraînées par les gaz de fluidisation sont classifiées :

* Les particules de diamètre inférieur à 90μm faibles en BPL sont considérées comme stériles.
* Les grains de diamètre supérieur à 90 μm sont récupérer par les classificateurs et rejoignent le produit séché et criblé.

Le produit séché est déchargé par l’intermédiaire d’une vanne R304 sur un tamis vibrant M101.

Le produit criblé à 6mm et le produit classifié sont acheminés par redler vers un élévateur à godet C501 qui alimente un répartiteur à lit fluidisé(fluo-seal R302) ; l’air de fluidisation provient du B403 et B201.

Le répartiteur alimente le calcinateur à travers 6 conduites.

Le transfert du minerai du lit du calcinateur dans le prérefroidisseur se fait par l’une des lignes de transfert R317A ou B équipée de vannes L CV260A et B à commande pneumatique contrôlée par le niveau de lit . Le minerai calciné est refroidi successivement dans trois réacteur à lit fluidisé.

1. Le phosphate est refroidi de 720°c à 50°c environ dans le prérefroidisseur avec l’air de la soufflante B201.
2. Ce produit subit un 2eme refroidissement de 500°c à environ 300°c dans le post-refroidisseur N° 2 par l’air de la soufflante B202.

* En fin la dernière phase de refroidissement du minerai de 300°c à 120°c se fait dans le post-refroidisseur N° 2 par l’air de la soufflante B202

Si l’air de la soufflante B202 est insuffisant pour assurer le refroidissement , une injection d’eau réglée s’effectue dans le lit.

Ainsi le produit refroidi est évacue à travers l’une des voies du calciné (voie EST ou OUEST) vers le hall de stockage.

III-3.2/ circuit gaz chaud

La fluidisation et le transfert calorifique sont assurés par les gaz ayant initialement la composition de l’air ambiant.

L’unité dispose de 3 soufflantes principales respectivement B201 ,B204 et b202.

* La soufflante B201 fournit de l’air de refroidissement au prérefroidisseur R338 constituant aussi l’air de fluidisation et de combustion du calcinateur.

Cet air est dépoussiéré dans des cyclones G103A et B à la sortie du prérefroidisseur avant de rejoindre la boite avant de calcinateur à une température 50°c.

* La soufflante B202 fournit de l’air de fluidisation au refroidisseur R 339-1. Cet air dépoussiéré dans les cyclones G104A et B rejoint les gaz sortant du calcinateur R337 dans un mélangeur D103.
* L’air de fluidisation et de refroidissement du post-refroidisseur R339-2. est assuré par un piquage venant de la soufflante B202. Cet air est évacué vers l’éléctrofiltre après un dépoussiérage dans le cyclone G105.

Les gaz du mélangeur sont dépoussiérés dans les cyclones G102A ,B ,C ,D. Ces gaz assurent la fluidisation et le séchage du lit du préchauffeur. Ils sont dépoussiérés à la sortie du préchauffeur dans des cyclones G101A.B.C.D et sont évacués vers l’éléctrofiltre pour subir une dernière épuration, avant d’être rejetés à l’atmosphère.

III-4/Notion De Base Sur Le Calcul Du Bilan Thermique

* Dans le calcinateur

Ce réacteur engendre plusieurs réactions chimiques on distingue :

* Les réactions exothermiques
* Les réactions endothermiques

## III-4-1/ Réactions exothermiques

Il s’agit des réactions qui libèrent de l’énergie sous forme de chaleur

* 1. **pouvoir calorifique du fuel**

La combustion du fuel dégage une quantité de chaleur de 9650 Kcal/kg

Cette combustion se réalise suivant les réactions élémentaires suivantes :

C + O2 CO2

H2 +1/2O2 H2O

S + O2 SO2

Cette combustion apporte le complément de chaleur nécessaire pour la calcination du phosphate.

* 1. **pouvoir calorifique des matières organiques**

cette chaleur , conditionne une consommation raisonnable en fuel

La combustion des matières organiques peut être décrite par l’équation générale suivante :

CxHyOzSt+ (x+y/4 + t-z/2 )O2 x CO2.+y/2 H2O +.t.SO2

Cette combustion fournie une énergie de 227 000 Kcal par tonne calciné.

**3) chaleur de combustion des sulfures minéraux**

On considère que les pyrites sont les sulfures minéraux les plus importantes à une température inférieur à 800°C deux réactions sont possibles

* une réaction de combustion

FeS2 +5/2 O2 FeO + 2SO2

H = -163,2kcal/mol FeS2 (exothermique)

* une réaction de formation de CaS

FeS2  + CaO FeO +2CaS +1/2 O2

H = 52Kcal /mol de FeS2 (endothermique)

**4/chaleur de formation des silicates de calcine**

Les principales réactions concernant essentiellement la formation de la wollastonité CaSiO3 et la larnite Ca2SiO4

a/ SiO2 +CaO CaSiO3

H=-21kcal/mol de CaSiO3  b/ SiO2+2CaO Ca2SiO4

H= -29 kcal/mol de Ca2SiO4

### III-4-2/ Réactions endothermiques

Il s’agit des réactions chimiques qui nécessitent un apport calorifique .

**a/ la décomposition des carbonates**

Le phosphate noir de Youssoufia présente trois types de carbonates

* calcite :Ca(CO3)
* magnésite : Mg(CO3)
* Dolomite:CaMg(CO3)

Seules les réactions de la décomposition de la Dolomite et la calcite sont connues .Ces réactions s’effectuent à des températures supérieures à700°C.

