

LE SECHAGE THERMIQUE

Sommaire

APPROCHE ENERGETIQUE

DESCRIPTION TECHNIQUE DE SECHEURS THERMIQUES

Séchoirs continus

- Atomisation
- Cylindre chauffant
- Tambour rotatif
- Sécheur tunnel
- Sécheur à bande
- Sécheur silo

Séchoirs statiques

- Etuve de séchage
- Lyophilisation
- Lit fluidisé
- Sécheur à palettes / vis

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

DEFINITIONS

Le séchage est une opération unitaire ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide. Ce procédé s'effectue dans la majorité des cas par **voie thermique**.

La problématique "séchage" développée dans cette section se focalise sur les procédés dédiés à ce mode de séparation sans s'attarder sur les autres types de séparation (par voie mécanique ou radiante).

1- APPROCHE ENERGETIQUE

La technique de séchage dépend souvent de la forme ou de l'état physique du produit à sécher. Cependant, plusieurs remarques doivent aider l'industriel quant au choix de cette dernière.

Cette opération nécessite un apport thermique important pour amener l'eau à se retirer du produit et pour assurer le transfert de masse. Généralement, le solvant évaporé est de **l'eau**. Aussi, la demande énergétique de ce procédé est a minima de 1 kg de vapeur par kg d'eau évaporée. Ce changement de phase liquide-gaz, complétée par la faible efficacité de ce type de procédé, rend l'opération **très coûteuse en énergie** (jusqu'à **plus de 1 000 kWh par tonne d'eau évaporée**).

Il est tout d'abord indispensable de bien connaître l'état de **siccité** final du produit à sécher. En effet, le séchage thermique ne se révélera pas indispensable dans le cas d'une faible siccité terminale (inférieure à 40 %). D'un autre côté, il s'avère souvent avantageux de diminuer la teneur en eau du produit par voie mécanique (séparation mécanique) avant tout séchage thermique, beaucoup plus coûteux. La maîtrise de l'énergie passe également par la substitution d'une forme d'énergie à une autre, ou l'utilisation simultanée ou alternée de plusieurs modes de transfert de l'énergie, notamment à travers l'utilisation des Energies Radiantes (qui peuvent également être utilisées pour le chauffage préliminaire du produit).

L'apport de chaleur sous pression atmosphérique peut se faire de différentes manières :

- **Par convection** : c'est le mode de transfert le plus utilisé car il permet un transfert simultané de chaleur et de masse (vapeur issue du produit). Le fluide sécheur utilisé habituellement est l'air chaud. Cependant, le séchage à la **vapeur d'eau surchauffée** permet d'obtenir des gains importants d'énergie. Au contact du produit à sécher, cette vapeur qui n'est pas saturée en eau se désurchauffe en cédant une partie de sa chaleur sensible, évaporant ainsi l'eau contenue dans le produit. Ce procédé ne convient pas aux produits sensibles à une très grande chaleur, mais se révèle avantageux pour ceux qui sont gorgés d'eau ou sensibles à l'oxydation. En effet, il est possible de récupérer l'énergie de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui-même (**CMV**) ou en dehors du séchoir. Il a en outre l'avantage de ne pas produire de gaz à effet de serre et son utilisation élimine les risques de feu et d'explosions.
- **Par conduction** : le transfert thermique se fait dans ce cas par contact du produit avec une paroi chauffée.
- **Par rayonnement** : les techniques énergies radiantes (UV, IR, HF, MO) permettent d'assurer, lorsque le produit le permet, un séchage de très bonne qualité et de réduire considérablement les dépenses liées au poste énergie. D'utilisation souple et précise, elles peuvent également être combinées à d'autres modes de transfert d'énergie (air chaud, conduction) ou sous certaines conditions de température ou de pression (séchage sous vide).

2- DESCRIPTION TECHNIQUE DE SECHEURS THERMIQUES

TECHNIQUE	Produit liquide	Produit pâteux	Produit pulvérulent et granulaire	Produit fibreux	Produit plan	Produit en bande	Produit en forme et en morceaux
Atomisation							
Sécheur tunnel							
Etuve de séchage							
Tambour rotatif							
Sécheur flash							
Lit fluidisé							
Sécheur à bandes							
Sécheur silo							
Cylindre chauffant							
Sécheur à palette / vis							
Lyophilisation							

Principaux procédés de séchage thermique rencontrés

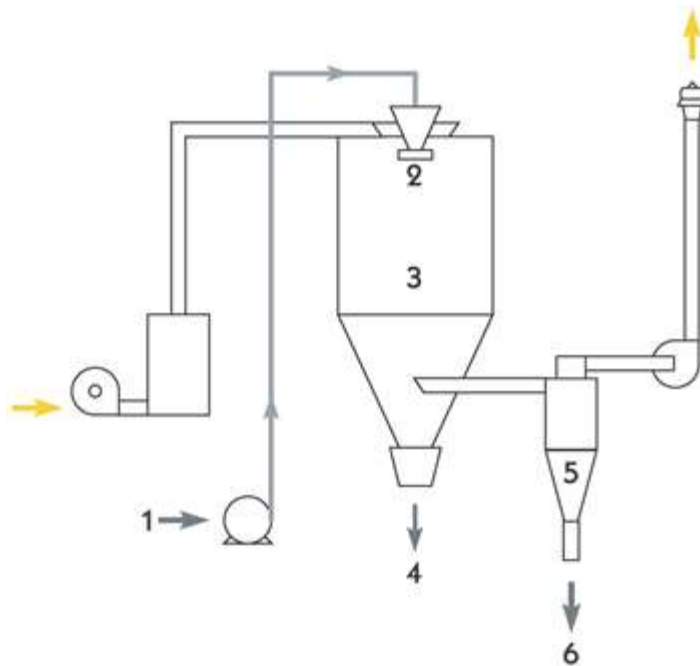
Le nombre très important de produits à sécher (forme, état initial ...) a pour conséquence l'existence dans l'industrie de nombreux procédés industriels (dispositifs, type d'énergie ...), ce qui rend difficile toute simplification lors du traitement de ce sujet.

Les fiches techniques présentées ci-après exposent, **pour une gamme étendue de technologies de séchoir**, outre la description du procédé et de ses caractéristiques, les différents systèmes ou dispositifs permettant d'atteindre une **plus grande efficacité énergétique dans leur utilisation**, ainsi **que les modes de transfert de chaleur courants ou en développement amenant des gains en énergie conséquents**.

Les divers types de séchoirs industriels peuvent se regrouper de différentes manières ; on a choisi ici de distinguer les séchoirs statiques ou séchoirs à feu discontinus, des séchoirs à feu continus.

