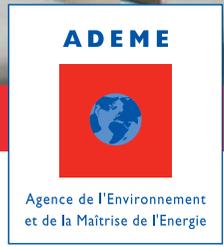




LES PROCÉDÉS DE SÉCHAGE DANS L'INDUSTRIE



Introduction

Le séchage est une des opérations unitaires les plus communes dans l'industrie, tout secteur confondu. Il apparaît sous de multiples techniques, en fonction de la diversité des produits traités.

Que ce soit pour obtenir la bonne tenue d'une couche de peinture, pour assurer la conservation sur de longues périodes d'un amas de grain de maïs ou pour conférer sa stabilité mécanique à un carreau de plâtre, une étape de séchage est non seulement nécessaire à la fabrication du produit, mais conditionne également sa qualité finale.

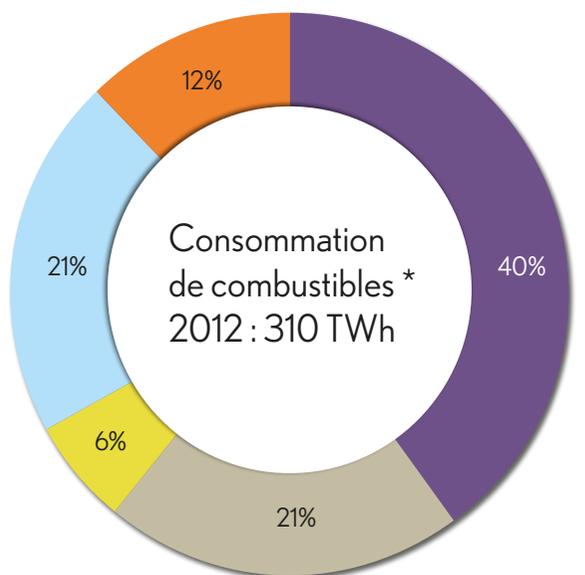
Devant la diversité des produits à sécher et des procédés industriels, avec chacun leurs contraintes spécifiques, une multiplicité de techniques industrielles de séchage a été développée. Pour ne citer que quelques exemples frappants, les séchoirs à lits fluidisés permettent d'améliorer l'efficacité du séchage des produits divisés, alors que le papier en feuille est généralement séché sur des cylindres chauffants et que la poudre de lait est obtenue par atomisation.

La productivité du séchage est faible. Cette étape constitue fréquemment un véritable goulot d'étranglement pour toute la ligne de production. Cette limitation de la productivité, alliée à l'incidence déterminante sur la qualité du produit fini, fait que les efforts de recherche et développement consentis par les industriels ont été et sont encore substantiels.

Le procédé de séchage a la particularité d'être l'un des plus forts consommateurs d'énergie, car il s'effectue dans la majorité des cas par voie thermique.

En 2014, en France, la consommation énergétique liée au séchage dans l'industrie représentait 65 TWh (5590 ktep)*, soit 21 % de la consommation totale industrielle.

*Source : Les chiffres clés 2015 climat, air et énergie, ADEME



* Hors cokeries intégrées

** Chauffage de liquides et de gaz, distillation...

Répartition des consommations par usage dans l'industrie, en France métropolitaine

Opération commune et transversale à tous les secteurs industriels, le séchage mérite donc un intérêt certain étant donné sa forte consommation énergétique et sa faiblesse de productivité. C'est la raison d'être de ce guide.

Destiné aux industriels, il a été conçu comme un outil de sensibilisation sur les procédés de séchage afin de répondre aux objectifs suivants :

- informer l'industriel des paramètres de choix pour un procédé de séchage ;
- faciliter la présélection de solutions techniques en fonction des problématiques industrielles, en particulier le type de produit à sécher ;
- présenter des technologies de séchage performantes économiquement, à la fois grâce à une productivité améliorée et à des consommations énergétiques optimisées.

Au niveau européen, les activités de séchage de certains secteurs (industries papetières, agroalimentaires et laitières, céramiques, etc.) sont répertoriées par des BREF (Best available techniques REFerence documents) qui référencent les meilleures techniques disponibles (MTD). En complément des BREF, ce guide illustre les pistes d'optimisation énergétique d'un procédé de séchage.

Une utilisation simple

Comment utiliser ce guide ?

La porte d'entrée principale de ce guide est le produit à sécher : la description fine du produit permettra au lecteur de cerner les contraintes et les spécificités industrielles qui devront être intégrées lors de la présélection des techniques applicables au séchage de ce produit.

Ce guide peut être utilisé de deux façons différentes.

1. Rechercher une solution adaptée à un besoin de séchage

La présélection des solutions techniques se fera en deux temps :

- le repérage du type de produit à sécher, la caractérisation du produit à l'état initial et final, puis l'analyse des principales caractéristiques produit/procédé. La consultation d'une **grille d'analyse** permettra ainsi de faire un premier choix des technologies envisageables avec le produit ;
- la lecture des **fiches techniques** qui permettra d'affiner cette présélection et de préparer les discussions avec les fabricants et centres de recherche.

2. Améliorer les performances d'une opération de séchage déjà en place

Dans ce cas, le procédé de séchage est connu et la fiche technique spécifique à cette opération unitaire est à consulter directement. Ensuite, le lecteur se

reportera à la section répertoriant les bonnes pratiques énergétiques et les témoignages qui le guideront dans sa démarche d'optimisation.

Les grilles d'analyse et les fiches techniques disposent respectivement d'une structure type, brièvement décrites ci-dessous afin de faciliter leur lecture et leur utilisation.

Ce guide est résolument orienté vers les techniques de séchage par voie thermique. Il existe cependant un certain nombre d'autres solutions permettant l'élimination de tout ou partie de l'eau dans des produits. Afin d'informer le lecteur sur ces possibilités, une partie de cet ouvrage est consacrée au traitement par voie mécanique en tant que moyen de pré-séchage par voie thermique.

Le contenu du guide

Le guide est composé de cinq parties distinctes.

1. L'aide à la sélection d'un procédé de séchage

La sélection d'un procédé de séchage s'avère souvent une tâche difficile, étant donné la multitude de fournisseurs et de technologies proposées par ces derniers. Ce chapitre vient en introduction aux grilles d'analyses et aux fiches techniques qui sont présentées dans ce guide, pour informer le lecteur sur les bonnes questions à se poser respectivement sur le produit, le procédé et le site d'implantation de la technologie de séchage.

2. Des grilles d'analyse pour le repérage de solutions techniques

GRILLE D'AIDE À LA SÉLECTION D'UN PROCÉDÉ DE SÉCHAGE

Type de produits / Technologies	Produits liquides (solutions aqueuses, lait, etc.)	Produits pâteux (saurs d'épuration, peinture concentrée, pâtes alimentaires...)	Produits pulvérulents et granulaires (farine, poudre pharmaceutique, pigments, sable, verre...)	Produits fibreux (laine, coton, sucre de lait...)	Produits plats (pâtisseries, biscuits, etc.)	Produits en bande (papier, films plastiques, feuille en bande...)	Solides en formes ou en masses (objets moulés en 3D, coque...)
Pré-séchage mécanique Méthode: centrifugation, tamisage, etc.						Pré-séchage par séchage par voie mécanique	
Evapo-concentration Méthode: évaporation, distillation, etc.							
Pré-séchage Méthode: centrifugation, tamisage, etc.		Pré-séchage par voie mécanique					
Sécheur bande Méthode: séchage par voie thermique							
Cylindre chauffant Méthode: séchage par voie thermique							
Sécheur écoule / Floir de séchage Méthode: séchage par voie thermique		Pré-séchage par voie mécanique	Pré-séchage par voie thermique				
Sécheur flash Méthode: séchage par voie thermique							

■ TECHNOLOGIE APPLICABLE
■ TECHNOLOGIE APPLICABLE SANS CONDITION

Un tableau croisé technologies/produits permet un repérage aisé des technologies utilisées ou applicables selon le produit à sécher. Afin d'aller plus loin, pour chaque type de produit, une grille d'analyse permet de sélectionner les différentes technologies de séchage envisageables à partir :

- des caractéristiques du produit à l'état initial et final (teneur en eau, forme, taille...);
- des caractéristiques produit/procédé (fragilité et thermosensibilité du produit, délai de séchage, volume à sécher...).

Pour exploiter efficacement ces grilles, l'ensemble de ces caractéristiques devra être connu, ce qui permettra de retenir une ou plusieurs technologie(s) de séchage adaptée(s) à la problématique d'un industriel.

Une utilisation simple

PRODUIT MIS EN FORME OU EN MORCEAUX					
Grilles d'analyse	Pré-séchage mécanique	Sécheur étuvé/ four de séchage	Lyophilisation	Sécheur tunnel	Sécheur par pertes différentielles
PARAMÈTRE DU PROCÉDÉ					
Température limite acceptée	< 50°C (traitement à l'ambiance)	200°C	50°C +100°C	250°C	
Durée de séchage	Quelques minutes	Quelques heures	10 à 72h	Quelques minutes à quelques heures	Quelques minutes à quelques heures
Capacité	Variable	Variable	Dépend du chargement (à 20 kg/m ³)	Variable	De kg à la tonne par lit
Fonctionnement	Continu	Discontinu	Discontinu	Continu	Discontinu ou continu
PRODUIT INITIAL					
Spécifications sur type de produit initial	Non pulvérisé	Le produit doit être placé de manière uniforme sur les plateaux	Le produit doit être placé de manière uniforme sur les plateaux		Sensibilité différentielle
Fragilité	Doit pouvoir résister à la pression du soufflage		Les morceaux doivent rester intacts après traitement		Sensibilité des cinétiques au séchage (MO) risque de rayures
Thermosensibilité		200°C	1 ^{er} traitement de séchage du produit: 30 à 90°C	30 à 250°C	Produit thermosensible accepté
Teneur en eau	Fortes teneurs en eau > 50%				
Forme					Épaisseur et volume à adapter en fonction de la vitesse de fluide (optimisation des codes)
Taille	Variable	1 mm à plusieurs cm		De quelques mm à plusieurs cm	Contraintes d'homogénéité du produit
PRODUIT FINAL					
Spécifications sur type de produit final		Conservation de la couleur, des arômes et des vitamines			Effet de post-réhydratation
Forme		Conservation de la forme			

3. Des fiches techniques pour la pré-sélection des technologies

Les fiches traitent des aspects techniques et énergétiques des applications existantes et potentielles, et sont détaillées ci-après.

Principe du procédé

Ce paragraphe contient un ou plusieurs schémas d'ensemble, la description du procédé et les variantes possibles de la technologie par rapport au procédé générique.

Caractéristiques du procédé

Cette partie précise en particulier le type de produit sur lequel s'applique le procédé, les actions mécaniques éventuelles sur le produit, son mode de déplacement, la température de fonctionnement, le temps de séjour, le débit de produit, la capacité de traitement... Les caractéristiques généralement décrites

sont la mise en œuvre de pré-traitement, de post-traitement ou d'autres équipements particuliers optionnels, ainsi que les méthodes pour améliorer l'efficacité énergétique et la sécurité du procédé.

LIT FLUIDISÉ

Principes du procédé

Un sécheur à lit fluidisé comprend 3 étapes distinctes :

- 1. Traitement de l'air**
L'air extérieur, qui va servir au séchage du produit, est filtré et chauffé.
- 2. Fluidisation**
L'air, soufflé au travers d'une plaque de diffusion, permet la fluidisation du lit de particules (c'est la mise en mouvement du lit), qui offrent alors une surface de
- 3. Séparation du produit sec et de l'air de séchage**
Le produit et l'air de séchage sont séparés dans le cyclone de dépoussiérage.

Exemple de sécheur par lit fluidisé - © GEA, GEA dryer

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

Mode de transfert de la chaleur

Les différents modes de transfert de chaleur applicables à la technologie décrite sont donnés. Il est précisé si leur utilisation est « courante » ou « peu courante ou en développement ».

Ces modes de transfert sont les suivants :

- la convection, avec air chaud ou vapeur d'eau surchauffée (VES). Avec air chaud, il est précisé le sens relatif d'écoulement entre l'air et le produit - léchage air chaud (courant parallèle), traversée air chaud (courant croisé) ou percussion air chaud ;
- la conduction ;

- le rayonnement infrarouge (IR), hautes fréquences (HF) ou micro-ondes (MO).

LIT FLUIDISÉ

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

- Léchage air chaud (courant parallèle)

L'air soufflé, au travers d'une plaque de diffusion dans la majorité des cas, arrive perpendiculairement au produit et le traverse, ce qui a pour effet de multiplier la surface d'échange et d'assurer le brassage du mélange particules-fluide.

La circulation de fluide se fait à co-courant, en dehors du cas particulier du lit fountain.

Utilisation peu courante ou en développement

- Vapeur d'eau surchauffée (VES)

L'utilisation de la VES, en remplacement de l'air chaud, peut potentiellement convenir lors d'un séchage par lit fluidisé.

Intérêts

- Économie d'énergie (0,6 - 0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique) ;
- Possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit au niveau du sécheur ou même (CIV) ou en dehors du sécheur (turbo-alternateur, chaudières...);
- Récupération de solvants volatils et/ou des mauvais odeurs ;
- Élimination des risques de feu et d'explosion ;
- Amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme, stabilité, stérilisation, digestibilité, absence de durcissement superficiel pour les produits visqueux ou collants...).

Contraintes

- Difficulté à traiter certains produits thermosensibles ;
- Coût plus élevé de l'équipement (nécessité d'être conforme aux règles de sécurité pour les systèmes HF, dispositifs d'entrée et de sortie du produit étanches à la vapeur).

Produit homogène et non collant

Nouveaux développements

Pré-traitement du produit

- Mélange de particules fines et de grosse taille dans le produit initial

Innovation

- Produit

Intérêts

- Réduction de l'agglomération des fines particules ayant un taux d'humidité initial élevé ;
- Réduction des chocs entre les grosses particules (vitesse de gaz inférieure à la vitesse de fluidisation minimale pour certaines grosses particules).

Application des Micro Ondes (MO)

- Comparaison des cinétiques de séchage du produit lors d'un séchage par lit fluidisé et par lit fluidisé + MO

Innovation

- Combinaison de 2 modes de transfert.

Intérêts

- Réduction du temps de séchage du produit en lit fluidisé + MO, surtout à basse température de l'air (= 40°C...).

Exemples d'applications et de produits traités

Afin de faciliter le travail de repérage du lecteur, ce paragraphe est structuré par type de produit traité. On précise, pour chaque application, quelques caractéristiques du procédé de séchage - teneur en eau finale (en base humide), température du fluide de séchage, débit de produit, temps de séjour du produit, consommation d'énergie (indicateur de performance énergétique lorsqu'elle est exprimée par kg de produit, consommation spécifique lorsqu'elle est exprimée par kg d'eau) - ainsi que ses intérêts et ses contraintes.

Nouveaux développements

Les développements en cours sont présentés en précisant le lieu d'innovation (le mode de transfert, le produit, ou la technologie), les intérêts et les contraintes de ces nouveaux développements.

Ils sont le reflet de l'actualité des travaux de recherche universitaires, et de prestations d'études publiques menées au sein d'organismes travaillant sur le séchage, pour des filières industrielles (produits alimentaires, céréales, bois, etc).

Les procédés de séchage peu employés dans le domaine industriel (par exemple, friture, déshydratation osmotique, etc) sont volontairement exclus du champ de ce guide.

4. Les bonnes pratiques énergétiques et les retours d'expérience

Bonnes pratiques énergétiques

Bonnes pratiques énergétiques

BONNES PRATIQUES ÉNERGÉTIQUES

Agir sur le pilotage en optimisant les consignes et la régulation

	FACILITÉ	TRI	COÛT
Instaurer un système de régulation performant, par exemple à base de commande prédictive (technique qui permet d'anticiper le futur comportement du procédé). Le réglage d'un séchoir de ce type nécessite l'intervention d'experts (température, humidité) et d'un système qui permet une régulation beaucoup plus fine du processus de séchage.	***	+/-	€€
Augmenter la température de l'air en entrée de séchoir jusqu'à la limite acceptable pour le produit.	*	+	€
Mettre en place de la variation de vitesse sur les moteurs des extracteurs, si pertinente par rapport au fonctionnement de l'installation elle-même dans le cas d'un produit à humidité variable.	**	+/-	€€
Optimiser l'allocation du séchoir pour limiter la fréquence des phases de démarrage et d'arrêt, qui sont des phases énergivores et souvent non productives.	*	+	€
Si le séchage utilise de l'air comprimé, isoler la poche de séchage du reste du réseau d'air comprimé et vérifier la pression réellement nécessaire.	**	+/-	€€

Agir sur la diminution des pertes thermiques du séchoir

	FACILITÉ	TRI	COÛT
Isoler un pré-séchoir ou passer les produits. Il récupère l'air en sortie de séchoir, qui peut avoir des températures supérieures à 100°C et donc être valorisé relativement facilement.	**	+/-	€€
Instaurer des réseaux d'air chaud ou réseau de sur-chauffage pour les installations de type à flux transversal, tunnel. Sur le même principe, installer des bannes en sortie haute des sas, elles adaptent la section des sas au gabarit des pièces traitées pour limiter les pertes thermiques par les sas.	**	+	€
Récupérer une fraction de l'air sortant pour le mélanger à l'air frais avant chauffage, afin de diminuer la puissance de chauffage nécessaire.	**	+/-	€€
Récupérer la chaleur - préchauffer l'air entrant avec l'air sortant en utilisant une tour de lavage rotatoire si cette dernière est nécessaire pour d'autres raisons.	***	+/-	€€
Récupérer la chaleur - préchauffer l'air entrant avec l'air sortant en utilisant un échangeur aérien. Gains énergétiques attendus de quelques % sur la consommation du procédé.	**	-	€€€

98 Les procédés de séchage dans l'industrie - ADEME • CETIAT

Cette partie présente des pistes d'améliorations en efficacité énergétique.

Les bonnes pratiques sont évaluées de façon qualitative, en termes de facilité de mise en œuvre, de coût et de temps de retour sur investissement. Ces infor-

mations sont spécifiques selon les installations et leurs conditions de fonctionnement (exigences produit, temps de fonctionnement annuel, etc.).

Retours d'expérience

Pré-séchage mécanique par soufflage d'air, en amont d'un séchoir thermique d'une ligne de peinture

APPLICATION
 Secteur industriel : industrie mécanique.
 Technologie : séchoir tunnel.
 Produits : produits en forme (pièces en métal/laiton).
 Innovation : pré-séchage mécanique par soufflage d'air.
 Bureau d'études : AMC.

Contexte & enjeux
 La société Ateliers Michaud Coating (AMC groupe Coratex) est une PME spécialisée dans la réalisation pour ses clients de chaînes complètes de traitement de surface et de peinture. Cette dernière est composée, entre autres, d'un tunnel de traitement de surface pour dégraisser les pièces et d'un tunnel de séchage pour les pièces avant application de la peinture.
 Les consommations d'énergie de ces équipements sont importantes. C'est dans ce contexte que la société AMC a accompagné son client, du secteur de l'industrie mécanique, à optimiser l'installation de séchage et en particulier l'étape amont de pré-séchage mécanique des pièces.

Présentation de la démarche
 L'évacuation de l'humidité des pièces dans le tunnel de séchage est assurée par convection forcée par air chaud (chauffage par brûleur gaz).
 Ce système permet un gain énergétique important grâce à l'utilisation d'un ventilateur pour le soufflage d'air à la place d'un compresseur d'air comprimé. Du fait de ce procédé, le séchage de certaines pièces est plus efficace.

TÉMOIGNAGE
 Anthony Lassalle
 Responsable bureau d'études AMC

Bilan de l'opération

- Gain énergétique
 - 386 MWh électrique/an
 - 8,7 tonnes équivalent CO₂ évitées
- Gain financier
 - 27 k€ / an
 - Investissement : 12,8 k€
 - Temps de retour sur investissement : Immédiat

L'AVIS DE L'EXPERT
 Avant de récupérer la chaleur latente, pensez à optimiser les performances de votre installation de séchage !
 Des économies d'énergie sont parfois simples et souvent peu coûteuses à mettre en œuvre, comme le pré-séchage mécanique par air soufflé en remplacement de l'air comprimé, qui est nettement plus coûteux à produire que l'air soufflé.

91 Les procédés de séchage dans l'industrie - ADEME • CETIAT

Les bonnes pratiques énergétiques sont illustrées par des exemples de réalisations industrielles, permettant de valoriser des actions d'optimisation mises en œuvre sur le terrain (techniques émergentes et/ou matures).

5. Des annexes techniques

Elles apportent un complément d'information en donnant quelques bases techniques pour mieux appréhender le procédé de séchage : définitions des paramètres clés lors d'un séchage, principe du diagramme de l'air humide, bilan énergétique d'un séchoir, etc.

Annexes

Les bases : porosité et humidité d'un produit

La porosité d'un matériau
 Normes ses caractéristiques physiques, chaque produit est également caractérisé par une structure interne composée des pores et des réseaux de canaux poreux. Ce sont dans ces zones de porosité qu'est piégée l'humidité.
 Le séchage nécessite donc d'éliminer l'eau en surface et de retirer l'eau présente dans les pores et réseaux poreux, en quantité maîtrisée pour obtenir la qualité du produit final souhaité.

Caractérisation de la porosité d'un produit
 La porosité volumique ϵ , rapport entre le volume des pores et le volume apparent du produit, est un paramètre pertinent à l'échelle du processus de séchage (porosité variable dans le produit) ou du produit (porosité moyenne).
 $\epsilon = \text{Volume de pores} / \text{Volume apparent du produit}$

Volume de contrôle microscopique

Le solvant eau dans un produit humide
 L'eau se présente dans le matériau sous 3 formes :
 • eau libre (eau capillaire),
 • eau liée (eau adsorbée),
 • eau de constitution.
 Il s'agit de l'eau superficielle qui est facilement liée au produit.

L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou retrait et donc une modification de la structure poreuse qui influera sur les caractéristiques physiques des produits, mais également sur les caractéristiques de séchage, par un ralentissement et même un blocage des transferts thermiques (croûtage, bouchage).
 Ainsi, il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours du séchage, pour anticiper les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver sans encombre au bout de l'opération tout en ayant gardé ses qualités.

La solide présente un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air humide à saturation. 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.

Elle remplit la majeure partie des vides de la structure, elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire.
 La quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu (ϵ).
 • Eau liée (eau adsorbée)
 C'est l'eau adsorbée dans les parois des structures, grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants, et plus particulièrement grâce aux forces de Van Der Waals.
 Cette eau est plus difficile à extraire que la précédente car les forces de liaisons sont plus importantes. Cette eau est plutôt concernée par la fin du séchage. On est alors dans le domaine hygroscopique.
 • Eau chimiquement liée ou de constitution
 C'est une eau de constitution ou de cristallisation. Elle fait partie de la structure du solide, et n'est pas concernée par l'opération de séchage. Cette eau ne peut être modifiée que par la cuisson, qui intervient à des températures beaucoup plus élevées. Cependant, lors des opérations de séchage, il faudra veiller à ne pas endommager les matériaux (ex : cas des angles, du kaolin, du bois...)
 L'humidité d'un produit est la somme des trois types d'eau présentes dans ce dernier.
 Lorsqu'on réalise un séchage, on diminue progressivement l'humidité dans le produit à commencer par l'eau libre suivie de l'eau liée.

104 Les procédés de séchage dans l'industrie - ADEME • CETIAT



S o m m a i r e

Aide à la sélection d'un procédé de séchage

Préambule : définition des paramètres clés	8	Intégration énergétique et performance environnementale	10
Pré-sélection de la technologie de séchage	9	Grille d'aide à la sélection d'un procédé de séchage	12
Intégration de la technologie de séchage sur le site industriel	9		

Grilles d'analyse

Produit mis en forme ou en morceaux	14	Produit plan	17
Produit liquide	15	Produit pâteux	18
Produit fibreux	16	Produit pulvérent et granulaire	20

Fiches techniques

Pré-séchage mécanique	22	Lit fluidisé	52
Évapo-concentration	26	Lyophilisation	58
Atomisation	30	Sécheur à palette/vis	62
Sécheur Bande	34	Sécheur silo	65
Cylindre chauffant	39	Tambour rotatif	69
Sécheur étuve / Four de séchage	43	Sécheur tunnel	74
Sécheur Flash	48	Séchoir par pertes diélectriques (HF ou MO)	82

Bonnes pratiques énergétiques

Agir sur le pré-séchage	87	Agir sur la maintenance	89
Agir sur la performance des équipements	87	Agir sur les installations périphériques du séchoir	89
Agir sur le pilotage en optimisant les consignes et la régulation	88	Agir sur le suivi énergétique de l'installation	90
Agir sur la diminution des pertes thermiques du séchoir	88		

Retours d'expérience

Pré-séchage mécanique par soufflage d'air, en amont d'un séchoir thermique	91	Récupération de chaleur sur sécheur par valorisation de l'air de refroidissement	96
Récupération de chaleur sur séchoir par échangeur cyclonique	92	Intégration énergétique du séchage dans le procédé industriel	98
Récupération directe de chaleur fatale sur l'extraction d'un séchoir	94		

Annexes

Sigles / Typologies de produit	100	Les bases : le diagramme de l'air humide	104
Glossaire	101	Les bases : bilan énergétique d'un séchoir	106
Les bases : porosité et humidité d'un produit	102		

AIDE À LA SÉLECTION D'UN PROCÉDÉ DE SÉCHAGE

Le choix d'un procédé de séchage s'avère souvent une tâche difficile étant donné la multitude de fournisseurs et de technologies proposées par ces derniers. De plus, vous trouverez probablement plus d'un type d'appareil permettant de sécher un produit donné.

Alors, comment s'y retrouver sans risquer de faire le mauvais choix ?

La mise en place d'une méthodologie est nécessaire afin de s'assurer que tous les paramètres de votre cahier des charges seront pris en compte. Pour cela, vous devrez rassembler un certain nombre d'informations relatives au produit, au procédé et au site d'implantation. La majorité des fabricants que vous contacterez commenceront par vous questionner sur ces points et le mieux est de savoir anticiper ces questions.

1. Préambule : définition des paramètres clés

Séchage par entraînement ou par ébullition ?

Le plus souvent, on utilise de l'air chaud ou bien les fumées de combustion comme fluide de séchage apportant la chaleur et évacuant l'humidité. On parle ainsi d'un séchage par entraînement dans lequel l'eau se diffuse sous l'effet d'un potentiel de pression du produit vers l'air.

On peut également utiliser de la vapeur d'eau surchauffée comme fluide de séchage. Dans ce cas, le produit est environné d'une atmosphère de vapeur d'eau pure et le transfert de l'eau sortant du produit s'effectue par un simple écoulement sans résistance. On parle ainsi d'un séchage par ébullition.

Le séchage par ébullition présente beaucoup d'intérêts économiques (rendement énergétique

élevé) et environnementaux (récupération des vapeurs et odeurs). Le séchage en vapeur d'eau assure également une sécurité vis-à-vis des incendies.

Malgré ces avantages, cette technique n'occupe qu'une petite place dans l'industrie et n'est adaptée que pour une gamme limitée de produits (se présentant principalement sous une forme plane), tels que la pulpe de betterave ou de papier, le bois, les boues et certains combustibles. Les difficultés rencontrées lors de l'utilisation de la vapeur d'eau surchauffée sont d'ordre technologique, comme la manutention du produit dans le séchoir (problèmes d'encrassement), l'alimentation et la récupération du produit, l'infiltration de l'air et le risque d'oxydation lors de la condensation de la vapeur d'eau sur les parois du séchoir. Dans le cas d'un fonctionnement à pression atmosphérique, la température à 100 °C dans le séchoir peut altérer la qualité du produit et le séchage par vapeur d'eau peut modifier les caractéristiques du produit (augmentation de la porosité par exemple).

Les mécanismes de séchage par entraînement et par ébullition sont fondamentalement différents, cependant dans les deux cas, c'est la pression de vapeur issue du produit qui détermine les échanges de matière entre le produit et l'atmosphère qui l'entoure.

En raison de la diversité des produits à sécher en termes de manutention mécanique et d'exigences particulières de qualité, la conception des équipements de séchage par entraînement est diverse. Les frais d'investissement et de fonctionnement constituent un facteur important lors de la conception, d'autant plus pour les produits saisonniers comme les fruits, les légumes et les fourrages.

Conception et dimensionnement du séchoir

La conception de séchoirs industriels est principalement basée sur des expériences pratiques (connaissances empiriques), puisque la manipulation et la transformation des produits solides, granulaires ou bien liquides ne peuvent pas être correctement et facilement présentées par des modèles physiques. Il est essentiel de caractériser les propriétés thermo-physiques des matériaux. Les propriétés thermodynamiques, d'équilibre (isotherme) et de transferts thermiques et massiques sont très importantes pour la caractérisation des conditions de séchage, alors que les propriétés mécaniques sont essentielles pour spécifier la manutention des produits solides ou granulaires.

D'autres propriétés comme les cinétiques de séchage (perte d'eau) sont utiles pour une estimation initiale du temps de séchage.

Généralement, les temps de séchage estimés sont pris en compte comme étant des temps de séjours approximatifs et considérés comme des paramètres clés dans la conception, particulièrement pour l'estimation de la taille du séchoir.

AIDE À LA SÉLECTION D'UN PROCÉDÉ DE SÉCHAGE

2. Pré-sélection de la technologie de séchage

C'est le cœur de votre procédé et toute la réflexion doit tourner autour de ce point central. Il est donc essentiel de bien connaître les caractéristiques du produit à sécher car elles définiront la technologie du sécheur et les paramètres de fonctionnement de l'installation.

Les spécifications d'un séchoir industriel doivent inclure les propriétés de la matière humide et sèche, la sensibilité des matériaux à la température, l'activité de l'eau du produit, la capacité évaporatoire (kg/h), la consommation énergétique, le coût d'investissement et de fonctionnement, ainsi que l'impact environnemental.

Sur le produit initial :

- nature du produit à sécher - formule chimique, composants, dimensions générales, allure ;
- nature du ou des solvant(s) à évaporer ;
- taille - distribution granulométrique si c'est une poudre, forme si c'est un solide ;
- viscosité - si c'est un liquide ;
- type d'humidité dans le produit - eau libre, eau liée. Un diagramme d'absorption/désorption est un plus ;
- produit thermosensible - température minimale et température maximale acceptables en cours de process ;
- coulabilité (poudre) ou viscosité (liquide) ;
- toxicité du produit humide.

Sur le produit final :

- humidité résiduelle du produit sec ;
- état initial / état final. Le produit doit-il être mis

en forme après séchage ?

- hygroscopicité du produit sec. L'atmosphère doit-elle être confinée pour éviter une reprise d'humidité ?
- toxicité du produit sec.

3. Intégration de la technologie de séchage sur le site industriel

L'environnement de la technologie de séchage est important. Nous présentons ci-après les principaux paramètres à prendre en compte autour de la technologie de séchage. Ces paramètres peuvent être environnementaux, énergétiques, ou toucher à la qualité du produit.

Ceci va vous permettre d'affiner le cahier des charges de la solution de séchage en intégrant les contraintes de l'utilisateur et du site de production, et faciliter ainsi les échanges avec un fournisseur d'équipement.

Les principaux paramètres sont :

- quantité horaire à traiter / cadences ;
- les étapes amont/aval sont-elles en continu ou discontinu ? Qu'est-il envisagé pour le séchage ? L'étape de séchage est souvent un goulet d'étranglement pour la chaîne de production. Ce choix est donc très important ;
- dimensions au sol et hauteur disponible pour l'équipement ;
- utilités disponibles sur site - eau, électricité, puissance de chauffage, de refroidissement ;
- types d'utilités - vapeur d'eau, eau glycolée...
- prise en compte de zones ATEX ? Si oui, la zone d'implantation est-elle déjà ATEX ?
- risque d'explosivité - solvant et poussière.

Comment est nettoyé l'appareil ? Quelles sont les contraintes liées à ce nettoyage ?

- risque d'abrasion et/ou de corrosion de l'appareil à cause des solvants ou du produit ?
- matériaux à utiliser en contact produit - types de métaux, matières des joints, des garnitures ;
- manutention du produit en début ou en fin de procédé. Par exemple, si le produit doit être manipulé par un opérateur en fin de traitement, une étape de refroidissement est peut-être nécessaire après le séchage.

Dans le cas d'une nouvelle installation, des essais de faisabilité seront nécessaires pour dimensionner l'installation de séchage, avant une mise en service sur un site industriel. Dans le cas d'une installation existante, les équipements peuvent être modifiés pour répondre à de nouvelles contraintes environnementales ou énergétiques, ou de nouvelles conditions opératoires (par exemple, l'augmentation de la cadence de production).