* de composition de la dolomite

CaMg(CO3)2 CaO +MgO + 2CO2

H=710kcal/kg CO2

* décomposition de la calcite

CaCO3 CaO + CO2

H=965kcal/kg CO2

**b/ Le déshydratation**

A la température de calcination; il y a élimination totale de l’eau de constitution estimée à 0,9%

H2O hydratation H2O vapeur

III/ NOTION SUR LA FLUIDISATION

III-1/ Définition

La fluidisation consiste essentiellement en la mise en suspension des matériaux granulaires dans un courant ascendant de gaz ; celui-ci à un double rôle :

* La fluidisation du lit
* L’échange thermique ou de matière avec la phase solide

Les solides fins et poussières qui peuvent être produits par abrasion et attrition dans le réacteur, sont entraînés par les gaz et récupérés par des cyclones placés à la sortie du réacteur.

**III-2/ Fluidisation Solide–Gaz**

# III-2-1/ Mise En Evidence Du Phénomène De Fluidisation

On considère une couche de particules solides sphériques identiques reposant sur une grille poreuse horizontale à l'intérieur d'une colonne assimilable à un cylindre vertical. On suppose qu'on fait circuler un gaz à travers la couche dans le sens ascendant. On démarre l'expérience avec une vitesse de gaz nulle puis on augmente progressivement cette valeur (on fait varier en fait le débit de gaz). On réalise alors successivement les observations suivantes:

* pour les plus faibles vitesses, la couche de solides reste sur la grille sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
* pour une vitesse Umin (vitesse minimale de fluidisation), on note une expansion de la couche: on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.
* en augmentant encore la vitesse, le lit poursuit son expansion: on peut alors décrire l'état fluidisé. Les particules sont indépendantes les unes des autres. Elles sont soumises à des mouvements désordonnés de faible amplitude. On note aucun mouvement de translation de l'ensemble par rapport au fluide. La surface supérieure du lit est pratiquement nette et horizontale. Le lit est assimilable à un liquide.
* à partir d'une certaine vitesse du gaz, des hétérogénéités apparaissent dans le lit avec des phénomènes de bullage (création dans le lit de cavités de fluide qui grossissent et s'élèvent à la surface). L'aspect de la surface du fluide est alors celui d'un liquide à l'ébullition.
* quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos, l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la colonne: c'est le phénomène d'entraînement. L'application de ce phénomène est le transport mécanique des solides pulvérulents.

## III-2-2/ vitesse minimale de fluidisation et stabilité du lit fluidise

La vitesse minimale de fluidisation est la vitesse du fluide à partir de laquelle le lit fluidisé s'établit.

On note U la vitesse apparente du gaz. Il s'agit du rapport entre le débit de gaz et la section totale de la colonne vide. Cette vitesse ne correspond pas à la vitesse réelle du gaz dans le lit qui est supérieure du fait d'une section de passage plus faible (présence des particules). La vitesse apparente est facile à utiliser car elle se calcule facilement à partir d'une mesure de débit.

On définit aussi d'autres grandeurs:

d: diamètre des particules assimilées à des sphères

: viscosité dynamique du gaz

l: hauteur du lit

S: section du lit donc section de la colonne

: masses volumiques des particules et du gaz

C: constante donnée dans la littérature voisine de 160

ψ: facteur de forme (ψ=1pour des sphères); ce facteur correctif est introduit pour prendre en compte des formes de particules différentes.

: porosité du lit; la porosité correspond à la fraction de vide et se définit comme le rapport entre le volume libre du lit et le volume total du lit. On a .

Dans l'état de fluidisation les particules sont soumises à leur poids, à la poussée d'Archimède et aux forces de frottement avec le gaz. Quand on atteint la vitesse minimale de fluidisation Umin , ces forces s'équilibrent.

On écrit l'expression du module F de la résultante du poids et de la poussée d'Archimède:



Le module Ffrott. des forces de frottement subies par les particules correspond en fait au produit de la perte de charge du gaz à la traversée de la colonne et de la section S du lit (la perte de charge ΔP est égale à Ffrott / S ). On montre que dans les cas habituels de fluidisation avec de fines particules, on a la relation suivante valable pour un régime laminaire:



Quand la vitesse du gaz augmente, seules les forces de frottement subies par les particules (elles ont naturellement tendance à tomber car le poids est supérieur à la poussée d'Archimède) augmentent. On finit par atteindre une vitesse telle que la relation suivante soit vérifiée:





On en déduit:

Ce calcul est valable quand la section du lit reste très grande par rapport au diamètre des particules.

Il reste à expliquer pourquoi un tel régime est stable quand on dépasse cette vitesse minimale: on observe que la perte de charge ΔP est en effet constante.

L'expression de la vitesse du gaz est toujours donnée par la même expression littérale que pour la vitesse minimale car on a toujours la même relation entre les forces. Comme U augmente, le seul facteur qui change est le terme  qui doit aussi augmenter pour vérifier l'égalité. On en déduit que ε augmente et par conséquent comme la masse de particules du lit et la section du lit sont constantes, le lit se dilate quand on augmente le débit du gaz.

Quand le débit du gaz est tel que la vitesse est supérieure à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos, l'égalité précédente ne peut plus s'établir: le phénomène perd sa stabilité et on assiste alors à l'entraînement des particules.

**Vitesse Minimale De Fluidisation Umf**

La vitesse minimale de fluidisation correspond à la vitesse des gaz au moment ou les particules commencent à bouger et ne sont plus supportées par la voûte du réacteur.