2-1- Séchoirs continus

× Atomisation



1. Entrée du produit humide
2. Pulvérisation des particules
3. Chambre de séchage
4. Sortie du produit sec
5. Cyclone de dépoussiérage
6. Fines

ATOMISATION

Type de produit

Etat initial	Produit liquide (doit être pompable)
Etat final	Produit pulvérulent (poudres de qualité uniforme)

Exemples d'applications

Teneur en eau	Lait	Café	Levures	Poudres détergentes	Sérum
initiale	52 %	75 - 85 %	75 %	35 %	/
finale	3 %	3 - 5 %	8 %	4 - 10 %	5 %

Le séchage comprend 3 étapes :

- Pulvérisation du produit

L'atomisation consiste à pulvériser la suspension à sécher en fines gouttelettes, souvent en partie haute de l'enceinte. Le liquide peut être pulvérisé par atomisation centrifuge, par atomisation sous pression (buse à simple fluide) ou par atomisation pneumatique (buse à 2 fluides). Cette opération détermine la taille des gouttelettes produites (et leur granulométrie), leur trajectoire, leur vitesse et par conséquent la dimension finale des particules sèches.

- Mélange air-spray et évaporation de l'eau

Les gouttes formées tombent par gravitation dans un courant d'air chaud et sèchent jusqu'à obtention d'un grain de poudre sec.

Le contact de l'air avec le produit peut se faire selon un écoulement co-courant, contre-courant ou mixte.

- Séparation du produit sec de l'air rejeté

La récupération des poudres est effectuée par des cyclones, suivis ou non de filtres à manches et de laveurs de gaz.

Des variantes au procédé générique existent également (atomisation multiple-effet, atomisation à 2 ou 3 étages).

Caractéristiques du procédé

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement		Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
	entrée	sortie			
1 à 30 m/s	100 à 600°C	60 à 200 °C	10 à 30 s	5 à 200 t/h	1 à 30 kg d'eau/h/m ³

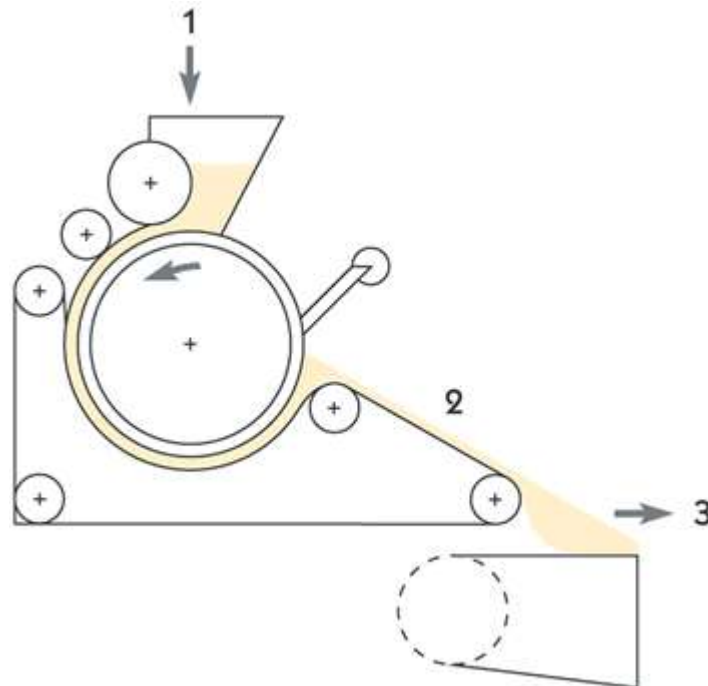
Efficacité énergétique

■ Il est intéressant de réchauffer l'air entrant au moyen de calories récupérées sur l'air sortant (par l'utilisation d'un fluide intermédiaire ou non).

■ L'utilisation de la **VES** (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir lors d'un séchage par atomisation. Les intérêts sont multiples:

- une consommation énergétique réduite par rapport au séchage air chaud (0,6-0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
- possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui-même (**CMV**) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières...),
- récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
- élimination des risques de feu ou d'explosions,
- amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme...).

× Cylindre chauffant



1. Entrée du produit humide
2. Produit demi-sec
3. Sortie du produit sec

CYLINDRE CHAUFFANT

Type de produit

Etat initial	Produit liquide, pâteux ou en bande
Etat final	Produit pulvérulent (flocons) ou en bande

Exemples d'applications

Teneur en eau	Latex de PVC	Papier - carton	Textile	Flocon de pomme de terre	Farine infantile instantanée
initiale	Produit liquide	60%	Produit en bande	80 %	50 - 64 %
finale	Produit liquide	5 %	Produit en bande	5 %	Produit pâteux

Le procédé consiste à étaler le produit humide à sécher en film mince sur la paroi externe d'un cylindre métallique, chauffé intérieurement (essentiellement par de la vapeur et par Infrarouge). C'est la face externe du cylindre qui transmet la chaleur par conduction dans la couche de produit humide en contact avec le cylindre.

Le schéma d'alimentation dépend essentiellement de la texture, de la concentration, de la viscosité, du caractère mouillant du produit et de la sensibilité à la température.

On distingue les modes d'alimentation suivants en fonction du type de produit :

- pour les fluides : alimentation par trempage, par pulvérisation ou par rouleau encreur ;
- pour les produits visqueux et pâteux : alimentation par plusieurs rouleaux encolleurs en cascade (le produit est encollé sur le tambour en couches successives, chaque rouleau satellite est alimenté par raclage du précédent) ou en parallèle (l'alimentation en couches successives se fait à partir de chaque rouleau satellite qui est alimenté directement en produit frais).

Le cylindre tourne pendant que le film sèche. L'axe de rotation est horizontal et la longueur du cylindre est plus réduite que pour un tambour rotatif. Le produit sec est raclé par un couteau et emmené vers le conditionnement.

Des variantes au procédé générique existent également (séchateurs bi-cylindres, séchateurs multi-cylindres).