AIDE À LA SÉLECTION D'UN PROCÉDÉ DE SÉCHAGE

4. Intégration énergétique et performance environnementale

La consommation d'énergie d'un séchoir est à prendre en compte dès la conception de l'installation, de manière à minimiser la facture d'énergie de l'installation dans le temps. Dans le cas d'une installation existante, une étude d'optimisation énergétique va permettre de faire un bilan des consommations d'énergie et d'identifier des pistes d'améliorations possibles.

L'efficacité énergétique est généralement chiffrée par le ratio de la consommation énergétique nécessaire pour l'évaporation de l'eau du produit par rapport à l'énergie totale fournie au séchoir (exprimé en kWh/kg d'eau évaporée). Cet indicateur dépend de plusieurs facteurs, notamment la capacité de production, le niveau de température, la qualité de l'échange thermique entre le produit et le gaz de séchage, les possibilités d'intégration énergétique de l'équipement en question par rapport à l'ensemble du procédé (possibilité de couplage, recyclage, etc.).

Lorsque la capacité de production est importante, il est préférable de choisir un fonctionnement en continu qui coûte beaucoup moins cher qu'un équipement en batch.

La consommation énergétique d'un séchoir peut être divisée par deux si l'on installe un système de recyclage des gaz de sortie, et par trois si le fonctionnement est sous vide.

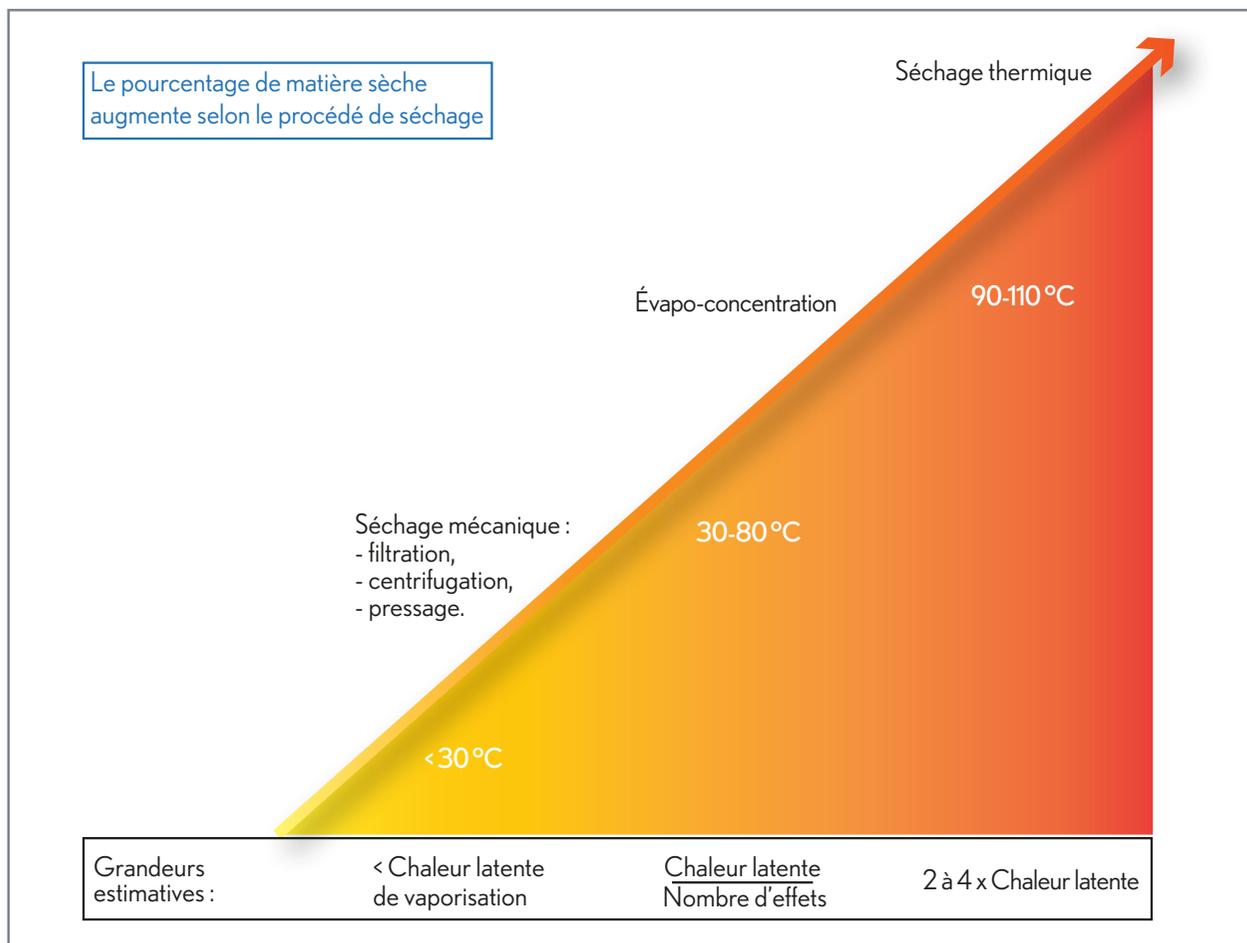
Par ailleurs, la performance environnementale d'un séchoir est à prendre en compte dès la conception de l'installation :

- réduction des rejets gazeux et traitement des polluants (COV, HAP, poussières) ;
- traitement des rejets liquides en station d'épuration ;

- réduction des émissions de gaz à effet de serre (CO₂)...

Le chapitre sur les bonnes pratiques énergétiques du guide présente de façon plus précise les actions possibles pour intégrer l'efficacité énergétique et l'impact environnemental d'un procédé de séchage.

Séchage et consommation d'énergie





Exemples de sècheurs - © GEA, ELMETHERM, COMESSA

GRILLE D'AIDE À LA SÉLECTION D'UN PROCÉDÉ DE SÉCHAGE

Cliquez sur les items dans Technologies et Produits pour accéder aux fiches techniques et au glossaire

Aide à la sélection d'un procédé de séchage

TYPES DE PRODUITS TECHNOLOGIES DE SÉCHAGE	Produits liquides (solutions aqueuses, lait, jus...)	Produits pâteux (boues d'épuration, peinture concentrée, gâteaux humides...)	Produits pulvérulents et granulaires (lactose, poudres pharmaceutiques, pigments, sable, sucre...)	Produits fibreux (laine, coton, sciure de bois...)	Produits plans (panneaux d'isolants, bois...)	Produits en bande (papier, films plastiques, textile en bande...)	Solides mis en forme ou en morceaux (objets moulés ou 3D, céramiques...)
Pré-séchage mécanique Mode continu ou discontinu - temps séjour : min ou h					Risque de dégradation physique du produit		
Évapo-concentration Mode continu ou discontinu - temps séjour : min ou h							
Atomisation Mode continu ou discontinu - temps séjour : s		Pour produit pompable et pulvérisable					
Sécheur bande Mode continu - temps séjour : min							
Cylindre chauffant Mode continu - temps séjour : s							
Sécheur étuve / Four de séchage Mode discontinu - temps séjour : h		Pour produit sec ne générant pas de poussières fines	Pour produit granulaire uniquement				
Sécheur flash Mode continu - temps séjour : s							

■ TECHNOLOGIE APPLICABLE

■ TECHNOLOGIE APPLICABLE SOUS CONDITION

GRILLE D'AIDE À LA SÉLECTION D'UN PROCÉDÉ DE SÉCHAGE

Cliquez sur les items dans Technologies et Produits pour accéder aux fiches techniques et au glossaire

TECHNOLOGIES DE SÉCHAGE	TYPES DE PRODUITS	Produits liquides (solutions aqueuses, lait, jus...)	Produits pâteux (boues d'épuration, peinture concentrée, gâteaux humides...)	Produits pulvérulents et granulaires (lactose, poudres pharmaceutiques, pigments, sable, sucre...)	Produits fibreux (laine, coton, sciure de bois...)	Produits plans (panneaux d'isolants, bois...)	Produits en bande (papier, films plastiques, textile en bande...)	Solides mis en forme ou en morceaux (objets moulés ou 3D, céramiques...)
Lit fluidisé Mode continu ou discontinu - temps séjour : min		Granulation ou atomisation préalable	Pour produit mis en forme					
Lyophilisation Mode discontinu - temps séjour : h								
Sécheur à palettes, à vis, à disque Mode continu ou discontinu - temps séjour : h ou min								
Sécheur silo Mode discontinu - temps séjour : h				Pour produit granulaire uniquement				
Tambour rotatif Mode continu - temps séjour : min			Pour produit à écoulement libre (sous peine d'agglomération)					
Sécheur tunnel Mode continu ou discontinu - temps séjour : h				Pour produit granulaire uniquement				
Sécheur par pertes diélectriques Mode continu ou discontinu - temps séjour : min ou h			Avec couplage air chaud et MO/HF	Avec couplage air chaud et MO/HF	Avec couplage air chaud et MO/HF	Avec couplage air chaud et MO/HF		

■ TECHNOLOGIE APPLICABLE

■ TECHNOLOGIE APPLICABLE
SOUS CONDITION

PRODUIT MIS EN FORME OU EN MORCEAUX

Cliquez sur les technologies de séchage pour accéder aux fiches techniques

Grilles d'analyse

	Pré-séchage mécanique	Sécheur étuve/Four de séchage	Lyophilisation	Sécheur tunnel	Sécheur par pertes diélectriques
PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ					
Température limite acceptée	< 50 °C (traitement à l'ambiance)	200 °C	-50 °C à +120 °C	250 °C	
Durée de séchage	Quelques minutes	Quelques heures	10 à 72 h	Quelques minutes à quelques heures	Quelques minutes à quelques heures
Capacité	Variable	Variable	Densité de chargement : 5 à 18 kg/m ²	Variable	Du kg à la tonne par lot
Fonctionnement	Continu	Discontinu	Discontinu	Continu	Discontinu ou continu
PRODUIT INITIAL					
Spécifications sur le produit initial	Non pulvérulent	Le produit doit être placé de manière uniforme sur les plateaux	Le produit doit être placé de manière uniforme sur les plateaux		Sensibilité diélectrique
Fragilité	Doit pouvoir résister à la pression du soufflage		Les morceaux doivent rester intacts après traitement		Sensibilité des céramiques au séchage MO, risque de ruptures
Thermosensibilité		200 °C	T° maximale de surface du produit : 30 à 90 °C	30 à 250 °C	Produit thermosensible accepté
Teneur en eau	Forte teneur en eau : > 50 %				
Forme					Épaisseur et volume à adapter en fonction de la fréquence de l'onde (pénétration des ondes)
Taille		Variable	1 mm à plusieurs cm	De quelques mm à plusieurs cm	Contrainte d'homogénéité du produit
PRODUIT FINAL					
Spécifications sur le produit final			Conservation de la couleur, des arômes et des vitamines		Effet de peau réduit
Forme			Conservation de la forme		

Cliquez sur les technologies de séchage pour accéder aux fiches techniques

	Pré-séchage mécanique (filtration)	Évapo-concentration	Atomisation	Cylindre chauffant	Lit fluidisé (avec granulation ou atomisation préalable)	Lyophilisation
PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ						
Température limite acceptée	< 50 °C (traitement à l'ambiance)	100-120 °C	900 °C			-50 °C à +120 °C
Durée de séchage	Quelques secondes à quelques heures	Quelques minutes à quelques heures	10-30 s	3-30 s	Quelques secondes à quelques minutes	10-72 h
Capacité	Variable	Jusqu'à plusieurs t/h	5-200 t/h	Quelques kg/h à quelques t/h	Variable	Densité de chargement : 5-18 kg/m ²
Fonctionnement	Continu ou discontinu	Continu	Continu	Continu	Continu ou discontinu	Discontinu
PRODUIT INITIAL						
Spécifications sur le produit initial	Particules en suspension dans un liquide	Liquide uniquement		Liquide	Solvant ou solution aqueuse	Solution liquide
Fragilité du produit			Problème d'attrition et de fines	Mise en œuvre d'un raclage	Problème d'attrition et de fines	
Thermosensibilité du produit	Pas de chauffage		100-600 °C	100-180 °C		T° maximale de surface du produit : 30-90 °C
Teneur en eau	Forte teneur en eau : > 50 %	Forte teneur en eau : > 50 %	Forte teneur en eau : > 50 % en général	> 50 %		Variable
Forme	Liquide	Liquide	Gouttes	Film	Gouttes	Produit déposé en couche de 1,5 à 3 cm
Taille des gouttes			5-1000 µm			
Viscosité	Faible : doit être pompable	Faible : doit être pompable	Faible : doit être pompable	Viscosité faible ou importante	Faible : doit être pompable	Faible ou importante
PRODUIT FINAL						
Spécifications sur le produit final	Gâteau de filtration ou liquide visqueux	Liquide fortement concentré	Pulvérulent	Pulvérulent	Poudre calibrées	• Pulvérulent • Conservation de la couleur, des arômes et des vitamines
Forme	Solide ou pâteux	Liquide ou pâteux	Poudre	Écailles	Grains ou poudre	Poudre

PRODUIT FIBREUX

Cliquez sur les technologies de séchage pour accéder aux fiches techniques

Grilles d'analyse

	Sécheur étuve / Four de séchage	Lit fluidisé	Lyophilisation	Tambour rotatif	Sécheur tunnel	Sécheur par pertes diélectriques (avec couplage air chaud et MO/HF)
PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ						
Température limite acceptée	200 °C	400 °C			250 °C	
Durée de séchage	Quelques heures	2 à 60 min	10-72 h	10-60 min	Quelques minutes à quelques heures	Quelques minutes à quelques heures
Capacité	Variable	5 à 100 t/h	5 à 18 kg/m ²	Fort débit : 2 à 250 t/h		De l'ordre de la tonne traitée
Fonctionnement	Discontinu	Continu	Discontinu	Continu	Continu	Discontinu ou continu
PRODUIT INITIAL						
Spécifications sur le produit initial	Le produit doit s'écouler librement			Le produit doit s'écouler librement		Sensibilité diélectrique
Fragilité				Existence d'un brassage mécanique		Risque d'emballage thermique à maîtriser
Thermosensibilité	< 200 °C	50 à 200 °C	T° maximale de surface du produit : 30 à 90 °C	Produit peu sensible à la température : 100 à 900 °C		Risque d'emballage thermique / surchauffe localisée
Teneur en eau				< 80 %		
Forme						Épaisseur du produit compatible avec le transfert radiatif
Taille				1 mm à plusieurs cm		
PRODUIT FINAL						
Spécifications sur le produit final	Fibres	Fibres	Conservation de la couleur, des arômes et des vitamines	Fibres	Fibres	Fibres
Forme				Conservation de la forme		Risque d'éclatement des fibres

Cliquez sur les technologies de séchage pour accéder aux fiches techniques

	Pré-séchage mécanique (soufflage, pressage)	Sécheur étuve / Four de séchage	Lyophilisation	Sécheur tunnel	Sécheur par pertes diélectriques (avec couplage air chaud et MO/HF)
PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ					
Température limite acceptée	< 50 °C (traitement à l'ambiance)	200 °C	-50 °C à +120 °C	250 °C	Variable
Durée de séchage	Quelques minutes	Quelques heures	10 à 72 h	Quelques minutes à quelques heures	Quelques minutes à quelques heures
Capacité	Variable	Variable	Densité de chargement : 5 à 18 kg/m ²		De l'ordre de la tonne traitée
Fonctionnement	Continu	Discontinu	Discontinu	Continu	Discontinu ou continu
PRODUIT INITIAL					
Spécifications sur le produit initial	Non pulvérulent				Sensibilité diélectrique
Thermosensibilité		< 200 °C	T° maximale de surface du produit : 30 à 90 °C	30 à 250 °C	Produit thermosensible accepté
Teneur en eau	Forte teneur en eau : > 50 %				
PRODUIT FINAL					
Spécifications sur le produit final			Conservation de la couleur		Dimensions à respecter pour les HF
Forme			Conservation de la forme		

PRODUIT PÂTEUX

Cliquez sur les technologies de séchage pour accéder aux fiches techniques

Grilles d'analyse

	Pré-séchage mécanique (filtration, pressage, centrifugation)	Atomisation	Cylindre chauffant	Sécheur étuve/Four de séchage	Sécheur flash	Lit fluidisé
PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ						
Température limite acceptée	< 50 °C (traitement à l'ambiance)	900 °C	300 °C	200 °C	600 °C	400 °C
Durée de séchage	Quelques minutes	10-30 s	3-30 s	Quelques heures	0,5-3,5 s	2-60 min
Capacité	Variable	5-200 t/h	Quelques kg/h à quelques t/h	Variable	5-15 à 30 t/h	5-50 t/h
Fonctionnement	Continu ou discontinu	Continu	Continu	Discontinu	Continu	100 t/h maxi
PRODUIT INITIAL						
Spécifications sur le produit initial	Produit pompable	Produit pompable et pulvérisable	Produit pompable	Si le produit sec ne génère pas de poussières fines	Sous réserve du type d'alimentation	Sous réserve du type d'alimentation
Fragilité		Problème d'attrition et de fines	Mise en œuvre d'un raclage		Produit peu fragile, problème d'attrition et de fines	Problème d'attrition et de fines
Thermosensibilité		100-600 °C	Produit thermosensible accepté 100-180 °C	Produit thermosensible accepté 70-180 °C	Produit thermosensible accepté 100-350 °C	50-200 °C
Teneur en eau	< 50 %		< 50 %		< 50 %	< 50 %
Forme		Gouttes	Film		Émiettés ou granulés	Émiettés ou granulés
Taille des gouttes		5-1000 µm			Produit fin : < 2 mm	Granulométrie homogène : 50 µm à 3 mm
Cohésion					Non collant	Non collant
PRODUIT FINAL						
Spécifications sur le produit final	Gâteau de filtration ou produit sous forme de pâte	Pulvérulent	Pulvérulent	Pulvérulent	Pulvérulent	Pulvérulent
Forme		Poudre calibrée	Écailles	Poudre non calibrée	Poudre non calibrée	Poudre non calibrée

PRODUIT PÂTEUX

Cliquez sur les technologies de séchage pour accéder aux fiches techniques

Lyophilisation	Sécheur à palettes/vis	Tambour rotatif	Sécheur tunnel	Sécheur par pertes diélectriques (avec couplage air chaud et MO/HF)	
P A R A M È T R E S D U P R O C É D É					
-50 °C à +120 °C	350 °C	900 °C	250 °C	Variable	Température limite acceptée
10-72 h	10 min à 10 h	10-60 min	Quelques minutes à quelques heures	Quelques minutes à quelques heures	Durée de séchage
Densité de chargement : 5-18 kg/m ²	Volume utile de produit : 0,1 à 10-20 m ³	Fort débit : 2-250 t/h		De l'ordre de la tonne traitée	Capacité
Discontinu	Discontinu ou continu	Continu	Continu	Discontinu ou continu	Fonctionnement
P R O D U I T I N I T I A L					
		Écoulement libre		Sensibilité diélectrique	Spécifications sur le produit initial
	Mélangeage et malaxage	Existence d'un brassage mécanique		Existence d'un brassage mécanique	Fragilité
T° max de surface du produit : 30-90 °C	Si vapeur : T = 120-200 °C Si fluide thermique : T = 280-350 °C	Produit peu sensible à la température 100-900 °C	30-250 °C	Produit thermosensible accepté	Thermosensibilité
		< 80 %			Teneur en eau
					Forme
1 mm à 1 cm maxi (plusieurs cm dans certains cas particuliers)	Émiétés ou granulés				Taille des gouttes
		Non collant (sous peine d'agglomération)			Cohésion
P R O D U I T F I N A L					
Conservation de la couleur, des arômes et des vitamines	Pulvérulent	Pulvérulent	Pulvérulent		Spécifications sur le produit final
Conservation de la forme	Poudre non calibrée	Poudre non calibrée	Poudre non calibrée		Forme

PRODUIT PULVÉRENT ET GRANULAIRE

Cliquez sur les technologies de séchage pour accéder aux fiches techniques

Grilles d'analyse

	Sécheur étuve / Four de séchage	Sécheur flash	Lit fluidisé	Lyophilisation	Sécheur à palettes/vis
PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ					
Température limite acceptée	200 °C	600 °C	400 °C	-50 °C à +120 °C	350 °C
Durée de séchage	Quelques heures	0,5-3,5 s	2 à 60 min	10 à 72 h	10 min à 10 h
Capacité	Variable	5 à 30 t/h	5-50 t/h 100 t/h maxi	Densité de chargement : 5 à 18 kg/m ²	Volume utile de produit : 0,1 à 20 m ³
Fonctionnement	Discontinu	Continu	Continu	Discontinu	Discontinu ou continu
PRODUIT INITIAL					
Spécifications sur le produit initial	Produit granulaire				
Fragilité		Produit peu fragile, problème d'attrition et de fines	Problème d'attrition et de fines		Mélangeage et malaxage
Thermosensibilité	< 200 °C	Produit thermosensible accepté 300-350 °C	50 à 200 °C	T° maximale de surface du produit : 30 à 90 °C	Si vapeur : T = 120-200 °C Si fluide thermique : T = 280-350 °C
Teneur en eau		< 50 %	< 50 %		
Taille	Plage étendue : 50µm à > 10 mm	Produit fin : < 2 mm	Granulométrie homogène : 50 µm à 3 mm	1 mm à 1 cm maxi (plusieurs cm dans certains cas particuliers)	
Cohésion		Non collant	Non collant		Non collant (sous peine d'agglomération)
PRODUIT FINAL					
Spécifications sur le produit final	Poudre ou grains	Poudre fine	Poudre ou grains	Conservation de la couleur, des arômes et des vitamines	Poudre ou grains
Forme				Conservation de la forme	

PRODUITS PULVÉRENT ET GRANULAIRE

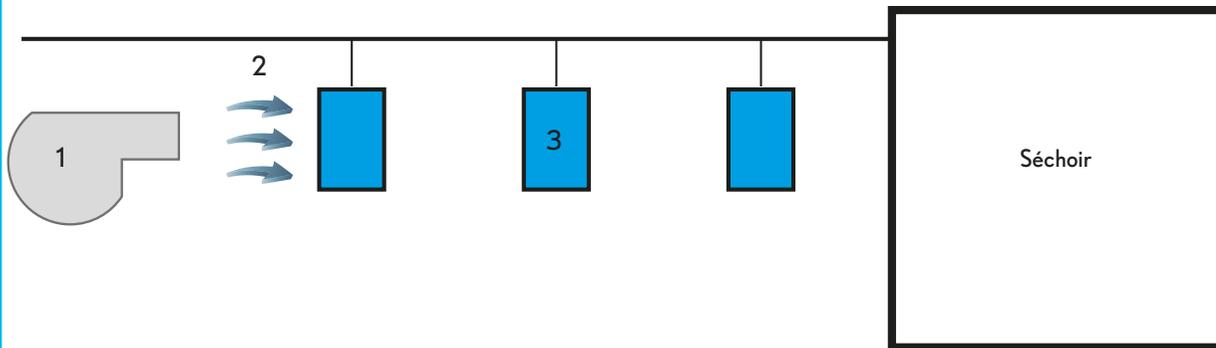
Cliquez sur les technologies de séchage pour accéder aux fiches techniques

Sécheur silo	Tambour rotatif	Sécheur tunnel	Sécheur par pertes diélectriques (avec couplage air chaud et MO/HF)	
P A R A M È T R E S D U P R O C É D É				
130-140 °C	900 °C	250 °C	Variable	Température limite acceptée
5-6 heures à 3-4 jours	10-60 min	Quelques minutes à quelques heures	Quelques minutes à quelques heures	Durée de séchage
	Fort débit : 2-250 t/h		De l'ordre de la tonne traitée	Capacité
Discontinu ou continu	Continu	Continu	Discontinu ou continu	Fonctionnement
P R O D U I T I N I T I A L				
Produit granulaire uniquement		Produit granulaire uniquement	Sensibilité diélectrique	Spécifications sur le produit initial
	Existence d'un brassage mécanique		Risque d'emballement thermique à maîtriser	Fragilité
30 à 90 °C	Produit peu sensible à la température 100-900 °C	30 à 250 °C	Produit thermosensible accepté	Thermosensibilité
	< 80 %			Teneur en eau
	Plage étendue : 50µm à > 10 mm	Plage étendue : 50µm à > 10 mm		Taille
	Non collant (sous peine d'agglomération)			Cohésion
P R O D U I T F I N A L				
Grains	Poudre ou grains	Poudre ou grains		Spécifications sur le produit final
				Forme

PRÉ-SÉCHAGE MÉCANIQUE

Principes du procédé

Pré-séchage par soufflage d'air



1. Ventilateur
2. Soufflage d'air
3. Produit

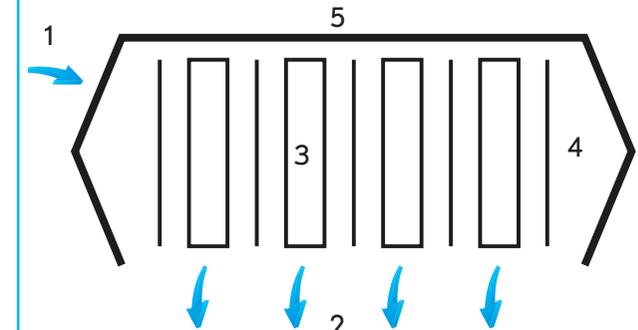
Dans de nombreux procédés industriels, les étapes de séchage sont combinées avec des étapes de séparation liquide-solide que l'on peut qualifier de pré-séchage par action mécanique. Dans ce cas, il est important d'avoir une vision globale du procédé car le séchage est souvent le plus consommateur en énergie et un goulot d'étranglement dans les procédés continus. Toute l'eau ou le solvant qui sont évacués en amont réduisent ainsi la consommation énergétique et la durée du séchage.

On distingue deux grandes catégories de systèmes de pré-séchage :

1. Soufflage d'air

Le soufflage utilise la vitesse d'un jet d'air, propulsé selon une direction et une forme données, pour retirer la pellicule de liquide se trouvant à la surface des matériaux. Cette technique est très adaptée pour retirer de l'eau de surface sur des objets volumineux qui ont subi une immersion dans un bain par exemple. On retrouve cette technologie dans l'industrie agroalimentaire, la sidérurgie, la fabrication de pièces plastiques et les procédés de nettoyage par immersion.

Pré-séchage par filtration



1. Entrée du produit humide
2. Sortie du produit
3. Média filtrant
4. Support média filtrant
5. Corps du système de filtration

2. Filtration

La filtration regroupe tous les procédés continus et discontinus qui utilisent une barrière mécanique de type toile ou membrane pour effectuer la séparation entre deux milieux, solide-liquide dans le cas présent. Cette technique est employée dans de nombreux domaines tels que l'agroalimentaire, la chimie, le traitement des boues, le textile, les minéraux et l'industrie pharmaceutique.

L'application d'une force mécanique par pression (pressage) permet de déplacer l'eau contenue dans ou à la surface d'une matière à sécher et peut être réalisée en complément d'une opération de filtration.

Caractéristiques du procédé • Soufflage d'air

Air surpressé ou comprimé

Les deux systèmes existent : l'air comprimé ne doit être utilisé qu'en cas d'absolue nécessité car son coût est nettement supérieur à l'air surpressé (du fait des pressions d'air plus importantes). En effet, l'air comprimé fait partie des sources d'énergies les plus coûteuses dans une usine, ce qui est souvent méconnu et sous-estimé.

Pression et débit d'air

Ils sont à déterminer avec le fournisseur de matériel de façon à consommer le moins d'air possible en conservant les performances désirées. Très souvent, des tuyaux ouverts sont mis en place mais ces systèmes sont surdimensionnés et gaspillent beaucoup d'énergie.

Température de l'air

Paramètre qui est fonction du procédé. Si le but est d'évacuer de l'eau en surface de pièces, souffler à température ambiante peut s'avérer économique et suffisant. Si l'objectif est de sécher en chargeant l'air en eau, alors un préchauffage de l'air peut faire gagner en efficacité.

Niveau sonore

Le bruit est l'une des nuisances les plus fréquentes en industrie. Les procédés de soufflage ont souvent la réputation de produire un niveau sonore élevé. Il faut veiller à utiliser des technologies de soufflage récentes alliant performance et réduction du bruit pour préserver la santé des opérateurs.

Caractéristiques du procédé • Filtration

Concentration en matière solide

Elle peut varier de 1% à plus de 20%. En fonction des cas, une simple clarification peut s'avérer suffisante pour séparer les deux phases.

Tailles des particules

Elle est très variable en fonction des procédés, de quelques μm à quelques mm. Ce paramètre est essentiel dans le choix du procédé et des éléments filtrants.

Lavage intermédiaire

La nécessité de laver la phase solide après filtration peut orienter le choix de la technologie. À savoir que deux méthodes sont couramment utilisées, le nettoyage par déplacement de liquide à travers le gâteau et le repulpage du gâteau avec le liquide de nettoyage.

Traitement horaire

Il est très variable en fonction des procédés. Le temps de séjour peut aller de quelques minutes à plusieurs heures.

Prétraitement

Le prétraitement est une méthode à envisager pour optimiser la filtration, que ce soit pour diminuer la durée de la filtration ou pour extraire plus de solvant. L'ajout d'agents flocculants ou coagulants a tendance à améliorer la filtrabilité des produits à faible granulométrie (de l'ordre de la dizaine de microns).

Température de fonctionnement

Cela dépend du procédé à mettre en œuvre. Certaines filtrations ont lieu à chaud et d'autres à froid. Il est important de tenir compte des conditions dans lesquelles le produit à filtrer est le plus stable.

Caractéristiques du procédé • Filtration

Catégories de filtres discontinus

- Filtre presse : il permet de filtrer sur des surfaces importantes de toile et sur des épaisseurs de 1 à 2 cm. Le gâteau est débâti par contre-pression et récupéré par une trappe sous le filtre. Une version automatique existe pour rendre ce procédé continu.
- Filtre à feuilles : en général, les feuilles sont montées sur des cadres verticaux et les deux faces sont filtrantes. L'épaisseur de gâteau de filtration est faible car l'espacement entre les feuilles est de 100 mm environ. Le produit est débâti par mise en mouvement des panneaux, par vibrations, ou bien manuellement.
- Filtre à plateaux : la filtration est réalisée simultanément sur une série de plateaux dans une enceinte sous pression. Lorsque la filtration est terminée, les plateaux sont sortis pour être débâti.
- Filtre à bougies : le filtre à bougies est similaire au filtre à feuilles. Dans cette configuration les éléments filtrants sont des cartouches cylindriques dont la forme ressemble à des bougies. Les bougies peuvent être remplacées aisément.
- Filtre Nutsche : le filtre Nutsche se compose d'une enceinte sous pression dans laquelle est placée une toile filtrante horizontale. La solution à filtrer est placée dans l'enceinte qui est mise sous pression. Ce procédé est utilisé en chimie fine et en pharmacie pour une utilisation multi-produits car le nettoyage y est plus aisé que pour les autres filtres.
- Variante sous vide : certains des procédés mentionnés ci-dessus comme le filtre Nutsche, le filtre à feuilles et le filtre à plateaux peuvent être opérés sous vide plutôt que sous pression. L'utilisation du vide en aval du filtre est cependant à proscrire dans certains cas car celui-ci peut entraîner l'évaporation de solvants volatils et, par conséquent, provoquer une cristallisation dans la zone des filtrats.

Catégories de filtres continus

- Filtre horizontal rotatif : il consiste en une succession de sections dans lesquelles le produit peut être chargé, filtré, lavé, et débâti sur un tour complet.
- Filtre à tambour : la solution liquide ou pâteuse est déposée sur les parois extérieures du tambour. La filtration est réalisée sous vide ou par surpression d'alimentation. Le produit est débâti par contre-pression ou par raclage après un tour.
- Filtre à disques rotatifs : filtre de grande capacité qui convient aux solutions fortement chargées en solides. Le produit est placé sur le filtre vertical par trempage dans la solution et la filtration est opérée sous vide pendant que le disque effectue un tour.
- Filtre à bandes : ce procédé est particulièrement adapté au traitement des boues et aux textiles. Le produit humide est placé sur une bande filtrante qui circule entre des rouleaux. Un système d'aspiration est placé sous la bande dans chaque section, ce qui a pour conséquence de drainer le liquide.
- Centrifugeuse : le produit est introduit, à débit constant, à une extrémité de la centrifugeuse et il est raclé à l'opposé. Seuls les produits peu compressibles peuvent être filtrés de la sorte car les forces qui s'appliquent sur le gâteau sont très fortes (les épaisseurs de gâteau pouvant atteindre 10 cm). À noter que des centrifugeuses discontinues existent également.