Dans la littérature, cette vitesse s’écrit

 pour Re< 10

dp: diamètre moyen des particules en m

ρp: densité du solide en Kg/m3

ρf: densité du fluide en Kg/m3

μf: viscosité dynamique en pl

Umf: vitesse minimale de fluidisation en m/s

Re: nombre de Reynolds

**Vitesse Maximale De Fluidisation**

La vitesse maximale de fluidisation correspond à la vitesse pour laquelle les particules solides sont entraînées par le gaz ascendant.

Cette vitesse est donnée par les relations suivantes :

(1)  pour Re<0.2

(2)  pour 0.25< Re<1000

(3)  pour Re>1000

## III-2-3/ Problèmes Pratiques De La Fluidisation

Dans la pratique quatre phénomènes sont fréquents dans le fonctionnement d'un lit fluidisé:

* le bullage: des bulles se forment dans la région de la grille de distribution de gaz au bas de la colonne, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition.

En réalité ce phénomène est très complexe et très étudié. La plupart des réacteurs fonctionnent sous ce régime.

* le pistonnage: le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles de la colonne. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.
* le renardage: les particules s'accolent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
* l'entraînement de particules: dans le cas d'un lit catalytique, l'érosion mécanique et les contraintes thermiques finissent par aboutir à la formation de particules plus fines même si initialement la distribution était uniforme. Ces particules peuvent donc être entraînées hors du lit.

En résumé les poudres qui se prêtent bien aux lits fluidisés ont les caractéristiques suivantes:

* solide très sec pour éviter l'agglomération des particules
* solide de diamètres entre 50 µm et 1 mm pour éviter l'agglomération des particules
* solide ayant une bonne résistance à l'attrition
* distribution de taille pas très importante (rapport de 15 entre les diamètres extrêmes)

III-3/ Avantage Et Inconvénient De La Fluidisation

La fluidisation apparaît aujourd’hui comme étant une technique fort prometteuse, vu ses aspects hydrodynamiques ou ses caractéristiques de transfert très favorables sur le plan énergétique

Mais n’empêche, elle présente quelques un inconvénients

* L’existence des zones mortes ou mal fluidisées
* Les solides friables sont pulvérisés et entraînés par les gaz . Un dispositif de dépoussiérage est donc nécessaire à la sortie du réacteur

III-4/ Propriétés Fondamentales De La Fluidisation

1. **Pertes de charge**

Dans un réacteur à lit fluidisé, lorsqu’un courant ascendant de gaz traverse la couche des particules, on observe suivant la vitesse des gaz , trois phase différentes :

* 1. **Lit fixe**

A faible débit de gaz, les particules sont immobiles, la perte de charge ΔP que subit le gaz de fluidisation, en traversant le lit, augmente avec le débit. Cette perte de particules et exprime par le relation d’ERGUN.



Z : hauteur de la couche des particules

ε : porosité

ρg , μg: masse volumique et viscosité du gaz

Uf : vitesse du gaz

**2) Lit fluidisé**

Les particules se mettent en mouvement lorsque la vitesse des gaz atteint la vitesse minimale de fluidisation(Umf)



MP: masse du produit dans le lit

S : section du réacteur

* 1. **Lit entraîné**

Lorsque la vitesse des gaz dépasse la vitesse maximale de fluidisation, toute la couche de particules est entraînée hors du lit.

IV/ SECHAGE DES PHOSPHATES

# IV-1/ Définition

On attend par séchage le procédé mis en ouvre pour éliminer un liquide( très souvent de l’eau), d’un matériau quelconque à l’aide d’un apport de chaleur. Dans une large acception du terme, on peut considérer comme méthodes de séchage celles où l’eau, sans changement d’état, est extraire par des moyens mécaniques(pressage, centrifugation,…). Ces méthodes sont désignés par dihydratation mécaniques.

Toutefois, il est d’usage de réserver le terme de séchage aux procédés thermiques.( KECHAOU ,1989).

Le séchage est une opération unitaire mettant en jeu un transfert de matière (le liquide imprégnant le solide passe à l'état de vapeur dans une phase gazeuse) et un transfert thermique (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide). La vaporisation pourra s'effectuer par ébullition ou par évaporation.

On peut signaler que le terme de déshydratation a un sens plus restrictif car il ne s'applique qu'à l'élimination de l'eau. On l'applique également à l'élimination de l'eau de cristallisation des cristaux hydratés. Ce but n'est pas recherché dans une opération de séchage(mais il s’élimine dans une opération de calcination).

Le champ d'application du séchage est particulièrement large: produits chimiques, produits pharmaceutiques, produits agroalimentaires, matières plastiques, papiers, bois...

Il se distingue de l'évaporation par les quantités de liquide traité: le liquide d'imprégnation est à une teneur initiale beaucoup plus faible dans le cas du séchage. Les appareils sont donc complètement différents.

III-2/ But Du Séchage

Le séchage a pour but d'éliminer par vaporisation le liquide qui imprègne un solide.

Il est largement utilisé dans l'industrie chimique où il vient souvent en complément d'opérations comme la sédimentation, la filtration ou l'essorage. Il se pratique dans plusieurs cas:

* + - * le liquide résiduel est incompatible avec la suite du procédé
      * le produit humide se conserve mal (hydrolyse possible, modification de l'aspect physique par agglomération des grains)
      * le coût du transport est plus élevé en présence de liquide
* le séchage permet outre l'élimination du liquide, la création de modifications de la structure interne du solide soit par exemple l'apparition d'une structure poreuse

A cause du coût énergétique de la vaporisation l'industriel cherche à avoir la plus basse teneur possible en liquide à l'entrée du sécheur. La tendance est à n'utiliser le séchage que lorsque les procédés de séparation mécanique restent impuissants pour atteindre la teneur souhaitée en liquide.