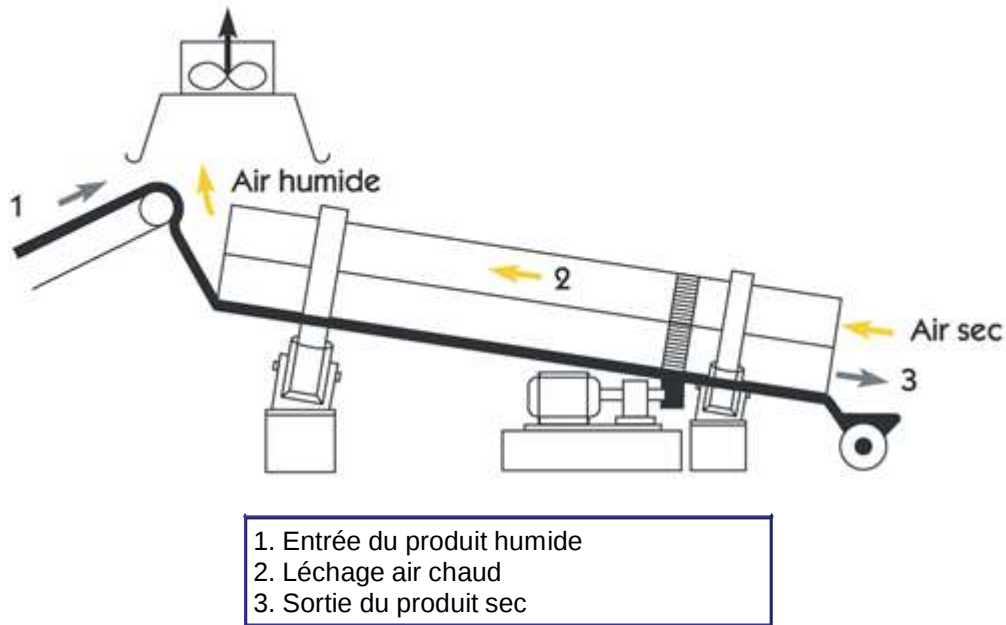
Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement	Temps de séjour	Capacité de traitement horaire
100 à 180 °C	3 à 30 s	15 à 40 kg d'eau/h/m ²

Efficacité énergétique

- On utilise fréquemment et avec intérêt pour le chauffage du cylindre la **VES** (Vapeur d'Eau Surchauffée) ou l'IR.
Les intérêts de l'IR sont multiples:
 - densité de puissance élevée et modularité,
 - faible inertie,
 - localisation de la chauffe (amélioration du profil longitudinal de température),
 - homogénéité de température,
 - entretien facile et réduit,
 - élimination des problèmes mécaniques dus à l'absence de circulation de fluides.
- Il est intéressant de récupérer de l'énergie dans les buées (pour la production d'eau chaude ou le chauffage de locaux par exemple)
- L'utilisation de Compression Mécanique de Vapeur (**CMV**) sous vide permet le séchage de produits thermosensibles avec une consommation énergétique faible.

× Tambour rotatif



TAMBOUR ROTATIF

Type de produit

Produit fibreux
Produit pulvérulent, granulaire
Produit pâteux extrudable, émiettable ou granulable

Exemples d'applications

Teneur en eau	Sable	Pulpe de betterave	Talc	Pâtes alimentaires	Luzerne
initiale	6 - 7 %	76 - 78 %	65 %	26,5 %	75 %
finale	0 %	10 - 12 %	0,5 - 1,5 %	12,5 %	10 - 15 %

Ces séchoirs sont constitués d'un tambour (cylindre), généralement de grande longueur, tournant lentement autour d'un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontale. Le produit humide est introduit en partie supérieure par un tapis ou une vis d'Archimède. Le produit avance par gravité, les grains roulant les uns sur les autres.

- Séchoir tambour convectif (à léchage et brassage)

Dans certains cas, la paroi intérieure du cylindre est garnie d'aubes permettant de remonter le produit et de le laisser tomber en pluie au cours de la rotation. Ce système accroît considérablement la surface d'échange entre le produit et l'air et donc contribue à diminuer le temps de séchage.

- Séchoir tambour conductif

La paroi du cylindre est chauffée extérieurement par des gaz de combustion. La face interne du cylindre assure par conduction la transmission de la chaleur au produit humide. Un écoulement d'air est nécessaire pour l'extraction de la vapeur d'eau.

Des variantes au procédé générique existent également (sécheur tambour à double ou triple passages).

Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement	Temps de séjour Débit du produit Capacité de traitement horaire			
	10 à 60 mn	50 à 70 t/h	Tambour conductif	Tambour convectif
100 à 900 °C			1 à 20 kg d'eau/h/m ²	3 à 100 kg d'eau/h/m ³

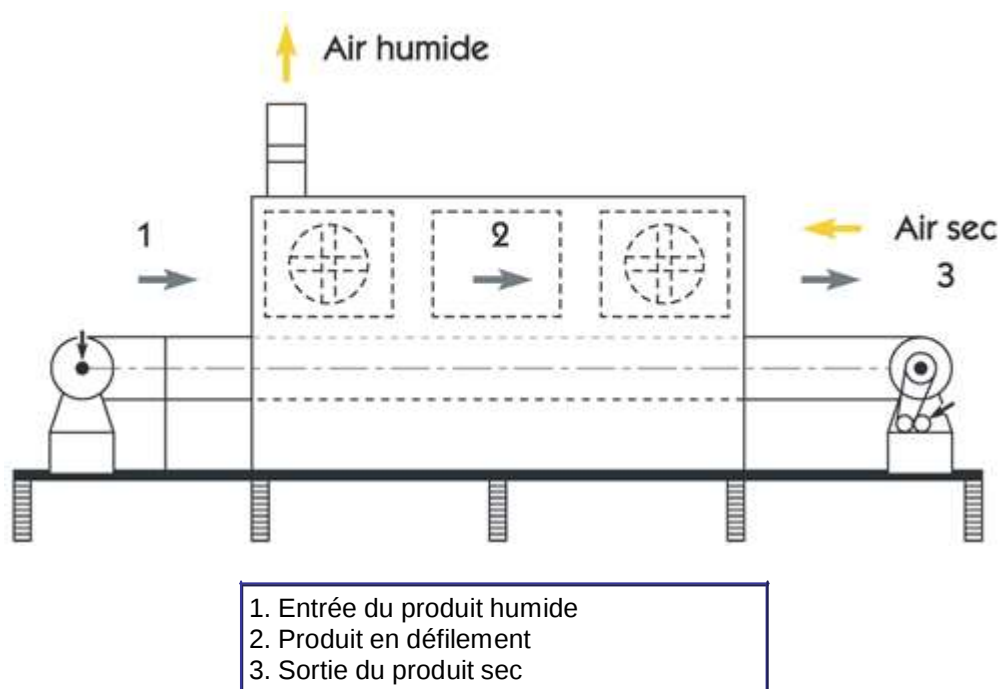
Efficacité énergétique

L'utilisation de la **VES** (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir lors d'un séchage par lit fluidisé.