Caractéristiques du procédé • Efficacité Énergétique

Le séchage mécanique ne permet pas de descendre sous les 60 % d'humidité dans le produit (en base humide). La consommation énergétique reste cependant inférieure à 0,2 kWh/kg d'eau extraite contre plus de 0,7 kWh/kg d'eau évaporée pour un séchage thermique classique.

Soufflage d'air

L'optimisation d'un système d'évacuation d'eau par soufflage nécessite de dimensionner correctement le «rideau» d'air à mettre en place. La forme spécifique des buses et leur orientation permettent d'optimiser le soufflage sur des pièces à géométrie variable qui défilent sous le jet.

D'autres optimisations sont possibles, telles que l'utilisation de buses adaptées pour réduire les consommations en air comprimé, ou le passage à de l'air surpressé moins coûteux que l'air comprimé.

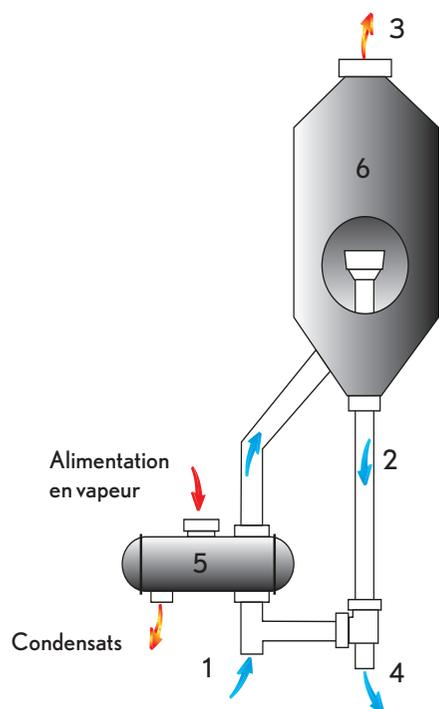
Filtration

En amont du séchage, des équipements de filtration performants permettront de réduire efficacement la quantité d'eau ou de solvant à évacuer avant l'opération de séchage, qui est le poste le plus énergivore des deux.

ÉVAPO-CONCENTRATION

Principes du procédé

Schéma de principe d'une unité d'évapo-concentration



1. Solution liquide à concentrer
2. Circulation de la solution liquide
3. Extraction buées
4. Concentrat
5. Échangeur thermique vapeur/solution à concentrer
6. Corps d'évaporation

L'évapo-concentration de solutions liquides comprend trois principales étapes :

- l'apport d'énergie thermique pour évaporer l'eau ;

- la séparation liquide-vapeur pour diriger la vapeur vers le condenseur ou vers de la récupération d'énergie (corps d'évaporation) ;
- la circulation du produit liquide pour assurer l'alimentation de l'échangeur et le renouvellement de la solution à concentrer.

Il existe des évaporateurs où l'évaporation a lieu dans la zone d'échange thermique et des évaporateurs où l'évaporation est séparée de la zone de transfert thermique.

1. Apport d'énergie thermique

Il s'agit d'apporter l'énergie au liquide pour élever sa température jusqu'à la température d'ébullition de l'eau (qui dépend de la pression, la mise sous vide permettant d'évaporer à plus basse température) et surtout suffisamment d'énergie pour provoquer le changement d'état de l'eau.

2. Séparation liquide-vapeur

Il s'agit de séparer la vapeur du liquide concentré, sans transférer de polluants dans la vapeur.

Pour les solutions visqueuses ou encrassantes, cette séparation se fera séparément de l'échange thermique.

3. Circulation

La circulation du liquide est primordiale, pour assurer le bon échange thermique côté liquide et empêcher l'encrassement des surfaces d'échanges.

Il existe différentes sortes d'évaporateurs : à grimpage par thermosiphon, à flots tombants (gravitaire) et à circulation forcée. Ces évaporateurs impliquent différents types de circulation et des puissances de pompes qui peuvent impacter de façon significative le bilan énergétique de l'installation.

Variantes

par rapport au procédé générique

Le procédé est connu surtout dans ces variantes qui offrent des économies d'énergie importantes par rapport au système simple effet : l'utilisation d'évaporateurs en série (à multiples effets) et/ou avec compression mécanique de vapeur (CMV) et/ou avec thermocompression permet d'augmenter l'efficacité énergétique de cette technologie.

➤ Évaporateurs à multiples effets

- Une unité d'évaporation multiple-effet regroupe un ensemble d'évaporateurs. On parle ainsi d'évaporation à 3, 4, 5 effets, ou plus, en fonction du nombre de réacteurs.

Le premier évaporateur est alimenté en vapeur vive. Les buées générées dans cet évaporateur sont ensuite réutilisées comme vapeur de chauffage dans l'évaporateur suivant.

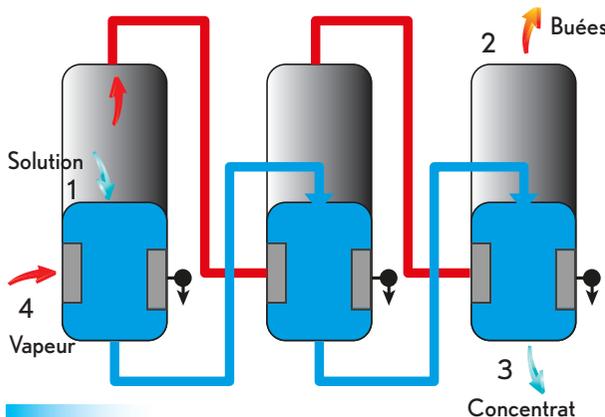
- Ce principe de fonctionnement est obtenu en décalant les pressions de chacun des évaporateurs, de façon à obtenir dans l'évaporateur en amont une vapeur se condensant à une température supérieure à la température d'ébullition de l'évaporateur suivant.
- Ainsi le débit initial de vapeur vive permet de générer en cascade des débits de buées réutilisées jusqu'au dernier effet, en général sous vide. À l'effet final, le système de refroidissement utilisant de l'eau de refroidissement peut condenser la vapeur. Une certaine quantité de vapeur peut être extraite des évaporateurs pour servir de sources de chaleur à d'autres procédés.

Principes du procédé

- Le nombre d'effets dépend du ratio des coûts opératoires et de l'investissement, ainsi que de la capacité d'évaporation et de l'élévation du point d'ébullition de la solution.

Il existe plusieurs configurations d'évaporateur multiple-effet : à co-courant, à contre courant, à alimentation parallèle...

Évaporateur à 3 effets à co-courant



1. Alimentation solution à concentrer
2. Extraction buées
3. Concentrat
4. Alimentation en vapeur

► Compression Mécanique de Vapeur

- Les buées issues du procédé d'évaporation sont dirigées dans une machine tournante afin d'être comprimées. Les compresseurs sont généralement des ventilateurs centrifuges avec un ou plusieurs étages de compression, mais peuvent aussi être des compresseurs de type volumétriques.
- Les compresseurs sont généralement entraînés

par de l'énergie électrique, mais peuvent aussi être entraînés par une turbine à vapeur.

- Réintroduites en amont du procédé, les buées recomprimées se condensent en libérant l'énergie nécessaire à la vaporisation d'une nouvelle quantité de buées.

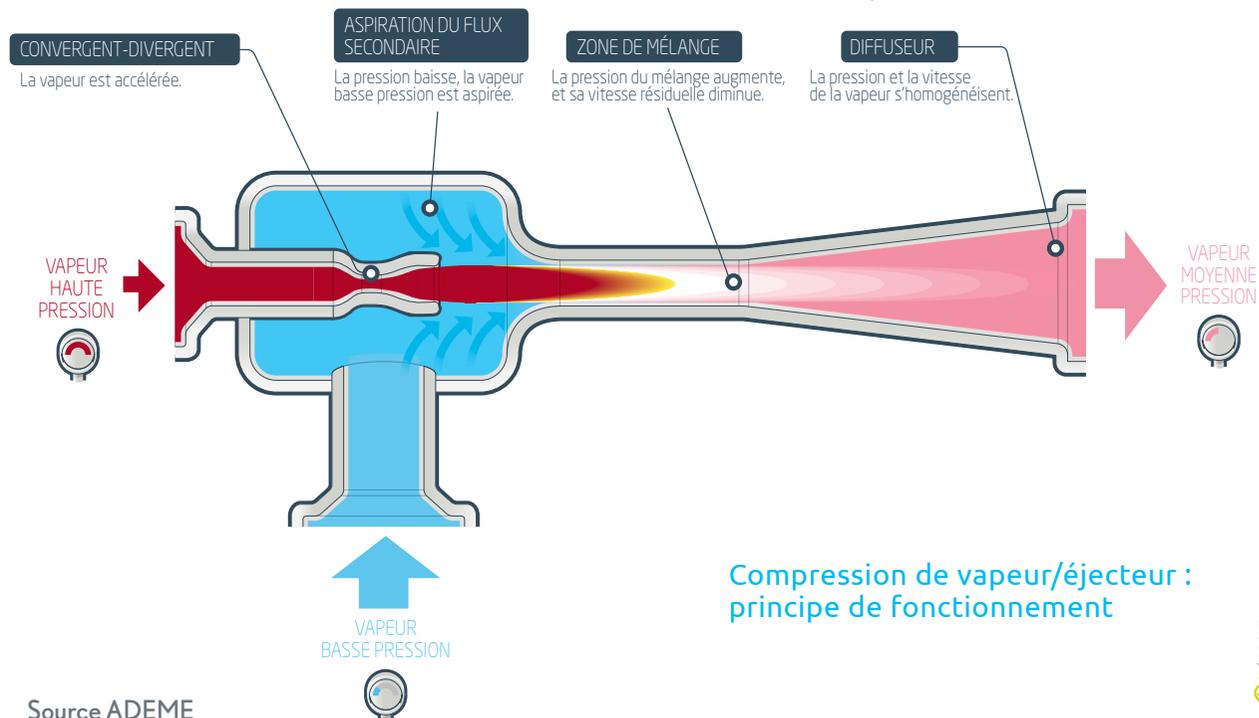
Une fois que le processus est amorcé (création des premières buées), l'énergie nécessaire à son entretien est uniquement apportée par l'énergie électrique au compresseur.

► Thermocompression / éjecto-compression

- Un éjecto-compresseur est un système simple composé d'une buse, d'une chambre de mélange

et d'un diffuseur. La vapeur basse pression issue du procédé y est comprimée, à une pression intermédiaire, par l'utilisation de l'énergie contenue dans la vapeur d'eau issue d'une chaudière (qui est à une pression plus élevée).

- La vapeur motrice traverse la buse d'injection où son énergie de pression est convertie en énergie cinétique (vitesse). Ce jet entraîne les buées qui sont aspirées, mélangées à la vapeur vive et accélérées dans le cône de mélange. Cette énergie cinétique est restituée sous forme de pression par ralentissement dans le diffuseur final.
- La vapeur re-comprimée est ensuite condensée pour alimenter un procédé interne ou externe en chaleur.



Compression de vapeur/éjecteur : principe de fonctionnement

Source ADEME

ÉVAPO-CONCENTRATION

Caractéristiques du procédé

Type de produit	Solutions aqueuses qui ont nécessité d'être concentrées.
État initial	Liquide à faible concentration (de quelques % à 10 % de matière sèche).
État final	Produit liquide à pâteux, de 35 % à 50 % de matière sèche et plus, le produit doit rester pompable.
Action mécanique sur le produit	Filtration éventuelle.
Mode de déplacement	Par pompage ou par gravitation.
Température de fonctionnement	De 20 °C à 110 °C (fonctionnement sous vide assez fréquent).
Temps de séjour	Le temps de séjour dépend des types d'évaporateurs de 0,5 min à 2 min (par flots tombants) jusqu'à 10 à 20 min (par grimpage).
Débit produit	Variable en fonction des unités de l'ordre de 1 t/h à 100 t/h.
Capacité de traitement horaire	Capacité évaporatoire variable de 1 t/h à 100 t/h.
Prétraitement	En fonction des produits à traiter : filtration, adjonction de neutralisants de pH, pré-concentration par techniques membranaires (osmose inverse / nano filtration).
Sécurité de l'installation	Contraintes de maintenance liées aux équipements sous pression. Traitement d'effluents liquides spécifiques (corrosifs, dangereux...).
Équipements particuliers	En cas de fonctionnement sous vide (mode fréquent), l'ensemble de l'installation (joints/vannes...) doit être adaptée. L'aspiration des incondensables à l'aide de pompes à vide peut être nécessaire, surtout dans le cas où la vapeur est récupérée du produit concentré (thermo-compression, compression mécanique de vapeur et multiples effets).
Séparation et post traitement	Finalisation du retrait d'eau pour les produits pâteux et/ou filtration si une cristallisation est obtenue au cours de la concentration (par exemple, pour des produits de type saumure).
Efficacité énergétique	<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaporateurs à multiple-effets : <ul style="list-style-type: none"> • simple effet : 0,8 à 1 kWh/kg d'eau, • double effet : environ 0,4 kWh/ kg d'eau, • triple effet : de 0,2 à 0,3 kWh/ kg d'eau. ■ Compression mécanique de vapeur : 0,018 à 0,026 kWh/kg d'eau. ■ Thermocompression : le gain est compris entre 25 et 40 % en fonction des technologies mono ou multi-tuyères. <p>L'efficacité énergétique des systèmes par CMV et par thermo-compression dépend fortement des taux de compression et donc des surfaces d'échanges disponibles.</p> <p>Les consommations auxiliaires des pompes (circulation forcée), du système de refroidissement et des pompes à vide doivent également être prises en compte.</p>

Modes de transfert de la chaleur

Utilisation courante

Chauffage convectif par échangeur de chaleur alimenté par de la vapeur haute pression pour le premier effet ou par CMV.

L'apport de chaleur au produit se fait par convection généralement via des échangeurs à tubes et calandre, parfois via des échangeurs à plaques spécifiques.



Domaine d'application

- Produits liquides ou pâteux.

Utilisation peu courante

Chauffage par eau chaude ou vapeur basse pression, au lieu de la vapeur haute pression afin d'utiliser de l'énergie de récupération. Les échangeurs sont du même type.

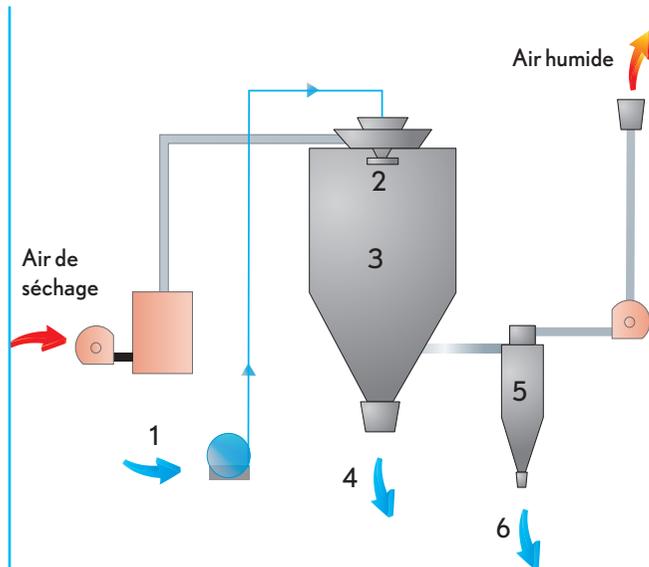
Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Lactoserum Teneur en eau : 94 % (initiale) à 68 % (finale).	Évaporateur à 3 effets avec thermocompression T° produit : 67 °C, débit produit entrant : 18,5 t/h. Débit d'eau évaporée : 15 t/h. Consommation spécifique : 0,13 kWh/kg d'eau.	

ATOMISATION

Principes du procédé

Tour d'atomisation



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

Le séchage comprend 3 étapes distinctes :

1. Pulvérisation du produit

L'atomisation consiste en la pulvérisation de 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) et 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.

2. Mélange air-spray et évaporation de l'eau

Les gouttes formées tombent par gravitation dans un courant d'air chaud et sèchent jusqu'à l'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.

3. 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.

Variantes

par rapport au procédé générique

- **Atomisation multiple-effet (atomisation + lit fluidisé + vibro-fluidiseur) :**
obtention de poudres agglomérées, avec de meilleures qualités d'écoulement, moins de fines, une mouillabilité et une solubilité supérieures.
- **Atomisation à 2 ou 3 étages par combinaison de technologies de séchage (atomisation suivie d'un lit fluidisé ou d'un sécheur flash) :**
refroidissement et post-séchage du produit, procédé relativement économique.

Caractéristiques du procédé

Type de produit	<p>État initial : produits liquides (le produit doit être pompable). État final : produits pulvérulents (poudres de qualité uniforme).</p>
Actions mécaniques sur le produit	Attrition et production de fines.
Mode de déplacement	<p>Entraînement par un fluide : $V_{\text{fluide}} = 1 \text{ à } 30 \text{ m/s}$. Fonctionnement continu.</p>
Température de fonctionnement	<p>Entrée : 100 à 600 °C en général (900 °C maxi). Sortie : 60 à 200 °C.</p>
Temps de séjour	10 à 30 s.
Débit produit	5 à 200 t/h.
Capacité de traitement horaire	1 à 30 kg d'eau/h/m ³ .
Pré-traitement	<p>Pour passer des liquides difficiles de haute à très haute viscosité. Pour mélanger des produits non miscibles. Pour formuler des spécialités avec incorporation d'ingrédients.</p>
Équipement de pré-traitement	<p>Concentrateur - évaporateur. Réchauffeur - pasteuriseur - stérilisateur. Plateforme de broyage. Homogénéisateur pour le mélange de produits non miscibles.</p>
Sécurité de l'installation	<p>Pour réduire les risques d'incendie ou d'explosion du produit et les émissions de vapeurs toxiques ou malodorantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • atomisation en circuit fermé (circulation d'un fluide de séchage inerte, surpression d'air intérieur) ; • récupération de solvants.
Équipements particuliers	<p>Conception de la chambre de séchage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • racleurs pneumatiques, marteaux, doubles enveloppes refroidies pour éviter des dépôts sur les parois dans le cas de produits thermosensibles et collants.
Séparation et post-traitement	<p>Dépoussiérage, filtration de l'air rejeté : cyclone, filtres, textiles, séparateurs électrostatiques et abatteurs humides (le produit récupéré peut être réinjecté dans l'alimentation du sécheur). Refroidissement du produit final et transport éventuel vers le conditionnement.</p>
Efficacité énergétique	<p>Réchauffage de l'air entrant au moyen de calories récupérées sur l'air sortant, par l'utilisation d'un fluide intermédiaire ou non. Consommation spécifique : 0,8 à 1,6 kWh/kg d'eau (en fonction de la thermo-sensibilité du produit et des contraintes de sécurité).</p>

ATOMISATION

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

▲ Léchage air chaud (courant parallèle)

L'écoulement d'air peut se faire selon 3 modes :

- écoulement co-courant où l'air et le fluide circulent dans la même direction. La chambre de séchage de type co-courant est le système le plus courant. La température de surface du produit est en général de 20 à 30 °C inférieure à la température de sortie de l'air ;
- écoulement contre-courant où l'air et le fluide circulent dans des directions opposées. Le temps de séjour de la particule est prolongé et ce type d'écoulement convient au séchage de particules de grosse taille ;
- écoulement mixte où les circulations d'air sont à la fois à co-courant et à contre-courant. Le séchage est aussi prolongé et les trajectoires plus longues des particules aboutissent à la formation de particules de plus grosse taille.



Domaine d'application

- Produit liquide pompable.

Utilisation peu courante ou en développement

▲ Vapeur d'eau surchauffée (VES)

L'utilisation de la VES, en remplacement de l'air chaud, peut potentiellement convenir lors d'un séchage par atomisation.

Intérêts

- Efficacité du procédé : consommation d'énergie réduite par rapport au léchage air chaud (0,6 à 0,7 kWh/kg d'eau sans récupération énergétique) ;
- efficacité du procédé : 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 volatils et/ou des mauvaises odeurs ;
- élimination des risques de feu et d'explosions ;
- qualité du produit séché : amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme, solidité, stérilisation, digestibilité, absence de durcissement superficiel pour les produits visqueux ou collants...).

Contraintes

- Difficulté à traiter certains produits thermosensibles ;
- coût plus élevé de l'équipement (nécessité d'être conforme aux règles de sécurité pour les systèmes HP, dispositifs d'entrée et de sortie du produit étanches à la vapeur).



Domaine d'application

- Produit liquide pompable.

Nouveaux développements

Nouvelles méthodes

▲ Nouvelles méthodes de caractérisation des transferts d'eau au cours du séchage et de la réhydratation de bases protéiques laitières

Les simulations numériques mettent en avant une performance énergétique supérieure des systèmes de séchage horizontaux à deux étages par rapport aux systèmes actuels verticaux. En pied de séchoir, un lit fluidisé permet de terminer le séchage pour les produits thermosensibles et/ou issus de gouttelettes de grande taille.

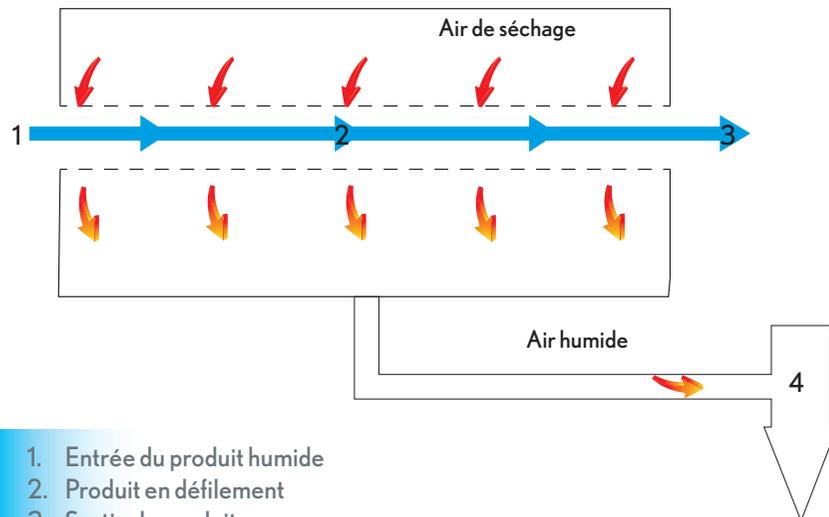
Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Lait Teneur en eau : de 52 % (initiale) à 3 % (finale).	Léchage air chaud T° fluide : 190 °C. Débit produit : 5 t/h. Consommation spécifique : 1,75 kWh/kg d'eau.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • procédé très efficace pour le séchage de liquides, • procédé éprouvé multi-domaines, • séchage de produits thermosensibles. ▪ Qualité du produit séché : rapidité de mouillage, facilité d'écoulement.
Café Teneur en eau : de 75-85 % (initiale) à 3-5 % (finale).	Léchage air chaud T° fluide : 270 °C.	
Poudres détergentes Teneur en eau : de 35 % (initiale) à 4-10 % (finale).	Léchage air chaud T° fluide : 350 °C. Débit produit : 30 t/h. Consommation spécifique : 0,9-1,2 kWh/kg d'eau.	
Levures Teneur en eau : de 75 % (initiale) à 8 % (finale).	Léchage air chaud T° fluide : <ul style="list-style-type: none"> • entrée : 100-350 °C ; • sortie : 100 °C. Centrifugation préalable (mécanique et sous vide).	Contraintes <ul style="list-style-type: none"> ▪ Contrainte d'environnement : équipement de sécurité pour éviter l'auto-inflammation du produit.
Oxyde de titane Teneur en eau : de 45 % (initiale) à 0,1 % (finale).	Léchage air chaud T° fluide : 400 °C. Débit produit : 5 t/h. Consommation spécifique : 1,1 kWh/kg d'eau.	
Sérum Teneur en eau finale : 5 %.	Léchage air chaud T° fluide : <ul style="list-style-type: none"> • entrée : 90 °C ; • sortie : 70 °C. Temps de séjour : 25 s.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ▪ Qualité du produit séché : <ul style="list-style-type: none"> • température inférieure à 70 °C, • stérilisation de l'équipement.

SÉCHEUR BANDE

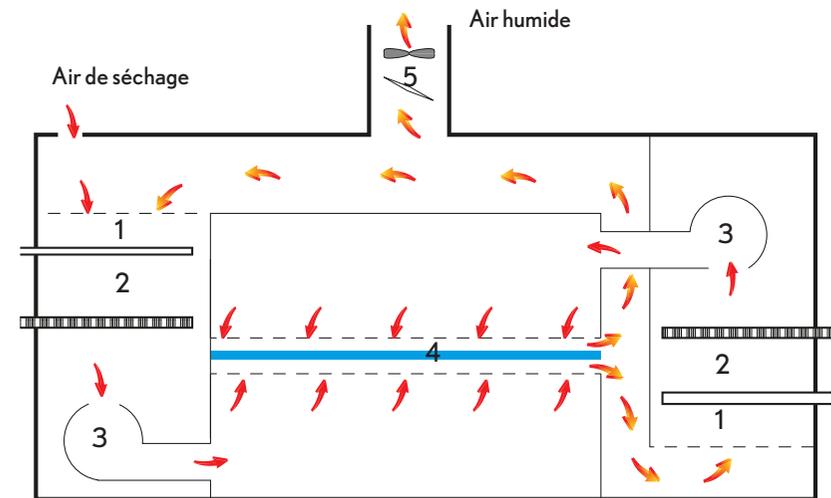
Principes du procédé

Séchage sur rame



1. Entrée du produit humide
2. Produit en défilement
3. Sortie du produit sec
4. Cyclone de dépoussiérage

Séchage sur rame : coupe transversale



1. Filtration de l'air
2. Chauffage de l'air
3. Ventilateurs
4. Produit en défilement
5. Registre d'extraction

Le procédé de séchage comprend 2 étapes distinctes :

1. Défilement du produit

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.

2. Transfert de chaleur et séchage 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. Le chauffage de l'air se fait le plus souvent par l'intermédiaire d'un brûleur à gaz ou via des tubes alimentés en vapeur.

Variantes

par rapport au procédé générique

► 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 de textiles, qui ne peuvent pas être mis en tension (tricot, grilles de verre, toiles très épaisses), pour le séchage d'enductions (textile et papier) et lors d'opérations intermédiaires de séchage de poudres/solides divisés peu pulvérulents. 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 de séchage en particulier par le temps de séjour du produit, la vitesse de défilement du produit et la capacité de traitement horaire du sécheur.

► Séchage sur convoyeur à bande

Le produit est placé sur un convoyeur percé de fentes ou d'orifices. De l'air chaud circule en boucle à travers le produit. Une partie de l'air est recyclé et de l'air frais est introduit dans le sécheur.

SÉCHEUR BANDE

Caractéristiques du procédé

On choisit de distinguer les technologies de séchage sur rame, séchage aéroporté et séchage sur tapis convoyeur dans le tableau suivant, afin de mieux dé-

crire les caractéristiques techniques propres à chacun de ces procédés.

Dans certains cas, on distingue aussi le produit traité,

selon que ce soit un produit du secteur textile ou du secteur papetier.

Type de produit	Produits en bande. Solides divisés déposés sur un convoyeur. Le produit ne doit pas se tasser naturellement pour favoriser l'écoulement de l'air.
Mode de déplacement	Défilement en continu.
Température de fonctionnement	Rames : 100 à 220 °C . Séchage aéroporté pour textiles et papiers : 50 à 350 °C . Convoyeur : 50 °C à 170 °C.
Temps de séjour	Rames : 1 s à 2 min. Séchage aéroporté pour textiles : 30 à 50 s. Séchage aéroporté pour papiers : 0,1 à 2 s. Convoyeur : 1 min à 4 h.
Vitesse de défilement du produit	Rames : 5 à 100 m/min pour des rames de 5 à 40 m. Séchage aéroporté pour textiles : 10 à 100 m/min. Séchage aéroporté pour papiers : 100 à 1500 m/min sur des longueurs de 3 m (4 à 5 m maxi). Convoyeur : vitesses < 10 m/min et épaisseur de 2 à 15 cm.
Capacité de traitement horaire	Rames : 6 à 20 kg d'eau/h/m ² de sécheur. Séchage aéroporté pour papiers : 10 à 50 kg d'eau/h/m ² de sécheur (ces valeurs de capacité varient fortement suivant que l'on se situe en tête ou en fin de sécheur). Convoyeur : jusqu'à 50 kg d'eau/h/m ² .
Pré-traitement	Déshydratation mécanique par couteaux d'air : ce procédé consiste à pousser l'eau de surface grâce à l'énergie cinétique des jets. Exprimage sur foulards. Filtration, granulation.
Équipements particuliers	Équipements pour corriger les variations en largeur et longueur du produit dans le secteur textile (redresseurs de trames). Dérôleurs hydrauliques (enroulage et dévidage du textile). Traitement d'air sur filtre ou passage sur colonnes d'eau.
Efficacité énergétique	Écoulement de l'air en circuit fermé avec l'insertion d'une fraction d'air neuf dans certaines applications.
Sécurité d'installation	Cellules photoélectriques (protection de l'individu et contre les incendies). Fils coupe-circuit (protection de l'individu). Procédé entièrement automatisé.

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

▾ **Léchage air chaud (courant parallèle)**

L'air circule parallèlement au produit.

 *Domaine d'application*

- Produit en bandes, enductions.

▾ **Traversée air chaud (courant croisé)**

L'air arrive de façon perpendiculaire au produit et le traverse.

 *Domaine d'application*

- Produit en bandes ou en lit de poudre.

▾ **Percussion air chaud**

Le principe du soufflage de l'air par percussion sur le produit intervient dans le cas du séchage aéroporté. La température de l'air peut atteindre des valeurs assez élevées (jusqu'à 350 °C).

Les vitesses de fluide maximales, pour le séchage de couches sur papier, sont de l'ordre de 50-70 m/s. Cette vitesse atteint les 90-110 m/s lorsque le produit traité est de la ouate de cellulose.

 *Domaine d'application*

- Enductions, couches sur textile et papier.

▾ **IR**

Avantages de l'IR / AC :

- densité de puissance élevée et modularité ;
- faible inertie ;
- localisation de la chauffe ;
- homogénéité de température ;
- entretien facile et réduit.

L'infrarouge d'origine électrique est préféré à l'infrarouge d'origine gaz dans le cas de séchage de teintures qui contiennent des colorants réagissant avec le CO₂.

 *Domaine d'application*

- Produit en bandes, enductions.

▾ **HF**

Avantages de la HF / AC :

- dissipation volumique de l'énergie ;
- homogénéité de traitement ;
- sélectivité des HF ;
- bonne synergie avec l'air chaud.

 *Domaine d'application*

- Produit en bandes, enductions.

Nouveaux développements

Modélisation

▾ **Séchage de papier couché**

Innovation

- Technologie.

Intérêts

- Simulation des transferts en prenant en compte à la fois les propriétés du papier et de la couche.

▾ **Simulation numérique du séchage de milieux poreux**

Innovation

- Technologie.

Intérêts

- Aide à la conception d'une voûte, d'un séchoir, d'une succession de séchoirs...

Application de la VES pour le séchage du textile

Innovation

- Mode de transfert.

Intérêts

- Économie d'énergie pour le séchage de textile domestique.

Contraintes

- Contraintes d'industrialisation (installation sous pression, thermosensibilité du produit à prendre en compte, etc.).