# IV-3/Diversité Des Situations Industrielles

Pour le choix d'un procédé de séchage, il faut tenir compte de la nature du produit et de son état. Ainsi, le domaine des phosphates auquel nous nous intéressons plus particulièrement, le critère essentiel est évidemment la qualité du produit obtenu. Du point de vue de l'économie de l'exploitation, un produit ne doit être traité qu'en fonction des caractéristiques exigées. De nombreux procédés de séchage et appareils ont été développés à travers le monde. Ces séchoirs se distinguent essentiellement les uns des autres par le mode d'apport de la chaleur(conduction, convection, rayonnement) et les dispositifs utilisés(plateaux, chariots, lits fluidisés,…) (KECHAOU, 1989).

## IV-4/ Nature Des Produits A Traiter

Du point de vue de leur typologie, la classification des produits repose d'une part sur leur structure( porosité, rigidité) et d'autre part, sur leurs propriétés déterminantes au cours du séchage. Cependant, le vocabulaire varie d'un auteur à l'autre et un produit est mis dans une catégorie en fonction d'un critère privilégié. Par exemple, l'argile est considéré par KEEY(1978) comme un produit colloïdal parce qu'il gonfle en absorbant l'eau alors que VAN BRACKEL(1980), invoquant l'apparition de pores au cours du séchage, le classe parmi les matériaux poreux-hygroscopiques. Ce même auteur définit les produits alimentaires comme des matériaux colloïdaux, Car ils ne comporteraient pas de pore. A partir des observations de VAN ARSDEL(1974) , nous nous contentons de relever les principales caractéristiques des phosphates brut qui sont constitues d'un assemblage des gisement des phosphates contenant l'eau et impuretés ces solides granulés ne sont

Pas nécessairement identiques ,d' où l'hétérogénéité de ces produits. De plus, ils sont hygroscopiques et rigides. Pour résumer, trois caractéristiques servent à classer un produit solide au regard de l'opération de séchage, de l'état de l'eau et les impuretés, de la matrice et de la texture.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Etat de l’eau | Hygroscopique | | Libre |
| Matrice | Rigide | | Déformable |
| Texture | Non poreux | Porosité  manométrique | Porosité  -capillaire  -micro/millimétrique |

Les phosphates ont des caractéristiques : hygroscopiques, rigide et poreux. De plus chaque phosphates se diffère par leurs impuretés qui ont à un effet positif ou négatif sur les processus de transformation des phosphates qui se suit.

# IV-5/ Problématique Du Séchage

Chaque opération de séchage est caractérisée simultanément par un transfert de chaleur et un transfert de masse et chaque produit a une cinétique de séchage qui lui est spécifique. A la différence de beaucoup d’autres phénomènes comportant un transfert de matière, le séchage met en œuvre des phénomènes multiples qui sont compliqués du fait que les conditions du séchage se modifient lors du départ de l’humidité.

L’étude bibliographique nous a montré que les chercheurs qui ont abordé l’aspect expérimental du séchage(QUINETTE,1981 ; EL-SELMAN,1989 ; ROSSELLO et all,1990), se fixent généralement un seul produit dont ils déterminent la vitesse de séchage. D’autre part, ceux qui ont étudie le séchage sur le plan théorique introduisent souvent dans les programmes de simulation l’expression de la vitesse de séchage qui a été déterminée empiriquement(COMBES, 1979 ; KHEDARI et all,1994 ; KHOUHILA,1989).

Le problème qui se pose, c’est que les chercheurs ne disposent pas souvent de la vitesse de séchage du produit étudié. Ceci les amène à prendre souvent une même expression de la vitesse de séchage, pour des produit différents ayant la même géométrie tout en faisant l’hypothèse que ces produits ont des comportements cinétiques voisins(KOUHILA, 1989).

### IV-6/ Caractérisation Des Solides(Phosphates) Humides

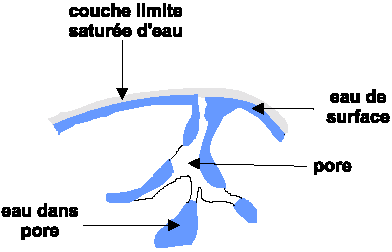
**1/ Humidité d'un solide**

On définit l'**humidité d'un solide** comme la masse d'eau en kg associée à 1 kg de solide sec (c'est en fait l'expression d'un rapport massique). On utilise fréquemment des pourcentages.

**2/ Description du solide humide**

Avant le séchage un solide humide peut se représenter schématiquement comme sur la figure suivante. Le solide a un film d'eau adhérant à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est à dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores: les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses.



**3/ Hygroscopicité**

Un solide non hygroscopique est un solide pour lequel à l'équilibre la tension de vapeur du liquide l'imprégnant est maximale pour une température donnée (tension de vapeur "normale" du liquide si il était seul dans une enceinte). C'est le cas durant le séchage des solides qui possèdent un film d'eau superficiel ou des solides dont les interstices sont suffisamment gros pour permettre la diffusion assez rapide de l'eau des pores à la surface.

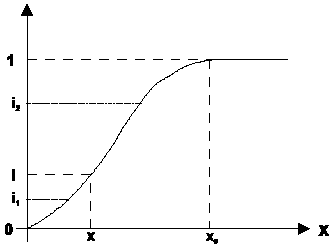
Un solide devient **hygroscopique** quand l'eau qu'il contient est en équilibre avec un air dont la pression partielle en eau est inférieure à la tension de vapeur maximale pour la température considérée. L'humidité relative de cet air est alors inférieure à 1. Ce comportement est du principalement aux forces liées à la capillarité qui ont tendance "à retenir l'eau en phase liquide".