Les intérêts sont multiples :

- une consommation énergétique réduite par rapport au léchage air chaud (0,6-0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
- possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui-même (**CMV**) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières ...),
- récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
- élimination des risques de feu ou d'explosions,
- amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme ...).

× Sécheur tunnel



SECHEUR TUNNEL

Type de produit

Produit pâteux
Produit pulvérulent, granulaire, fibreux
Produit plan, en forme, en morceaux

Exemples d'applications

Teneur en eau	Gélatine	Laine en bourre	Fruits et légumes	Briques et tuiles
initiale	70 %	35 - 40 %	80 -90 %	20 %
finale	10 %	0,1 - 15 %	5 %	3 %

Un sécheur tunnel est constitué d'une enceinte fixe dans laquelle le produit à traiter se déplace longitudinalement d'une extrémité à l'autre de l'enceinte.

- Transport du produit

Le produit initial est déposé, à l'entrée du tunnel, au moyen d'un dispositif adéquat, qui peut être une bande oscillante, une vis d'étalement, un distributeur vibrant ou une boudineuse.

La matière est transportée sur un tapis unique (en tôles pleines ou perforées, en grillage, en toile tissée).

- Séchage du produit

L'apport de chaleur au produit se fait généralement par l'intermédiaire d'un fluide de séchage (circulation d'air chaud). D'autres modes de transfert de la chaleur sont également possibles.

Des variantes au procédé générique existent également (sécheur tapis à tabliers en série ; sécheur tapis à tabliers superposés ; sécheur chariot ; sécheur à balancelles).

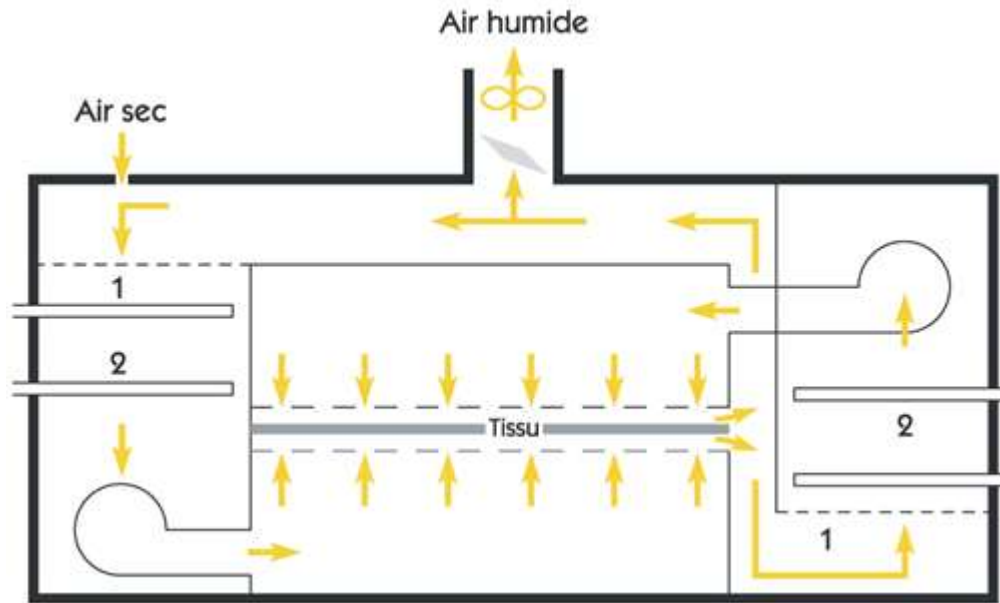
Caractéristiques du procédé

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
très variable	30 à 250 °C	très variable	très variable	1 à 50 kg d'eau/h/m ³

Efficacité énergétique

- On utilise fréquemment et avec intérêt pour le chauffage du cylindre la **VES** ou les énergies radiantes telles que IR (infra rouges) et HF(hautes fréquences).
Les intérêts de l'IR et des HF sont multiples :
 - densité de puissance élevée et modularité,
 - faible inertie,
 - localisation de la chauffe (amélioration du profil longitudinal de température),
 - homogénéité de température,
 - entretien facile et réduit,
 - élimination des problèmes mécaniques dus à l'absence de circulation de fluides.
- L'utilisation de la **VES** (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir lors d'un séchage par lit fluidisé.
Les intérêts sont multiples :
 - une consommation énergétique réduite par rapport au léchage air chaud (0.6-0.7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
 - possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui-même (**CMV**) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières ...),
 - récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
 - élimination des risques de feu ou d'explosions,
 - amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme...).
- L'utilisation de Compression Mécanique de Vapeur (**CMV**) permet d'obtenir une consommation énergétique faible : la vapeur utilisée est recyclée par plusieurs ventilateurs et réchauffée dans des échangeurs. C'est la vapeur extraite du produit qui est comprimée pour aller se condenser et surchauffer la vapeur de séchage.
- Utilisation possible de Pompe à Chaleur (**PAC**).

× Sécheur à bande



Séchage sur rame

1. Filtration de l'air
2. Chauffage de l'air

SECHEUR A BANDE

Type de produit : Produit en bande

Exemples d'applications

Teneur en eau	Laine	Couches sur papier	Pâte à papier
initiale	40 %	10 à 40 %	80 -90 %
finale	15 %	5 %	5 %

Le produit défile sur une rame en étant maintenu par des picots, qui permettent d'agir sur la longueur et la largeur du produit final, c'est-à-dire sur la stabilisation dimensionnelle du produit.

L'apport de chaleur au produit se fait généralement par l'intermédiaire d'un fluide de séchage (circulation d'air chaud). L'utilisation des énergies radiantes est aussi possible.

Séchage par aéroportance

L'air de séchage est soufflé par des buses ou par des fentes, soit sur une seule face du produit, soit sur les deux. Les caissons de soufflage de l'air sont répartis de manière à obtenir une homogénéité de soufflage à la surface du produit.

Ce procédé est utilisé pour le séchage des textiles, qui ne peuvent pas être mis en tension (tricots, grille de verre, toiles très épaisses), pour le séchage d'enductions (textile et papier) et lors d'opérations intermédiaires de séchage. Cela nécessite d'assurer une distribution efficace de l'air (soufflage et extraction), un écoulement homogène de l'air sur le produit et d'ajuster les vitesses de fluide.

Le séchage aéroporté se distingue de la rame en particulier par le temps de séjour du produit, sa vitesse de défilement et la capacité de traitement horaire du sécheur.