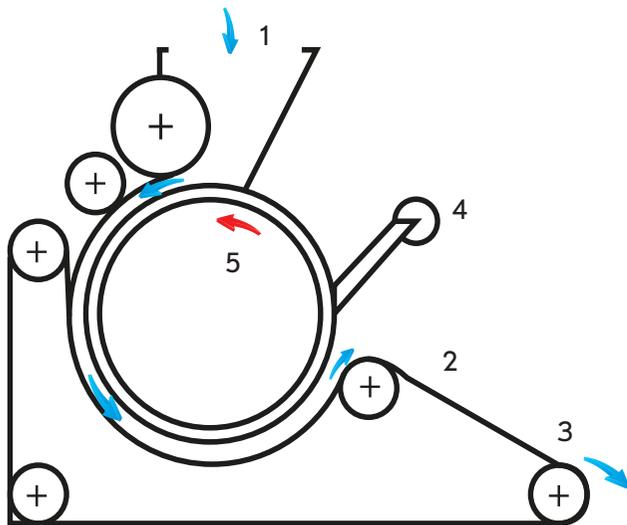
SÉCHEUR BANDE

Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
<p>Laine</p> <p>Teneur en eau : de 40 % (initiale) à 15 % (finale).</p> <p>Produit en bande</p>	<p>Produit plan, air chaud T° fluide : 110 °C. Débit produit : 0,3 à 1 t/h. Consommation spécifique : 1,5 à 1,6 kWh/kg d' eau (incluant le rendement de la chaudière et la distribution).</p> <p>Prèsèche IR + air chaud (rame) Densité de puissance : • IR électrique : 50 kW/m² ; • IR gaz : 100 à 200 kW/m². Temps de séjour : 3-5 s. Vitesse de défilement : 5-100 m/min.</p>	<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • productivité (gain de 30 à 50 % sur les vitesses de défilement), • simplicité de mise en œuvre, souplesse et prix. ■ Qualité du produit séché : meilleures modularité et homogénéité du séchage. <p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : prix de l'IR électrique. ■ Surcoûts d'investissement. ■ Consommation spécifique : 1,2 à 2,5 kWh/kg d' eau.
<p>Couches sur papier</p> <p>Enduction puis séchage</p> <p>Teneur en eau : de 10 à 40 % (initiale) à 5 % (finale).</p> <p>Produit plan</p>	<p>Percussion air chaud T° fluide : 160 à 200 °C. Débit produit : 15 t/h. Coût de fonctionnement : 1,3 à 2 kWh/kg d'eau. Procédé le plus répandu pour le séchage d'enductions.</p> <p>HF Applicateur : électrodes à barreaux . Densité de puissance : 10 à 30 kW/m². Temps de traitement HF : 0,5 à 5 s. Vitesse de défilement : 50 à 300 m/s.</p> <p>IR</p>	<p>Intérêts HF</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : sélectivité des HF pour le séchage d'enductions et de colles déposées en bande (enveloppes ou formulaires). ■ Consommation spécifique : 1,5 à 2,4 kWh/kg d' eau. <p>Intérêts IR</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • amélioration du profil d'humidité (suite aux progrès de l'électronique), • coûts d'investissements plus faibles que les HF.
<p>Pâte à papier</p> <p>Teneur en eau : de 58 (initiale) à 9 % (finale).</p> <p>Produit plan</p>	<p>Percussion air chaud T° fluide : 125 °C. Pressage préalable.</p>	

Principes du procédé

Cylindre chauffant



- 1 • Entrée du produit humide
- 2 • Produit mi-sec
- 3 • Sortie du produit sec
- 4 • Racleur produit
- 5 • Circulation fluide chauffant

Le séchage comprend 2 étapes distinctes :

1. Alimentation du produit

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 parfois par IR). 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 sa sensibilité à la température.

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

- pour les produits fluides - alimentation par trempage, par pulvérisation et par rouleau encolleur ;
- pour les produits visqueux et pâteux - le produit est introduit en partie haute ou latérale par rapport au cylindre chauffant et l'alimentation se fait 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). L'alimentation type borbier est un bac dans lequel vient baigner le cylindre. Dans ce cas, le temps de séjour du produit en contact de la paroi chaude est plus long.

2. Transport et séchage du produit

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.

Le contact du produit sur une surface chaude induit un choc thermique, qui permet des transformations thermochimiques irréversibles (cuisson et gélification de l'amidon par exemple...).

Variantes

par rapport au procédé générique

► Sécheur bi-cylindre

Ce sécheur est constitué de deux cylindres en regard, le produit passant par la fente laissée par les deux cylindres.

Il ne convient pas à certains produits thermosensibles, le temps de séjour du produit est un peu plus long (surtout si le mode d'alimentation est de type borbier).

► Sécheur multi-cylindre

Il s'agit d'une batterie de cylindres chauffants spécifique au séchage de produits en bandes, plus particulièrement du papier, où les vitesses de défilement varient de 100 à 1500 m/min.

CYLINDRE CHAUFFANT

Caractéristiques du procédé

Type de produit	État initial : produit liquide, produit pâteux, produit en bande. État final : produit en bandes, produit pulvérulent (flocons).
Actions mécaniques sur le produit	Mise en œuvre d'un raclage.
Mode de déplacement	Continu.
Température de fonctionnement	100 à 180 °C.
Temps de séjour	3 à 30 s. 1 à 10 min avec une alimentation de type borbier respectivement sur un mono-cylindre et un bi-cylindre.
Débit produit	5 à 200 t/h.
Capacité de traitement horaire	15 à 40 kg d'eau/h/m ² de contact. 10 à 50-60 kg d'eau/h/m ² de contact pour le papier (ces valeurs varient suivant la position du cylindre, en tête ou en fin de sécheur ; elles sont donc à considérer avec précaution).
Pré-traitement	Centrifugation, évaporation et concentration du produit car l'on peut traiter sur cylindre chauffant des produits visqueux, épais et pâteux (exemples : crèmes de levures, bactéries issues de fermentation).
Équipements particuliers	Fonctionnement sous vide : <ul style="list-style-type: none"> • séchage de produits thermosensibles car la température d'évaporation est faible (cas notamment des produits très concentrés), avec des ébullitions à 40-60 °C ; • séchage en atmosphère inerte ; • récupération de solvants.
Post-traitement	Floconnage. Broyage.
Efficacité énergétique	Consommation spécifique de 0,83 à 0,97 kWh/kg d'eau.
Récupération de l'énergie dans les buées	Production d'eau chaude. Chauffage de locaux.
CMV sous vide	Séchage de produits thermosensibles avec une consommation énergétique faible. Ces procédés de recyclage thermique restent peu répandus.

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

▲ Conduction

- Chauffage du cylindre par VES ou IR.

Intérêts de l'IR

- 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.

Domaine d'application

- Produit liquide, pâteux, en bande.

Nouveaux développements

Modélisation des transferts de chaleur et de masse

▲ Séchage de textiles sur cylindre

Innovation

- Technologie.

Intérêts

- Modélisation des transferts de chaleur à travers la paroi externe du cylindre ;
- modélisation des transferts de masse et de chaleur au sein du textile poreux.

Combinaison de deux modes de transfert

▲ Sécheur mono-cylindre + jets impactants de VES pour séchage de feuilles de papier

Innovation

- Combinaison de la conduction et de la VES à des vitesses de 100 m/s et à une température de 450 °C.

Intérêts

- Récupération énergétique de la vapeur issue du produit ;

- amélioration des propriétés mécaniques du produit et diminution de la brillance du papier ;
- vitesse de séchage accrue.

Contraintes

- Conception peu aisée.

Exemples d'applications et de produits traités

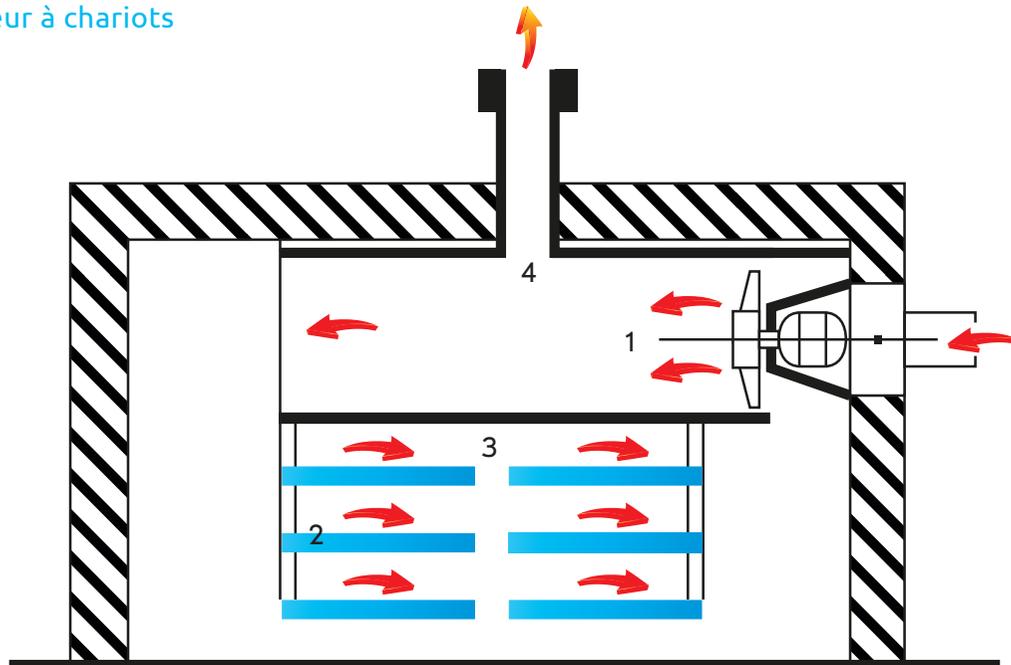
PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Latex de PVC Produit liquide	Conduction (sous vide) T° fluide : 80 à 85 °C.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : séchage à basse pression à 24 000 Pa pour éviter le rosissement du produit. ■ Qualité du produit : produit de parfaite qualité.

CYLINDRE CHAUFFANT

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Flocons de pommes de terre Produit pâteux Teneur en eau : de 80 % (initiale) à 5 % (finale).	Conduction (chauffage du produit par VES) T° fluide : 150 °C. Débit produit : 4 t/h. Consommation spécifique : 1 kWh/kg d'eau. Diminution à 0,2-0,3 kWh/kg d'eau avec CMV. Procédé classique de séchage de la purée de pommes de terre.	
Farine infantile instantanée Produit pâteux Teneur en eau initiale : 50 % à 64 %.	Conduction (chauffage du produit par VES) Débit produit : 0,5 t/h de produit fini. Mélange en phase humide de la totalité des composants du produit fini (farines, sucres, vitamines...) Gélatinisation des amidons et stérilisation de la bouillie par montée à plus de 120 °C sur un échangeur à surface raclée.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : gain énergétique sur la préparation des farines et sur le transport des produits. Simplicité du procédé. ■ Qualité du produit séché : meilleure qualité bactériologique du produit. Floconnage du produit sec.
Papier, carton Produit en bandes Teneur en eau : de 60 % (initiale) à 5 % (finale).	Conduction (chauffage du cylindre par VES) T° fluide : 100-180 °C. Débit produit : 15 t/h. Consommation spécifique : 1,06 - 1,07 kWh/kg d'eau. Pressage préalable. Procédé le plus répandu pour le séchage du papier.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : récupération énergétique sur les buées et CMV. Contraintes <ul style="list-style-type: none"> ■ Qualité du produit séché : irrégularité d'humidité dans la largeur de la feuille.
	Conduction (chauffage du cylindre par VES + IR en amont ou en aval du cylindre)	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • dopage de sécheries multi-cylindres (apport localisé d'énergie), • densité de puissance élevée avec des IR courts ou des IR moyens (jusqu'à 200 kW/m² d'encombrement au lieu de 20-40 kW/m² de contact pour un cylindre alimenté en vapeur).
Textile Produit en bande	Conduction (chauffage du cylindre par IR) Débit produit : 10-80 m/min. Temps de traitement : 2 à 5 s. Consommation spécifique : 1 à 1,5 kWh/kg d'eau.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • très faible inertie thermique, • flux conductif important (gain de 20 à 40 % en production), • facilité de mise en œuvre. ■ Qualité du produit séché : profil de séchage homogène dans le produit. Contraintes <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : prix du procédé.

Principes du procédé

Sécheur à chariots



1. Soufflage de l'air de séchage
2. Produit déposé sur des claies
3. Léchage air chaud
4. Extraction des buées

Le séchage comprend deux étapes :

1. 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.

2. 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.

Variantes

par rapport au procédé générique

► Sécheur chariot

Le produit, déposé ou non sur des claies, est disposé dans un chariot et peut être plus facilement retiré du séchoir par déplacement.



Exemple de sécheur étuve à double battant - © ELMETHERM

SÉCHEUR ÉTUVE / FOUR DE SÉCHAGE

Caractéristiques du procédé

On distingue le cas particulier du bois, certaines caractéristiques du procédé de séchage étant nettement différentes.

Type de produit	<p>Tout type de produits traités :</p> <ul style="list-style-type: none"> • produit liquide, • produit pâteux, • produit pulvérulent, granulaire, fibreux, • produit plan, en forme, en morceaux.
Mode de déplacement	Fonctionnement discontinu.
Température de fonctionnement	< 70-80 °C (possibilité d'avoir des températures de 120-150 °C dans le cas du bois).
Temps de séjour	<p>Il varie de 30 minutes à quelques heures, voire quelques jours.</p> <p>Dans le cas du séchage de bois, temps de séjour plus important, de 3,5 jours à 2-3 mois, la moyenne étant de 35 jours.</p>
Densité de chargement	<p>Très variable suivant le produit à traiter.</p> <p>Dans le cas du séchage de bois, capacité utile de 30 à 150 m², la moyenne étant de 45-50 m².</p>
Capacité de traitement horaire	<p>Très variable suivant le produit à traiter.</p> <p>Dans le cas du séchage de bois, 250 à 400 kg d'eau évaporée/m³/h.</p>
Pré-traitement	Pressage et centrifugation suivant le type de produit traité.
Équipements particuliers	<p>Fonctionnement sous vide (peu répandu) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • séchage de produits thermosensibles car la température d'évaporation est faible, • séchage en atmosphère inerte, • récupération de solvants, • traitement de produits plus épais et/ou plus difficiles à traiter dans le cas du séchage du bois.
Efficacité énergétique	<p>Circulation d'air en circuit fermé : le fluide de séchage est déshumidifié, préchauffé puis renvoyé dans la chambre de séchage.</p> <p>PAC pour récupérer la chaleur latente contenue dans les buées issues du produit.</p>

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

▲ Léchage air chaud (courant parallèle)

L'air vient lécher le produit à des vitesses de l'ordre de 1 m/s dans les étuves statiques à claies.

Il peut y avoir des problèmes de croûtage à la surface du produit.

C'est le procédé le plus répandu dans les sécheurs étuves.

 *Domaine d'application*

- Tous produits.

Utilisation peu courante ou en développement

▲ Traversée air chaud (courant croisé)

L'air arrive de façon perpendiculaire au produit et le traverse de façon à obtenir un séchage le plus homogène possible.

Dans le cas du séchage de bois, c'est le procédé le plus courant, les vitesses de l'air de séchage variant de 1,5 à 5 m/s.

 *Domaine d'application*

- Produit suffisamment poreux et peu épais.



Exemple de sécheur étuve - © ELMETHERM

Modélisation

▲ Transferts de masse et de chaleur

Transferts de masse et de chaleur dans un four hautes-fréquences type capacitif lors du séchage mixte AC/ HF de billes de verre et de béton cellulaire.

Innovation

- Mode de transfert et produit.

Intérêts

- Réduction du temps de séchage ;
- gain en productivité ;
- gain d'énergie.

▲ Variation des propriétés visco-élastiques

Variations des propriétés visco-élastiques de légumes (carottes, pommes de terre) en fonction du taux d'humidité lors d'un séchage par air chaud (température de l'ordre de 70 °C).

Innovation

- Produit.

Intérêts

- Mise en évidence de deux comportements visco-élastiques distincts des légumes, respectivement à forte et à basse teneur en eau.

▲ Influence des conditions opératoires

Influence des conditions opératoires (température et humidité relative de l'air) sur les changements de couleur de fruits et légumes lors d'un séchage par air chaud et sous vide (simulation et expérimentation).

Innovation

- Technologie.

Intérêts

- Étude de 3 paramètres de couleur : clarté, rougissement et jaunissement des produits ;

Nouveaux développements

- influence des conditions opératoires seulement sur la rougeur et le jaunissement des produits.

Applications des Hautes Fréquences

▲ Séchage par air chaud et HF de bobines de fil

Innovation

- Combinaison de 2 modes de transfert.

Intérêts

- Réduction du temps de séchage (30 à 90 min) ;
- réduction de la température de traitement ;
- meilleur compromis séchage/coût énergétique.

▲ Séchage sous vide et par HF de planches de bois vert

Innovation

- Combinaison de 2 modes de transfert.

SÉCHEUR ÉTUVE / FOUR DE SÉCHAGE

Nouveaux développements

Application des Micro-Ondes

► Étude des gradients d'humidité

Étude des gradients d'humidité lors d'un séchage par MO dans des aliments (pommes de terre, igname) découpés sous forme sphérique.

Innovation

- Technologie, mode de transfert.

► Séchage par MO de produits isolants (pièces de forme), généralement fibreux

Innovation

- Mode de transfert.

► Séchage combiné par léchage air chaud et MO de plaques de pin maritime

Innovation

- Mode de transfert.

Intérêts

- Apport volumique d'énergie ;
- réduction du temps de séchage.

Contraintes

- Applicable à de faibles épaisseurs de plaques.

Applications du vide

► Séchage de bois par alternance vide et convection

Innovation

- Combinaison de 2 modes de transfert.

Intérêts

- Réduction du temps de séchage ;
- meilleure qualité finale du bois.

► Séchage sous vide et par VES de planches de chêne

Innovation

- Combinaison de 2 modes de transfert.

Intérêts

- Pas de décoloration du bois pour des planches de faible épaisseur (27 mm) ;
- réduction du temps de séchage de 2 à 5 par rapport à un temps de séchage air chaud.

Contraintes

- Dégradation du produit pour des planches plus épaisses (50 mm).

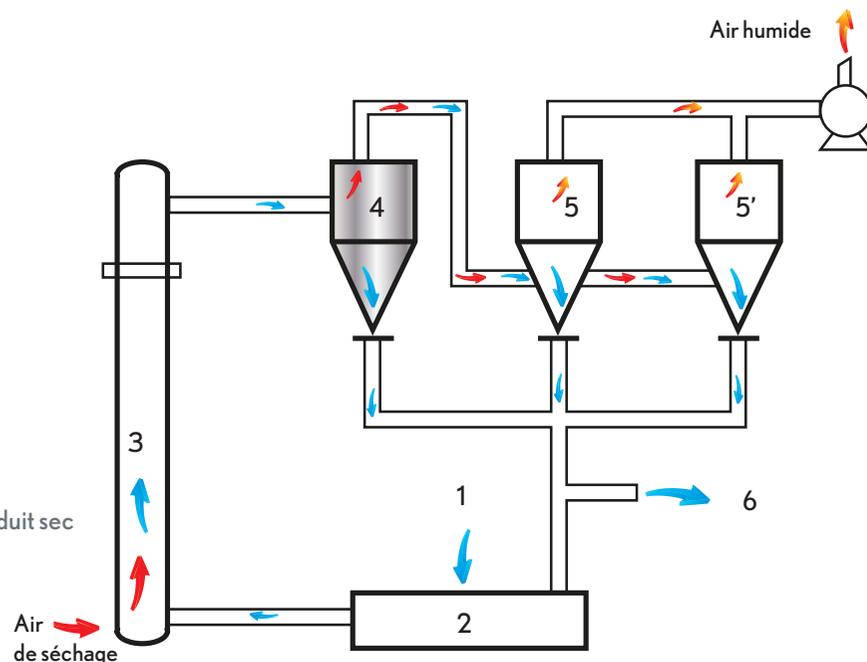
Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Boues d'hydroxydes métalliques Teneur en eau : de 70 % (initiale) à 30 % (finale). Produit pâteux	Traversée air chaud Consommation spécifique : 0,4 kWh/kg d'eau.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : PAC pour la récupération de la chaleur latente de la vapeur d'eau issue du produit et le réchauffage de l'air de séchage. ■ Qualité du produit séché : humidité finale de 20 à 30 % pour éviter les problèmes de poussière. ■ Contraintes d'environnement : réduction des tonnages et donc des coûts de transport et de mise en décharge.
Carreaux de plâtre Teneur en eau : de 45 % (initiale) à 5 % (finale). Produit en forme	Léchage air chaud T° fluide : 100 °C. Débit produit : 2 t/h. Temps de séjour : 30 h. Consommation spécifique : 1 kWh/kg d'eau.	
Bois (résineux) Teneur en eau : de 44 % (initiale) à 12 % (finale). Produit en forme	Léchage air chaud T° fluide : 70 °C. Temps de séjour : 3 j pour une capacité utile de 50 m. Débit produit : 0,6 t/h. Consommation spécifique : de 1,5 à 1,8 kWh/kg d'eau. Équipement particulier : PAC. <ul style="list-style-type: none"> • T° fluide : 50 °C, • temps de séjour : 9 j, • volume utile de bois : 60 m³, • débit produit : 0,2 t/h. 	
Feuilles de placage en bois Produit en forme	HF Encore rare dans l'industrie. Électrodes planes le plus souvent. Puissance HF installée : 1 à 50 kW. Débit produit : 5 à 100 pièces/h. Temps de séjour : 5 s à 10 min.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : gain en productivité. ■ Qualité du produit séché : meilleure qualité finale du produit.
Bobines de textile Teneur en eau : de 60 % (initiale) à 7-15 % (finale). Produit en forme	HF Injection d'air comprimé pour passer d'une teneur en eau de 200 à 60 % (préséchage préalable).	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • gains énergétiques, • opérations de manutention réduites (pas de déroulement / enroulement du tissu). ■ Qualité du produit séché : pas de sur-séchage de la matière (autorégulation des HF).

SÉCHEUR FLASH

Principes du procédé

Sécheur flash



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

Le séchage comprend 3 étapes distinctes :

1. 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.

2. 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.

3. Séparation du produit sec de l'air rejeté

En haut de la colonne, l'air et la matière sèche sont séparés par passage dans des cyclones.

À la sortie des cyclones, l'air peut être rejeté ou recyclé après filtration ou non.

Variantes

par rapport au procédé générique

- **Combinaison sécheur flash et lit fluidisé**
Température du fluide plus faible dans le sécheur flash, amélioration de la qualité du produit final (employé surtout pour les polymères, tels que les polyéthylènes).
- **Combinaison sécheur flash et tambour rotatif**



Exemple de sécheur flash - © COMESSA

Caractéristiques du procédé

Type de produit	<p>Produit pâteux (sous réserve du type d'alimentation).</p> <p>Produit pulvérulent, granulaire (produit fin, homogène et pouvant être transporté pneumatiquement).</p>
Actions mécaniques sur le produit	<p>Brassage intense du produit.</p> <p>Attrition et production de fines.</p>
Mode de déplacement	<p>Entraînement par un fluide $V_{\text{fluide}} = 15 \text{ à } 30 \text{ m/s}$ (pour des hauteurs de colonne de 5 à 50 m).</p> <p>Vitesse minimale de fluide à respecter pour éviter des phénomènes de collage sur la colonne.</p>
Température de fonctionnement	<p>Entrée : 100 à 350 °C (650 °C maxi).</p> <p>Sortie : 70 à 120 C.</p>
Temps de séjour	<p>0,5 à 3,5 s (1 s en général).</p>
Débit produit	<p>5 à 30 t/h.</p>
Capacité de traitement horaire	<p>5 à 100 kg d'eau/h/m² (dépend de la taille de la particule).</p>
Pré-traitement	<p>Mélange de produit sec et produit humide pour éviter le collage de particules sur les parois.</p> <p>Broyage : on injecte le produit et de l'air chaud dans le broyeur.</p>
Équipements particuliers	<p>Dépoussiérage de l'air rejeté : cyclone.</p> <p>Réduction des risques d'incendie ou d'explosion du produit : sécheur flash en circuit fermé et sous atmosphère inerte (par exemple, pour le polypropylène). Ce type d'installation est peu répandu.</p>

SÉCHEUR FLASH

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

▸ Léchage air chaud (courant parallèle)

Les particules sont mises en entraînement par passage d'un fluide chaud qui circule à co-courant.



Domaine d'application

- Produit fin et homogène.

Utilisation peu courante ou en développement

▸ Vapeur d'eau surchauffée (VES)

L'utilisation de la VES, en remplacement de l'air chaud, peut convenir dans un sécheur flash pour des produits qui ne sont pas thermosensibles.

Intérêts

- Économie d'énergie (0,6-0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique) ;
- 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 volatils et/ou des mauvaises odeurs ;
- élimination des risques de feu et d'explosion ;
- amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme, solidité, stérilisation, digestibilité, absence de durcissement superficiel pour les produits visqueux ou collants...).

Contraintes

- Difficulté à traiter certains produits thermosensibles ;
- coût plus élevé de l'équipement (nécessité d'être conforme aux règles de sécurité pour les systèmes HP, dispositifs d'entrée et de sortie du produit étanches à la vapeur).



Domaine d'application

- Produit fin et homogène.

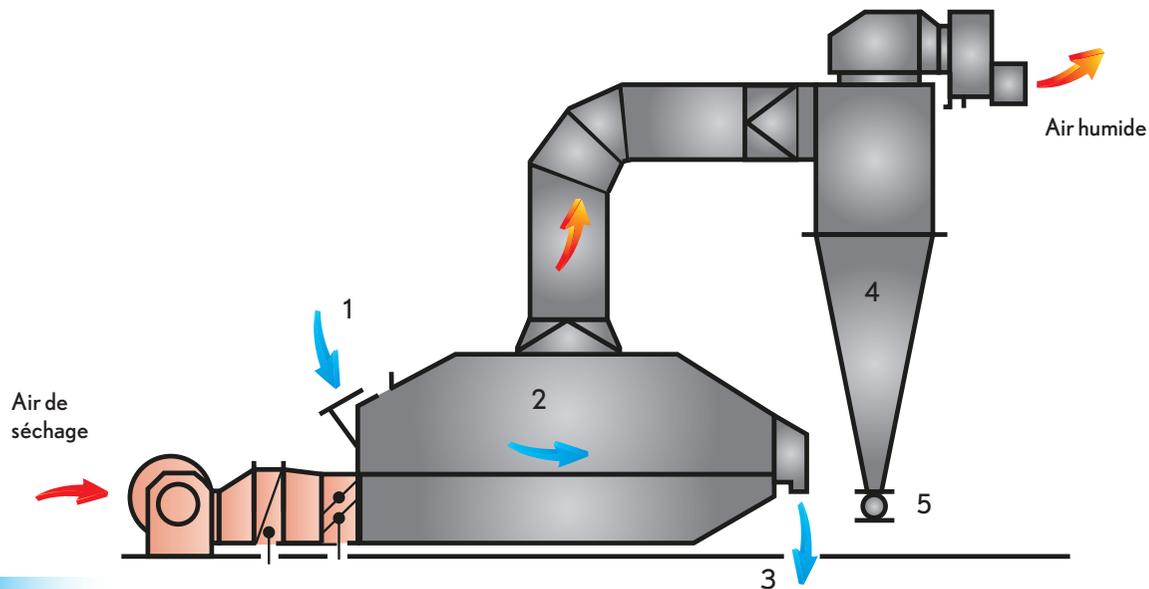
Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
<p>Poudre d'amidon Teneur en eau : de 40-45 % (initiale) à 8-10 % (finale). Produit pulvérulent et granulaire</p>	<p>Léchage air chaud T° fluide : 160 à 230 °C. Consommation spécifique : 1,7-1,8 kWh/kg d'eau.</p>	
<p>Farine Teneur en eau : de 15 % (initiale) à 12 % (finale). Produit pulvérulent et granulaire</p>	<p>Léchage air chaud T° fluide : • entrée : 140 °C ; • sortie : 45-48 °C. Consommation spécifique : 0,9 kWh/kg d'eau.</p>	
<p>Protéines Teneur en eau : de 50-60 % (initiale) à 8 % (finale). Produit pulvérulent et granulaire</p>	<p>Léchage air chaud T° fluide : 140 °C. Consommation spécifique : 1,7-1,8 kWh/kg d'eau.</p>	
<p>Particules de bois Teneur en eau : de 50 % (initiale) à 10 % (finale). Produit pulvérulent et granulaire</p>	<p>Léchage air chaud T° fluide : • entrée : 160 °C ; • sortie : 75 °C. Débit produit : 26 t/h. Consommation spécifique : 1,2 kWh/kg d'eau.</p>	<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficacité du procédé : consommation spécifique plus faible que dans un autre sécheur. <p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Contraintes d'environnement : risque d'inflammation du produit à 160 °C.

LIT FLUIDISÉ

Principes du procédé

Lit fluidisé



1. Entrée du produit humide
2. Chambre de fluidisation
3. Sortie du produit
4. Cyclone de dépoussiérage
5. Sortie poussières

Un sécheur à lit fluidisé comprend 3 étapes distinctes :

1. Traitement de l'air

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

2. Fluidisation

L'air, soufflé au travers d'une plaque de diffusion, permet la fluidisation du lit de particules (c'est-à-dire la mise en mouvement du lit), qui offrent alors une sur-

face 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 process.

3. Séparation du produit sec et de l'air de séchage

Le produit et l'air de séchage sont séparés dans le cyclone de dépoussiérage.



Exemple de sécheur par lit fluidisé - © GEA, GEA dryer

Variantes

par rapport au procédé générique

► Lit vibré

L'agitation du produit est en partie assurée par la vibration mécanique de l'appareil. Il est utilisé dans le cas de produit à granulométrie très étalée, à résistance mécanique faible et ayant tendance à coller. La vitesse du fluide de séchage est plus faible.

► Lit à échangeurs immergés

Des échangeurs à plaques ou à tubes sont immergés dans le lit fluidisé. Il est utilisé dans le cas de produit thermosensible, à granulométrie fine. La couche de produit à fluidiser est plus importante (60 à 180 cm).

► Lit en fontaine

Il n'y a pas de grille de distribution du gaz. Le produit circule sous forme d'un jet et retombe de part et d'autre de ce jet : d'où un mouvement cyclique des particules qui engendre la granulation du produit initial. Il est utilisé pour des produits agricoles ou de diamètre de l'ordre de 5 mm.

► Granulation

Le produit humide est pulvérisé dans une couche fluidisée de granules déjà formés (obtention de granules bien définis et non poussiéreux).

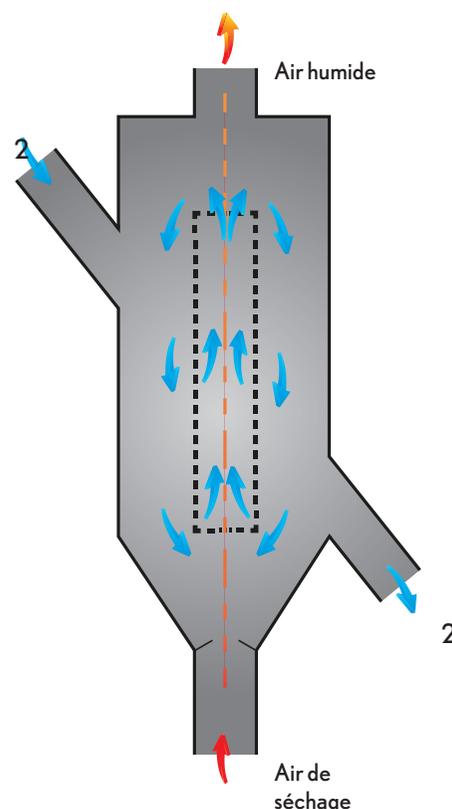
► Plug flow

Les particules fluidisées sont forcées à circuler le long d'un écran en forme de spirale, du centre vers la périphérie de la chambre. On obtient une humidité finale très faible sans surchauffe de la particule et le temps de séjour est contrôlé.

► Lit fluidisé à agitateurs mécaniques (situés à la base de la chambre de séchage)

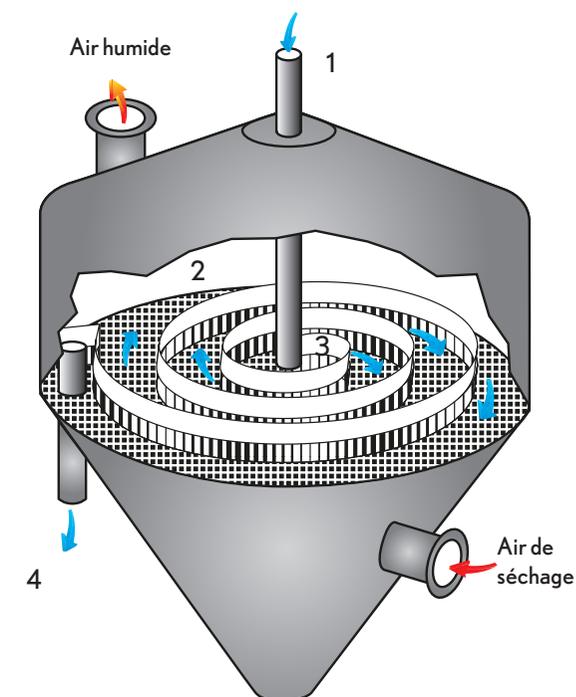
Traitement de produits pâteux ou de gâteaux de filtre et obtention d'une poudre finale homogène et fine en une seule opération.