Le tracé des isothermes d'adsorption permet de rendre compte de ce comportement. On trace expérimentalement à une température donnée la courbe d'équilibre de l'humidité relative de l'air au contact du solide humide en fonction de l'humidité de ce solide.

**4/ Comportement d'un solide humide dans le gaz chaud**

**a/ Séchage et mouillage d'un solide:**

On note Xc l'humidité d'un solide en équilibre avec de l'air saturé (i=1) à la limite du domaine d'hygroscopicité. On considère ce solide d'humidité X < Xc placé dans des courants d'air d'humidités relatives i1 et i2 . A cette humidité X correspond une humidité relative de l'air à l'équilibre égale à I. On examine sur l'isotherme de la figure 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.



On observe les deux comportements suivants:

i1 < I désorption de l'eau donc séchage

i2 > I adsorption de l'eau donc mouillage du solide

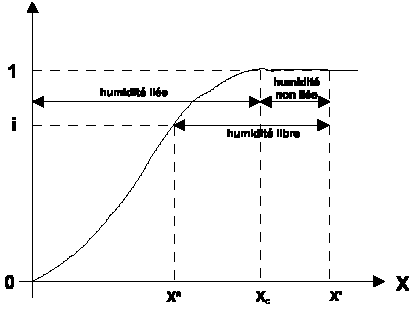
Remarque: on en déduit qu'un solide dans le domaine hygroscopique placé dans de l'air humide va absorber de l'eau jusqu'au moment où son humidité correspondra à l'équilibre avec l'air. La conséquence de ceci est que le stockage de composés hygroscopiques peut entraîner la formation d'agglomérats de solide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

**b/ Les différentes humidités d'un solide:**

Si un solide d'humidité X' > X \* est soumis à un courant gazeux constant d'humidité relative i, 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 \*.

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 i.

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



# IV-7/ Caractérisation Des Gaz De Séchage

**1/ Humidité absolue et humidité relative d'un gaz:**

On définit l'**humidité absolue d'un gaz** comme la masse d'eau en kg associée à 1 kg de gaz sec. On le notera Y.

L'**humidité relative** i s'exprime comme le quotient de la pression partielle de vapeur d'eau pH2O contenue dans le gaz par la pression de vapeur saturante de la vapeur P°H2O (tension de vapeur) à la même température. L'humidité relative est souvent nommée **degré hygrométrique**.

Quand l'air est saturée en eau, alors i = 1 pH2O = P°H2O

**2/ Point de rosée:**

Si le mélange initial gaz - vapeur d'eau (exempt de liquide) est refroidi sous une pression totale constante, la pression partielle en vapeur d'eau est constante mais la tension de vapeur diminue (la pression de vapeur saturante de l'eau est une fonction croissante de la température).

Quand celle-ci devient égale à la pression partielle, les premières gouttes de liquide apparaissent: on a alors atteint une température nommée le **point de rosée.** L'humidité relative est alors égale à 1.

Une poursuite du refroidissement entraîne une condensation de la vapeur et par suite une diminution de son humidité absolue. L'humidité relative reste constante.

**3/ Température sèche et température humide du gaz:**

On nomme **température sèche** d'un gaz la température indiquée par une sonde de température nue placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens courant.

On nomme **température humide** (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans un courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement.

**Remarque: Si on considère une enceinte adiabatique traversé par un courant gazeux et contenant de l'eau pure, la température (température sèche) atteinte en sortie par le gaz saturé en vapeur d'eau est nommée la température de saturation adiabatique.**

**5/ Diagramme enthalpique de l'air humide (diagramme de Mollier):**

L'enthalpie de l'air humide définit le contenu énergétique de cet air.

L'enthalpie notée H de 1 kg d'air sec associé à Y kg de vapeur d'eau à θ °C est la quantité de chaleur à fournir à ce mélange sous une pression constante pour l'amener de la température de référence 0 °C à la température de θ °C .Les états de référence à considérer sont l'eau liquide et le gaz sec à 0°C.

L'enthalpie de l'air humide H est la somme de l'enthalpie de l'air et de l'enthalpie de l'eau.

H = Cpa θ + Y . (Lv + Cpe. θ ) où Cpa et Cpe sont respectivement les chaleurs massiques de l'air et de l'eau à l'état gazeux et Lv la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C.

On obtient donc H = 1,01.θ + Y . (2494 + 1,92 . θ) avec H en kJ.kg-1

Le diagramme de Mollier permet la représentation de 5 grandeurs décrivant l'air humide (2 grandeurs suffisent à le définir totalement).

Pour le diagramme utilisable pour des températures sèches jusqu'à 300 °C, on observe notamment les variables suivantes:

* température sèche θ : les isothermes sont des droites légèrement croissantes en fonction de l'humidité absolue avec graduations sur l'axe des ordonnées
* température humide
* humidité absolue Y : les lignes d'humidité absolue constantes sont des verticales

avec graduations sur l'axe des abscisses

* humidité relative i : courbes croissantes en fonction de Y
* enthalpie H : les isenthalpies sont des droites parallèles décroissantes

Pour le diagramme utilisable pour des températures sèches jusqu'à 55 °C, on peut également lire la température humide de l'air.

Les diagrammes de l'air humide sont utilisés pour les calculs relatifs aux humidités de l'air, pour les déterminations de points de rosée et de température humide ainsi que pour les calculs énergétiques relatifs au séchage.