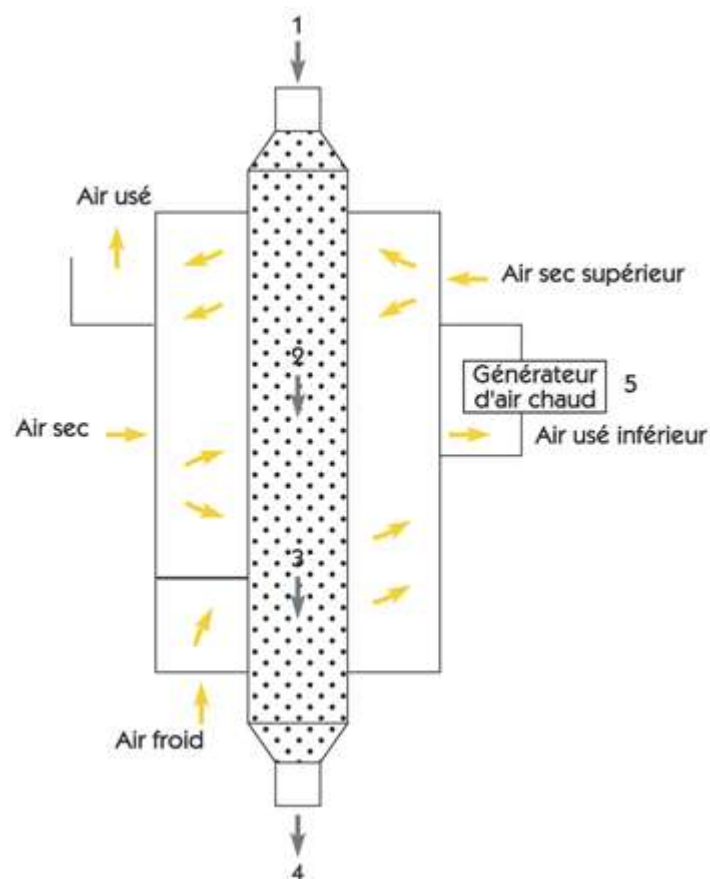
Caractéristiques du procédé

		Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	Temps de séjour	Capacité de traitement horaire
Rames		5 à 100 m/min	100 à 220 °C	1s à 2 min	6 à 20 kg d'eau/h/m ² de sécheur
	Textiles	10 à 100 m/min	50 à 350 °C	30 à 50 s	10 à 50 kg d'eau/h/m ² de sécheur
	Papiers	100 à 1500 m/min		0,1 à 2s	

Efficacité énergétique

- On utilise fréquemment et avec intérêt pour le chauffage du cylindre la **VES** ou les énergies radiantes telles que IR (infra rouges) et HF(hautes fréquences).
Les intérêts de l'IR et des HF sont multiples :
 - densité de puissance élevée et modularité,
 - faible inertie,
 - localisation de la chauffe (amélioration du profil longitudinal de température),
 - homogénéité de température,
 - entretien facile et réduit,
 - élimination des problèmes mécaniques dus à l'absence de circulation de fluides.
- L'utilisation de la **VES** (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir lors d'un séchage par lit fluidisé.
Les intérêts sont multiples :
 - une consommation énergétique réduite par rapport au séchage air chaud (0.6-0.7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
 - possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui-même (**CMV**) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières ...),
 - récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
 - élimination des risques de feu ou d'explosions,
 - amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme...).

× Sécheur silo



1. Entrée du produit humide
2. Zone de séchage
3. Zone de refroidissement
4. Sortie du produit sec
5. Recyclage de l'air usé

SECHEUR SILO

Type de produit

Produit **granulaire**

Exemples d'applications

Teneur en eau	Blé tendre	Maïs	Orge
initiale	19,5 %	35 %	20 %
finale	14,5 %	15 %	14,5 %

Le séchage comprend 4 étapes :

- Alimentation du produit

Le produit humide est introduit en haut du sécheur et descend par gravité. Des trappes qui s'ouvrent et se ferment à intervalles réguliers permettent de réguler le débit de grains.

- **Séchage proprement dit**

La zone de séchage est munie de gaines ou dièdres qui irriguent la couche de grain en air chaud. Ces gaines permettent l'apport d'énergie nécessaire au séchage du grain et l'évacuation de l'air usé.

- **Refroidissement et extraction du grain**

De l'air froid est introduit dans les gaines, en partie inférieure du sécheur, pour amener la température du grain à température ambiante.

- **Recyclage thermique de l'air usé**

Cet air provenant de la partie inférieure du sécheur est recyclé, soit en partie supérieure du sécheur, soit en amont de l'installation, au niveau du générateur d'air chaud.

Des variantes au procédé générique existent également (dryération ou refroidissement lent différé; sècheurs fermiers).

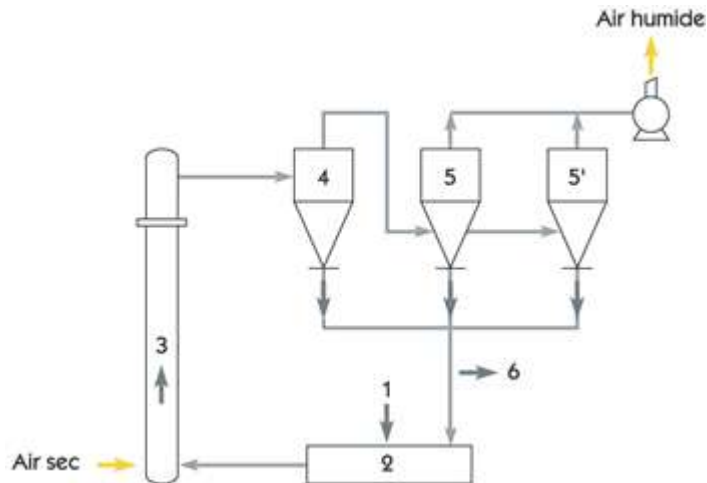
Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement	Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
30 à 90 °C	6-9 h à 3-4 jours	2 à 60 t de grain humide/h	500 à 15 000 kg d'eau/h

Efficacité énergétique

Il est possible d'effectuer un recyclage intégral en récupérant l'air usé de la partie inférieure du sécheur (zone de refroidissement et de séchage) ; ce dernier est réchauffé puis réinjecté dans la partie supérieure du sécheur.

x Sécheur flash



1. Entrée du produit humide
2. Mélange produit humide + produit sec
3. Entraînement du produit
4. Cyclone
5. Filtres
- 5'. Filtres
6. Sortie du produit sec

SECHEUR FLASH

Type de produit

Produit **pâteux** (sous réserve du type d'alimentation)

Produit **pulvérulent**, granulaire

Exemples d'applications

Teneur en eau	Protéines	Farine	Particules de bois	Poudre d'amidon
initiale	50 - 60 %	15 %	50 %	40 - 45 %
finale	8 %	12 %	10 %	8 - 10 %

Le séchage comprend 3 étapes :

- Alimentation du produit

Le produit à sécher est introduit à la base d'une colonne par un injecteur qui le disperse dans un courant d'air chaud.