Lit en fontaine



1. Entrée du produit humide
2. Sortie du produit sec

Plug flow



1. Entrée du produit humide
2. Chambre de fluidisation
3. Écran en forme de spirale
4. Sortie du produit sec

LIT FLUIDISÉ

Caractéristiques du procédé

Type de produit	Produit très divers à granulométrie homogène et non collants : <ul style="list-style-type: none"> • produits liquides (sur granules déjà formés), • produits pâteux (sous réserve du type d'alimentation), • produits pulvérulents, granulaires, fibreux, • produits de raffinage.
Action mécanique sur le produit	Brassage des particules.
Mode de déplacement	Entraînement par un fluide : $V_{\text{fluide}} = 0,2 \text{ à } 3 \text{ m/s}$ pour un diamètre variant de 100 à 5 000 μm . Seuil et plafond en matière de vitesse d'entraînement des particules pour un séchage homogène. Fonctionnement continu. Déplacement par vibration de la sole.
Température de fonctionnement	50 à 200 °C en général (400 °C maxi).
Temps de séjour	2 à 60 min.
Débit produit	5 à 50 t/h en général (100 t/h maxi).
Capacité de traitement horaire	30 kg d'eau/h/m ² à 200 kg d'eau/h/m ² (par m ² de sole).
Pré-traitement	Mélange produit humide et produit sec. Granulation du produit humide. Utilisation de filtres presse sous vide.
Equipements particuliers	Dépoussiérage de l'air humide : cyclone.
Efficacité thermique	Recyclage thermique de la vapeur issue du produit : <ul style="list-style-type: none"> • réchauffage de produit, production d'eau chaude, • CMV lorsque le fluide de chauffage est de la vapeur d'eau surchauffée, • recyclage thermique des calories issues de l'air de séchage, • utilisation d'une PAC pour le chauffage des gaz.
Sécurité de l'installation	Réduction des risques d'incendie ou d'explosion du produit et de l'émission de vapeurs toxiques ou malodorantes : <ul style="list-style-type: none"> • Lit fluidisé en circuit fermé (circulation d'un fluide de séchage inerte) ; • récupération de solvants.

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

▲ Léchage air chaud (courant parallèle)

L'air soufflé, au travers d'une plaque de diffusion dans la majorité des cas, arrive perpendiculairement au produit et le traverse, ce qui a pour effet de multiplier la surface d'échange et d'assurer le brassage du mélange particules-fluide.

La circulation de fluide se fait à co-courant, en dehors du cas particulier du lit en fontaine.

Utilisation peu courante ou en développement

▲ Vapeur d'eau surchauffée (VES)

L'utilisation de la VES, en remplacement de l'air chaud, peut potentiellement convenir lors d'un séchage par lit fluidisé.

Intérêts

- Économie d'énergie (0,6 - 0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique);
- possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit au niveau du séchoir lui-même (CMV) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières...);
- récupération de solvants volatils et/ou des mauvaises odeurs;
- élimination des risques de feu et d'explosion;
- amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme, solidité, stérilisation, digestibilité, absence de durcissement superficiel pour les produits visqueux ou collants...).

Contraintes

- Difficulté à traiter certains produits thermosensibles;
- coût plus élevé de l'équipement (nécessité d'être conforme aux règles de sécurité pour les systèmes HP, dispositifs d'entrée et de sortie du produit étanches à la vapeur).

 Domaine d'application

- Produit homogène et non collant.

Nouveaux développements

Pré-traitement du produit

▲ Mélange de particules fines et de grosse taille dans le produit initial

Innovation

- Produit.

Intérêts

- Réduction de l'agglomération des fines particules ayant un taux d'humidité initial élevé;
- réduction des chocs entre les grosses particules (vitesse de gaz inférieure à la vitesse de fluidisation minimale pour certaines grosses particules).

Application des Micro-Ondes (MO)

▲ Comparaison des cinétiques de séchage du poivre lors d'un séchage par lit fluidisé et par lit fluidisé + MO

Innovation

- Combinaison de 2 modes de transferts.

Intérêts

- Réduction du temps de séchage du poivre en lit fluidisé + MO, surtout à basse température de l'air (~ 40 °C).

LIT FLUIDISÉ

Exemples d'applications et de produits traités

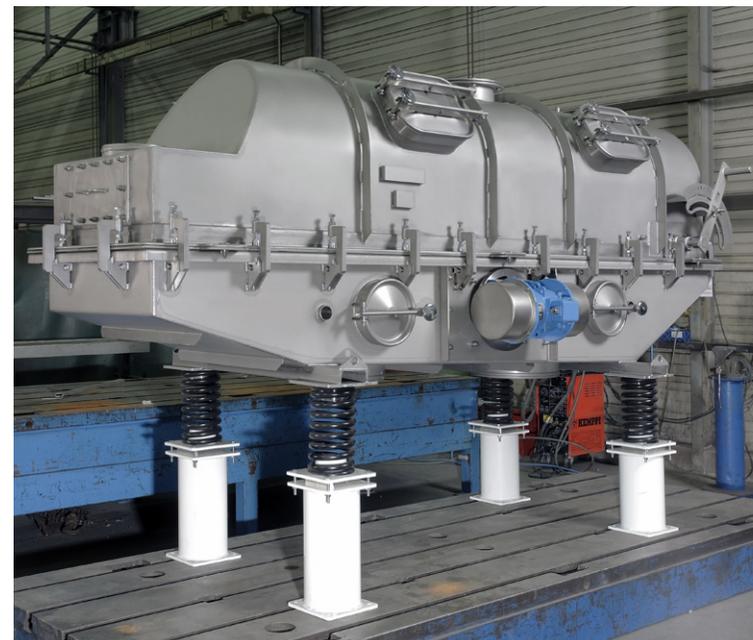
PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Sulfate de zinc Teneur en eau initiale : 23 %. Produit liquide (granulation)	Léchage air chaud T° fluide : • entrée : 550 °C • sortie : 120 °C. Vfluide : 2,3 m/s. Débit produit : 2,6 t/h.	Intérêts ■ Qualité du produit séché : obtention de granulés de diamètre 1,5-3 mm.
Colorants Teneur en eau : de 31 % (initiale) à 7 % (finale). Produit liquide (granulation)	Léchage air chaud T° fluide : 200 °C. Vitesse de fluide : 1,4 m/s.	
Levures Teneur en eau : de 70 % (initiale) à 5 % (finale). Produit pâteux	Léchage air chaud T° fluide : 50-60 °C. Débit produit : 5-10 t/h. Centrifugation préalable.	
Boues Teneur en eau : de 65 % (initiale) à 40 % (finale). Produit pâteux	VES Lit fluidisé à échangeurs immergés vapeur HP 31,10 ⁵ Pa. T° fluide : 235 °C. Consommation spécifique : 0,8 kWh/kg d'eau. Pressage sur filtres presse. Granulation par mélange avec du produit sec.	Intérêts ■ Efficacité du procédé : consommation énergétique plus faible et possibilité de récupération énergétique. ■ Qualité du produit séché : stérilisation microbologique de la boue séchée. ■ Contraintes d'environnement : odeurs piégées dans l'eau obtenue par condensation de la vapeur issue du produit.
Sel marin Teneur en eau : de 2 % (initiale) à 0,03 % (finale). Produit poudreux	Léchage air chaud T° fluide : 75 à 80 °C. Consommation énergétique : 0,35 kWh/kg d'eau.	
Chlorate de sodium (NaClO₃) Teneur en eau : de 4 % (initiale) à 0,02 % (finale). Produit poudreux	Léchage air chaud T° fluide : 160 °C. Consommation énergétique : 1,7 kWh/kg d'eau.	Contraintes ■ Qualité du produit séché : adjonction d'agents anti-agglomérants. ■ Contraintes d'environnement : produit explosif, traitement à basse température (100 °C en sortie).

Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Charbon broyé Teneur en eau : de 50 % (initiale) à 8 % (finale). Produit poudreux	VES T° fluide : <ul style="list-style-type: none"> • entrée : 300 °C • sortie : 150 °C. Mélange préalable du charbon en poudre avec un liant et granulation du produit. Séchage complémentaire et refroidissement sous vide (teneur en eau finale de 2 %).	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : recyclage de la vapeur issue du produit. ■ Contraintes d'environnement : élimination du risque d'explosion de poussières combustibles.
Caséine Teneur en eau : de 50 % (initiale) à 12 % (finale). Produit granulaire	Léchage air chaud T° fluide : 105 °C. Débit produit : 0,5 t/h. Consommation énergétique : 1,0 kWh/kg d'eau.	



Exemple de lit fluidisé à échangeurs - © COMESSA

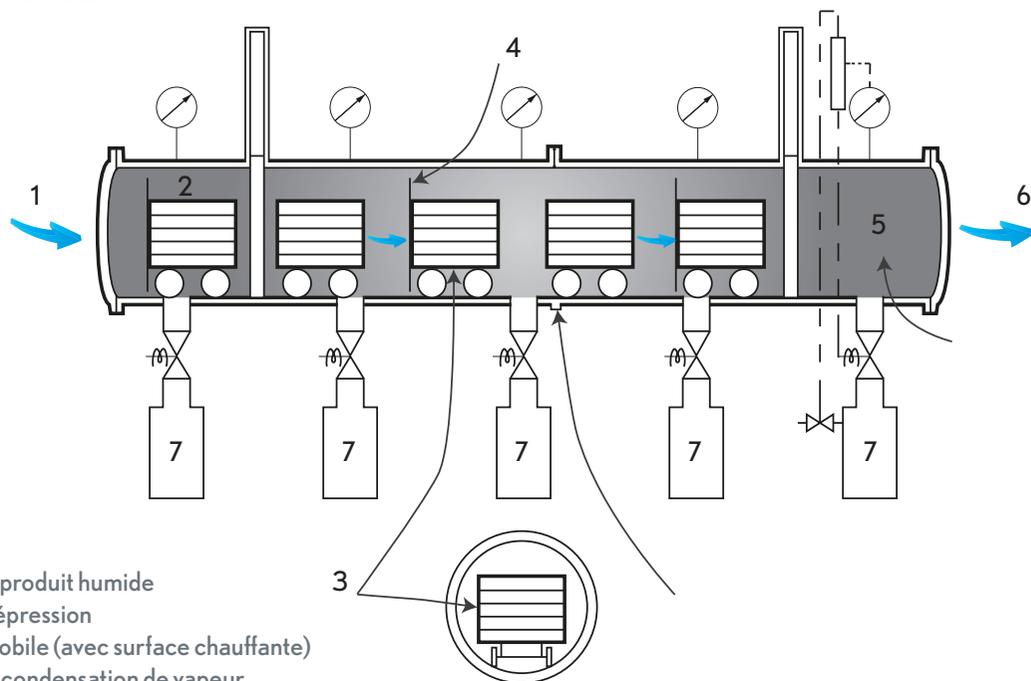


Exemple de lit fluidisé vibré - © COMESSA

LYOPHILISATION

Principes du procédé

Sécheur 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. Sortie condensats

Ce procédé combine l'action du froid et du vide en provoquant la sublimation de la glace. Ce procédé est généralement recommandé pour des produits à forte valeur ajoutée (pharmaceutiques) ou pour des produits thermosensibles (agroalimentaires) en raison des coûts fixes et des coûts de fonctionnement des installations.

Le produit est le plus souvent déposé sur des claies.

La lyophilisation est un procédé de séchage en 3 temps :

1. 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.

2. 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.

3. Désorption finale de l'eau liée

Il s'agit d'extraire de l'eau adsorbée ou emprisonnée dans les microcapillaires et qui n'a pas été congelée.



Exemple de sécheur par lyophilisation
© GEA, GEA dryer

Variantes

par rapport au procédé générique

➤ Sécheurs à chariots

Capacité de traitement plus importante avec un sécheur à chariots.

➤ Pulvérisation + lyophilisation

Cette variante est adaptée pour des produits tels que le café, le thé et le lait, mais reste rare.

Caractéristiques du procédé

La lyophilisation permet d'obtenir des produits finaux de qualité :

- conservation de la forme et de l'aspect des produits traités ;
- réhydratation instantanée ;
- récupération des qualités pharmaceutiques, biologiques et métaboliques après réhydratation ;
- bonne rétention des arômes ;
- conservation longue sans additif.

Type de produit	Tout type de produits : <ul style="list-style-type: none"> • produit liquide (en couche de 1,5 à 3 cm), • produit pâteux, • produit puvérulent, granulaire, fibreux, • produit plan, en forme, en morceaux (les dimensions de produit varient de 1 mm à 1 cm, plusieurs cm dans certains cas particuliers).
Mode de déplacement	Fonctionnement discontinu ou pseudo-continu avec un sas de chargement et de déchargement.
Température du produit	Couche froide : -10 à -40 °C. Température maximale de surface : 30 à 90 °C.
Pression de la chambre de séchage	10 à 300 Pa.
Temps de séjour	10 à 72 h (en général, 30 à 40 h).
Densité de chargement	5 à 18 kg/m ² .
Capacité de traitement horaire	0,1 à 0,5 kg d'eau/h/m ² .
Pré-traitement	Élimination préalable d'eau par cuisson pour les produits solides, par concentration pour les produits liquides. Broyage, découpe et tri du produit initial.

LYOPHILISATION

Mode de transfert de la chaleur

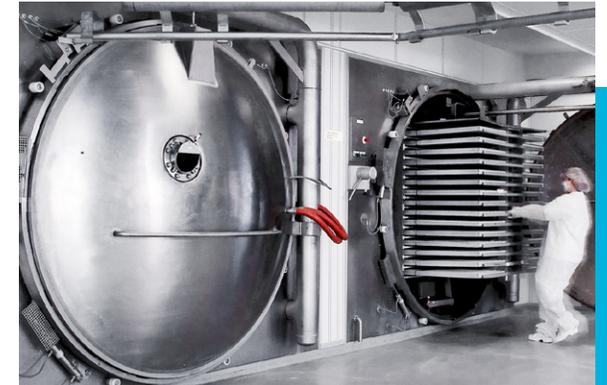
Utilisation courante

► Conduction ou radiation

Le produit est placé dans des chariots ou sur des plateaux à surface chauffante.

 *Domaine d'application*

- Tous produits.



Exemple de sécheur par lyophilisation - © GEA, GEA dryer

Nouveaux développements

Influence des conditions de fonctionnement

► Lyophilisation à pression atmosphérique de bactéries lactiques, de viandes, de fruits et légumes

Innovation

- Technologie.

Contraintes

- Durée de cycle plus grande.

► Étude des conditions opératoires optimales

Étude des conditions opératoires optimales (pression de la chambre et température des plaques chauffantes) lors de la lyophilisation du lait écrémé (pendant les phases de sublimation et désorption).

Innovation

- Technologie.

Intérêts

- Réduction du temps de séjour du produit de 22 h à 12,5 h environ.

► Influence des conditions opératoires

Influence des conditions opératoires (pression, température des plaques chauffantes) sur la durée du cycle de lyophilisation et la qualité des fraises (couleur, texture, apparence, taux de réhydratation).

Innovation

- Technologie.

Intérêts

- Influence des conditions de fonctionnement sur la couleur et l'apparence des fraises.

Applications des Micro-Ondes (MO)

► Séchage par Micro-Ondes de lait, champignons et pommes de terre

Innovation

- Mode de transfert.

Intérêts

- Temps de séchage plus rapide.

Contraintes

- Coût élevé des MO (1 kJ d'énergie coûte 10 à 20 fois plus cher lorsqu'il est fourni par MO plutôt que par de la vapeur) ;
- difficulté à contrôler le procédé (propriétés diélectriques de l'eau et de la glace différentes) et risques d'arcs électriques.

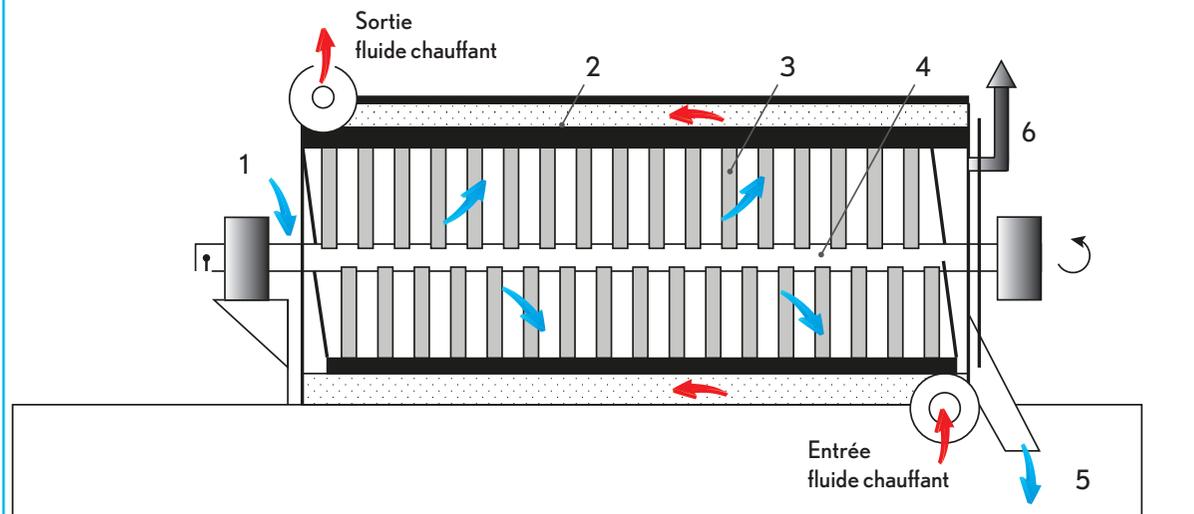
Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
<p>Champignons (en lamelles de 3 mm)</p> <p>Teneur en eau finale : 5 % en base sèche.</p> <p>Produit en morceaux</p>	<p>Conduction (sous vide)</p> <p>T° congélation : - 40 °C.</p> <p>T° plaques chauffantes : 90 °C.</p> <p>Temps de séjour : 30 h.</p> <p>Densité de chargement : 15 kg/m².</p> <p>Consommation spécifique : 1,8 kWh/kg d'eau.</p>	
<p>Morceaux de fraise (quarts de fruit déposés en couches de 3,5 cm sur des claies)</p> <p>Teneur en eau finale : 11 % en base sèche.</p> <p>Produit en morceaux</p>	<p>Conduction (sous vide)</p> <p>T° congélation : - 40 °C.</p> <p>Pression de fonctionnement : 30 Pa.</p> <p>T° plaques chauffantes : 50 °C.</p> <p>Temps de séjour : 60 h.</p> <p>Densité de chargement : 18 kg/m².</p> <p>Consommation spécifique : 1,8 kWh/kg d'eau.</p>	<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : 99 % de l'eau contenue dans le produit est éliminée. ■ Qualité du produit séché : conservation de la forme, du goût, de la couleur et de la texture du produit. ■ Qualité du produit séché : réhydratation immédiate du produit. <p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Coûts d'investissement et de fonctionnement élevés.

SÉCHEUR À PALETTES / VIS

Principes du procédé

Sécheur à palettes



1. Entrée du produit humide
2. Double enveloppe
3. Palette
4. Arbre rotatif
5. Sortie du produit sec
6. Extraction buées

Le procédé de séchage comprend 2 étapes distinctes :

1. Alimentation et transport du produit

Le sécheur à palettes est constitué d'un corps cylindrique 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.

2. Transfert de chaleur et séchage du produit

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.

Variantes

par rapport au procédé générique

➤ Sécheur vis

L'arbre muni de palettes est remplacé par une vis en rotation. Les modes de transfert de la chaleur au produit à sécher restent identiques à ceux d'un sécheur à palettes.

➤ Sécheur à double arbres

Il est constitué de deux arbres parallèles dont les disques radiaux s'enchevêtrent lors de leurs rotations. L'effet de cisaillement est intense, il convient donc bien aux produits pâteux séchés en continu.

Caractéristiques du procédé

Type de produit	<p>État initial :</p> <ul style="list-style-type: none"> • produits pâteux, • produit pulvérulent, granulaire (traitement de substances hautement visqueuses, collantes et incrustantes et possibilité de sécher des produits nocifs ou inflammables). <p>État final :</p> <ul style="list-style-type: none"> • produits pulvérulents granulaires de qualité uniforme.
Action mécanique sur le produit	Mélange et brassage intense du produit, cisaillement important avec des vis et modéré avec des pales.
Mode de déplacement	Continu ou discontinu. Dans le sécheur continu, toutes les pales ont le même profil pour diriger le produit d'une extrémité à l'autre. La conception du sécheur discontinu (à palettes) nécessite de faire faire des allers-retours au produit en maximisant le temps de contact avec les parois chauffantes. Par conséquent, les pales n'ont pas toutes le même profil.
Température de fonctionnement	Vapeur de 120 à 130 °C (200 °C maxi). Fluide thermique de 280 à 350 °C.
Temps de séjour	10 min à 10 h.
Volume utile de produit entrant	0,1 à 20 m ³ .
Capacité de traitement horaire	10-15 kg d'eau/h/m ² de surface de contact.
Pré-traitement	Émiettage, granulation des produits pâteux en général. Mélange de produit sec et de produit humide dans certains cas particuliers pour diminuer les phénomènes de collage.
Équipements particuliers	<p>Fonctionnement sous vide :</p> <ul style="list-style-type: none"> • séchage de produits thermosensibles ce qui permet d'abaisser le point d'ébullition du solvant, • séchage en atmosphère inerte, • récupération de solvants. <p>Dispositifs particuliers pour le chargement et le déchargement du produit dans des sécheurs sous vide et en fonctionnement continu (sas entrée - sortie du produit). Émoteurs pour les produits solides qui ont tendance à s'agglomérer. Existence d'arbres à contre-pales, de palettes à surfaces lisses pour améliorer la nettoyabilité et la propreté des palettes. Pièges ou condenseurs pour la récupération de solvants. Filtre à poussières, décolmatage au niveau de l'évacuation des vapeurs. Nettoyage en place (NEP), pour les produits nocifs/toxiques en particulier.</p>

SÉCHEUR À PALETTES / VIS

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

► Conduction

L'apport de chaleur au produit se fait par conduction au travers de l'enveloppe cylindrique et par l'intermédiaire des pelles si elles sont parcourues par un fluide thermique.



Domaine d'application

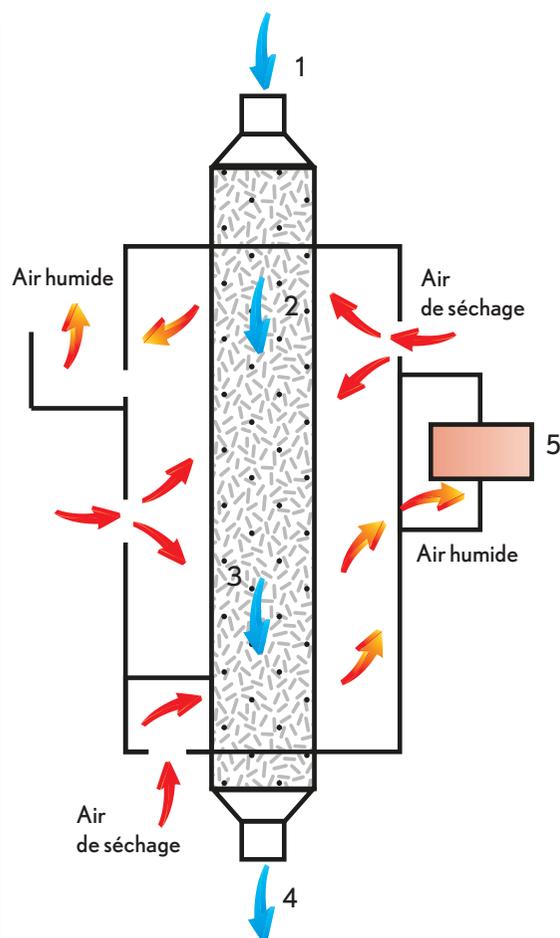
- Produits pâteux, pulvérulents et granulaires.

Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Boues de peinture hydrosoluble (poudre de polyuréthane chargée de peinture) Produit pâteux Teneur en eau : 70 % (initiale) à 3,2 % (finale).	Conduction (sous vide) Température de fonctionnement : 80 °C. Temps de séjour : 1 h 18 min. Centrifugation préalable.	Intérêt <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : mélange et brassage intense du produit.
Boues de peinture organique (poudre de polyuréthane chargée de peinture) Produit pâteux Teneur en eau : 70 % (initiale) à 2,2 % (finale).	Conduction (sous vide) Température de fonctionnement : 150 °C. Temps de séjour : 45 min. Centrifugation préalable.	Intérêt <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • mélange et brassage intense du produit, • réduction du temps de séchage du fait de la température de fonctionnement plus élevée.

Principes du procédé

Sécheur à silo



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

Le séchage comprend quatre étapes :

1. 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.

2. Transfert de chaleur et séchage du grain

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.

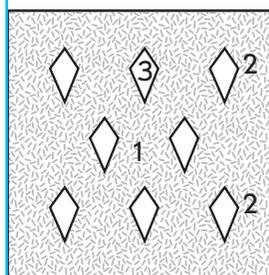
3. Refroidissement et extraction du grain

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

4. Recyclage thermique de l'air

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.

Zoom sécheur à silo



1. Masse de grain
2. Dièdres
3. Distribution de l'air de séchage dans les dièdres

Variantes

par rapport au procédé générique

► Dryeration ou refroidissement lent différé

Ce procédé est appliqué essentiellement au séchage du maïs. Le refroidissement du grain n'est pas effectué dans le sécheur mais soit dans plusieurs cellules alimentées par lots successifs (dryeration discontinue), soit dans une seule cellule spécialement aménagée (dryeration continue). Dans les deux cas, on laisse tout d'abord ressuyer ou reposer le grain de 8 à 12 heures avant de le ventiler. La période de ressuyage et de refroidissement lent en dryeration atténue les chocs thermiques à la surface du grain, d'où une amélioration de la qualité du grain. De plus, le sécheur sert uniquement au séchage du grain et ramène l'humidité du grain à 18-19 % au lieu des 15 % atteints traditionnellement. On augmente ainsi la capacité de séchage à l'entrée du sécheur.

► Sécheurs fermiers

- Sécheurs statiques : le grain, disposé en couches de 30-50 cm sur un faux-fond grillagé, est séché puis refroidi en arrêtant le système de chauffage.
- Sécheur à recirculation de grains : le fonctionnement est identique à celui du sécheur statique sauf que le grain est brassé par l'intermédiaire d'une vis ou d'une chaîne à godets.
- Sécheurs verticaux continus : le grain descend lentement tout en étant traversé par de l'air à une seule température (le séchage et le refroidissement du grain sont donc réalisés séparément). Le grain est recyclé dans le sécheur jusqu'à obtention de l'humidité finale souhaitée.

SÉCHEUR SILO

Caractéristiques du procédé

Type de produit	Produits granulaires.
Mode de déplacement	Fonctionnement continu ou discontinu.
Température de fonctionnement	30 à 90 °C en général (140 °C maxi).
Temps de séjour	4-9 h à 3-4 j.
Débit produit	Sécheurs dont les capacités varient de 400 à 12 000 «points/heure» : 2 à 60 t/h de grain humide.
Capacité de traitement horaire	500 à 15 000 kg d'eau/h.
Prétraitement	Prénettoyage du grain humide pour éliminer des déchets végétaux (économie d'énergie et de temps). Préstockage du grain humide (en cellule non ventilée à l'abri de l'air ou en cellule ventilée).
Équipements particuliers	Laveurs d'air pour le dépoussiérage des rejets.
Efficacité énergétique	Recyclage intégral : on récupère l'air de la partie inférieure du sécheur (zone de refroidissement et de séchage). Il est réchauffé puis réinjecté dans la partie supérieure du sécheur. Recyclage partiel : l'air de la partie inférieure du sécheur est recyclé partiellement en sortie du générateur d'air chaud. Présence de moteurs à vitesse variable et de sondes hygrométriques permettant d'ajuster le taux de recyclage et par conséquent d'atteindre des rendements jusqu'à 80 %.
Sécurité de l'installation	Filtration de l'air pour éviter le contact de particules incandescentes végétales et métalliques avec la masse de grain. Régulation optimale des températures et du débit d'air pour diminuer les surchauffes locales de température dans le sécheur et éviter les risques d'incendie. Nettoyage régulier en raison de l'encrassement très important des buses de distribution d'air dans le silo.

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

▾ Traversée air chaud (courant croisé)

L'air arrive de façon perpendiculaire au produit et le traverse de façon à obtenir un séchage le plus homogène possible.

Un important travail a été effectué sur les gaines et buses de distribution de l'air au niveau du produit permettant d'augmenter l'efficacité énergétique du procédé (échange air/produit) et donc d'améliorer les rendements de production.

 *Domaine d'application*

- Produit granulaire.

Nouveaux développements

Modélisation

▾ Analyse des gradients d'humidité

Analyse des gradients d'humidité lors du séchage de riz à basse et haute température (10 à 50 °C), à partir d'un modèle de séchage en couches minces.

Innovation

- Qualité produit.

Intérêts

- Amélioration de la qualité du riz lors de son stockage ventilé à basse température (pour empêcher la prolifération d'insectes).

▾ Étude sur la forme et la disposition des dièdres

Innovation

- Technologie.

Intérêts

- Amélioration de la qualité du grain, par une meilleure homogénéité de l'humidité finale du grain.

Applications des énergies renouvelables

▾ Séchage à la biomasse (paille)

Innovation

- Mode de transfert.

Intérêts

- Rentabilité économique.

Contraintes

- Difficultés d'exploitation dues à la nécessité de stocker la paille ;
- surveillance accrue malgré l'automatisation du chargement.

▾ Séchage solaire

Séchage à basse température de grains mis en cellule ou avec une ventilation séchante.

Innovation

- Mode de transfert.

Contraintes

- Séchage lent et faible débit de grain sec ;
- séchage de produits peu humides à la récolte.



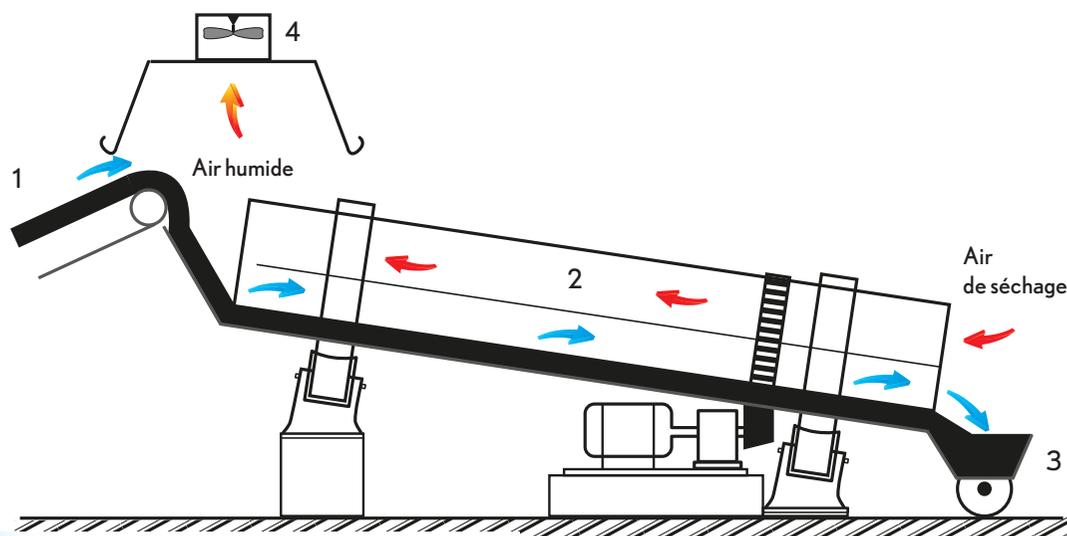
Exemple de sécheur silo • Franco Nadalin/Shutterstock.com

SÉCHEUR SILO

Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
<p>Maïs</p> <p>Teneur en eau : de 35 % (initiale) à 15 % (finale).</p> <p>Produit granulaire</p>	<p>Traversée air chaud</p> <p>T° fluide : 100 à 110 °C.</p> <p>Débit produit : quelques tonnes à 20 t/h.</p> <p>Consommation spécifique : 1,4 kWh/kg d' eau sans système de récupération et 1 kWh/kg d' eau avec recyclage d' air.</p>	<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : bon compromis entre la qualité du grain, la capacité de séchage et le rendement thermique. <p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Qualité du produit séché : décollement des enveloppes des grains si la température de séchage est trop élevée, d'où des pertes de protéines et d'amidon.
<p>Blé tendre</p> <p>Teneur en eau : de 19,5 % (initiale) à 14,5 % (finale).</p> <p>Produit granulaire</p>	<p>Traversée air chaud</p> <p>T° fluide maxi : 90 °C.</p> <p>Consommation spécifique : 1,7 à 2,3 kWh/kg d'eau.</p>	<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • température de séchage abaissée à 90 °C, • débit de grain plus important. <p>Contraintes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : refroidissement renforcé. ■ Qualité du produit séché : influence de la température de séchage sur la qualité boulangère du produit.
<p>Orge</p> <p>Teneur en eau : de 20 % (initiale) à 14,5 % (finale).</p> <p>Produit granulaire</p>	<p>Traversée air chaud</p> <p>T° fluide maxi : 42 °C.</p>	
<p>Pois protéagineux</p> <p>Teneur en eau initiale : 17 % à 20 %.</p> <p>Produit granulaire</p>	<p>Traversée air chaud</p> <p>T° fluide maxi : 90 °C.</p>	<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : conservation du grain et de ses qualités nutritionnelles pour une température de séchage limitée à 90 °C.
<p>Tournesol</p> <p>Teneur en eau : de 14 % (initiale) à 8 % (finale).</p> <p>Produit granulaire</p>	<p>Traversée air chaud</p> <p>T° fluide maxi : 70 °C.</p>	<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : débit d'air réduit pour éviter l'envolement de poussières. ■ Qualité du produit séché : pas d'altération des constituants du grain. <p>Contraintes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Contraintes d'environnement : prénettoyage des grains pour éviter des risques d'incendie.

Tambour rotatif



1. Entrée du produit humide
2. Léchage air chaud
3. Sortie du produit sec
4. Extraction buées

Le procédé de séchage comprend 2 étapes distinctes :

1. Alimentation et transport du produit

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.

2. Transfert de chaleur et séchage du produit

Le transfert de chaleur se fait par convection ou par conduction selon le type de tambour.

Séchoir tambour rotatif 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.

Variantes

par rapport au procédé générique

► Sécheur tambour à double ou triple passage

Ce sécheur est constitué de 2 ou 3 tambours concentriques. Dans le cas du sécheur double tambours, le produit traverse d'abord le tambour intérieur et ressort dans le tambour extérieur, l'air de séchage circulant à co-courant par rapport au produit. Il permet de traiter des produits ayant un spectre granulométrique assez large avec des vitesses de fluide élevées.

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 chaleur au produit humide.

Un écoulement d'air est nécessaire pour l'extraction de la vapeur d'eau.

TAMBOUR ROTATIF

Caractéristiques du procédé

Type de produit	<p>Produits fibreux. Produits pâteux extrudables, émiettables ou granulables. Produits pulvérulents, granulaires.</p>
Action mécanique sur le produit	<p>Cylindre à paroi lisse : retournement du produit. Cylindre à aubages internes : brassage du produit.</p>
Mode de déplacement	<p>Fonctionnement continu.</p>
Température de fonctionnement	<p>De 100 à 900 °C , entre 600 et 900 °C en général.</p>
Temps de séjour	<p>10 à 60 min.</p>
Débit produit	<p>Production élevée : 2 t/h à 250 t/h, en moyenne 50 à 70 t/h.</p>
Capacité de traitement horaire	<p>1 à 20 kg d'eau/h/m² de surface chauffante (tambour conducteur). 3 à 100 kg d'eau/h/m³ (tambour convectif), en moyenne 60 à 80 kg d'eau/h/m³.</p>
Équipements particuliers	<p>Dépoussiérage de l'air usé : cyclone ou multi-cyclone (systèmes de dépoussiérage les plus répandus). Filtre à manche. Laveurs à gaz. Fonctionnement sous vide : <ul style="list-style-type: none"> • séchage de produits thermosensibles car la température d'évaporation est faible, • séchage en atmosphère inerte, • récupération de solvants. </p>
Efficacité énergétique	<p>Mise en place de systèmes de recyclage du gaz de séchage dans les tambours, permettant d'atteindre des consommations spécifiques de l'ordre de 0,8 kWh/kg d'eau.</p>

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

▸ **Léchage - traversée air chaud (tambour direct)**

La circulation de l'air peut se faire selon un écoulement co-courant ou à contre-courant.

La circulation d'air à co-courant permet le séchage de produits qui ne supportent pas une température élevée à l'état sec : le produit final est en contact avec une température de gaz la plus faible au cours du procédé, évitant ainsi de brûler le produit.

La circulation d'air à co-courant est la plus répandue.

La circulation à contre-courant convient lorsque l'on souhaite des teneurs en humidité du produit final faibles ou une température de produit final élevée.

La production d'air chaud est généralement assurée par la combustion d'énergie fossile. Ce procédé laisse place progressivement à des chaudières biomasse.

Une amélioration des systèmes d'aubages internes dans le tambour a permis d'augmenter l'efficacité d'échange entre les gaz chauds et le produit.

 **Domaine d'application**

- Produits pâteux, pulvérulents et granulaires.

▸ **Conduction**

La paroi est chauffée au moyen d'une double enveloppe contenant un fluide, des tubes d'échangeurs, des résistances électriques, voire directement par la flamme des brûleurs.

L'extraction d'air nécessaire à l'élimination de la vapeur d'eau produite se fait généralement à contre-courant par rapport au produit.

 **Domaine d'application**

- Produits pâteux, pulvérulents et granulaires.



Exemple de tambour rotatif (chauffé par la paroi)
© COMESSA

Utilisation peu courante ou en développement

▸ **Vapeur d'eau surchauffée**

Ce procédé reste peu répandu.

Intérêts

- Économie d'énergie (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 volatils et/ou des mauvaises odeurs ;
- élimination des risques de feu et d'explosions ;
- amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme, solidité, stérilisation, digestibilité, absence de durcissement superficiel pour les produits visqueux ou collants...).

Contraintes

- Difficulté à traiter certains produits thermosensibles ;
- coût plus élevé de l'équipement (nécessité d'être conforme aux règles de sécurité pour les systèmes HP, dispositifs d'entrée et de sortie du produit étanches à la vapeur).

 **Domaine d'application**

- Produits pâteux, pulvérulents et granulaires dans quelques cas particuliers (par exemple, séchage de pulpes de betterave), l'intérêt étant la récupération énergétique et la qualité du produit.

TAMBOUR ROTATIF

Exemples d'applications et de produits traités

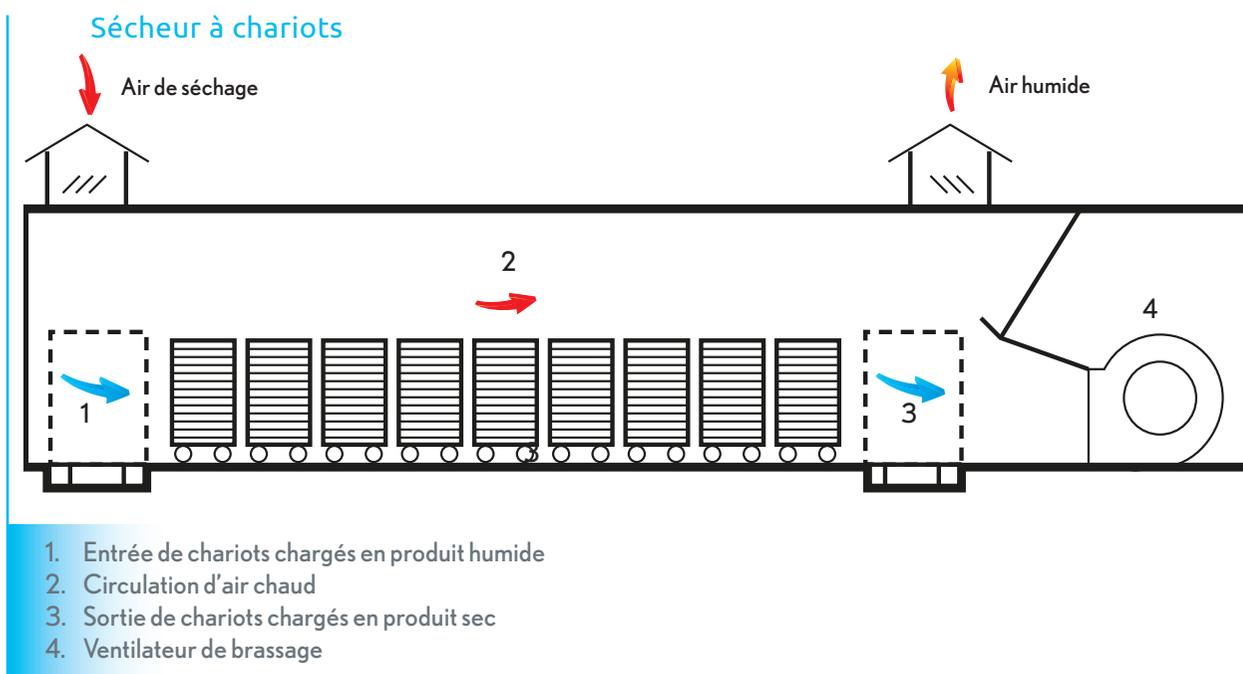
PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
<p>Pulpes de betterave</p> <p>Teneur en eau : de 76-78 % (initiale) à 10-12 % (finale).</p> <p>Produit pâteux</p>	<p>Léchage air chaud</p> <p>T° fluide : 700 °C.</p> <p>Pressage systématique des pulpes.</p> <p>VES</p> <p>T° fluide : 145 °C.</p> <p>Pressage systématique des pulpes.</p>	<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • récupération énergétique avec CMV, • réduction des pertes aux feux. ■ Qualité du produit séché : absence d'oxydation, suppression des polluants apportés par les fumées de combustion.
<p>Chlorure de potassium</p> <p>Teneur en eau : de 4-8 % (initiale) à 0,1 % (finale).</p> <p>Produit poudreux</p>	<p>Traversée air chaud</p> <p>T° fluide : 700 °C.</p> <p>Débit produit : 60 à 240 t/h.</p> <p>Consommation spécifique : 2,3 kWh/kg d'eau.</p>	
<p>Noir de carbone</p> <p>Teneur en eau : de 33 % (initiale) à 1 % (finale).</p> <p>Produit poudreux</p>	<p>Conduction</p> <p>Température de séchage : 800 °C.</p> <p>Débit produit : 5 t/h.</p> <p>Consommation spécifique : 1,30 à 1,75 kWh/kg d'eau.</p>	
<p>Talc</p> <p>Teneur en eau initiale : de 4-8 % (initiale) à 0,5-1,5 % (finale).</p> <p>Produit poudreux</p>	<p>Conduction</p> <p>Température de séchage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • fumées entrantes : 500 °C ; • fumées sortantes : 150 °C. <p>Débit produit : 5 t/h.</p> <p>Consommation spécifique : 2,9 kWh/kg d'eau.</p>	
<p>Superphosphates</p> <p>Teneur en eau : de 10 % (initiale) à 3 % (finale).</p> <p>Produit granulaire</p>	<p>Traversée air chaud</p> <p>Débit produit : 50 t/h.</p> <p>Consommation spécifique : 1,4 kWh/kg d'eau.</p>	
<p>Engrais NPK</p> <p>Teneur en eau : de 5 % (initiale) à 1 % (finale).</p> <p>Produit granulaire</p>	<p>Traversée air chaud</p> <p>T° fluide : 200 °C.</p> <p>Débit produit : 100 t/h.</p> <p>Consommation spécifique : 0,2 kWh/kg de produit fini.</p>	

Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Sable Teneur en eau : de 6-7 % (initiale) à 0,1% (finale). Produit granulaire	Traversée air chaud T° fluide : entrée : 600 °C - sortie : 90-100 °C. Débit produit : 40 t/h. Temps de séjour : 20 min. Consommation spécifique : 0,11 à 0,16 kWh/kg de produit fini.	
Pâtes alimentaires Teneur en eau : de 26,5 % (initiale) à 12,5 % (finale). Produit granulaire (autres que spaghetti)	Traversée air chaud T° fluide : 130 °C. Débit produit : 2 t/h. Consommation spécifique : 1,4 kWh/kg d'eau.	
Particules pour panneaux de bois Teneur en eau : de 35-55 % (initiale) à 3 % (finale). Produit granulaire	Traversée air chaud Consommation spécifique : 0,7 à 0,8 kWh/kg de produit fini.	
Luzerne Teneur en eau : de 75 % (initiale) à 10-15 % (finale). Produit fibreux	Traversée air chaud T° fluide : 700 °C. Débit produit : 15 t/h. Capacité évaporatoire : 80 à 90 kg d'eau/h/m ³ . Consommation spécifique : 0,8-0,9 kWh/kg d'eau. VES T° fluide : 130-145 °C.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • concentration de jus par récupération de la chaleur contenue dans l'air, • séchage de pulpes de betterave possible sur le même appareil. Intérêts VES <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • récupération énergétique de la vapeur issue du produit, • séchage de produits divers dans le même appareil (pulpes de betterave, particules de bois...) et de granulométries différentes. ■ Qualité du produit séché : humidité finale homogène. Contraintes VES <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : sas d'entrée et de sortie du produit à cause du fonctionnement à 3 bars.
Bois pellet Teneur en eau : de 30-60 % (initiale) à 3-10 % (finale). Produit granulaire	Léchage air chaud T° fluide : 400 à 600 °C. (chaudière biomasse). Temps de séjour : 8 min. Débit produit : 2 à 20 t/h. Consommation spécifique : 0,9 kWh/kg d'eau. Séchage de sciure de bois pour fabrication de pellets.	

SÉCHEUR TUNNEL

Principes du procédé



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.

Le séchage comprend deux étapes :

1. 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).

2. Transfert de chaleur et 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 (cf. § Mode de transfert p 76).

Variantes

par rapport au procédé générique

Les variantes sont liées au mode de transport du produit.

- **Sécheur tapis à tabliers en série**
Plusieurs tapis sont agencés en série.
Produits ayant tendance à s'agglomérer.
- **Sécheur tapis à tabliers superposés**
Plusieurs tapis sont agencés de façon superposée.
Possibilité de retournement du produit, sécheur basse température et temps de séjour plus long.
- **Sécheur à chariot**
Produit initial en forme ou en morceaux et temps de séjour atteignant plusieurs heures.
- **Sécheur à balancelles**
Transport du produit dans des balancelles suspendues à un convoyeur.

Caractéristiques du procédé

Type de produit	<p>Produit de texture variée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • produit pâteux, • produit granulaire, fibreux, • produit plan, en forme, en morceaux.
Mode de déplacement	Défilement en continu sur un support.
Température de fonctionnement	<p>30 à 250 °C en général.</p> <p>Température ajustable suivant le produit à sécher.</p> <p>Possibilité de refroidir le produit en fin de séchage sur le même appareil, dans une zone de refroidissement du sécheur.</p>
Temps de séjour	<p>Varie de quelques secondes, à quelques minutes ou quelques heures.</p> <p>Vitesse d'avance du tapis variable (action possible sur le temps de séjour).</p>
Débit produit	Débit de matières important et très variable.
Capacité de traitement horaire	1 à 50 kg d'eau/h/m.
Équipements particuliers	Séchage mécanique par couteaux d'air : ce séchage consiste à pousser l'eau de surface grâce à l'énergie cinétique des jets (vitesse possible des jets jusqu'à 280 m/s).
Efficacité énergétique	<p>Récupération de chaleur par PAC.</p> <p>CMV possible : la vapeur 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.</p>

SÉCHEUR TUNNEL

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

► Léchage air chaud (courant parallèle)

La circulation de l'air peut se faire à co-courant ou à contre-courant.

La circulation à contre-courant permet d'élever progressivement la température du produit humide et convient bien aux matières qui ont tendance à croûter et à celles qui sont sensibles à un choc thermique.

Lorsque le produit contient beaucoup d'eau libre, il est généralement préférable de réaliser un écoulement d'air à co-courant car le temps de séchage est ainsi réduit.

Souvent, la circulation de l'air s'effectue dans le même sens que le produit en début de séchage puis en sens contraire dans la dernière phase du processus.

Domaine d'application

- Tous produits.

► Traversée air chaud (courant croisé)

C'est le mode de transfert le plus courant pour les sècheurs à tapis.

L'air arrive de façon perpendiculaire au produit et le traverse, soit de haut en bas, soit de bas en haut ou une combinaison des deux afin d'obtenir un séchage parfaitement homogène. Dans le cas d'une traversée sur une épaisseur moyenne de 10 cm, la vitesse de l'air est d'environ 1,25 m/s (de 0,25 à 2,5 m/s pour des applications spéciales).

Domaine d'application

- Produit suffisamment poreux et peu épais.

► Percussion air chaud

L'air est envoyé sur le produit sous forme de jets impactants dont les vitesses de fluide sont d'environ 5 à 20 m/s pour les produits minces.

Limité généralement aux sècheurs à tapis.

Domaine d'application

- Produit peu épais.

► Infrarouge

Le transfert d'énergie se produit entre une source émettrice et le produit à chauffer qui absorbe tout ou partie de l'énergie qu'il reçoit, celle-ci étant elle-même une fraction plus ou moins importante de l'énergie rayonnée en fonction de la qualité du système.

Le rayonnement IR est peu pénétrant et s'accommode mal de produits aux formes trop complexes.

Intérêts

- Densité de puissance élevée et modularité ;
- modularité importante.

Domaine d'application

- Produit mince ou en nappes.

► Hautes-Fréquences

Il permet de traiter en profondeur des produits épais, tout en étant bien adapté aux produits en nappes.

Intérêts

- Dissipation interne de l'énergie ;
- homogénéité de traitement.

Domaine d'application

- Produit épais et/ou suffisamment humide.
- Produit en nappes.

► Vapeur d'eau surchauffée (VES)

Le fluide de séchage circule le plus souvent en courant croisé (par traversée).

Intérêts

- Consommation d'énergie réduite par rapport à l'AC (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 volatils et/ou des mauvaises odeurs ;
- élimination des risques de feu et d'explosion ;
- amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme, solidité, stérilisation, digestibilité, absence de durcissement superficiel pour les produits visqueux ou collants...).

Contraintes

- Difficulté à traiter certains produits thermosensibles ;
- coût plus élevé de l'équipement (nécessité d'être conforme aux règles de sécurité pour les systèmes HP, dispositifs d'entrée et de sortie du produit étanches à la vapeur).

Domaine d'application

- Produit suffisamment poreux.

Nouveaux développements

Prétraitement du produit

▲ Séchage/imprégnation de produits végétaux et animaux

Innovation

- Qualité produit.

Intérêts

- Formulation de produits ;
- amélioration de la qualité ;
- recyclage de solutions.

Application des Hautes Fréquences

▲ Séchage mixte AC/HF de produits isolants généralement fibreux (pour le bâtiment, l'automobile...) de forme régulière

Innovation

- Mode de transfert.

Intérêts

- Réduction du temps de séchage du produit.

Application de la vapeur d'eau surchauffée

▲ Séchage de béton cellulaire par VES

Innovation

- Mode de transfert.

Intérêts

- Économie d'énergie et amélioration de la qualité du produit ;
- réduction du temps de séchage et de la taille du séchoir.

Contraintes

- Température du fluide de séchage plus élevée que lors d'un séchage par AC ;
- problèmes de chargement et de déchargement du produit.

Application des Infrarouges

▲ Séchage de granulés de polyamide et de nylon par IR

Innovation

- Mode de transfert.

Intérêts

- Réduction du temps de séchage.

▲ Séchage IR de tranches d'oignons

Innovation

- Mode de transfert.

Intérêts

- Réduction du temps de séchage.

Application des Micro-Ondes

▲ Coulage de pièces sanitaires avec apport de MO

Innovation

- Mode de transfert.

Intérêts

- Gain en productivité.

▲ Séchage d'extraits d'algues par MO

Innovation

- Mode de transfert et technologie.

Intérêts

- Séchage en continu, en atmosphère normale (classiquement sous vide) ;
- capacité de séchage plus grande.

SÉCHEUR TUNNEL

Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Gélatine Teneur en eau : de 70 % (initiale) à 10 % (finale). Produit pâteux	Traversée air chaud T° fluide : 30 à 60 °C. Débit produit : 0,5 t/h. Consommation spécifique : 0,8 kWh/kg d'eau.	
Pulpes de betterave Produit pâteux	VES Encore rare dans l'industrie.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : économie d'énergie avec CMV - consommation (d'origine électrique) de 0,2 kWh/kg d'eau évaporée, dont 72 % pour le compresseur, 27 % pour les ventilateurs et 1 % pour le transport du produit dans le séchoir. ■ Qualité du produit séché : produit de haute qualité car séché en atmosphère inerte et stérile. ■ Pollution atmosphérique supprimée (pas de cheminée, condensats recyclables sans traitement). ■ Risques d'incendie supprimés.
Laine en bourre Teneur en eau : de 35-40 % (initiale) à 0,1-15 % (finale). Produit fibreux	Traversée air chaud Consommation spécifique : 1,3 kWh/kg d'eau. HF	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : souplesse du procédé (contrôle humidité produit...). Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • séchage homogène et rapide, • densité de puissance modérée. ■ Qualité du produit séché : <ul style="list-style-type: none"> • meilleure tenue du fil à la traction, • suppression des déchets. Contraintes <ul style="list-style-type: none"> ■ Qualité du produit séché : certains types de fibres blanches ont tendance à jaunir. ■ Essorage centrifuge préalable.
Herbes et plantes médicinales Produit fibreux	Léchage air chaud Sécheur multi-tapis. T° fluide : 80 à 100 °C. Capacité évaporatoire : 5 à 18 kg/h/m ² . Vitesse de défilement : 0,5 m/min.	

Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Fruits et légumes Teneur en eau : de 80-90 % (initiale) à 5 % (finale). Produit en forme	Léchage air chaud T° fluide : 50 à 100 °C. Débit produit : 10 à 20 t/h. Consommation spécifique : 1 kWh/kg d'eau.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • très grande souplesse d'utilisation (température, humidité et vitesse de l'air), • grande homogénéité de traitement, • possibilité PAC basse température. ■ Qualité du produit séché : produit non détérioré grâce à la basse température (arômes, goût, vitamines).
Biscuits Teneur en eau : de 4 % (initiale) à 0,02 % (finale). Produit poudreux	Traversée air chaud : AC + HF Applicateur : électrodes planes ou à barreaux. Puissance installée HF : 60 à 200 kW. T° fluide maxi : 300 °C. Débit produit : 2 à 7 t/h de produit fini. Temps de séjour : 5 à 50 min.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • gain en productivité de 30 à 40 % et en consommation énergétique de 20 à 30 %, • encombrement 2 à 3 fois plus faible. ■ Qualité du produit séché : la sélectivité des HF corrige les gradients d'humidité au sein du produit.
Briques et tuiles Teneur en eau : de 20 % (initiale) à 3 % (finale). Produit en forme	Léchage air chaud Débit produit : 4 à 28 t/h. Consommation spécifique : 0,3-0,8 kWh/kg d'eau. Étirage ou pressage puis séchage. HF Encore rare dans l'industrie.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : gain en productivité. ■ Qualité du produit séché : amélioration de la qualité du produit.
Matelas en latex alvéolé Produit en forme (épaisseur de 6 à 14 cm).	Léchage air chaud Temps de séjour : 24 à 48 h. Centrifugation jusqu'à une teneur en eau de 33 %. AC + HF Encore rare dans l'industrie. Les deux modes de transfert se font successivement séchage AC puis séchage sous HF. HF Centrifugation jusqu'à une teneur en eau de 20 %.	Intérêts AC + HF <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • gain en productivité, • association d'un séchage en surface et d'un séchage volumique. Intérêts HF <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • séchage homogène, • temps de séjour réduit (2 min/matelas). ■ Qualité du produit séché : amélioration de la qualité du produit final. ■ Impact environnemental : bonnes conditions de travail (pas de bruit, moins d'émissions volatiles).
Mousse de polyuréthane Produit en forme	AC + HF	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : gain en productivité.

SÉCHEUR TUNNEL

Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Frites Produit en forme	AC + HF Encore rare dans l'industrie. Applicateur : électrodes planes ou à barreaux. Puissance installée : 60 à 200 kW. T° fluide : 300 °C.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : gain en productivité de 30 à 40 % et en consommation énergétique de 20 à 30 %.
Pâtes alimentaires Teneur en eau : de 26-27 % (initiale) à 12-13 % (finale). Produit en forme	Traversée air chaud Sécheur multi-tapis. IR Encore rare dans l'industrie.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • modularité, densité de puissance élevée, • rendements énergétiques élevés, • simplicité de mise en œuvre et de conduite.
Bobines textiles Teneur en eau : de 60 % (initiale) à 7-15 % (finale). Produit en forme	Traversée air chaud : AC + HF Applicateur HF à plateau. Puissance HF installée : 60 kW Consommation spécifique : 1,2 kWh/kg d'eau. Production de fil : 0,06 t/h (l'objectif étant d'atteindre 0,12 t/h).	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : <ul style="list-style-type: none"> • gain en productivité, • gain énergétique. ■ Qualité du produit séché : régularité du séchage et élimination du jaunissement du produit. Contraintes <ul style="list-style-type: none"> ■ Procédés coûteux. ■ Manutentions pour l'essorage et la disposition des bobines sur le tapis.
Carreaux de plâtre Teneur en eau : de 45 % (initiale) à 5 % (finale). Produit en forme	Léchage air chaud T° fluide : 100 °C. Capacité évaporatoire : 2 800 kg d'eau. Consommation spécifique : <ul style="list-style-type: none"> • 1,0 kWh/kg d'eau (dans le tunnel) ; • 1,2-1,3 kWh/kg d'eau (en tenant compte du rendement de la chaudière). Équipement particulier : PAC. <ul style="list-style-type: none"> • capacité évaporatoire : 2 640 kg d'eau/h, • consommation spécifique : 0,2 kWh/kg d'eau. 	

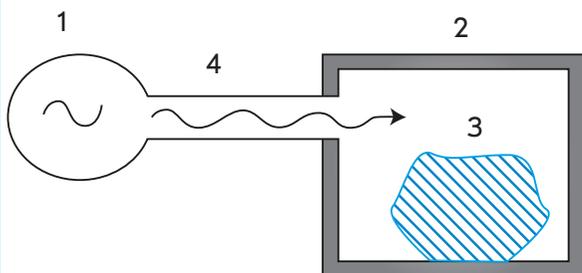
Exemples d'applications et de produits traités

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Placoplâtre Teneur en eau initiale : 45 %. Produit en forme (plaque de 2,5 à 3,6 m x 1,2 m)	Léchage air chaud T° fluide : 130 °C. Débit produit : 40 t/h. Consommation spécifique : 0,9 kWh/kg d'eau. HF Encore rare dans industrie.	
Pots catalytiques Produit en forme	HF Encore rare dans l'industrie. Électrodes planes (parfois électrodes à barreaux). Densité de puissance : 2 à 5 kW/m ² . Temps de séjour : 1 à 5 h. Consommation spécifique : 1,2 à 2,4 kWh/kg d'eau.	
Bois résineux Teneur en eau : de 44 % (initiale) à 12 % (finale). Produit en forme	VES Encore rare dans l'industrie. T° fluide : <ul style="list-style-type: none"> • entrée : 145 °C, • sortie : 110 °C. Vfluide : 6 m/s. Consommation spécifique (d'origine électrique) : 0,2 à 0,3 kWh/kg d'eau.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : récupération énergétique de la vapeur issue du produit par CMV pour réchauffer la vapeur de séchage. ■ Qualité du produit séché : meilleure qualité, diminution des tensions et des fissurations dans le bois. ■ Contraintes d'environnement : réduction des risques de feu et d'explosion.

SÉCHOIR PAR PERTES DIÉLECTRIQUES (HF ou MO)

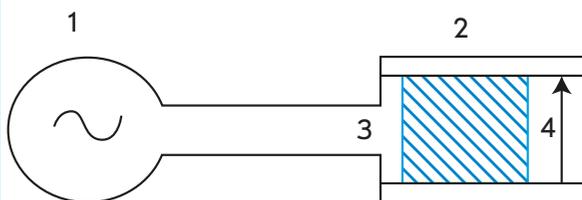
Principes du procédé

Micro-Ondes : propagation du champ électrique dans des cavités



1. Générateur MO
2. Cavité MO
3. Produit à sécher
4. Guide d'onde

Hautes Fréquences : propagation du champ électrique entre des électrodes



1. Générateur HF
2. Électrodes
3. Produit à sécher
4. Champ électrique

1. Échauffement du produit

Le produit, placé dans une cavité ou un applicateur (électrodes), est soumis à un champ électromagnétique Micro-Ondes (MO) ou Hautes Fréquences (HF) qui provoque son échauffement et son séchage. Le séchage par perte diélectrique est un séchage dit «volumique» contrairement aux procédés conventionnels utilisant la conduction et/ou la convection surfacique.

Le chauffage diélectrique est donc l'opération électrothermique qui produit l'échauffement interne d'un matériau à partir du déplacement de porteurs de charges (ions, électrons libres...) et de l'agitation moléculaire induite dans ce matériau par des champs électriques alternatifs de fréquences élevées. Les champs électriques et les fréquences d'alternance de ces champs sont imposés dans le produit par la propagation d'une onde électromagnétique qui le traverse.

2. Fréquences des ondes électromagnétiques

Le champ électrique alternatif porté par l'onde électromagnétique HF (27,12 ou 13,56 MHz) ou MO (2 450 ou 915 MHz) excite l'ensemble des molécules polaires ou polarisées de la matière qu'il traverse.

Cette distinction entre HF et MO vient non seulement de la différence de fréquence mais également de certaines caractéristiques qui ne sont pas identiques dans de nombreux domaines (technologie utilisée, caractéristiques de l'interaction onde/matière, profondeur de pénétration), bien que fondamentalement les mécanismes de dissipation sous forme thermique de l'énergie électromagnétique soient sensiblement comparables entre ces deux bandes de fréquences.

Variantes

par rapport au procédé générique

► En HF

Applicateur capacitif, applicateur strayfield (barreaux alternés).

► En MO

Cavité MO multimode, guide à fente rayonnante, cavité monomode...

SÉCHOIR PAR PERTES DIÉLECTRIQUES (HF ou MO)

Caractéristiques du procédé

Type de produit	Tout produit mauvais conducteur d'électricité. Produits plans ou volumiques, plus ou moins épais. Produits difficiles à sécher.
Mode de déplacement	Continu ou discontinu (MO et HF).
Température de fonctionnement	Dépend de la puissance MO ou HF incidente. Pas de limitation particulière hormis les équilibres thermiques avec l'environnement du séchoir.
Temps de séjour	Quelques secondes à quelques heures selon le produit traité. Temps de traitement divisé par 5 jusqu'à 100 par rapport aux techniques conventionnelles.
Capacité de traitement horaire	Très variable selon le produit à traiter.
Équipements particuliers	Technologie s'accompagnant généralement d'un soufflage air chaud pour évacuer l'humidité. Possibilité de travailler sous vide ou sous pression de vapeur.
Efficacité énergétique	Le rendement des traitements est généralement très bon, celui de la génération de l'énergie étant compris entre 60 et 70 %, le rendement global varie de 55 à 65 %.
Sécurité d'installation	Réduction des risques de brûlures car il n'y a pas de production d'air chaud. Réduction des débits d'air extraits par rapport aux procédés classiques. Nécessité d'un blindage efficace de l'équipement pour limiter les fuites électromagnétiques.

SÉCHOIR PAR PERTES DIÉLECTRIQUES (HF ou MO)

Mode de transfert de la chaleur

Utilisation courante

► Pour les Hautes Fréquences (HF)

La propagation de l'onde se fait entre 2 électrodes contenant le produit. Le champ électrique alternatif HF provoque un déplacement des porteurs de charges (ions) du produit, donc un courant électrique par conduction ionique et le matériau s'échauffe par effet Joule.

► Pour les Micro-Ondes (MO)

La propagation de l'onde se fait de manière aléatoire dans une cavité dans laquelle est placé le produit. Les molécules polaires du produit forment un dipôle électrique qui tend à chaque alternance du champ électrique à s'aligner avec ce champ. Dans la gamme des fréquences qui nous concerne, cette orientation ne peut s'établir complètement et qu'avec un certain retard par rapport au champ d'excitation de fréquence élevée, dû aux frictions et aux chocs entre les différents dipôles. C'est le phénomène de polarisation/relaxation diélectrique qui, s'il est entretenu, conduit à une dégradation sous forme thermique d'une partie de l'énergie véhiculée par l'onde.

Nouveaux développements

Traitement par HF et MO sur des nouveaux produits

Innovation

- Produit et mode de transfert de la chaleur.

► Boues

Intérêts

- Efficacité du procédé : séchage plus efficace par MO et équipement de taille réduite par rapport aux procédés conventionnels.

► Panneaux isolants

Intérêts

- Efficacité du procédé : technique prometteuse en HF car les technologies conventionnelles sont peu adaptées en termes d'efficacité de séchage.

► Produits pharmaceutiques

Intérêts

- Séchage sous vide et à faible température par un traitement MO sur des produits granuleux.

Modélisation du séchage par HF et MO : travaux de simulation numérique

Innovation

- Mode de transfert de la chaleur.

Couplage de différents codes de calcul numérique tenant compte de la thermique et de l'électromagnétisme.

SÉCHOIR PAR PERTES DIÉLECTRIQUES (HF ou MO)

Exemple d'applications et de produits traités

En général, les techniques de séchage par perte diélectrique sont utilisées lorsque les techniques conventionnelles ne permettent pas de répondre aux exi-

gences d'efficacité énergétique ou de productivité. Les puissances des installations varient en fonction des produits et des cadences de production. Elles peuvent

aller de quelques kW à plusieurs centaines de kW. Les investissements sont généralement plus importants que pour les systèmes de traitement convectifs.

PRODUIT	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ	REMARQUES
Produit textile en nappe Teneur en eau : de 70 % (initiale) à 10 % (finale)	Consommation spécifique : entre 0,9 et 1,1 kWh/kg d'eau. Produit plan, traitement HF sur un applicateur strayfield.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : augmentation de la cadence de production, gain en efficacité énergétique (réduction des débits d'air extraits du séchoir). ■ Compacité de l'installation du séchoir.
Bois	Traitement HF sous pression de vapeur d'un produit volumique. Consommation spécifique : entre 1,3 et 1,6 kWh/kg d'eau. Température de procédé : 130 °C.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : gain sur le temps de traitement du produit (traitement en une dizaine d'heures contre plusieurs jours en procédé conventionnel). Contraintes : <ul style="list-style-type: none"> ■ Procédé fortement énergivore.
Pommes	Traitement batch en cavité MO avec injection de vapeur (température de procédé : 110 °C). Température produit : 40 °C. Temps de traitement total : 7 minutes, dont 4 minutes de MO.	Contraintes : <ul style="list-style-type: none"> ■ Qualité du produit séché : risque d'altération du produit (aspect visuel du produit, propriétés organoleptiques).
Bobines de verre	Traitement HF des bobines avec des électrodes adaptées à la forme des produits.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : gain sur le temps de traitement du produit.
Pain de sucre	Traitement MO de pain de sucre pour la déshydratation.	Intérêts <ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité du procédé : gain sur le temps de traitement du produit.

SÉCHAGE : OPTIMISEZ VOS CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE

Production



Réseau



Utilisation



Contrôle



Maintenance



PILOTAGE ET RÉGULATION

- Installer un système de régulation performant, par exemple à base de commande prédictive (technique qui permet d'anticiper le futur comportement du procédé).
- Optimiser l'utilisation du séchoir pour limiter la fréquence des phases de démarrage et d'arrêt, qui sont des phases énergivores et souvent non productives.

EN AMONT

- Utiliser un procédé de séchage mécanique (égouttage, pressage, filtration, décantation centrifuge...) en amont du séchoir thermique, permet d'abaisser le taux d'humidité jusqu'à 60 %.

RÉCUPÉRATION DE CHALEUR

- 15-25% Récupérer l'air chaud sortant du sécheur pour :
 - 1) recycler dans le brûleur du séchoir une partie de l'air sortant,
 - 2) préchauffer l'air entrant,
 - 3) le pré-séchage et le post-séchage en augmentant la température de l'air jusqu'à la limite acceptable pour le produit.

SÉCHOIR

- Agir sur la maintenance en optimisant la fréquence de désencrassement des séchoirs, et en vérifiant régulièrement l'intégrité de l'isolation et de l'étanchéité des chambres de séchage.

PRÉCONCENTRATION

- Préconcentrer les produits liquides par osmose inverse.

INTÉGRATION THERMIQUE

- Travailler sur l'intégration thermique de l'installation (la chaleur nécessaire au séchage pour être récupérée des fumées d'un poste de combustion par le biais d'un échangeur...).

- 10-15% Utiliser une technique de séchage par conduction.

- 10-15% Pour améliorer les performances énergétiques, un système complémentaire de compression mécanique de vapeur peut être mis en place. Ce système permet de faire des économies sur l'étape de condensation des buées en supprimant la consommation d'eau de refroidissement.

SÉCHOIR

- Si le séchage utilise de l'air comprimé : isoler le poste séchage du reste du réseau d'air comprimé et vérifier la pression réellement nécessaire.
- Vérifier les spécifications de séchage utilisées dans l'entreprise en cherchant à les alléger au maximum.

PROCÉDÉS ALTERNATIFS

- Utiliser l'énergie solaire soit directement par séchage naturel, soit par le biais de panneaux solaires thermiques produisant de l'air chaud.
- Le séchage thermique peut être réalisé par rayonnement. Les énergies radiantes, comme l'infrarouge, le chauffage haute fréquence et le chauffage micro-ondes peuvent sécher directement un produit ou être utilisées en chauffage préliminaire.
- Le séchage thermique direct peut être réalisé à la vapeur d'eau surchauffée.

L'optimisation de la consommation d'énergie doit être vue comme un levier pour agir et piloter efficacement le fonctionnement d'un séchoir. Elle présente l'avantage de pouvoir réduire la facture énergétique du séchoir mais également de mieux connaître son fonctionnement. C'est en effet par une meilleure connaissance de ses équipements qu'un industriel pourra identifier et engager les améliorations possibles sur son procédé.

Nous présentons dans ce chapitre les différentes actions possibles en terme d'efficacité énergétique, telles que :

- valoriser le pré-séchage ;
- valoriser la performance des séchoirs ;
- optimiser la régulation des séchoirs ;
- avoir une maintenance régulière et préventive ;

- mettre en œuvre le comptage énergétique ;
- etc.

Les pistes d'amélioration sont présentées de façon qualitative dans la suite de ce chapitre, les notions de coût et de Temps de Retour sur Investissement (TRI) étant spécifiques selon les installations et leurs conditions de fonctionnement (exigences produit, temps de fonctionnement annuel, etc.)

Agir sur le pré-séchage

	FACILITÉ	TRI	Coût
Utiliser un procédé de séchage mécanique (égouttage, pressage, filtration, décantation centrifuge...) en amont du séchoir thermique. Le séchage mécanique ne permet pas de descendre sous les 60 % d'humidité dans le produit (en base humide), mais la consommation d'énergie reste inférieure à 0,2 kWh/kg d'eau extraite, contre plus de 0,7 kWh/kg pour un séchage thermique classique.	**	+/-	€€

Agir sur la performance des équipements (si le produit le permet)

	FACILITÉ	TRI	Coût
Remplacer les systèmes de séchage standards par des technologies plus performantes :			
• utiliser une technique de séchage par vapeur surchauffée. On estime que cela permet de diviser la consommation d'énergie d'un facteur 3 à 15 si la vapeur produite peut être valorisée intégralement par condensation ;	***	-	€€€
• dans le cas d'un séchage à « basse température » (faible écart entre la température de l'air frais et celle en entrée du séchoir), utiliser de l'air le plus sec possible : déshumidifier l'air de séchage et relever la température de cet air au moyen d'une pompe à chaleur si nécessaire ;	***	-	€€€
• utiliser un système de chauffage par énergie radiante (infra-rouge, UV, micro-ondes, hautes fréquences).	**	+/-	€€
Utiliser l'énergie solaire comme source de chaleur, soit par le biais de panneaux solaires thermiques produisant de l'air chaud, soit en séchant directement le produit au soleil.	**	-	€€
Valoriser autant que possible les combustibles biomasse pour la production d'air chaud.	***	+/-	€€€
Sélectionner des technologies de séchoir en canopy, pour limiter les pertes thermiques par les sas.	***	+/-	€€€

BONNES PRATIQUES ÉNERGÉTIQUES

Agir sur le pilotage en optimisant les consignes et la régulation

	FACILITÉ	TRI	Coût
Installer un système de régulation performant, par exemple basée sur l'analyse prédictive (technique qui permet d'anticiper le futur comportement du procédé). Le déploiement d'une solution de ce type nécessite l'installation de capteurs (température, humidité) et d'un automate mais permet un suivi et une régulation beaucoup plus fine du processus de séchage.	***	+/-	€€
Augmenter la température de l'air en entrée de séchoir jusqu'à la limite acceptable pour le produit.	*	+	€
Mettre en place la variation de vitesse sur les moteurs des extractions, si elle est pertinente par rapport au fonctionnement de l'installation et/ou dans le cas d'un produit entrant à humidité variable.	**	+/-	€€
Optimiser l'utilisation du séchoir pour limiter la fréquence des phases de démarrage et d'arrêt, qui sont des phases énergivores et souvent non productives.	*	+	€
Si le séchage utilise de l'air comprimé : isoler le poste séchage du reste du réseau d'air comprimé et vérifier la pression réellement nécessaire.	**	+/-	€€

Agir sur la diminution des pertes thermiques du séchoir

	FACILITÉ	TRI	Coût
Installer un pré-séchoir et le chauffer en récupérant l'air en sortie du séchoir, qui peut avoir des températures supérieures à 100 °C et donc être valorisé relativement aisément.	**	+/-	€€
Installer des rideaux d'air chaud au niveau des sas des séchoirs, pour les installations de type étuve traversante, tunnel. Sur le même principe, installer des bavettes en partie haute des sas, et/ou adapter la section des sas au gabarit des pièces traitées pour limiter les pertes thermiques par les sas.	*	+	€
Recycler une fraction de l'air sortant pour le mélanger à l'air frais avant chauffage, afin de diminuer la puissance de chauffage nécessaire.	**	-	€€
Récupérer la chaleur : préchauffer l'air entrant avec l'air sortant en utilisant une tour de lavage, notamment si cette dernière est nécessaire pour d'autres raisons.	***	+/-	€€
Récupérer la chaleur : préchauffer l'air entrant avec l'air sortant en utilisant un échangeur air/air. Gains énergétiques attendus de quelques % sur la consommation du procédé.	**	-	€€€

Agir sur la maintenance

	FACILITÉ	TRI	Coût
Optimiser la fréquence de désencrassement des séchoirs en prenant en compte les pertes de performances dues à l'encrassement et les pertes thermiques dues à l'ouverture prolongée du séchoir le temps du nettoyage.	**	+	€
Vérifier régulièrement l'intégrité de l'isolation et l'étanchéité des chambres de séchage et des équipements annexes.	*	+	€
Mettre en place des moteurs haut rendement, dans le cas de remplacement de moteurs.	*	+	€
En cas de pannes, privilégier l'achat de moteurs neufs et éviter le rebobinage.	*	+	€
Surveiller et entretenir la qualité métrologique de l'instrumentation du séchoir (en particulier la régulation).	*	+	€
Disposer de modes opératoires intégrant les performances énergétiques du séchoir.	*	+	€

Agir sur les installations périphériques du séchoir

	FACILITÉ	TRI	Coût
Veiller à la situation géographique du séchoir par rapport aux procédés voisins (extractions), afin d'éviter toute perturbation aéraulique du séchoir.	*	+	€
Installer de la compression mécanique de vapeur ou des éjecto-compresseurs sur des installations d'évapo-concentration de manière à réduire la consommation spécifique de l'installation (kWh/tonne d'eau évaporée).	***	+/-	€€€
Dans le cas d'installations avec émissions de COV, organiser la production de manière à exploiter autant que possible la combinaison séchage-oxydation ou séchage-incinération.	**	+/-	€€

BONNES PRATIQUES ÉNERGÉTIQUES

Agir sur le suivi énergétique de l'installation

	FACILITÉ	TRI	Coût
Mettre en place des comptages énergétiques sur les équipements fortement consommateurs et/ou pour comparer plusieurs installations de séchage sur un même site.	*	+	€
Définir des indicateurs énergétiques pour suivre la consommation d'énergie du séchoir dans le temps (par exemple, kWh/tonne d'eau évaporée, kWh/tonne de produit traité).	*	+	€
Former/informer le personnel sur les économies d'énergies.	*	+	€

Légendes

FACILITÉ		TEMPS DE RETOUR SUR INVESTISSEMENT (TRI)		Coût	
*	Facile	+	Court terme	€	Faible
**	Moyennement facile	+/-	Moyen terme	€€	Modéré
***	Difficile	-	Long terme	€€€	Élevé

Prés-séchage mécanique par soufflage d'air, en amont d'un séchoir thermique d'une ligne de peinture

APPLICATION

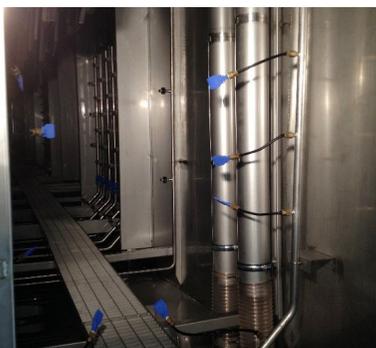
Secteur industriel : industrie mécanique.

Technologie : sécheur tunnel.

Produit : produit en forme (pièces métalliques).

Innovation : pré-séchage mécanique par soufflage d'air.

Bureau d'études : Ateliers Michaud Coating (AMC groupe Corelec).



Pré-séchage par soufflage d'air à haute vitesse

Contexte & enjeux

Le bureau d'études Ateliers Michaud Coating (AMC groupe Corelec) est une PME spécialisée dans la réalisation pour ses clients de chaîne complète de traitement de surface et de peinture. Cette dernière est composée, entre autres, d'un tunnel de traitement de surface pour dégraisser les pièces et d'un tunnel de séchage pour les pièces avant application de la peinture.

Les consommations d'énergie de ces équipements sont importantes. C'est dans ce contexte que la société AMC a accompagné son client, du secteur de l'industrie mécanique, à optimiser l'installation de séchage et en particulier l'étape amont de pré-séchage mécanique des pièces.

Présentation de la démarche

L'évacuation de l'humidité des pièces dans le tunnel de séchage est assurée par convection forcée par air chaud (chauffage par brûleur gaz).

Afin d'améliorer l'efficacité du séchage un dispositif complémentaire est mis en place dès la sortie du tunnel de traitement de surface.

Le nouveau dispositif utilise de l'air provenant d'un ventilateur haute pression, d'une puissance de 5,5 kW ; cet air est soufflé à haute vitesse sur les pièces par l'intermédiaire de lèvres de soufflage. Le dispositif précédent consistait à utiliser un système de soufflage d'air comprimé (27 buses, débit unitaire 27 Nm³/h).

TÉMOIGNAGE

Ce système permet un gain énergétique important grâce à l'utilisation d'un ventilateur pour le soufflage d'air à la place d'un compresseur d'air comprimé. De plus, avec ce procédé, le séchage de certaines pièces est plus efficace.

Anthony Lassalle
Responsable bureau d'études AMC

Bilan de l'opération

⚡ Gain énergétique

- 386 MWh électrique/an
- 8,7 tonnes équivalent CO₂ évitées

📊 Gain financier

- 27 k€ / an

📅 Investissement

- 12,8 k€

🕒 Temps de retour sur investissement

- Immédiat

L'AVIS DE L'EXPERT

Avant de récupérer la chaleur fatale, pensez à optimiser les performances de votre installation de séchage !

Des économies d'énergie sont parfois simples et nécessitent peu d'investissement à mettre en œuvre, comme le pré-séchage mécanique par air soufflé en remplacement de l'air comprimé, qui est nettement plus coûteux à produire que l'air soufflé.

Le CETIAT

RETOURS D'EXPÉRIENCE

Récupération de chaleur sur séchoir par échangeur cyclonique

APPLICATION

Secteur industriel : industrie céréalière, société coopérative agricole de 2 580 adhérents, CA 225 M€.

Technologie : séchoir silo.

Produit : produit granulaire (céréales).

Innovation : récupérateur de chaleur par échangeur cyclonique.

Bureau d'études : CLAUGER.

Contexte & enjeux

Dans l'industrie céréalière, les grains doivent être séchés avant d'être stockés en silos. Les séchoirs ventilés rejettent d'importantes quantités de matières organiques dans l'atmosphère et consomment une quantité importante de gaz pour le chauffage de l'air, ainsi que de l'électricité pour la ventilation forcée.

L'énergie globale consommée pour le séchage représente un poste important pour la coopérative. La puissance d'un séchoir se définit par sa puissance d'évaporation en tonnes d'eau/h. L'indicateur de performance qui qualifie le mieux l'efficacité globale d'un séchoir est la consommation spécifique qui s'exprime en kWh/tonne d'eau évaporée.

La consommation spécifique moyenne du parc des séchoirs français s'établit de 1 000-1 100 kWh/tonne d'eau pour les plus récents à 1 200-1 400 kWh/tonne d'eau pour les plus anciens.

Le monde agricole a longtemps privilégié le coût d'investissement au rendement global mais l'évolution du coût des énergies et des taxes associées devraient accélérer la remise en cause de la conception et de l'exploitation de ces équipements.

L'enjeu pour CLAUGER, spécialiste de la gestion économique des équipements thermiques et du traitement d'air, était de proposer une solution innovante capable de financer la filtration des rejets par la réduction des coûts énergétiques des séchoirs.

Présentation de la démarche

L'air rejeté, humide et chargé en particules, issu du séchage est très colmatant. Aussi, il est illusoire de vouloir utiliser un échangeur de type tubes + ailettes ou un filtre à manches pour le traiter, les deux seraient obturés et inopérants rapidement.

CLAUGER a installé un échangeur cyclonique qui permet simultanément, de réduire la masse des particules émises et de récupérer l'énergie contenue dans l'air dit « usé ». Cet air chaud et saturé en humidité, puisqu'ayant servi à sécher le grain, constitue une chaleur fatale et représente un potentiel énergétique

important à récupérer.

L'échangeur, réalisé en inox, est installé en partie haute du séchoir.

Sa particularité est de combiner l'effet de la condensation et de la centrifugation. La carrosserie est constituée de deux cylindres verticaux concentriques entre lesquels sont disposées des spirales en tubes lisses denses véhiculant un fluide caloporteur.

L'air chaud, humide et chargé en poussières, entre dans l'échangeur par un piquage tangentiel débouchant entre les deux cylindres (comme dans un cyclone dépoussiéreur) : il impacte la surface d'échange constituée par des tubes en spirales.

Par contact sur une zone plus froide, l'humidité de l'air se condense sur les tubes qui deviennent un piège à particules.

La poussière s'accumule mais l'eau aussi, et, lorsque la masse critique est atteinte, la force centrifuge arrache ce mélange des tubes de l'échangeur pour le projeter sur la paroi périphérique le long de laquelle il descend avant d'être évacué. Ainsi, cet échangeur est comme autonettoyant, sans pour autant consommer d'eau autre que celle contenue dans l'air.

TÉMOIGNAGE

D'autres versions sont déjà étudiées, utilisant les pompes à chaleur à haute température pour remonter le niveau de la température de la boucle d'eau de récupération jusqu'à 70/80 °C.

Ce système peut permettre de se passer d'énergies fossiles (et de flammes) pour le séchage des oléagineux (qui brûlent facilement) et des céréales, avec un faible pourcentage de poids d'eau à retirer.

Ce travail sur les séchoirs et les enregistrements de données en continu qui ont été réalisés nous incitent à en modifier les équipements et leur mode de régulation existants afin d'en améliorer le rendement global.

Stéphane Alajarin
Directeur Industriel CLAUGER

Récupération de chaleur sur séchoir par échangeur cyclonique

Quand au fluide froid contenu dans les tubes, il ressort chaud de l'échangeur et peut être utilisé pour préchauffer, via un autre échangeur, l'air extérieur en amont du brûleur, réduisant ainsi la consommation énergétique du séchoir.

Les particules captées dans l'échangeur cyclonique peuvent être réutilisées en amendement ou en compostage.

L'eau chargée, récupérée en pied de cyclone, est filtrée, puis sert au nettoyage en continu des échangeurs pour en garantir le rendement.

Cette solution représente l'avantage de ne générer aucun déchet supplémentaire et de ne pas utiliser de produits toxiques.

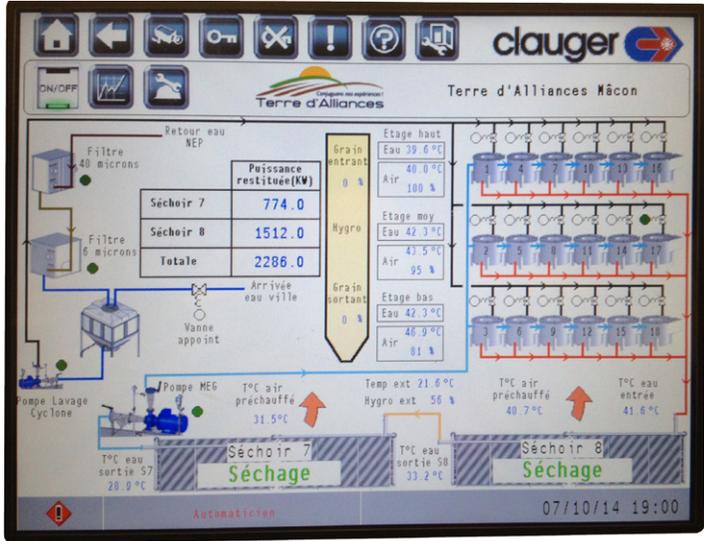


Schéma d'échangeurs cycloniques utilisés en récupération d'énergie sur séchoirs

Bilan de l'opération

- ⚡ **Gain énergétique (sur du maïs 35 %-15 % par 10 °C extérieur)**
 - De 6 à 9 W/m³ d'air rejeté pour une installation, soit une économie d'énergie de 20 à 30 %
 - Exemple : 2 800 kWh économisés pour un débit d'air de 315 000 m³/h
- 🌳 **Gain environnemental**
 - Émissions de poussières << 30 mg / Nm³ d'air rejeté

L'AVIS DE L'EXPERT

L'encrassement des échangeurs de chaleur peut être un frein à la mise en œuvre d'une solution de récupération de chaleur sur un site industriel, en présence d'effluents colmatants ou encrassants ; en effet, outre la contrainte technique, les contraintes de maintenance peuvent rebuter un industriel à valoriser sa chaleur fatale.

Le CETIAT

RETOURS D'EXPÉRIENCE

Récupération directe de chaleur fatale sur l'extraction d'un séchoir

APPLICATION

Site : PRODEVA (51)

Secteur industriel : industrie de l'alimentation animale, PME de 24 salariés, production annuelle moyenne 45 000 tonnes, CA 8,35 M€.

Technologie : tambour rotatif.

Produit : produit fibreux (luzerne), produit en morceaux (pulpes de betterave).

Innovation : récupérateur directe de chaleur fatale.

Contexte & enjeux

La société PRODEVA fabrique de la luzerne et de la pulpe de betteraves déshydratées à destination unique de l'alimentation animale.

La matière première (luzerne et pulpe) est séchée puis broyée pour être ensuite granulée. Le taux d'humidité du produit à l'entrée du séchoir est compris entre 55 et 75 %.

Le site de l'entreprise comprend deux lignes de séchage, permettant de traiter 45 000 tonnes/an de produit, correspondant à une évaporation d'eau de 40 tonnes/heure.

Le poste séchage représente un enjeu énergétique important malgré un pré-séchage naturel en amont pour la luzerne ou un sur-pressage de la pulpe de betteraves.

Présentation de la démarche

Le produit est séché dans des tambours rotatifs dans un flux d'air, chauffé par des chaudières à charbon pulvérisé (énergie la plus économique).

Les débits d'air en jeu dans le séchoir ainsi que les rejets thermiques correspondants dans l'extraction du séchoir sont élevés.

L'amélioration consiste en une récupération de chaleur directe sur les rejets d'air chaud du tambour rotatif, qui permettent de pré-sécher par voie thermique le produit : il est déposé sur une bande perforée, au travers de laquelle circule l'air

chaud et humide récupéré sur le tambour rotatif.

Le produit ainsi pré-séché est ensuite transporté par vis vers le tambour rotatif. Compte tenu de l'opération de pré-séchage, la température de séchage dans le tambour est abaissée, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie du séchoir.

L'autre intérêt de cette récupération est de recycler la poussière présente dans les rejets d'air extraits du séchoir pour l'intégrer dans les granulés fabriqués.

L'installation est récente et date de 2014.



Vue pré-séchoir avec caisson d'alimentation en produit

TÉMOIGNAGE

Concernant cet investissement, nous avons été satisfaits des résultats conformes à nos attentes, avec l'obtention d'une économie de plus de 10 %. Il nous a également permis de travailler à une température d'attaque plus basse, donc avec moins de «pertes au feu», et d'avoir une meilleure maîtrise des rejets de poussières, avec un captage optimisé. Nous avons ainsi une plus grande capacité de séchage, principalement en période fortement humide au cours de laquelle l'alimentation du séchoir est réalisée avec des fourrages venant directement des champs.

Xavier de la Fournière
Directeur PRODEVA

Récupération directe de chaleur fatale sur l'extraction d'un séchoir



Vue de face pré-séchoir avec bande perforée

Bilan de l'opération

-  **Gain énergétique**

 - 10 % de la consommation d'énergie du séchoir
 - Économie de 1 100 tonnes de lignite
-  **Gain financier**

 - 110 k€ / an
-  **Investissement**

 - 1 300 k€ (pré-séchoir, caisson d'alimentation, gaines de recyclage et équipements électriques)
-  **Temps de retour sur investissement**

 - > 5 ans
-  **Gain environnemental**

 - 1 800 tonnes équivalent de CO₂ évitées

L'AVIS DE L'EXPERT

L'ADEME estime le gisement industriel de chaleur valorisable à une température supérieure à 100°C à 51 TWh. Les fours et les séchoirs sont des équipements présentant un potentiel élevé de chaleur valorisable, plus particulièrement au niveau de leurs extractions.

Évaluez le potentiel de vos rejets grâce à l'audit énergétique ciblé de vos process et réduisez vos consommations d'énergie !

Le CETIAT

RETOURS D'EXPÉRIENCE

Récupération de chaleur sur sécheur par valorisation de l'air de refroidissement

APPLICATION

Site : Métaux Spéciaux MSSA (73).

Secteur industriel : industrie chimique, PME avec un effectif < 300 personnes, CA 67,5 M€.

Technologie : tambour rotatif.

Produit : produit granulaire (sodium).

Innovation : récupération de chaleur directe du refroidisseur vers le séchoir.

Bureau d'études : COMESSA.

Contexte & enjeux

La société Métaux Spéciaux (MSSA), fondée à la fin du XIX^e siècle, produit en particulier du sodium, des dérivés chimiques du vanadium et des métaux alcalins, du chlore, du potassium. Ces produits contribuent à la fabrication dans des secteurs industriels en développement : énergies renouvelables, électronique, hygiène et santé, automobile et bâtiment, textile et papier.

La production du sodium s'effectue par électrolyse de sel fondu, à partir d'un sel (NaCl) quasi anhydre, nécessitant un traitement à haute température (440 °C), impliquant une consommation de gaz importante.

Afin de réduire cette consommation énergétique et dans le cadre d'une augmentation de capacité, la société MSSA a décidé de mettre en place une nouvelle installation de séchage et refroidissement de sel, dont le principe de fonctionnement permet de réduire les effluents gazeux et la consommation énergétique.

Présentation de la démarche

Le séchage du sel s'accompagne d'une étape de refroidissement pour permettre sa manutention et son stockage, avant d'être transféré dans les bacs d'électrolyses.

Du fait de sa forte hygroscopicité et de la très faible teneur en eau résiduelle, le choix d'un refroidissement conductif a été retenu. Par ailleurs, afin de permettre une optimisation et une plus grande fiabilité du procédé, un refroidissement indirect par air a été choisi. De ce fait, l'air ayant servi au refroidissement du sel peut ainsi être réutilisé comme air de séchage après avoir été réchauffé à la température souhaitée au moyen d'un brûleur gaz, ce qui permet, outre la récupération d'énergie, de réduire les rejets atmosphériques.

L'installation est composée d'un tube rotatif sécheur à contre-courant alimenté par l'air chauffé à plus de 600 °C. A sa sortie du sécheur, le sel est transféré dans le refroidisseur rotatif à échangeur tubulaire embarqué (configuration contre-courant). Lors de cette étape, l'énergie cédée par le sel est intégralement transmise à l'air par conduction thermique.

L'air de refroidissement ainsi réchauffé (environ 200 °C) est directement renvoyé vers le brûleur gaz avant d'être réinjecté dans le sécheur.

Le gain énergétique permet une réduction de 25 % à 30 % (en fonction des paramètres de fonctionnement) de la consommation de propane.

TÉMOIGNAGE

Les nombreux échanges techniques avec la société MSSA nous ont permis de leur proposer une solution fiable répondant à leur souhait de réduire la consommation énergétique sans pour autant complexifier l'installation. L'amortissement rapide de l'option a été un élément majeur dans leur prise de décision.

Frédéric Pron
Directeur Général délégué COMESSA

Récupération de chaleur sur sécheur par valorisation de l'air de refroidissement

Bilan de l'opération

 **Gain énergétique**

- 2 050 MWh/an (80 000 Nm³ de propane)

 **Gain financier**

- 80 k€

 **Investissement**

- La plus-value que représente la solution sélectionnée par rapport à un système de refroidissement conventionnel ne permettant pas la récupération des gaz chauds est d'environ 135 k€.

 **Gain environnemental**

- 185 tonnes de CO₂ évitées à l'atmosphère

L'AVIS DE L'EXPERT

Les économies d'énergie peuvent être conséquentes, dès lors que chaque étape du procédé est optimisée en matière d'efficacité énergétique. Pour toute solution de récupération de chaleur, il est important de vérifier que la modification apportée à l'installation n'impacte pas la qualité du produit et d'impliquer les opérateurs dans le pilotage et le suivi de la performance énergétique de l'installation.

Un audit est un moyen simple et efficace d'identifier des pistes d'améliorations et d'augmenter les performances de votre installation de séchage !

Le CETIAT

RETOURS D'EXPÉRIENCE

Intégration énergétique du séchage dans le procédé industriel

APPLICATION

Site : la sucrerie d'Etrépagny (27).

Secteur industriel : industrie agroalimentaire, PME de 89 salariés.

Technologie : tambour rotatif.

Produit : produit granulaire (sucre).

Innovation : optimisation énergétique du procédé.

Bureau d'études : COMESSA.

Contexte & enjeux

La sucrerie d'Etrépagny (27), fondée à la fin du XIX^e, siècle appartient au groupe Saint-Louis Sucre, lui-même détenu par le groupe Südzucker (premier producteur mondial de sucre). Elle produit, à partir de la betterave, environ 1 600 t de sucre par jour pendant la campagne sucrière (de septembre à décembre).

Le séchage du sucre, dernière étape du procédé avant le stockage, est nécessaire pour garantir au sucre sa bonne conservation.

Traditionnellement, le séchage s'opère dans un tube rotatif alimenté en air chaud. Afin de remplacer un sécheur en fin de vie, la sucrerie d'Etrépagny a décidé de mettre en place un nouvel atelier de séchage de sucre.

Présentation de la démarche

La fabrication du sucre cristallisé s'effectue en plusieurs étapes : diffusion, épuration, évaporation, cristallisation, centrifugation et séchage. À sa sortie des centrifugeuses, le sucre est encore entouré d'un film de sirop qui devra être évaporé lors de la dernière étape de séchage. Traditionnellement, le séchage s'effectue au moyen d'un flux d'air chaud (70/90 °C) injecté dans le sécheur. Ce qui nécessite une consommation de vapeur d'environ 20 kg/h de vapeur par t/h de sucre.

Pour cette nouvelle installation et afin de réduire la consommation énergétique, le sécheur a été conçu et dimensionné pour utiliser la chaleur sensible du sucre comme seul apport énergétique pour assurer son séchage. En effet, le produit sort chaud du process amont au séchage (environ 70 °C). Lors du séchage, le sucre va céder une partie de sa chaleur qui servira à évaporer l'eau contenue dans le film de sirop (environ 1 %). Une quantité limitée d'air est injectée dans le sécheur (à contre-courant) pour

évacuer l'eau évaporée. Cet air, légèrement réchauffé (env. 40 °C) pour réduire son humidité relative va traverser le sécheur et se réchauffer encore légèrement au contact du sucre.

Au final, ce principe de séchage « à froid » permet d'économiser plus de 75 % de la vapeur par rapport à un sécheur traditionnel « à chaud », soit environ 15 kg/h de vapeur par t/h de sucre.

Ce type de sécheur permet également de pré-refroidir le sucre et de diminuer ainsi la consommation énergétique dépensée pour son refroidissement. Du fait d'un débit d'air nettement plus faible, la consommation électrique globale du système de ventilation est également réduite d'environ 50 %.

TÉMOIGNAGE

Le choix technique du séchage « à froid » résulte de la volonté forte de Saint Louis Sucre de réduire la dépense énergétique de cette étape. Le gain financier important l'emporte facilement sur les contraintes additionnelles de pilotage de l'installation qu'implique la solution retenue.

Frédéric Pron
Directeur Général délégué COMESSA

Intégration énergétique du séchage dans le procédé industriel

Bilan de l'opération

 **Gain énergétique**

- Réduction de 75 % de la vapeur nécessaire au procédé (réduction d'environ 2 690 t de vapeur/an).

 **Gain financier**

- 80 k€ (énergie thermique)

 **Investissement**

- Le choix d'un séchage « à froid » par rapport aux installations de séchage « à chaud » conventionnelles n'engendre pas de surcoût significatif. Le gain financier est quasi immédiat mais cette option nécessite une surveillance accrue de l'installation par les opérateurs lors des phases transitoires (démarrage/arrêt).

L'AVIS DE L'EXPERT

Un nouvel investissement ou une amélioration apportée à une installation existante est souvent l'opportunité de repenser plus efficacement un procédé et d'intégrer la performance énergétique dans les équipements en amont du projet.

Le transfert de chaleur du sucre vers le sirop, grâce à la chaleur accumulée dans le process amont, permet d'intégrer l'efficacité énergétique au coeur même du procédé.

La facture d'énergie est réduite de manière conséquente, avec un double gain : gain d'énergie thermique pour le séchage du sirop et gain d'énergie électrique du système de ventilation du séchoir.

Le CETIAT

ANNEXES

Sigles / Typologie de produits

Liste des sigles

AC :	air chaud
CMV :	compression mécanique de vapeur
DIC :	détente instantanée contrôlée
HF :	hautes fréquences
HP :	haute pression
IR :	infrarouge
MO :	micro-ondes
PAC :	pompe à chaleur
T° :	température
VES :	vapeur d'eau surchauffée

Typologie de produits

Produit liquide

Produit pompable.

Exemple : lait.

Produit pâteux

Si le produit est de texture assez fluide, il pourra être pulvérisé. On parle de pâtes pompables.

Si le produit est très visqueux, on peut lui donner une texture assez proche de l'état solide (par émiettage ou granulation). On parle dans ce cas de gâteaux cohérents.

Exemple : purée de pomme de terre, boue de station d'épuration.

Produit pulvérulent

Produit divisé, s'écoulant librement, dont la granulométrie est inférieure à 500 µm.

Exemple : produits pharmaceutiques.

Produit granulaire

Produit divisé, s'écoulant librement, dont la granulométrie est supérieure à 500 µm.

Exemple : sable.

Produit fibreux

Produit cohérent ayant une dimension privilégiée (on parle aussi d'objet à une dimension) pour lequel on peut définir une longueur et un diamètre dans la direction transversale.

Exemple : laine en bourre.

Produit plan

Produit cohérent dont la forme est plane.

Exemple : aggloméré.

Produit en bandes

Produit souple.

Exemple : papier, textile.

Produit en morceaux

Produit cohérent qui se présente sous forme de morceaux.

Exemple : morceaux de légumes.

Produit en forme

Produit cohérent qui conserve sa forme initiale au cours de l'opération de séchage.

Exemple : carreau de plâtre.

Air surpressé / air comprimé

L'air surpressé est relevé en terme de niveau de pression, jusqu'à 1 bar au dessus de la pression atmosphérique. Au-delà de 1 bar, on parle d'air comprimé.

Boudinage (ou extrusion)

Opération consistant à obtenir un produit sous forme de cylindres de diamètre constant.

Cliver

Fendre dans le sens naturel de ses couches, par lames parallèles.

Exprimage

Compression mécanique d'une étoffe réalisée entre deux rouleaux.

Floconnage

Opération légère qui transforme le film obtenu en flocons calibrés (produits amyliacés).

Foulard

Appareil d'imprégnation et d'exprimage pour étoffes. Ce sont en général des rouleaux recouverts d'un support en caoutchouc.

Laize

Largeur d'une étoffe, d'un tissu entre les deux lisières.

Points/heure

La capacité d'un sécheur silo s'exprime en quintaux humides points/heure ou encore par abus de langage, en «points/heure» ou «points». Un «point» équivaut à 1,17674 kg d'eau retirée de 100 kg de grain humide ramené à 15 % d'humidité finale.

À partir de cette capacité exprimée en «points», il est possible de déterminer la capacité évaporatoire (kg d'eau/h) et le débit de grain à l'entrée du sécheur.

Exemple : un sécheur de 3 000 «points» peut évaporer $3\,000 \times 1,17647 = 3\,530$ kg d'eau/h dans les conditions énoncées.

Teneur en eau (base humide)

Le teneur en eau, exprimée en base humide, est le rapport de la masse d'eau contenue dans le produit et de la masse du produit.

$$\% \text{ eau} = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{totale}}} = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{eau}} + m_{\text{matière sèche}}}$$

Teneur en eau (base sèche)

La teneur en eau, exprimée en base sèche, est le rapport de la masse d'eau contenue dans le produit et de la masse de matière sèche du produit.

$$\% \text{ eau} = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{matière sèche}}}$$

ANNEXES

Les bases : porosité et humidité d'un produit

La porosité d'un matériau

Hormis ses caractéristiques physiques, chaque produit est également caractérisé par une structure interne composée des pores et de réseaux de canaux poreux. Ce sont dans ces zones de porosité qu'est piégée l'humidité.

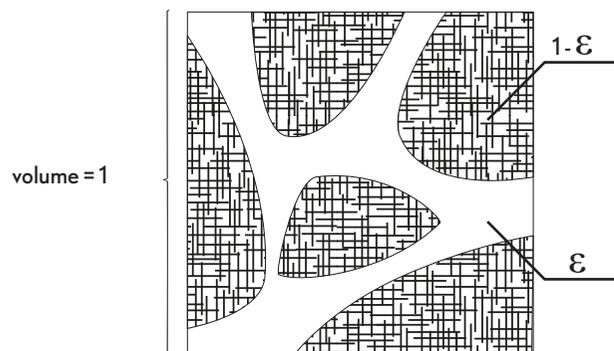
Le séchage nécessite donc d'éliminer l'eau en surface et de retirer l'eau présente dans les pores et réseaux poreux, en quantité maîtrisée pour obtenir la qualité du produit final souhaitée.

Caractérisation de la porosité d'un produit

La porosité volumique ε , rapport entre le volume des pores et le volume apparent du produit, est un paramètre pertinent à l'échelle du processus de séchage (porosité variable dans le produit) ou du produit (porosité moyenne).

$\varepsilon = \text{Volume de pores} / \text{Volume apparent du produit}$

Volume de contrôle microscopique



L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou retraites, et donc une modification de la structure poreuse qui rejaillira sur les caractéristiques physiques des produits, mais également sur les caractéristiques de séchage, par un ralentissement et même un blocage des transferts thermiques (croustage, bouchage).

Ainsi, il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours du séchage, pour infléchir les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver sans encombre au bout de l'opération, tout en ayant gardé ses qualités.

Description du solide humide

Le solide présente un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air humide à saturation. 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.

Le solvant eau dans un produit humide

L'eau se présente dans le matériau sous 3 formes :

- eau libre (eau capillaire),
- eau liée (eau absorbée),
- eau de constitution.

■ Eau libre (eau capillaire)

Il s'agit de l'eau superficielle qui est faiblement liée au produit.

Elle remplit la majeure partie des vides de la structure, elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire.

La quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu (ε).

■ Eau liée (eau absorbée)

C'est l'eau absorbée dans les parois des structures, grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants, et plus particulièrement grâce aux forces de Van Der Waals.

Cette eau est plus difficile à extraire que la précédente car les forces de liaisons sont plus importantes. Cette eau est plutôt concernée par la fin du séchage. On est alors dans le domaine hygroscopique.

■ Eau chimiquement liée ou de constitution

C'est une eau de constitution ou de cristallisation. Elle fait partie de la structure du solide, et n'est pas concernée par l'opération de séchage. Cette eau ne peut être modifiée que par la cuisson, qui intervient à des températures beaucoup plus élevées. Cependant, lors des opérations de séchage, il faudra veiller à ne pas endommager les matériaux (par exemple, le cas des argiles, du kaolin, du bois...).

L'humidité d'un produit est la somme des trois types d'eau présentes dans ce dernier.

Lorsqu'on réalise un séchage, on diminue progressivement l'humidité dans le produit à commencer par l'eau libre suivie de l'eau liée.

Les bases : porosité et humidité d'un produit

L'humidité d'un produit

On définit l'humidité d'un produit X comme la masse d'eau en kg associée à 1 kg de solide sec ou humide, selon l'habitude des industriels. Elle s'exprime en %.

Pour les produits en base sèche :

$$X_{bs} = \text{Masse d'eau} / \text{Masse de produit sec}$$

Pour les produits en base humide :

$$X_{bh} = \text{Masse d'eau} / \text{Masse de produit humide}$$

$$X_{bh} = X_{bs} / (1 + X_{bs})$$

Il est nécessaire de bien connaître la base de référence.

La siccité d'un produit

Un autre paramètre est parfois utilisé par les industriels : la siccité. Le matériau est humide et on le caractérise par rapport au produit sec. Elle s'exprime en %.

$$\text{Siccité} = \text{masse de produit sec} / \text{masse de produit humide}$$

$$\text{Siccité} = 1 / (1 + X_{bs})$$

	PRODUIT A	PRODUIT B
Masse sèche (g)	1000	1000
Masse d'eau (g)	300	3000
Masse humide (g)	1300	4000
Humidité base sèche (%)	30	300
Humidité base humide (%)	23	75
Siccité (%)	77	25

L'activité d'un produit A_w

L'activité de l'eau A_w mesure de façon globale la force de liaison entre l'eau et le produit.

C'est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à l'équilibre au-dessus du produit (p_w) à la pression partielle de vapeur d'eau à l'équilibre au-dessus de l'eau pure (p_w^0) à la même température :

$$A_w = p_w / p_w^0$$

L'activité d'un produit varie entre 0 et 1 (1 étant le maximum).

L'activité de l'eau est l'un des principaux paramètres influençant la conservation des aliments ou des produits pharmaceutiques. Les micro-organismes ont besoin d'eau libre (libre pour les réactions biochimiques) afin de se développer.

L'activité de l'eau ne représente pas la teneur en eau (ou humidité) mais bien la disponibilité de cette eau. Plus l'activité de l'eau est élevée, plus la quantité d'eau libre est grande et plus les micro-organismes se développeront. Les champignons ont habituellement besoin d'une activité d'au moins 0,7 et les bactéries d'au moins 0,91.

Afin de diminuer cette activité, on peut soit sécher le produit, soit ajouter un soluté qui va fixer l'eau et la rendre non utilisable par les micro-organismes : c'est la salaison des produits de charcuterie, ou le sucrage des confitures, par exemple.

ANNEXES

Les bases : le diagramme de l'air humide

Le diagramme de Mollier ou diagramme de l'air humide

Le diagramme de Mollier permet la représentation des grandeurs décrivant l'air humide.

Le diagramme de l'air humide est utilisé pour les calculs relatifs aux humidités de l'air, pour les déterminations de points de rosées et de températures humides ainsi que pour les calculs énergétiques relatifs au séchage.

Ces éléments peuvent être synthétisés, sous forme graphique, dans le diagramme dit de « l'air humide », établi pour une pression d'air donnée.

Il n'est valable que dans les limites de pression, donc d'altitude. Il comporte 3 axes.

Il se rapporte à l'unité de masse d'air sec (kilogramme d'air sec ou kg as).

La température sèche (T_s)

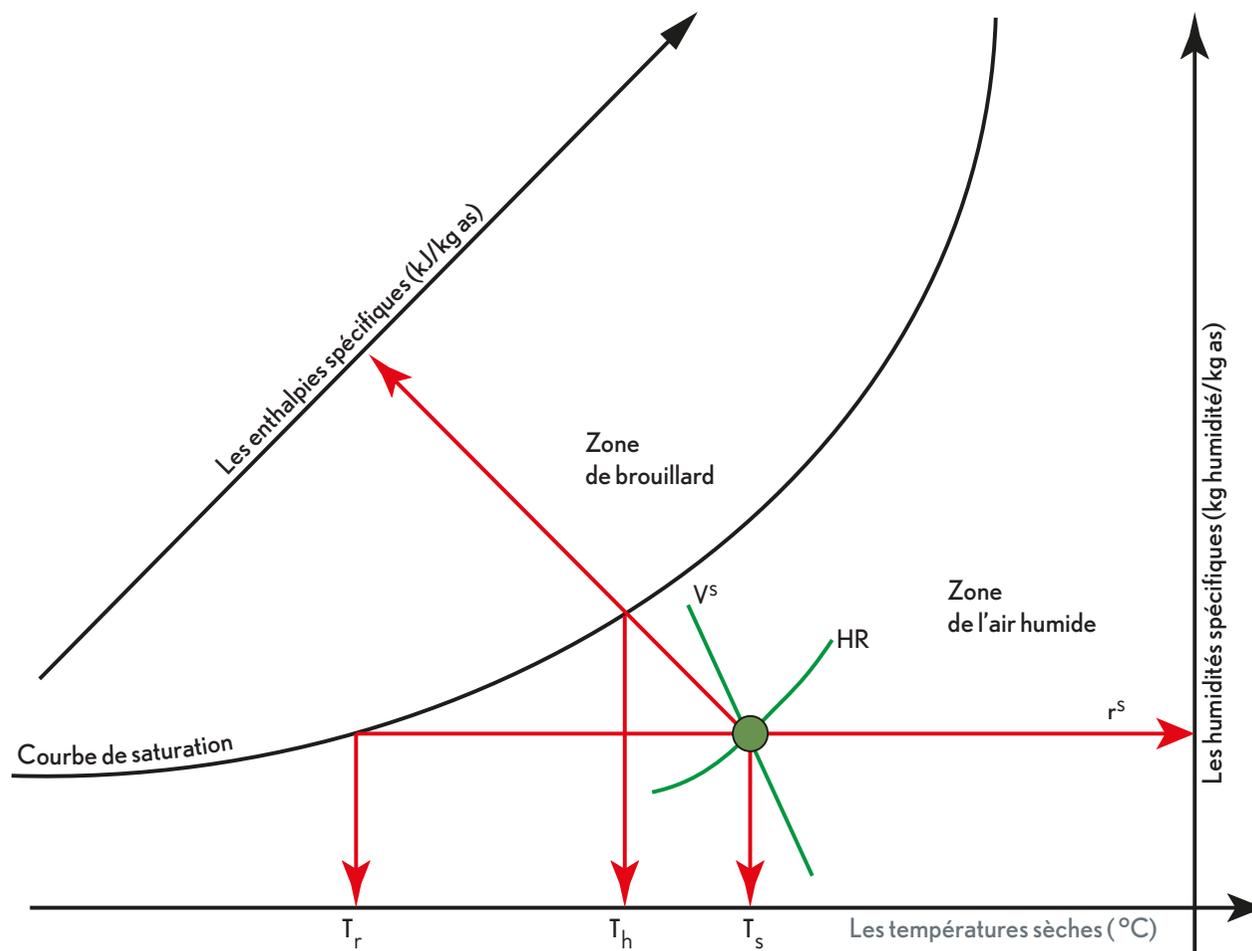
C'est la température mesurée avec un thermomètre à l'abri du rayonnement des différentes parois.

Cette température correspond à la consigne affichée par le séchoir.

La température humide (T_h)

La température humide (ou température de bulbe humide) est la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le gaz considéré et humidifiée en permanence par de l'eau pure. L'évaporation de l'eau contenue dans la mèche provoque un refroidissement (la température humide est donc toujours inférieure à la température du gaz). La température humide est une des grandeurs représentatives de l'humidité du gaz.

C'est la température à laquelle va s'évaporer l'eau en surface du matériau.



Représentation simplifiée du diagramme de l'air humide

La température de rosée (ou point de rosée T_r)

Le point de rosée ou température de rosée est la température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise, à pression et humidité données, sans

qu'il se produise une formation d'eau par saturation.

Dans un séchoir, il faut faire en sorte de ne pas atteindre cette température de rosée au risque de condenser sur les parois internes.

Les bases : le diagramme de l'air humide

Humidité de l'air (relative HR)

L'humidité est la quantité d'eau présente dans l'air à une température donnée. Elle est mesurée à l'aide d'un hygromètre et est exprimée en %.

Celle-ci s'exprime comme le quotient de la pression partielle de vapeur d'eau sur la pression de vapeur saturante de l'eau à la même température. L'humidité relative est aussi souvent nommée degré hygrométrique. À la saturation, l'humidité relative est de 100 %.

C'est l'humidité de l'air qui va conférer à cette dernière la capacité évaporatoire d'un produit :

- si l'air est saturé en humidité, le pouvoir évaporatoire de l'air est nul. Aucun séchage ne sera possible.
- si l'air est totalement déshydraté, son pouvoir évaporatoire est excellent, mais risque de provoquer un sur-séchage selon les produits.

Le rapport de mélange (r)

Le rapport de mélange r d'un volume d'air désigne le rapport de la masse de vapeur d'eau qu'il contient à la masse d'air sec.

Ce nombre r est sans dimension et devrait donc être en kg/kg as. Cependant, ses valeurs restant généralement très faibles, il est d'usage de les manipuler en les multipliant par 1 000, ce qui revient à l'exprimer en grammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec (g/kg as).

Volume spécifique ou volume massique (V)

C'est le volume occupé par un kilogramme d'air sec accompagné des quelques grammes de vapeur qui lui sont mélangés. On le note V (m³ d'air humide/kg air sec).

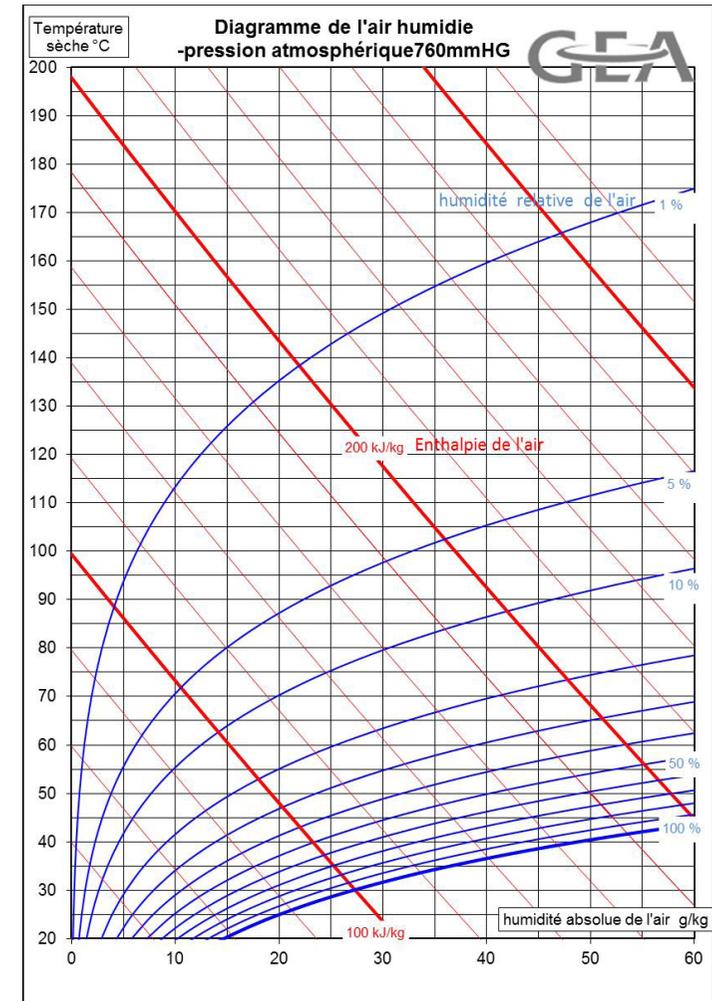
Le volume spécifique de l'air augmente avec la température (car l'air se dilate en s'échauffant comme la plupart des fluides). Il augmente aussi avec la teneur en humidité (car la vapeur d'eau est moins dense que l'air sec). Cette caractéristique est rarement utilisée en séchage.

L'enthalpie de l'air (H)

L'enthalpie est le terme utilisé en thermodynamique pour exprimer la chaleur totale (ou énergie calorifique) d'un système.

L'enthalpie de l'air humide est donc le contenu énergétique de cet air. L'enthalpie de l'air humide est la somme de l'enthalpie de l'air et de l'enthalpie de l'eau.

La notion d'enthalpie est utilisée en séchage pour réaliser les bilans car elle intègre l'ensemble des caractéristiques de l'air de séchage (température, humidité, masse volumique...). Elle est exprimé en kJ/kg air sec (kJ/kg as).

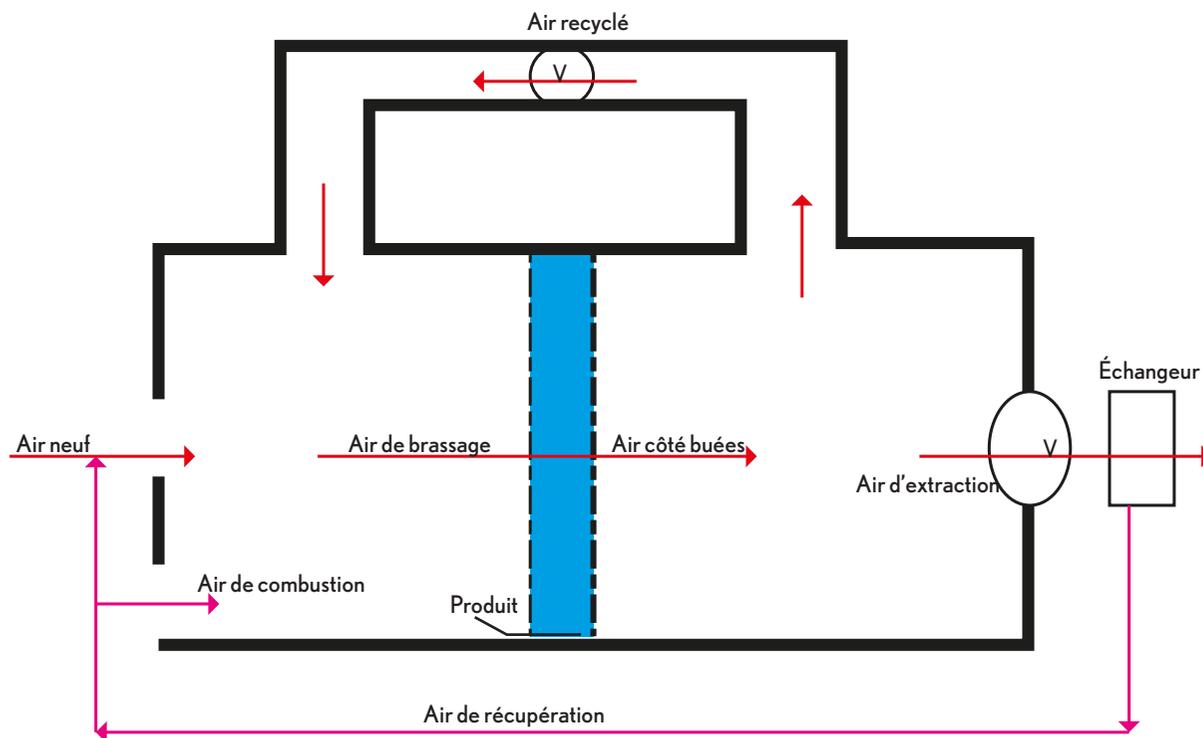


Exemple de diagramme de Mollier - Source GEA

ANNEXES

Les bases : bilan énergétique d'un séchoir

Les principaux débits d'air d'un séchoir



Les principaux débits d'air d'un séchoir

Le débit d'air assurant le séchage : air de brassage

Le débit d'air de brassage est égal à l'air de recyclage éventuel + l'air neuf entrant + l'air de combustion si ce dernier est soufflé dans le séchoir.

C'est l'air de brassage qui assure le transfert thermique avec le produit.

Plus le débit de brassage interne sera important, plus les échanges convectifs le seront.

Le débit d'air neuf

L'air entrant (neuf) pénètre dans le séchoir au niveau des sas ou des ouvertures prévues à cet effet. Il est chauffé par le système de production de chaleur.

L'air neuf entrant dans le séchoir dépend principalement des débits d'extraction afin de maintenir un équilibre de pression. Il est pris en général dans l'atelier, à température ambiante.

La quantité d'air neuf entrant dans le séchoir influencera donc directement la puissance de chauffe à mettre en œuvre.

Le débit d'air recyclé (ou air de recyclage)

L'air de recyclage est de l'air extrait côté buées et réinjecté dans la zone de brassage.

Il permet de bénéficier d'un apport d'air chaud complémentaire afin de diminuer l'arrivée d'air neuf à chauffer, à débit de brassage constant. Il abaisse par conséquent les consommations énergétiques du séchoir.

Le débit d'air d'extraction

Il s'agit de l'air qui est extrait au séchoir.

Il faut que ce débit soit le plus faible possible (ce qui permet de réduire l'entrée d'air neuf) avec la plus grande humidité.

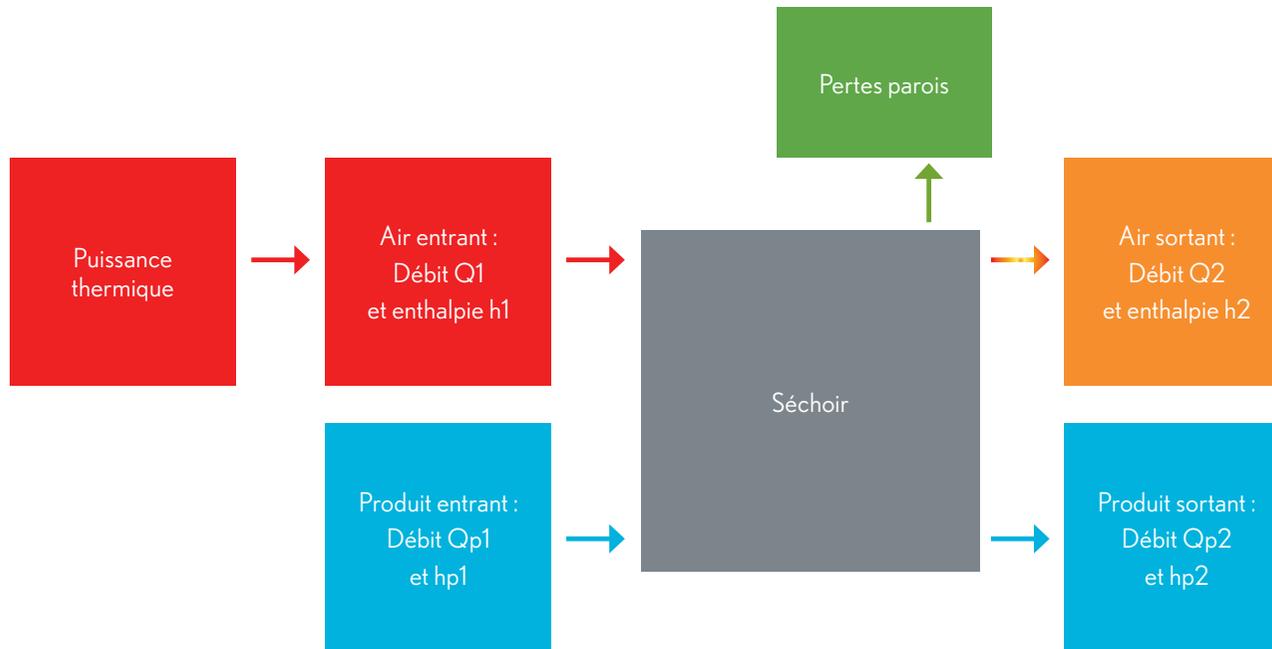
Le débit d'air de récupération

L'air extrait au niveau du séchoir est parfois chaud et chargé en humidité. Son pouvoir calorifique est ainsi important (il est pratiquement égal à la puissance du séchoir).

Le principe consiste à récupérer une partie de cette puissance pour la réinjecter dans le séchoir. On préchauffe ainsi l'air neuf entrant avec une partie de cette chaleur via la mise en place d'un échangeur de chaleur (récupérateur de chaleur).

Les bases : bilan énergétique d'un séchoir

Le bilan énergétique d'un séchoir



Principe du bilan énergétique

En général, sans être exhaustif :

- les déperditions par les parois sont faibles ;
- la puissance fournie pour échauffer le produit (puissance sensible) est faible également ;
- la puissance enthalpique de l'air entrant dans le séchoir est faible (air froid extérieur) par rapport à celle de l'extraction (chaude et chargée en humidité).

Ce qui implique que pratiquement la totalité de la puissance fournie par le système de production de chaleur du séchoir se retrouve dans la puissance enthalpique des gaz d'extraction.

Il est donc important de travailler sur l'optimisation énergétique d'un séchoir, voir le chapitre «Bonnes pratiques énergétiques» (p. 86) pour aller plus loin.

Remerciements

L'ADEME et le CETIAT tiennent à remercier tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce guide, notamment :

- Monsieur Hedi ROMDHANA, AGROPARISTECH,
- Monsieur Éric MONFORT, GEA,

ainsi que les entreprises industrielles ayant fourni des illustrations et leurs témoignages :

- AMC
- CLAUGER
- COMESSA
- ELMETHERM
- GEA
- PRODEVA

LE CETIAT

Créé en 1960 à la demande des industriels de l'aéronautique et de la thermique, le CETIAT a pour objectif de participer à l'innovation de ces secteurs industriels, en anticipant les évolutions et les besoins de ces derniers.

Doté d'une mission d'intérêt général, le CETIAT est un organisme d'études, d'essais, d'étalonnages et de formation, qui joue aujourd'hui un rôle capital pour renforcer la compétitivité du secteur industriel français. Il a développé, au cours des années, des outils de pointe pour les essais, des diagnostics pertinents, des mesures fiables, des expertises innovantes, pour déterminer avec précision, les performances aérodynamiques, thermiques et acoustiques des matériels ou installations.

Centre référent reconnu par les industriels de tous les secteurs, tant sur le plan européen qu'international, le CETIAT joue un rôle central dans les instances de normalisation européennes et internationales, et participe à la réussite de nombreux projets européens.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Ce document est édité par l'ADEME et le CETIAT
ADEME | 20, avenue du Grésillé | BP 90406 |
49004 Angers Cedex 01

CETIAT : Domaine Scientifique de la Doua -
25, avenue des Arts • BP 2042 - 69603 Villeurbanne
Cedex - France

Coordination du projet : Aude-Claire HOUDON et Sandrine
LACOMBE, ADEME - Youmna ROMITTI et Fabienne TRACOU, CETIAT

Crédits photo : AMC - CETIAT - CLAUGER - COMESSA -
ELMETHERM - GEA - PROVEDA

Création graphique : BELTYS • 302 rue Garibaldi • 69007 Lyon •
04 78 721 911 • www.beltys.fr

Brochure réf. 8856

ISBN : 9791029707919 - Février 2017

Dépôt légal : ©ADEME Éditions, février 2017

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

LES PROCÉDÉS DE SÉCHAGE DANS L'INDUSTRIE

Le séchage est une des opérations unitaires les plus communes dans l'industrie, tous secteurs confondus. Il apparaît sous de multiples techniques, nées de la diversité des produits traités. Le séchage est de plus une opération clé pour l'industrie : la qualité du produit final en dépend. Une inadaptation du procédé industriel de séchage a donc un fort impact : coûts de fonctionnement élevés dus à une consommation énergétique excessive, produit de mauvaise qualité, productivité faible.

Pourtant, l'information pratique, organisée et globale manque. Ce guide a pour vocation de combler cette lacune et permet, à partir des caractéristiques du produit à sécher de présélectionner une technologie adaptée. C'est un outil pratique pour tous ceux qui ont des décisions à prendre en matière de séchage dans les processus de fabrication de produits industriels.



www.ademe.fr

www.cetiat.fr



8856

ISBN 979-1-02970-791-9



9 791029 707919