#### IV-8/ Méthodes De Séchage

On distingue trois méthode de séchage :

* Séchage par convection
* Séchage par conduction
* Séchage par rayonnement

Nous nous intéressons au séchage par convection

##### Séchage par convection

**a/ Généralités:**

C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie chimique: on envoie sur la matière à sécher un courant gazeux chaud (le plus sec possible) qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée.

La température du gaz diminue entre l'entrée et la sortie alors que c'est le contraire pour le solide.

Dans un procédé en continu deux sens de circulation sont possibles pour le gaz et le solide à sécher. La circulation à contre-courant est toujours la plus efficace et permet un séchage plus poussé. L'inconvénient est par contre de mettre en présence à une extrémité du sécheur le gaz à sa température la plus élevée (le moins humide) avec du solide ayant l'humidité la plus faible. Le risque de détérioration du produit est donc important pour un produit thermosensible. Par contre pour un séchage à co-courant le séchage est le plus intense quand le gaz chaud est en contact avec le solide ayant l'humidité la plus forte: le risque d'altération du produit diminue alors fortement.

**b/ Processus:**

Si on considère un solide humide placé dans un courant d'air gazeux on observe au cours de l'opération de séchage trois périodes distinctes:

* une phase de mise en température du solide
* une phase de séchage à vitesse constante
* une phase de séchage à vitesse décroissante

L'étude de la phase à vitesse constante montre que cette phase est comparable à ce que serait l'évaporation d'eau si aucun solide n'était présent: on se trouve dans le cas où soit il y a beaucoup d'eau à la surface du solide soit la diffusion de l'eau de l'intérieur du solide vers la surface est suffisamment rapide.

Durant cette phase on considère que le séchage s'effectue de manière adiabatique car il n'y aucun échange de chaleur avec l'extérieur. La chaleur latente de vaporisation de l'eau est entièrement fournie par le refroidissement de l'air chaud.

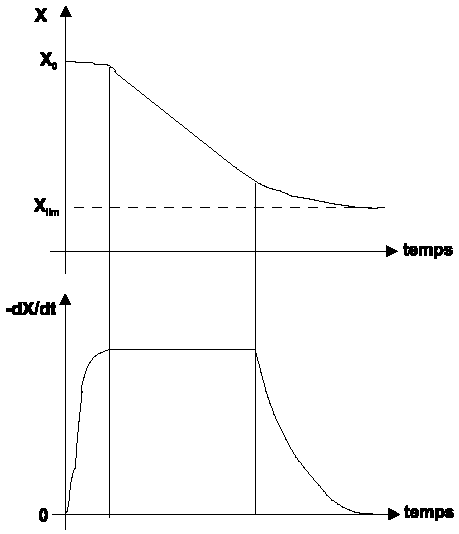
Le processus s'effectue donc **à enthalpie constante**. L'air chaud dans le diagramme de l'air humide va donc évoluer sur une isenthalpie (droite de saturation adiabatique): la chaleur perdue par refroidissement est entièrement compensé par l'apport de l'enthalpie de la vapeur d'eau composée d'un terme du à sa formation par évaporation et d'un terme beaucoup plus faible du à son réchauffement (l'échauffement du solide est négligeable dans cette phase si les températures de l'air ne sont pas trop élevées). Pendant cette période la température du solide reste constante et égale à la température humide de l'air.

**Remarque: On montre que dans le cas de l'eau, la température humide est égale à la température de saturation adiabatique de l'air.**

**Les facteurs qui augmentent la cinétique sont:**

* la diminution de l'humidité absolue de l'air de séchage
* l'élévation de la température de l'air de séchage
* l'augmentation du coefficient de transfert thermique par une augmentation de la vitesse de circulation de l'air
* l'augmentation de la surface spécifique du solide ce qui entraîne une augmentation de la surface d'échange

Pendant cette période la nature du solide et sa structure interne (pores, interstices) n'interviennent pas.

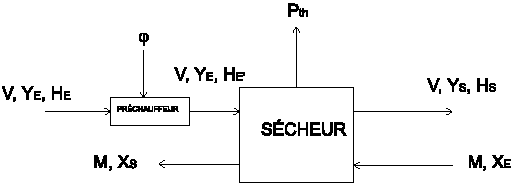


En fait l'air n'atteint jamais la température de saturation adiabatique puisque la vitesse commence à décroître à partir d'une humidité Xc (humidité critique) et finit par tendre vers une vitesse nulle. Pendant cette période la tension de vapeur du liquide imprégnant le solide est inférieure à celle existant pour un liquide seul présent.

L'humidité superficielle n'est plus renouvelée assez rapidement car le séchage progressant, il faut alors éliminer l'eau provenant de l'intérieur du solide: le trajet de la vapeur d'eau vers la surface devient de plus en plus long et les phénomènes de diffusion deviennent cette fois limitant. Cette diffusion devient d'autant plus lente qu'un phénomène de écroûtage apparaît parfois en surface. La vitesse s'annule quand l'humidité du solide devient égale à Xlim ce qui correspond à une valeur d'équilibre pour l'air de séchage utilisé.

Pendant cette phase les conditions opératoires liées à l'air perdent de leur importance. On assiste à un échauffement du solide.

#### IV-9/ Bilan Thermique

****

Les notations suivantes sont utilisées:

* V: débit massique de gaz sec
* M: débit massique de solide sec
* X : humidité du solide
* Y: humidité absolue de l'air
* H: enthalpie de l'air humide

On considère un procédé continu par convection où un produit d'humidité XE à l'entrée du sécheur est séché par un air d'humidité absolue YE à l'entrée du préchauffeur. Le préchauffeur sert à augmenter la température de l'air avant son entrée dans le sécheur. Il faut remarquer que ce préchauffage ne modifie pas l'humidité absolue de l'air.