- Entraînement du produit injecté

Le produit est transporté par le courant de gaz chauds à l'intérieur de la colonne. La surface d'échange entre le produit et le fluide chauffant est importante, ce qui permet un transfert rapide de chaleur et de masse.

- Séparation air/produit sec

En haut de la colonne, l'air et la matière sèche sont séparés par passage dans des cyclones. A la sortie des cyclones, l'air peut-être rejeté ou recyclé après filtration ou non.

Des variantes au procédé générique existent également (combinaison sécheur flash et lit fluidisé, combinaison sécheur flash et tambour rotatif).

Caractéristiques du procédé

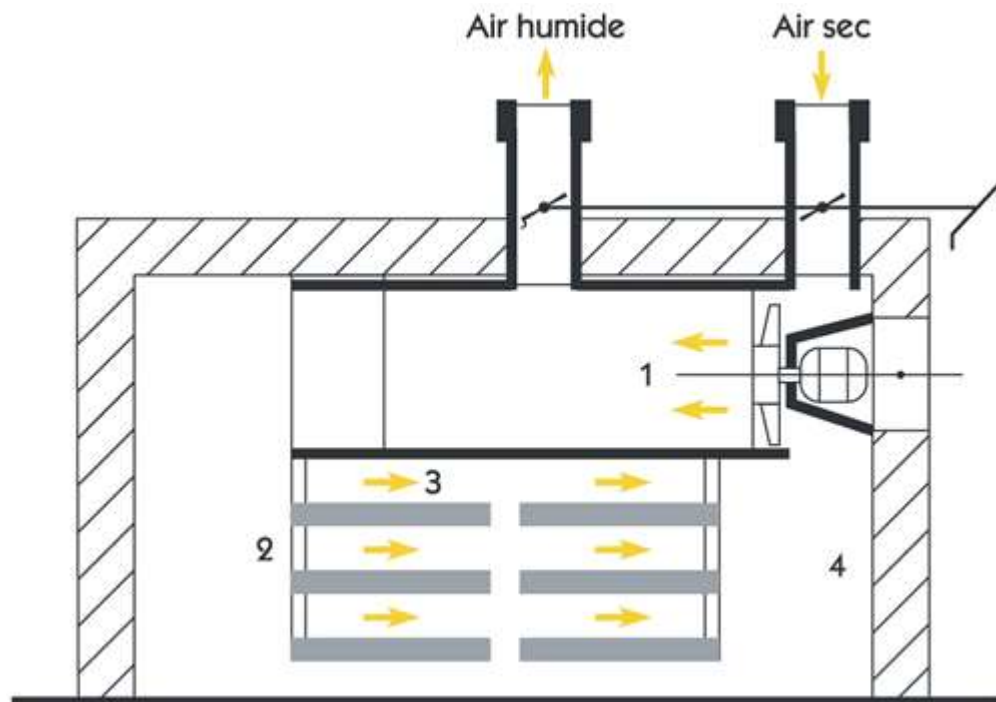
Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	temps de séjour	débit du produit	capacité de traitement horaire
15 à 30 m/s	100 à 350 °C	0,5 à 3,5 s	5 à 30 t/h	5 à 100 kg d'eau/h/m ²

Efficacité énergétique

- Il est intéressant de réchauffer l'air entrant au moyen de calories récupérées sur l'air sortant (par l'utilisation d'un fluide intermédiaire ou non).
- L'utilisation de la **VES** (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir dans un sécheur flash.
Les intérêts sont multiples :
 - une consommation énergétique réduite par rapport au léchage air chaud (0,6-0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
 - possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui-même (**CMV**) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières ...),
 - récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
 - élimination des risques de feu ou d'explosions,
 - amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme...).

2-1- Séchoirs statiques

× Etuve de séchage



Sécheur étuve à claie

- 1 Soufflage de l'air de séchage
- 2 Produit déposé sur des claies
- 3 Léchage air chaud
- 4 Aspiration de l'air humide

SECHEUR ETUVE / FOUR DE SECHAGE

Type de produit

Produit liquide
Produit pâteux
Produit pulvérulent, granulaire, fibreux
Produit plan, en forme, en morceaux

Exemples d'applications

Teneur en eau	Bois (résineux)	Boues d'hydroxydes métalliques	Carreaux de plâtre	Bobine de textile
initiale	44 %	70 %	45 %	60 %
finale	12 %	30 %	5 %	7 - 15 %

Le séchage comprend 2 étapes :

- Chargement et séchage du produit

Le produit est placé dans une enceinte close où l'apport énergétique, nécessaire au séchage, se fait par circulation d'air chaud.
Cette enceinte peut comporter une série de claies superposées sur lesquelles le solide est réparti en couches minces.

- Recyclage de l'air humide

L'air chargé d'humidité est aspiré hors de la chambre de séchage, au travers de condenseurs qui l'assèchent puis est renvoyé par un système de ventilation forcé.

Des variantes au procédé générique existent également (sècheur chariot).

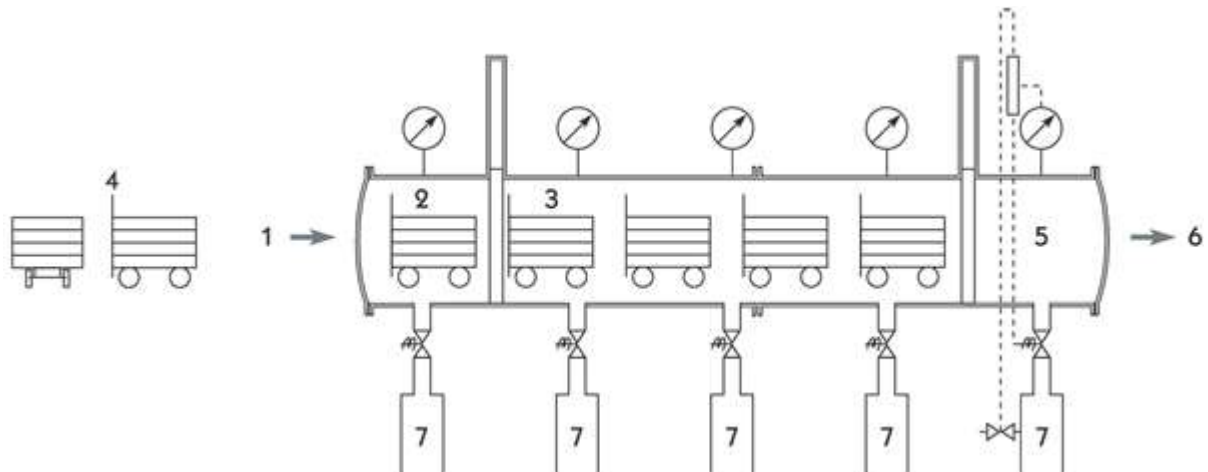
Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement	temps de séjour	débit du produit	capacité de traitement horaire
< 70 - 80 °C	très variable	très variable	très variable suivant le produit

Efficacité énergétique

- Créer une circulation d'air en circuit fermé : le fluide de séchage est déshumidifié, préchauffé puis renvoyé dans la chambre de séchage.
- Utilisation d'une Pompe à Chaleur (PAC) pour récupérer la chaleur latente contenue dans les buées issues du produit.
- De nouveaux développements s'axent sur l'utilisation des énergies radiantes telles que MO (micro ondes) et HF(hautes fréquences).
Les intérêts des MO et des HF sont multiples :
 - densité de puissance élevée et modularité ,
 - faible inertie,
 - localisation de la chauffe (amélioration du profil longitudinal de température),
 - homogénéité de température,
 - entretien facile et réduit,
 - élimination des problèmes mécaniques dus à l'absence de circulation de fluides.
- Séchage par Vapeur d'eau Surchauffée (VES) sous vide.

× Lyophilisation



lyophilisation (séchateurs à chariots)

1. Entrée du produit humide
2. Mise en dépression
3. Chariot mobile (avec surface chauffante)
4. Plaque de condensation de vapeur
5. Remise en pression
6. Sortie du produit sec
7. Chambre de condensation

LYOPHILISATION

Type de produit

Produit **liquide** (en couche de 1,5 - 3 cm)

Produit **pâteux** (sous réserve du type d'alimentation)

Produit **pulvérulent, granulaire, fibreux**

Produit **plan, en forme, en morceaux**, dimensions de produit généralement de 1 mm à 1 cm

Exemples d'applications

Teneur en eau	Champignons	Morceaux de fraises
initiale	Produit en lamelle	Produit en morceaux
finale	5%	11%

Ce procédé combine l'action du froid et du vide en provoquant la sublimation de l'eau ; celle-ci passant directement de l'état glacé à l'état vapeur sans transition par la phase liquide. Le produit est le plus souvent déposé sur des claies.

La lyophilisation est un procédé de séchage en trois temps :

- **Congélation du produit**

Le produit est congelé à basse température (-30 à -50°C). Cette étape est déterminante car elle fixera les caractéristiques cristallines du système congelé, et par là, la texture de la forme lyophilisée finale.

- **Sublimation de la glace**

Le produit congelé est ensuite introduit dans une enceinte de séchage travaillant sous vide poussé (pression absolue : 100 Pa). L'eau s'évapore alors par sublimation.

- **Désorption finale de l'eau liée**

Il s'agit d'extraire l'eau adsorbée ou emprisonnée dans les microcapillaires.

Des variantes au procédé générique existent également (séchateurs à chariots ; pulvérisation + lyophilisation).

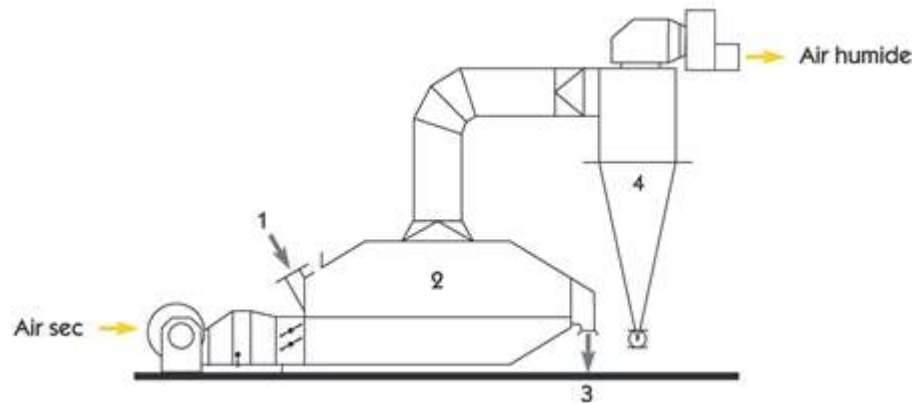
Caractéristiques du procédé

Pression de la chambre de séchage	Température du produit		Temps de séjour	Densité de chargement	Capacité de traitement horaire
	couche froide	max. de surface			
10 à 300 Pa	-10 à -40°C	30 à 90 °C	10 à 72 h	5 à 18 kg/m ²	0,1 à 0,5 kg d'eau/h/m ²

Efficacité énergétique

De nouveaux développements s'attachent à étudier l'intérêt de l'application des Micro-ondes (MO) pour ce type de séchage.

× Lit fluidisé



1. Entrée du produit humide
2. Chambre de fluidisation
3. Sortie du produit
4. Cyclone de dé poussierage

LIT FLUIDISE

Type de produit

Produit liquide (sur granules déjà formés)
Produit pâteux (sous réserve du type d'alimentation)
Produit pulvérulent, granulaire, fibreux

Exemples d'applications

Teneur en eau	colorants	levures	boues	charbon broyé	sel marin
initiale	31%	70%	65%	50%	2%
finale	7%	5%	40%	8%	0,03%

Le séchage comprend 3 étapes :

- Traitement d'air

L'air extérieur, qui va servir au séchage du produit, est filtré et chauffé.

- Fluidisation

L'air soufflé au travers d'une plaque de diffusion, permet la fluidisation du lit de particules (i.e la mise en mouvement du lit), qui offrent alors une surface de séchage plus importante.

Le lit est en mouvement de fluidisation homogène lorsque la vitesse de l'air de séchage est supérieure à la vitesse de fluidisation minimale et inférieure à la vitesse au-delà de laquelle se produit un entraînement des particules hors de la zone de process.

- Séparation du produit sec et de l'air de séchage

Des variantes au procédé générique existent également (Lit vibré, lit à échangeurs immergés, lit en fontaine).