Le bilan matière sur l'eau permet notamment de déterminer le débit d'air sec permettant d'éliminer 1 kg d'eau:

M . XE + V . YE = M . XS + V . YS

donc si on note W le débit massique d'eau évaporée, on obtient:

M . ( XE - XS ) = V . ( YS - YE ) = W

Ceci revient à dire que l'eau enlevée à la matière à sécher a été éliminée par l'air.

D'où pour éliminer 1 kg d'eau, il faut utiliserkg d'air sec et 1 kg d'air sec permet l'élimination de YS - YE kg d'eau.

Le bilan thermique est plus délicat et nécessite l'utilisation des enthalpies; on considère dans ce cas comme système le préchauffeur et le sécheur. On prend en compte comme "débits enthalpiques" d'entrée les enthalpies relatives aux entrées du solide "humide" et du gaz "sec", la puissance thermique fournie par le préchauffeur φ et comme "débits enthalpiques" de sortie les enthalpies relatives aux sorties du solide "sec" et du gaz "humide", la puissance thermique dissipée par pertes thermiques Pth.

Un cas d'étude intéressant concerne le séchage par convection dans la phase de vitesse constante. Si on se place dans l'hypothèse d'un processus adiabatique, on admet alors qu'il n'y a pas de pertes thermiques et que le solide ne subit aucune variation de température entre l'entrée et la sortie du sécheur. Dans ce cas, la phase dans le sécheur proprement dit est adiabatique et le seul apport d'énergie est la puissance thermique au préchauffeur qui permet la vaporisation d'un débit massique d'eau W. L'air humide "évoluant" sur une isenthalpie pendant ce séchage,

on a:

HS = HE'

On en déduit: φ = V . (HE' - HE)

Dans ce cas la chaleur à fournir au préchauffeur pour vaporiser 1 kg d'eau est:



###### IV-10/ Méthodologie De Mise En Place D Une Opération De Séchage

Pour mettre en place et mener à bien une opération de séchage ,nous présentons les étapes de l une des méthodes de travail (GUINEBAULT ,1986) que nous avons adopté :

* *Recenser les contraintes :*
  + - * température maximale du produit, durée maximale de séchage et teneur en eau et les impuretés finales ;
      * contraintes économiques ,écologiques et géographiques ;
      * dates de récoltes et étalement dans le temps
* *Rassembler touts les informations concernent le produit :*
  + - * déterminer les isothermes de sorption et par suit les teneurs en eau et en impuretés finales ;
      * déterminer les cinétiques de séchage dans une soufflerie de laboratoire ;
      * déterminer les courbes de séchage ,les coefficients de diffusion du produit ,etc ;
* *Inventorier les énergies renouvelables disponibles sur place :*
  + - * solaire éolienne ,hydraulique ,possibilités de stockage ;
      * choisir le mode de captation le plus adapté à la situation ;
* *Rechercher la possibilité d étendre i usage des capteurs d énergie à d autres opérations*

Cette opération a pour objectif de réduire au maximum le coût d investissement

* *Modéliser et dimensionner le type de séchoir choisi*
  + - * élaborer des modèles de fonctionnement de l ensemble du système de séchage ;
      * choisir un type de séchoir (séchoir à claies ,tunnel ,plateaux ,chariots , lits fluidisés …
      * élaborer un programme informatique simulant le comportement du séchoir ;
      * dimensionner le séchoir à partire d un besoin à satisfaire.

\**Réaliser le séchoir dans la pratique*

*\*Préparer le produit au processus de séchage*

* Concassage, criblage, broyage ;
* *Etudier la cinétique de séchage en situation réelle et valider les models élaborés .*
* *Etude de l évolution de la qualité du produit au cours du séchage ,ensachage et stockage.*
* *Envisager une étude économique et prévoir le temps d amortissement du système.*

Avant de passer à la réalisation d un séchoir ,il est nécessaire de poser la question :

Quel appareil faut-il installer pour sécher une quantité déterminée de produit dans des conditions de fonctionnement préalablement définies ?

La démarche de mise en œuvre d une opération de séchage est illustrée par l’ organigramme suivant :

|  |
| --- |
| Quel est le produit à sécher ? |

|  |
| --- |
| Quelle quantité faut-il sécher ?  Et combien de temps |

|  |
| --- |
| Quel est le débit d’air chaud nécessaire ? |

Direct Indirect

|  |
| --- |
| Quel type de séchoir ? |
| Quelle est la surface de captation nécessaire ? |

|  |
| --- |
| Le rayonnement solaire disponible est –il suffisant |

|  |
| --- |
| Quel mode de ventilation ? |

Naturelle

Forcée

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Comment favoriser la convection naturelle sans système particulier ? |  | Quelle surface et quelle forme de cheminée solaire ? |  | Quelle puissance et quel type de ventilateur ? |

**Figure : Organigramme de mise en place d’une opération de séchage**

#### IV-11/ Equipements Annexes Des Sécheurs

**1/ Conditionnement de l'air de séchage:**

**a/ Filtres:**

Suivant le produit à traiter des contraintes importantes peuvent être imposées à l'air de séchage. Des filtres sont donc souvent installés; ils peuvent parvenir parfois à empêcher le passage des bactéries et autres micro-organismes si ils sont suffisamment fins.

**b/ Ventilateurs:**

Ils communiquent à l'air l'énergie mécanique nécessaire à sa traversée du sécheur.