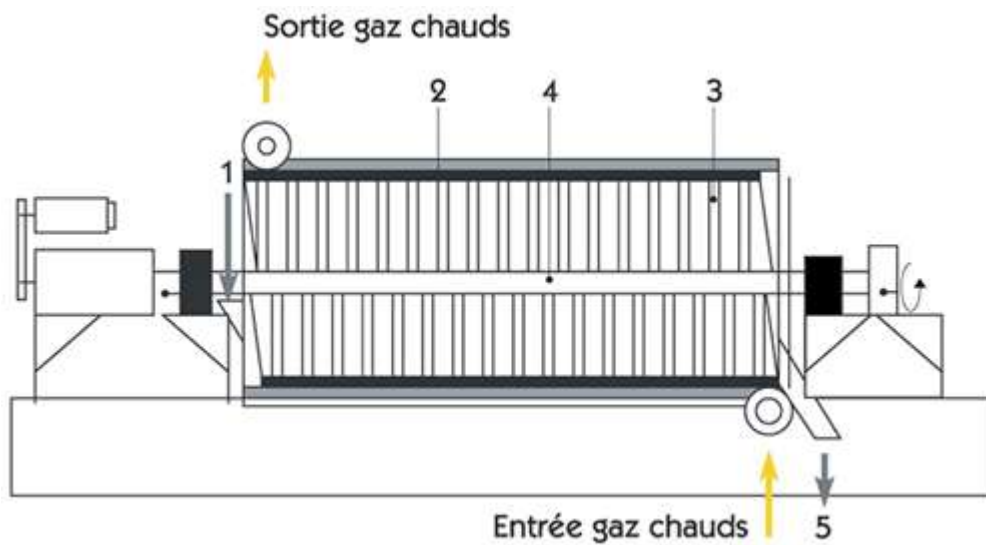
Caractéristiques du procédé

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	temps de séjour	débit du produit	capacité de traitement horaire
0,2 à 3 m/s	50 à 200°C	2 à 60 mn	5 à 50 t/h	30 à 200 kg d'eau/h/m ²

Efficacité énergétique

- Il est intéressant de réchauffer l'air entrant au moyen de calories récupérées sur l'air sortant (par l'utilisation d'un fluide intermédiaire ou non), ou d'utiliser ces dernières pour la production d'eau chaude ou le chauffage de locaux.
- L'utilisation de la **VES** (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir lors d'un séchage par lit fluidisé.
Les intérêts sont multiples :
 - une consommation énergétique réduite par rapport au léchage air chaud (0,6-0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
 - possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui-même (**CMV**) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières ...),
 - récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
 - élimination des risques de feu ou d'explosions,
 - amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme...).
- De nouveaux développements s'attachent à étudier la combinaison d'un séchage par lit fluidisé et Micro-ondes (MO).

× Sécheur à palette / vis



sécheur à palettes

- | |
|--|
| 1. Entrée du produit humide
2. Double enveloppe
3. Palette
4. Arbre creux
5. Sortie du produit sec |
|--|

SECHEUR A PALETTE / VIS

Type de produit

Etat initial	Produit pâteux
	Produit pulvérulent, granulaire (traitement de substances hautement visqueuses, collantes et incrustantes et possibilité de sécher des produits nocifs ou inflammables)
Etat final	Produit pulvérulent, granulaire de qualité uniforme

Exemples d'applications

Teneur en eau	Boues de peinture hydrosoluble	Boues de peintures organiques
initiale	70%	70 %
finale	3,2 %	2,2 %

Le sécheur à palettes est constitué d'un corps cylindre horizontal (stator) à l'intérieur duquel tourne un arbre (rotor) muni de bras, à l'extrémité desquels sont fixées des pelles.

L'ensemble bras/pelles est remplacé par des segments de disques radiaux pour le traitement de produits pâteux. Il peut y avoir un arbre à contre-pales pour assurer un nettoyage plus efficace de l'arbre principal.

L'enveloppe extérieure est chauffée par l'intermédiaire de gaz chauds ou d'un fluide thermique. L'arbre et les palettes peuvent aussi être parcourus par un fluide thermique. Le mouvement des palettes permet un brassage intensif du produit et les surfaces d'échange supplémentaires qu'elles offrent augmentent le transfert de chaleur.

Il est nécessaire de prévoir une faible ventilation (air ou gaz inerte) ou une pompe à vide pour enlever les vapeurs de séchage.

Des variantes au procédé générique existent également (sécheur vis).

Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement		Temps de séjour	Volume utile de produit entrant	Capacité de traitement horaire
vapeur	fluide thermique			
120 à 130 °C	280 à 350 °C	10 mn à 10 h	0,1 à 20 m ³	10 à 15 kg d'eau/h/m ² de surface

Afin de compléter ces informations, vous pouvez vous procurer le document suivant :
« Les procédés de séchage dans l'industrie » – 2000 – ADEME (Sur le site de l'ADEME : www.ademe.fr réf : 3186)

4- APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Les séchoirs détaillés ci-dessus sont présents dans de nombreux secteurs industriels. De très nombreuses fabrications industrielles passent en effet par une ou plusieurs étapes de séchage thermique, qui est le premier mode de transfert de matière dans les industries de procédés. On peut citer de façon non exhaustive les principaux secteurs industriels concernés :

- Industrie agro-alimentaire : céréales, lait ...
- Industrie des matériaux de construction : tuiles et briques, céramiques ...
- Industrie papetière,
- Boues résiduelles,
- Textiles et cuir,
- Chimie.

DEFINITIONS

Siccité

Taux de matière sèche contenues dans un matériau (rapport massique)

VES

Vapeur d'Eau Surchauffée.

Le fluide sécheur est la vapeur d'eau surchauffée. Au contact du produit à sécher, cette vapeur qui n'est pas saturée en eau se désurchauffe en cédant une partie de sa chaleur sensible, évaporant ainsi l'eau contenue dans le produit.

Ce procédé ne convient pas aux produits sensibles à une très grande chaleur, mais se révèle avantageux

pour ceux qui sont gorgés d'eau ou sensibles à l'oxydation. En effet, il est possible de récupérer l'énergie de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui-même (CMV) ou en dehors du séchoir. Il a en outre l'avantage de ne pas produire de gaz à effet de serre et son utilisation élimine les risques de feu et d'explosions.

CMV

Compression Mécanique de Vapeur : système basé sur la recompression totale des buées produites avant d'être réutilisées sur l'échangeur de chaleur. Cette recompression est assurée par un moteur électrique.

Pompe à chaleur

Système travaillant à très basse température utilisant l'ammoniaque ou un fréon comme fluide thermique. Celui-ci se condense dans l'échangeur; puis liquide, il est détendu et vaporisé en assurant la condensation des buées produites dans l'évaporateur. Il est ensuite recomprimé pour être à nouveau utilisé sur l'échangeur.