**c/ Déshumidificateurs de l'air:**

Pour améliorer la capacité d'absorption d'eau de l'air, il est intéressant de prévoir un dispositif de déshumidification de l'air qui abaisse l'humidité de l'air avant son entrée dans le sécheur.

On peut procéder par condensation en diminuant la température de l'air en dessous de son point de rosée ce qui permet d'éliminer l'eau en excès. On peut aussi passer l'air sur un support hydrophile qu'on régénère ensuite. Cette deuxième méthode est plus fréquemment utilisée pour déshumidifier l'air de refroidissement des produits après séchage.

**d/ Réchauffeurs d'air:**

La nécessité d'abaisser l'humidité relative de l'air avant son entrée dans le sécheur pour obtenir une meilleur efficacité oblige à préchauffer l'air. On utilise à cet effet des aérothermes constitués par des tubes munis d'ailettes et traversés par des fluides caloporteurs.

Une deuxième solution consiste à utiliser des brûleurs utilisant des combustibles divers (fuel, charbon , gaz). Si le contact de l'air avec les produits de combustion est direct le rendement thermique est meilleur mais il faut alors ne pas avoir de contraintes au niveau de la contamination par les dérivés de combustion du produit à sécher. Pour éviter ce problème, on réchauffe alors l'air en utilisant un échangeur.

**e/ Récupération thermique:**

Le recyclage de l'air en sortie du sécheur peut s'effectuer si il est encore peu chargé en humidité. On renvoie donc cet air mélangé à de l'air "neuf" au niveau du préchauffage. Il est aussi parfaitement possible d'utiliser l'air en sortie souvent encore à une température élevée pour contribuer en partie au préchauffage de l'air "neuf".

**V/ ENVIRONNEMENT**

Actuellement, les entreprises cherchent à certifier le produit fini ; pour avoir une qualité intégré qui satisfait aux exigences des clients.

L’environnement c’est l’un des grand axes qui gêne la certification des l’entreprise lui-même.

Dans les industries des complexes chimiques qui destinées pour la fabrication des divers dérivés des phosphates tant que complexes constituants des impuretés en parallèles aux produits semi fini ou fini ils sont résultes des rejets( poussières des phosphates et de soufre, SO2, NH3, P2 O5, phosphogypses, l’eau de lavage des gaz, les gaz volatils via les cheminés, l’irradiation…etc) aux alentour des installations à une distance assez long .

Cette contaminations de l air ;sol zones marins à un effet néfaste de point de vue social économique et écologique .

On conclu que le domaine de l’environnement est un domaine assez vierge ; exige une intervention des différentes disciplines qui peuvent contribuer dans le domaine de la recherche scientifique .

# VI/ CONCLUSION & PERSPECTIVES

## VI-1/ Conclusion

# Les impuretés des phosphates varient d’une région à l’autre, d’où la difficulté d’optimiser L’énergie de séchage ou de calcination, même de dimensionner ces procédés. Ce qui nécessite une installation assez flexible qui nous favorise un produit fini satisfaisant aux exigences clients ; d’où l’idée de le refroidir par les phosphates moins de matière organique pour récupérer le plus possible l’énergie, augmenter la productivité ainsi que la micropososité.

Le séchage et la calcination des phosphates sont deux opérations unitaires qui ont pour but ; conditionnement des phosphates de point de vue humidité et impuretés, selon l’adaptation de ses produits aux besoins de ses clients à savoir les qualités marchandes de phosphates qui sont adaptées aux besoins de chaque client et aux réglementations environnementales en vigueur.

Nous nous focalisons notre étude sur l’optimisation de l’apport calorifique le long de la chaîne de production

# VI-2/ Perspectives

* Les isothermes de sorption des phosphates en fonction de la température initiale ;
* Les isothermes de sorption des grains des phosphates en fonction de la température initiale ;
* Le tracé de la vitesse de séchage en fonction de l’humidité pour des températures différentes ;
* L’effet de la variation des constantes chimiques sur l’isotherme de sorption ;
* L’effet de séchage ou calcination sur la variation des constantes chimiques ;
* L’effet de séchage ou calcination sur les métaux lourds(polluants) et les éléments qui interagissent négativement sur le processus de transformations des phosphates à ces dérivés ;
* L’effet de la température sur la microporosité des phosphates(porosité après et avant le séchage) ;
* La réactivité du silicium le Long de la chaîne de séchage ou calcination(encrassement des tubes de lit fluidisé…) ;
* Le coût énergétique en fonction de l’humidité entré séchoir ;
* Détermination de coefficient de conduction des phosphates(gamme de variation) ;
* Le coefficient de diffusion de l’eau dans les phosphates ;
* Phosphates (calciné ou séché) +phosphates (brut à teneur en matière organique faible) ;



**L’efficacité**

* Constituants chimiques ;
* Bilan d’énergie ;
* Etude théorique ;
* Mesure de la micro porosité(augmentation de la surface d’attaque) ;
* Etablissement d’un loi empirique ;
* Dimensionnement du séchoir ;
* Le bilan global dépend des réactions exothermiques et endothermique ;

⇓

* Etablissement d’un programme qui détermine avec précision l’énergie à ajouter pour calciner ou sécher les phosphates selon les besoins des clients ;

VII/ BIBLIOGRAPHIE

* Perfectionnement spécifique : processus et conduite des unités.
* H. Hakim : gestion de l’environnement au sein du groupe OCP.
* A.Arafan : Traitement thermique d’un phosphate très riche en matière organique et valorisation des phosphates.
* A.EL Haouari , A.EL Alouani  et A.Arafan : Le groupe OCP : Une grande capacité d’adaptation pour satisfaire les besoins de ses clients.
* KOUHILA : Etude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif