

PARTIE II. Procédés des industries agro-alimentaires

A. Procédés à température ambiante

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

Procédés thermiques

Exemples

Procédés unitaires courants incluant la transfert de chaleur comme opération unitaire

- Chaleur
 - Blanchiment
 - Stérilisation
 - Cuisson
 - Pasteurisation
 - Séchage
 - Evaporation
- Froid
 - Réfrigération
 - Congélation
- Froid en 1er
 - Lyophilisation
- Chaleur en 1er
 - Cuisson-extrusion
 - Distillation

Procédés thermiques

Principes du transfert de chaleur

- **Conduction**
 - Entre molécules adjacentes.
 - Contact direct.
 - Pas de mouvement de matière
- **Convection**
 - Transfert d'énergie par transfert de matière fluide chauffée
 - Le mouvement de matière à l'intérieur de l'aliment distribue la chaleur
 - Le mouvement est naturel ou artificiel
- **Rayonnement**
 - Transfert de chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques
- **Combinaison de ceux-ci**

Procédés thermiques

Equipements

- Echange de chaleur séquentiel
 - Fours, étuves, autoclaves
 - Réfrigérateurs, congélateurs
- Echange de chaleur continu
 - Echangeurs à plaques
 - Echangeurs tubulaires
 - Echangeurs à surface raclée
 - Convoyeurs

Procédés thermiques

Equipements

Echangeur à plaques

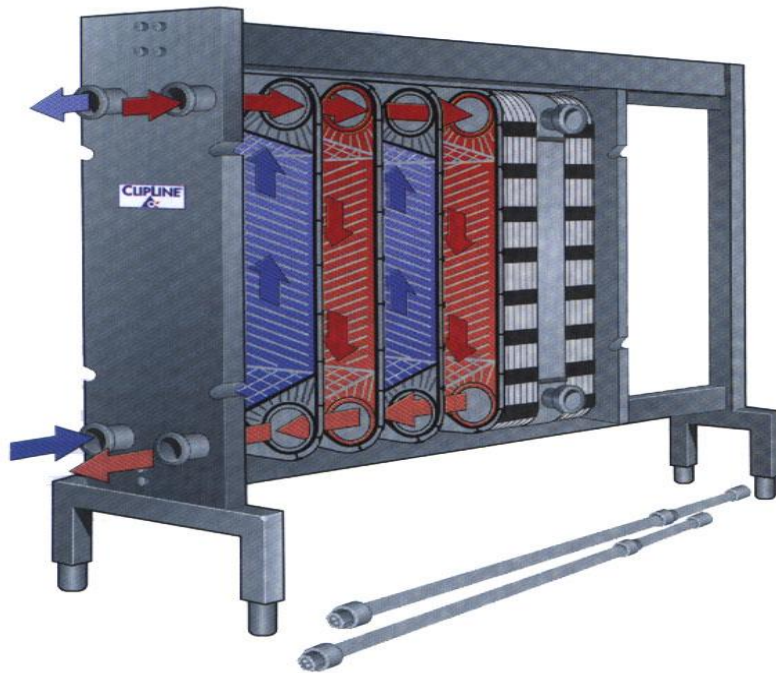
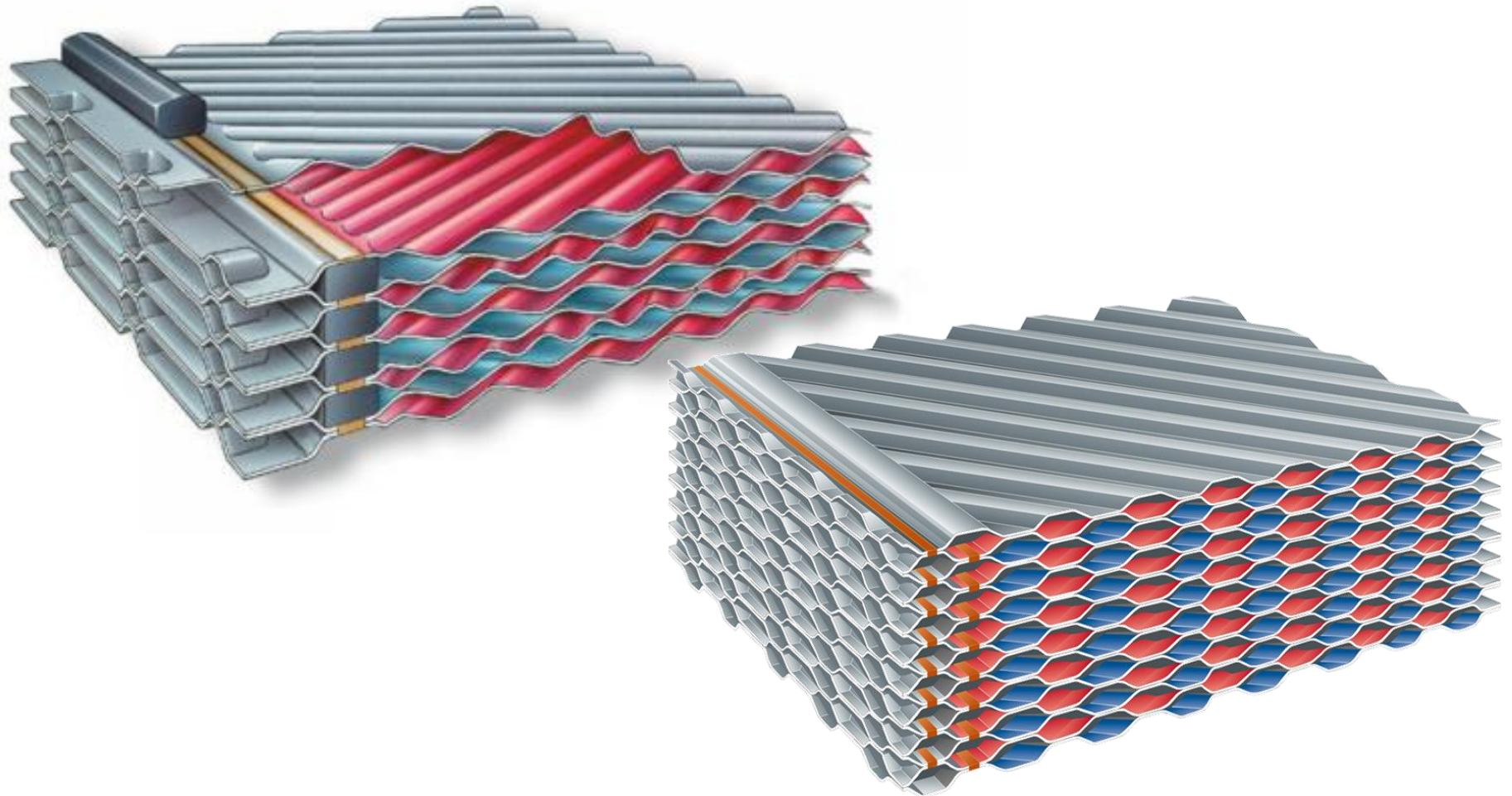


Fig - Principe de circulation des fluides et de transfert de chaleur dans un échangeur à plaques

Procédés thermiques

Equipements

Echangeur à plaques

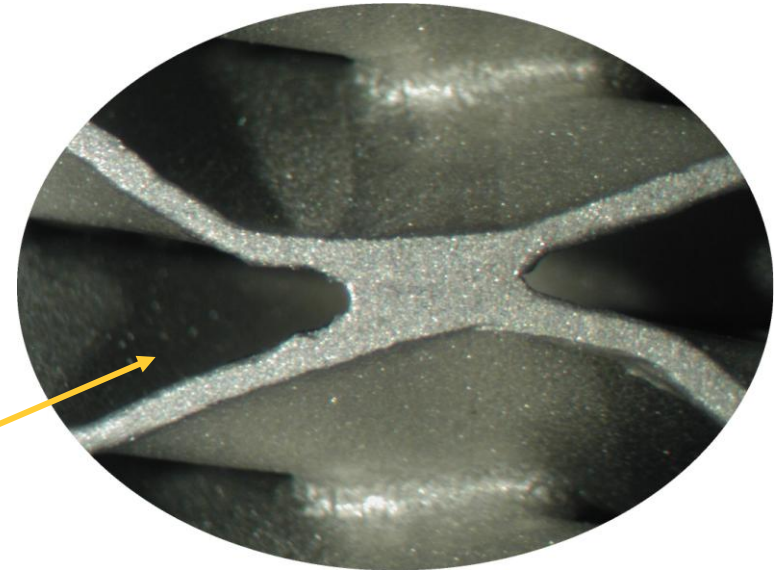


Principe de circulation des fluides et de transfert de chaleur dans un échangeur à plaques

Procédés thermiques

Equipements

Echangeur à plaques

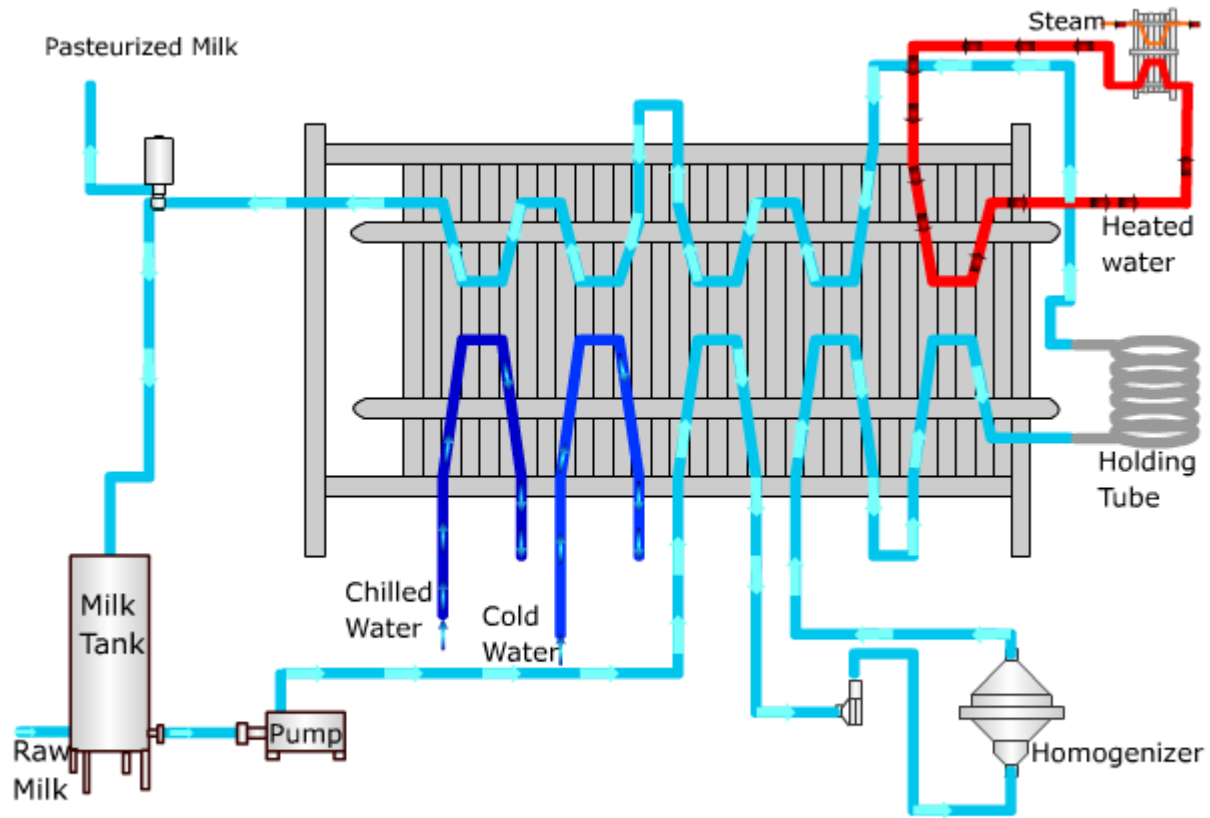


Principe de circulation des fluides et de transfert de chaleur dans un échangeur à plaques

Procédés thermiques

Equipements

Echangeur à plaques



Copyright: R. Paul Singh

Principe et exemple d'application

Procédés thermiques

Equipements

Echangeur tubulaire

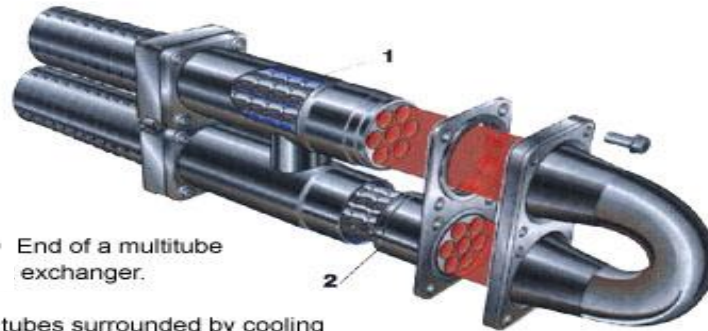


Fig. 6.1.19 End of a multitube exchanger.

1 Product tubes surrounded by cooling medium

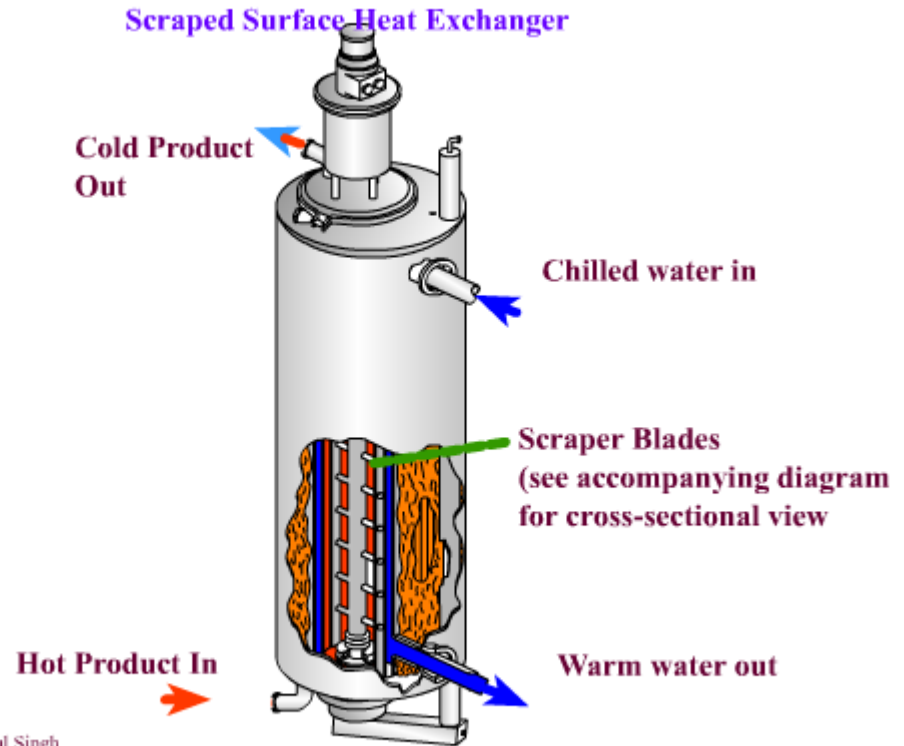
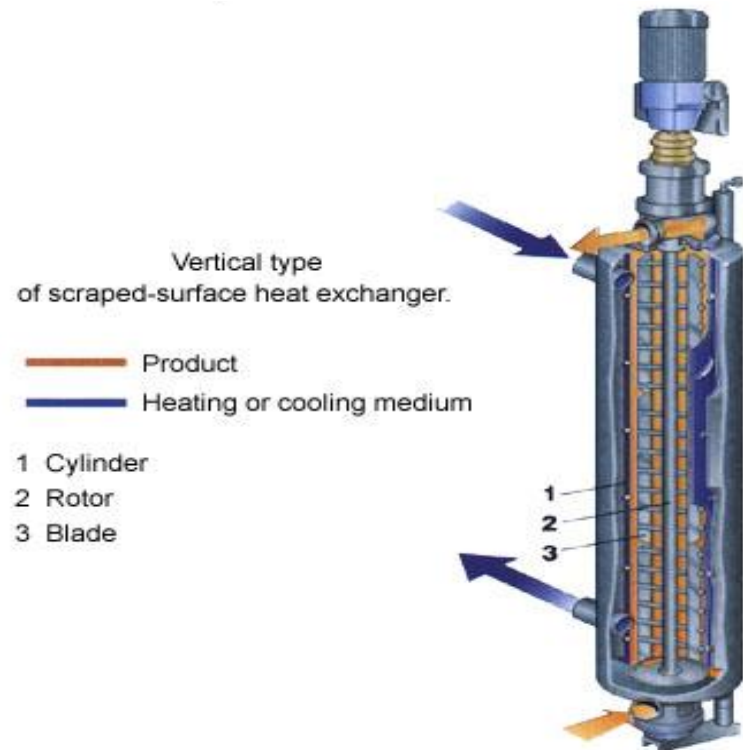
Fig - Principe de circulation des fluides et de transfert de chaleur dans un échangeur tubulaire

Procédés thermiques

Equipements

Echangeur à surface raclée

Fig - Principe de circulation des fluides et de transfert de chaleur dans un échangeur à surface raclée



Procédés thermiques

Facteurs affectant le transfert de chaleur

exemples

- **Densité** de l'aliment
- **Viscosité** et **état** de l'aliment (solide ou liquide)
- **Moyen** de transfert de chaleur utilisé
- **Agitation?**
- **Température** du milieu chauffant ou réfrigérant

PARTIE II. Procédés des industries agro-alimentaires

A. Procédés à température ambiante

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Le chauffage

Objectifs du chauffage

- **Acceptabilité gustative & digestibilité**
 - Griller, rôtir, cuire au four (chaleur sèche)
 - Frire
 - Bouillir
- **Conservation & sécurité sanitaire**
 - Blanchiment
 - Pasteurisation
 - Stérilisation

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Le chauffage

Changements induits par le chauffage

- **Désirables**
 - Destruction des microorganismes
 - Inactivation des enzymes
 - Amélioration de la couleur, de l'arôme, du goût, de la texture
 - Amélioration de la digestibilité
- **Indésirables**
 - Dégradation des nutriments
 - Dégradation des attributs sensoriels

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

II. Pasteurisation et stérilisation

III. Evaporation et séchage

IV. Distillation

V. Cuisson-extrusion

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

II. Pasteurisation et stérilisation

III. Evaporation et séchage

IV. Distillation

V. Cuisson-extrusion

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

Effets des enzymes dans les tissus

- Les **enzymes** des matières premières végétales sont susceptibles de provoquer des **modifications biochimiques** des constituants alimentaires et de dégrader les principes actifs.
- Les enzymes peuvent provoquer...
 - arômes** indésirables
 - changements de **couleur**
 - pertes de **vitamines**
 - ramolissement** des tissus

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

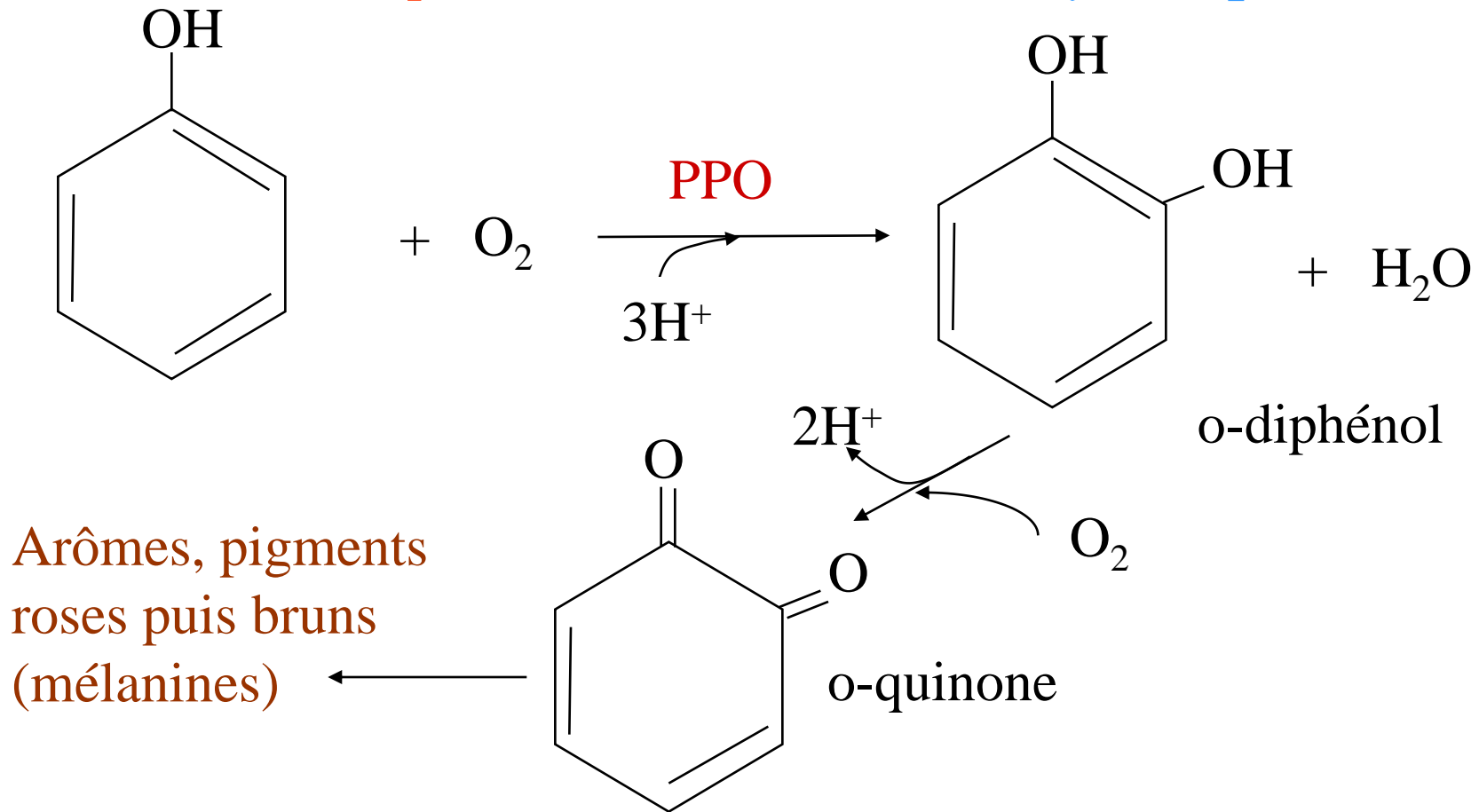
Exemple : le brunissement enzymatique

- Phénomène qui accompagne le découpage de certains fruits et/ou légumes frais
- Résultant de la formation de pigments colorés en brun du groupe des **mélanines** provoquée par les lésions cellulaires des tissus végétaux
- **Polyphénol-oxydase** : les **ortho-diphénols** incolores des végétaux sont transformés en **ortho-quinones** légèrement colorées ; des étapes supplémentaires de polymérisation non enzymatiques conduisent ensuite aux mélanines.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

Exemple : le brunissement enzymatique



- **Prévention** : abaissement du pH, piégeage de l'oxygène par un anti-oxydant, blanchiment

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

Définition et effets

- Traitement thermique destiné à **inactiver les enzymes** susceptibles de provoquer une détérioration au cours du stockage
- Principalement contre le brunissement et le développement d'arômes indésirables
- Les traitements varient d'un produit à l'autre

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

Elévation rapide de la température du produit

- Eau bouillante
 - Utilisation de **pompes** : le produit est pompé à travers l'eau bouillante pendant un temps donné
 - Utilisation de **convoyeurs**: le produit est plongé dans l'eau bouillante pendant un temps donné
- Vapeur
 - Le produit passe rapidement dans une zone chargée de vapeur

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

Avantages

- Le séchage de la plante ne suffit pas nécessairement à inactiver les enzymes qui peuvent être réactivées par simple réhydratation.
- La congélation n'arrête pas les réactions enzymatiques.
- Dans un produit non blanchi, l'activité enzymatique peut avoir lieu même dans des conditions de **réfrigération**, de **congélation** ou de **déshydratation**. Cette activité peut aussi avoir lieu durant la montée en température des **conserves**.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

Limites

- Applications limitées aux fruits/légumes et quelques fruits de mer
- Simple réduction de la population de cellules végétatives
- Nécessité d'une **seconde barrière**
- La sécurité dépend de la seconde barrière



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

II. Pasteurisation et stérilisation

III. Evaporation et séchage

IV. Distillation

V. Cuisson-extrusion

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

II. Pasteurisation et stérilisation

Catégories de traitements thermiques

Traitement	Température	Temps
1 (LTH)	Faible	Long
2	Intermédiaire	Intermédiaire
3 (HTST)	Elevée	Court
4 (UHT)	Très élevée	Très court

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

II. Pasteurisation et stérilisation

Exemple : traitement du lait

- **Méthode LTH**
 - Traitement de grands volumes : 63°C, 30 min
 - Peu satisfaisant (qualité nutritionnelle, sensorielle)
- **Méthode Flash [HTST]**
 - Echangeur de chaleur : 72°C, 15s
 - Refroidissement rapide
- **Méthode UHT**
 - Echangeur de chaleur : 135°C, 1s
 - Peu d'effets indésirables

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

II. Pasteurisation et stérilisation

En fonction de leur intensité et de leurs objectifs, trois principaux types de traitements

- **La stérilisation**

- Traitement thermique à **haute température**, supérieure à 100 °C, capable de détruire toutes les formes microbiennes présentes, y compris les endospores bactériennes

- **La pasteurisation**

- Traitement modéré à **basse température** permettant de maintenir la qualité du produit
- La pasteurisation réduit la population microbienne dans le lait et autres aliments sensibles à la chaleur (jus, bière, sauces)

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

II. Pasteurisation et stérilisation

- La pasteurisation
 - Action sur les formes végétaives
 - Les endospores bactériennes peuvent, si le pH le permet, germer et altérer le produit...
 - Si le pH est acide : pasteurisation stabilisatrice

Traitement	Température	Autre barrière
Stérilisation commerciale	>100°C (non acides)	Non
Pasteurisation	71,5°C, 15s ou équivalent	Oui
Pasteurisation stabilisatrice	Idem pasteurisation (acides)	Non?

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

II. Pasteurisation et stérilisation

Notion de barème

- Un traitement thermique est caractérisé par un couple (**temps, température**) qui détermine son efficacité (**Barème**).
- **Fromage fondu**
 - Pour inactiver totalement les spores de *Clostridium*, il est nécessaire d'obtenir une **valeur stérilisatrice** de 4 min, c'est-à-dire de pratiquer un **barème de stérilisation** équivalent à 4 min à 121,1 °C (par exemple 2 s à 140 °C).
- **Lait**
 - Les germes pathogènes sont détruits à 72 °C pendant 15 s
 - Les spores sont détruites à 138 °C pendant 2 s.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

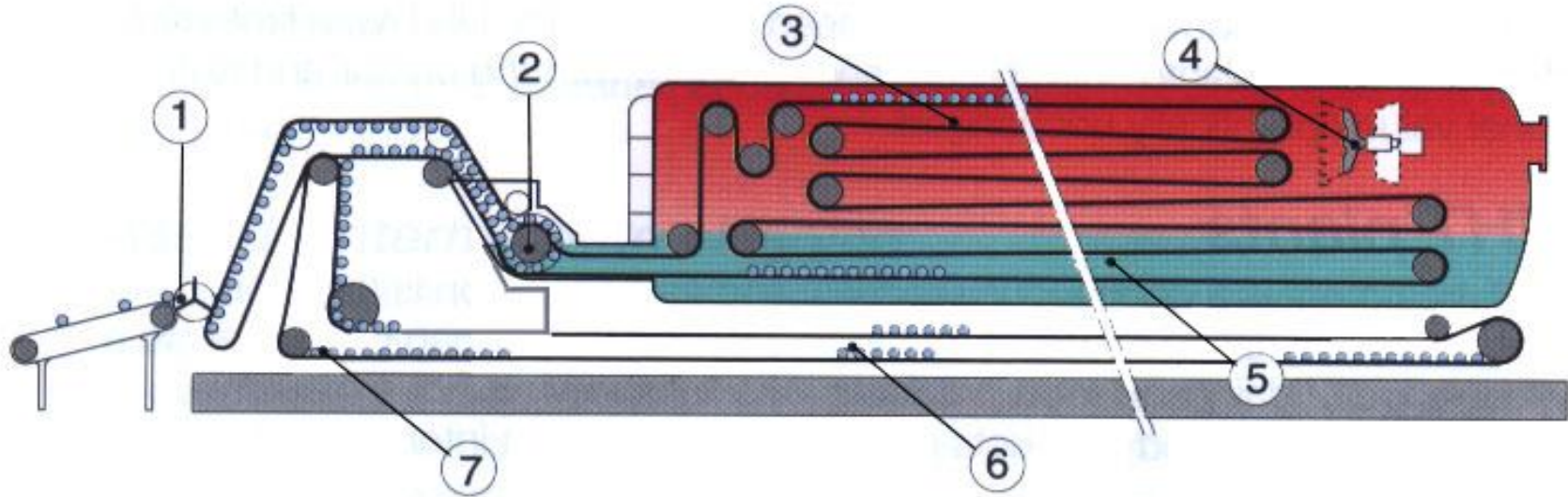
II. Pasteurisation et stérilisation

Quelques barèmes utilisés en industrie

Haricots verts en boîtes de	425 mL	11 min à 130 °C ;
Maïs doux en boîtes de	425 mL	8 min à 125 °C ;
Epinards hâchés en boîtes de	425 mL	55 min à 129 °C ;
Cassoulet en boîtes de	850 mL	22 min à 130 °C ;
Aliments pour animaux (pâtée) en boîtes de	850 mL	90 min à 129 °C ;
Mirabelles au sirop en boîtes de	1700 mL	15 min à 100 °C.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Stérilisation dans l'emballage



Horizontal sterilizer with rotary valve seal and positive pressurization (steam/air mixture) facility.

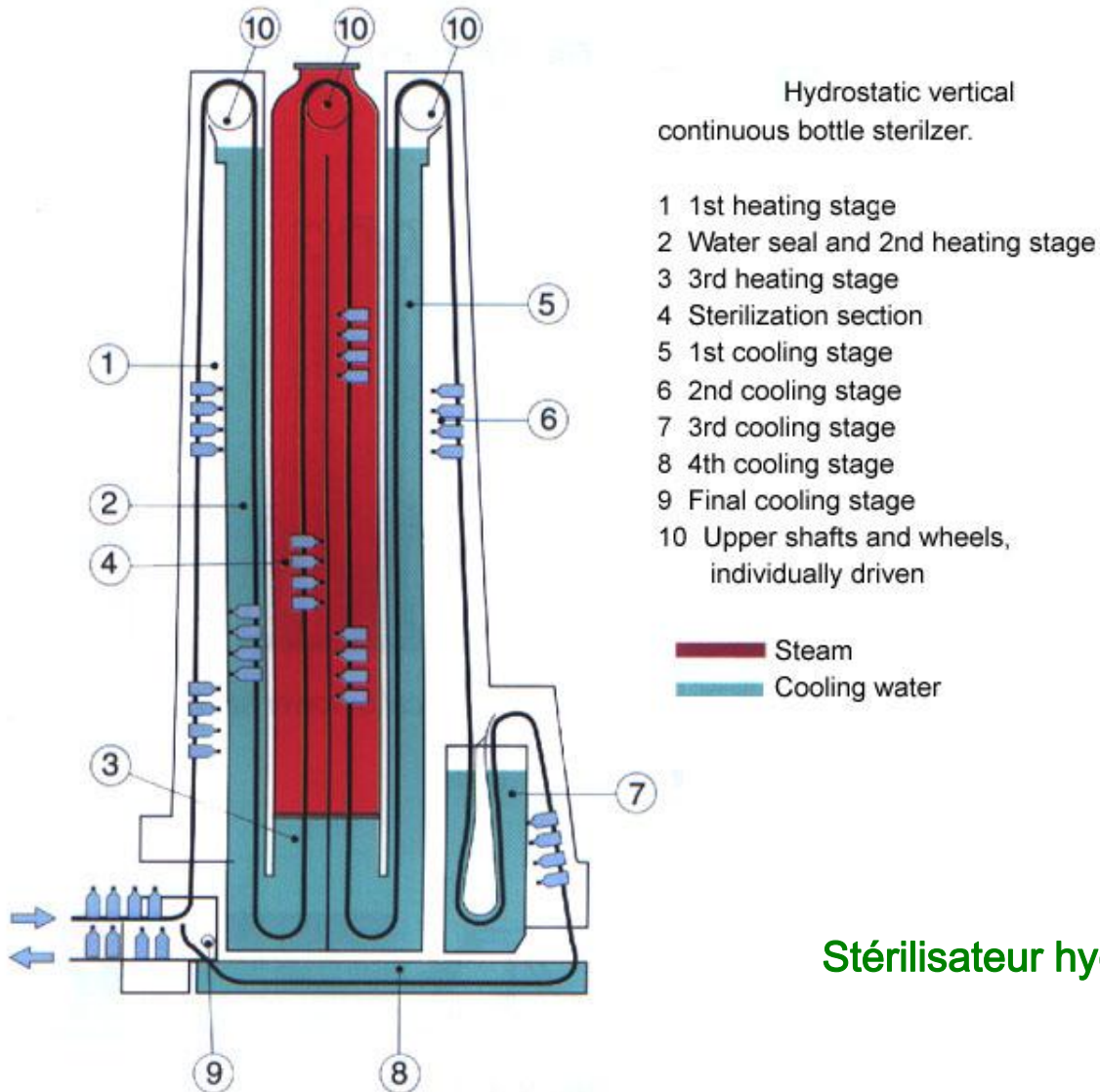
- 1 Automatic loading of bottles or cans
- 2 Rotating valve simultaneously transports bottles into and out of pressure chamber
- 3 Sterilization area
- 4 Ventilation fan
- 5 Pre-cooling area
- 6 Final cooling at atmospheric pressure
- 7 Unloading from conveyor chain

■ Steam
■ Cooling water

Stérilisateur hydrostatique horizontal continu

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

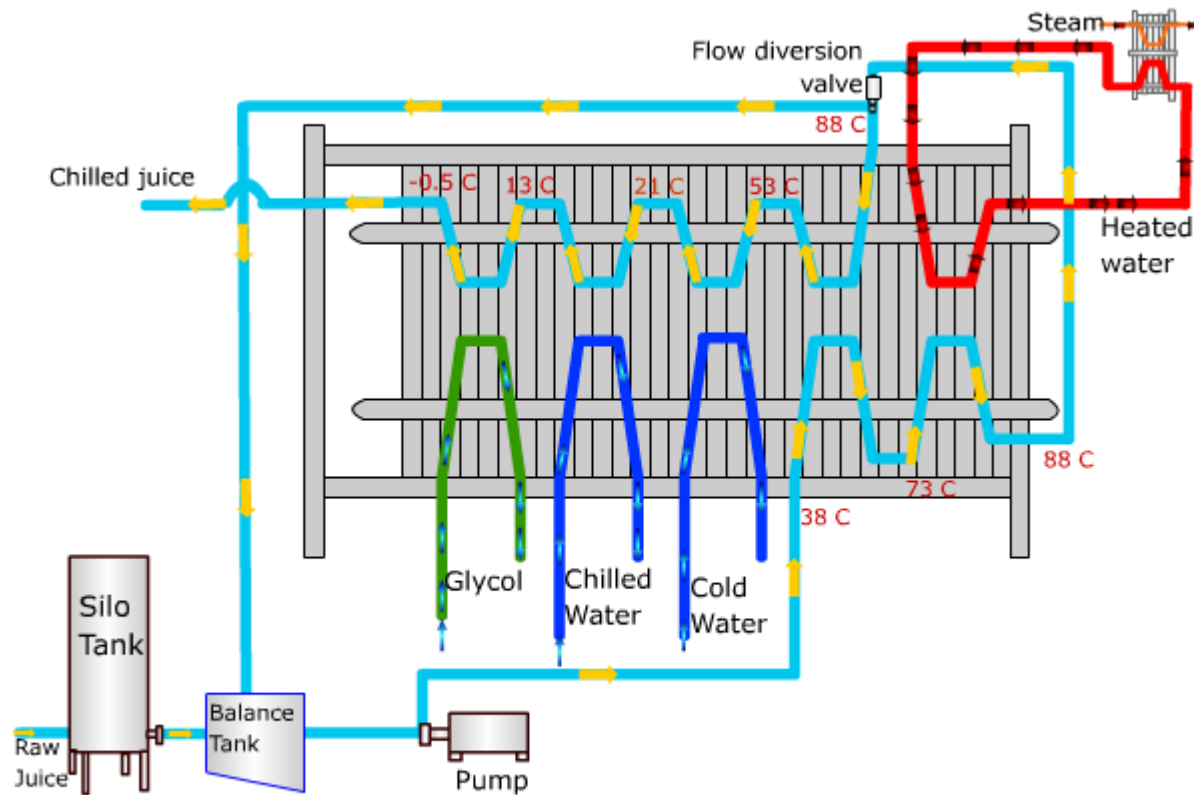
Stérilisation dans l'emballage



Stérilisateur hydrostatique vertical continu

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Stérilisation en vrac



Copyright: R. Paul Singh

Emballage en conditions stériles

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

II. Pasteurisation et stérilisation

Efficacité des traitements

- **Par voie sèche**
 - Phénomène oxydant
 - Echange de chaleur peu efficace
 - Températures et durées élevées
- **Par voie humide :**
 - Phénomène dénaturant
 - Echange efficace, vapeur d'eau 121-130°C
 - Utilisation de la pression
 - La pression n'est pas à l'origine de l'effet létal

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

II. Pasteurisation et stérilisation

Efficacité des traitements

- Nature du milieu
 - ↑acidité ↑vitesse d'inactivation
 - ↑[protéines, sucres, gras] ↓pénétration de chaleur
↑résistance à la chaleur
 - ↑[sel] ↑ ou ↓ résistance à la chaleur
 - ↓activité de l'eau ↑résistance à la chaleur

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

II. Pasteurisation et stérilisation

III. Concentration et séchage

IV. Distillation

V. Cuisson-extrusion

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

III. Concentration et séchage

Aw – exemples d'aliments

0,95 – fruits, légumes, viande, poisson, lait

0,91 – quelques fromages, jambon

0,87 – saucissons secs, fromages à pâte dure, margarine

0,80 – jus de fruit concentrés, lait concentré, sirops,

0,75 – confiture, marmelade

0,65 – gelées, sucre

0,60 – fruits secs, miel

0,50 – pâtes sèches, épices

0,30 – biscuits

0,03 – lait en poudre, soupes déshydratées

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

III. Concentration et séchage

Principes

- **Séchage** – *Déshydratation totale* : élimination presque entière de l'eau
 - Lait en poudre, café instantané
- **Concentration** – *Déshydratation partielle*
 - Lait concentré, sirops

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

III. Concentration et séchage

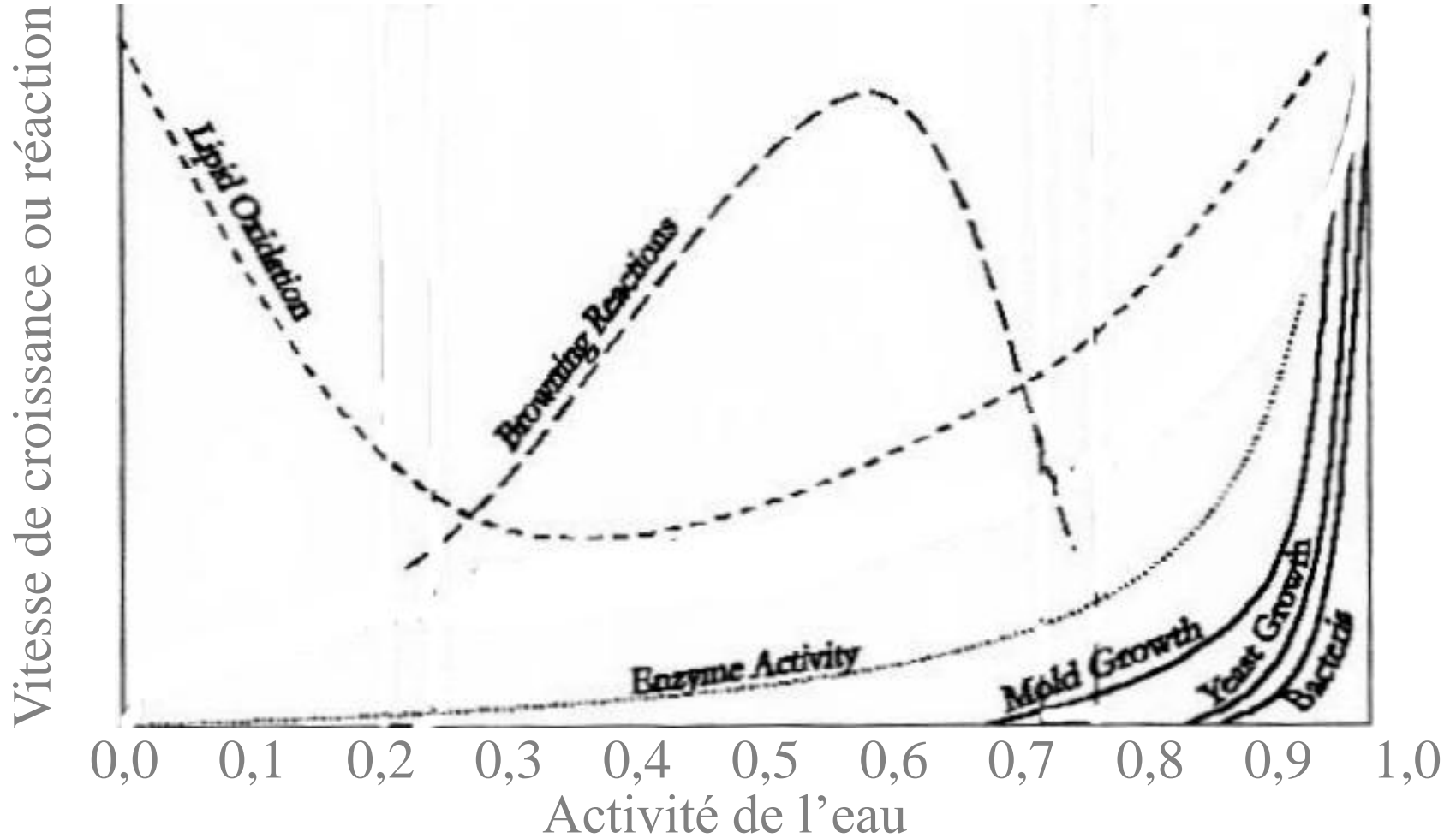
Objectifs

- Pourquoi **sécher** des produits agricoles et alimentaires ?
 - Stabiliser les produits et accroître leur durée de conservation,
 - Produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation,
 - Réduire le poids et le volume.
- Pourquoi **concentrer** des produits agricoles et alimentaires ?
 - Accroître la durée de conservation des produits (probablement),
 - Réduire le poids et le volume.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

III. Concentration et séchage

Effets du séchage



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

III. Concentration et séchage

Types de déshydratation?

- Déshydratation **thermique** : évaporation (chaleur)
cryoconcentration (froid)
- Déshydratation **mécanique** : osmose inverse & ultrafiltration
- Déshydratation **sous vide** : à température réduite.

Deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour évaporer l'eau d'un produit :

l'ébullition

l'entraînement

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

III. Concentration et séchage

Principes de l'évaporation

Ebullition

- L'ébullition a lieu lorsque la température du produit est élevée à une valeur telle que la **pression de vapeur d'eau** de ce produit est égale à la **pression totale ambiante**.
- La température d'ébullition dépend de la pression totale et de l'activité de l'eau du produit.
- Le gaz en contact avec la surface du produit est de la vapeur d'eau pure.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

III. Concentration et séchage

Principes de l'évaporation

Entraînement

- Lorsqu'un produit humide est placé dans un **courant de gaz suffisamment chaud et sec**, le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation : l'eau est évaporée sans ébullition.
- La vapeur d'eau est transférée par **conduction et convection** du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par le gaz.
- La **température** de surface du produit reste toujours inférieure ou égale à celle de l'air et donc nettement **inférieure à la température d'ébullition** de l'eau.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

III. Concentration et séchage

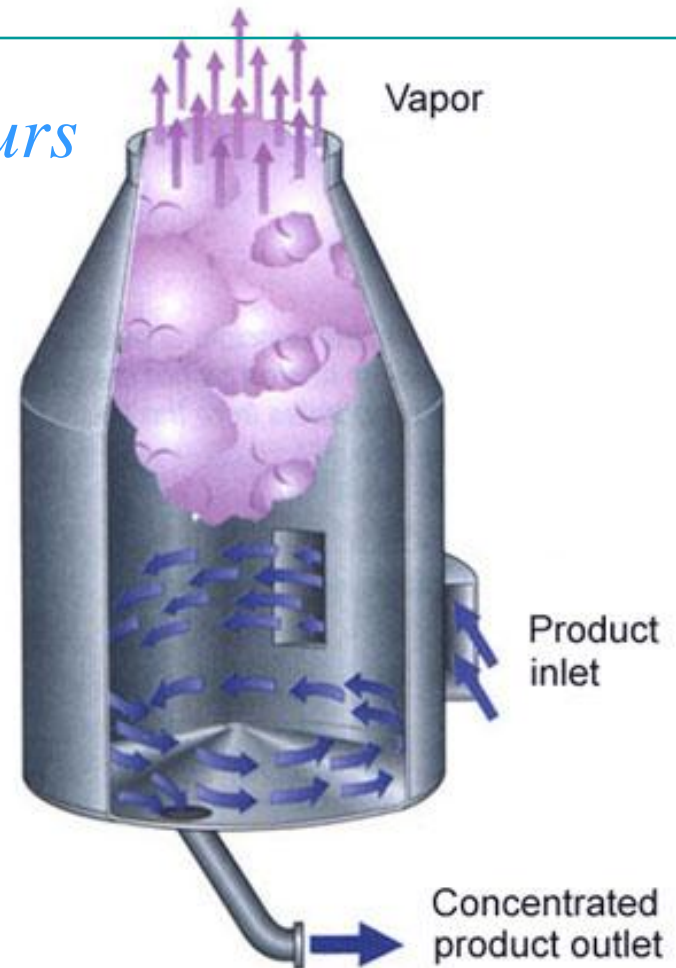
Facteurs influençant l'évaporation

- L'évaporation est meilleure avec une:
 - **Surface** d'échange importante
 - **Température** élevée
 - **Circulation** d'air importante
 - **Humidité** réduite
 - **Pression** réduite (vide)

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — Concentration

Les évaporateurs



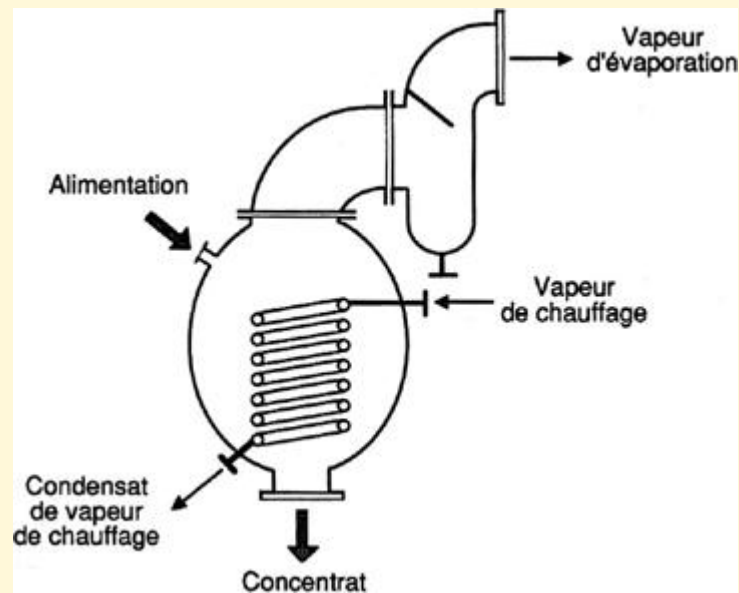
Produit circulant dans une chambre à vide.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — Concentration

Évaporateur à serpentin

Fig. Exemple 1 : Évaporateur à serpentin

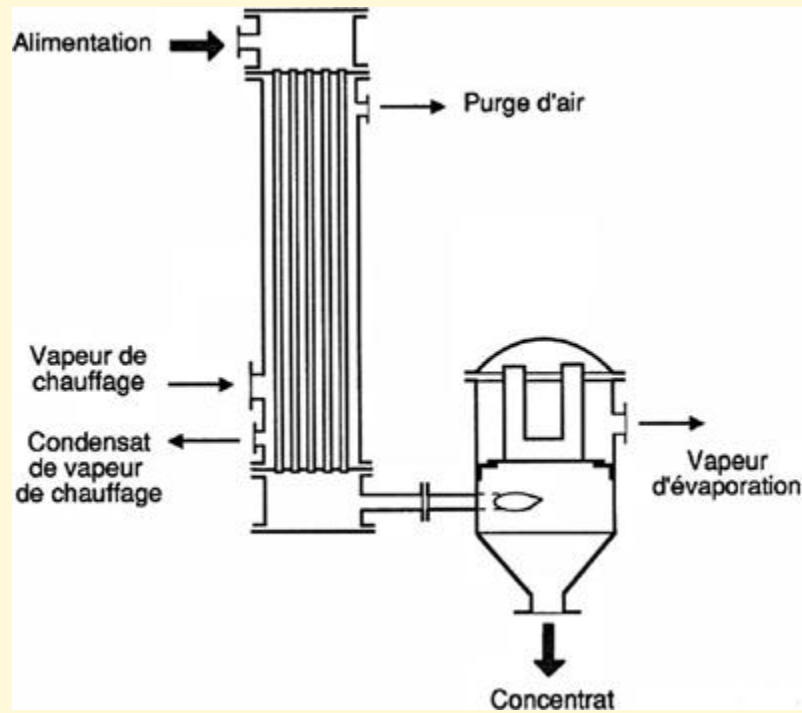


B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — Concentration

Evaporateur à flot tombant

Fig. Exemple 2 : Evaporateur à flot tombant (ou à descentage)



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — Concentration

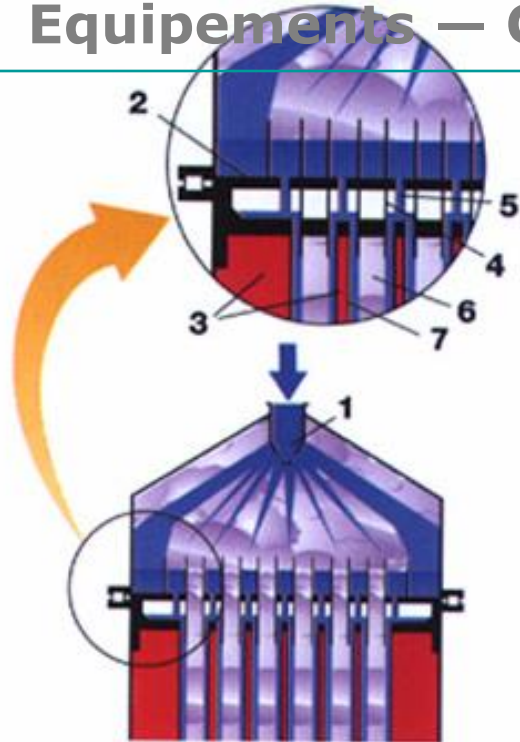


Fig. Upper section of a falling film evaporator.

- 1 Product feed nozzle
- 2 Spreader plate
- 3 Steam for heating
- 4 Coaxial tubes
- 5 Openings
- 6 Vapor
- 7 Evaporator tubes

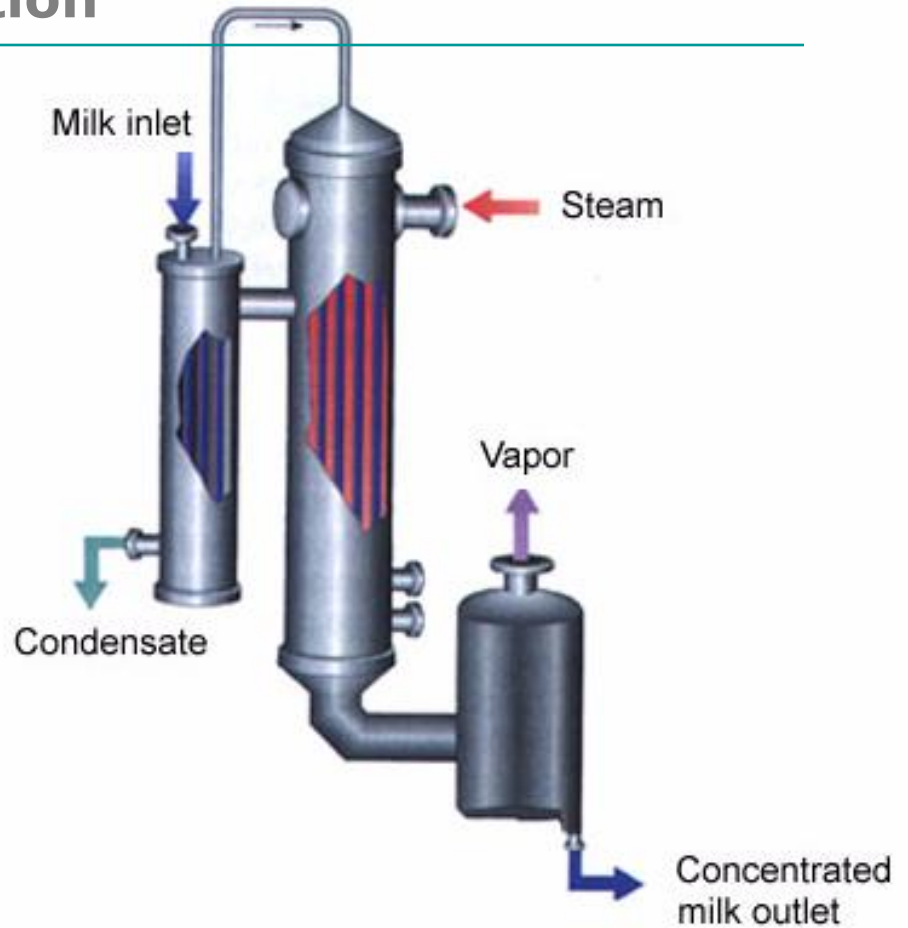


Fig. Evaporateur à flot tombant

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — Concentration

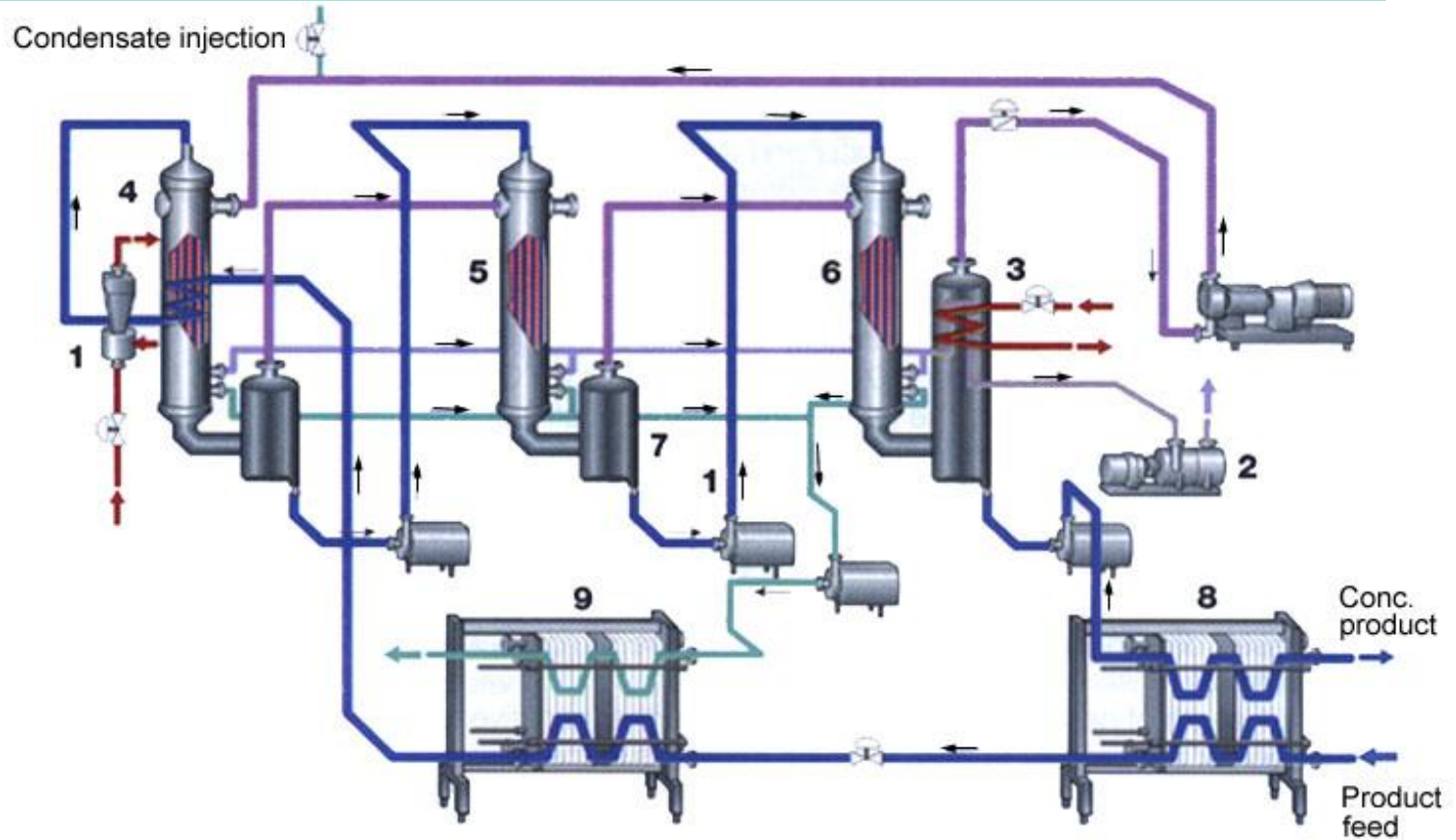


Fig. Three-effect evaporator with mechanical vapor compression.

- Product
- Vapor
- Condensate
- Heating medium

- 1 Thermocompressor
- 2 Vacuum pump
- 3 Mechanical vapor compressor
- 4 1st effect
- 5 2nd effect
- 6 3rd effect
- 7 Vapor separator
- 8 Product heater
- 9 Plate condenser

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — Concentration

Evaporateur à flot tombant

- Taux de production
 - 1 890 000 litres par jour
- Taille typique
 - 23 m haut × 3 m large
- Prix typique
 - € 2 000 000



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

III. Concentration et séchage

Quelques applications de la concentration

La concentration du **lait**, entier ou écrémé

Opération en vue d'une commercialisation ou d'un séchage

La concentration des **jus de fruits**

Opération pour réduire les frais de transport et de stockage, mais aussi pour une commercialisation.

De même, les **jus de légumes** pour potages en sachets, ainsi que les **gélamines alimentaires** obtenues à partir des os, sont également concentrés par évaporation.



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Les sécheurs

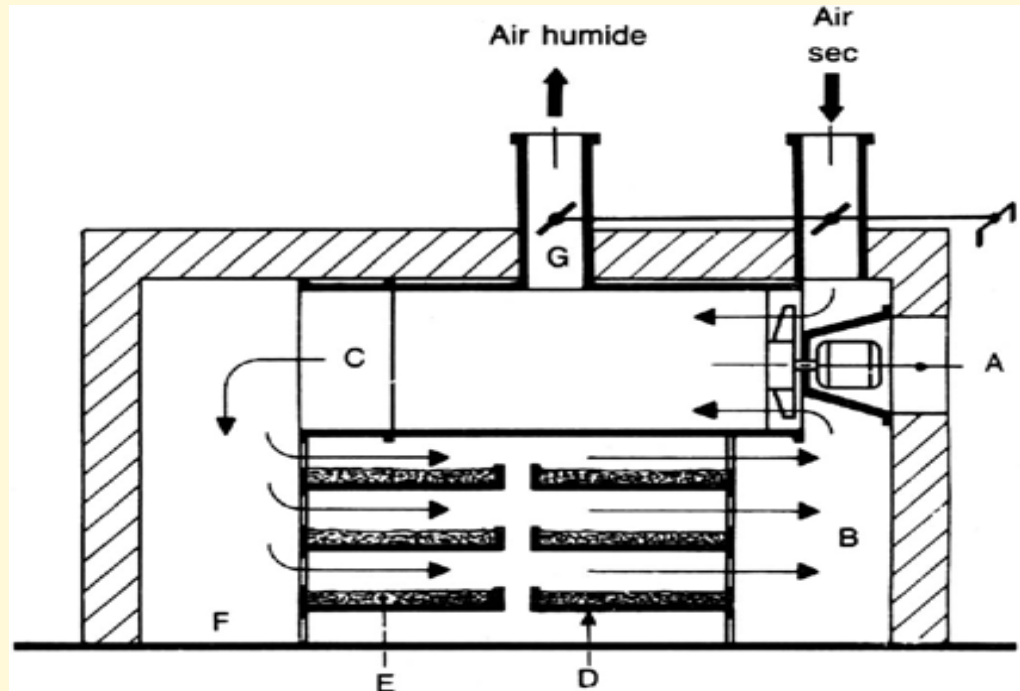
- Sécheur :
 - à convection
 - sous-vide
 - à pulvérisation (atomiseur)
 - à lit fluidisé

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Sécheur discontinu à convection

Fig. Exemple 1 : Sécheur discontinu à convection par léchage

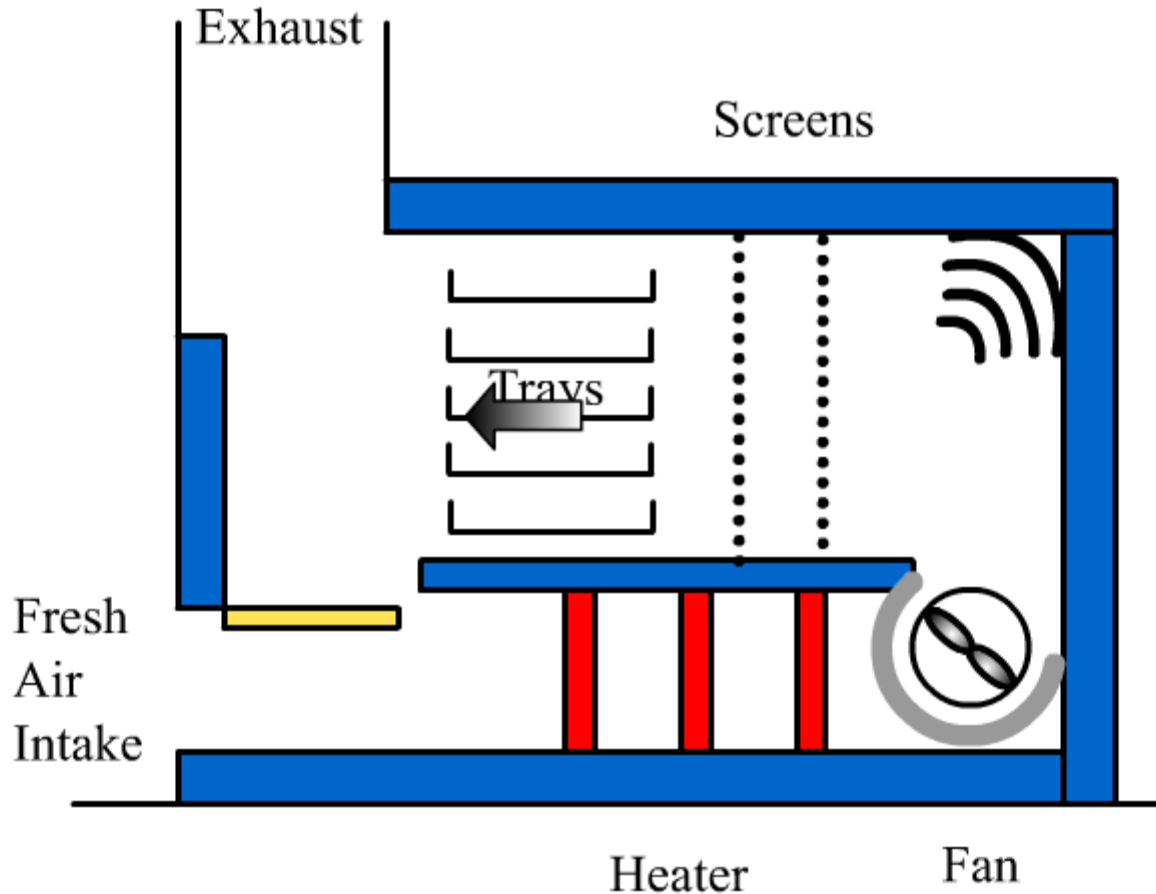


- A ventilateur
- B gaine d'aspiration
- C aérotherme
- D claies à fond plein
- E produit à sécher
- F gaine de soufflage
- G cheminée d'extraction des gaz avec clapet de réglage

Si la matière n'est pas brassée pendant l'opération de séchage, il y a intérêt à inverser le sens du courant d'air plusieurs fois au cours du séchage. On utilise pour cela des ventilateurs hélicoïdes réversibles commandés automatiquement par une minuterie.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

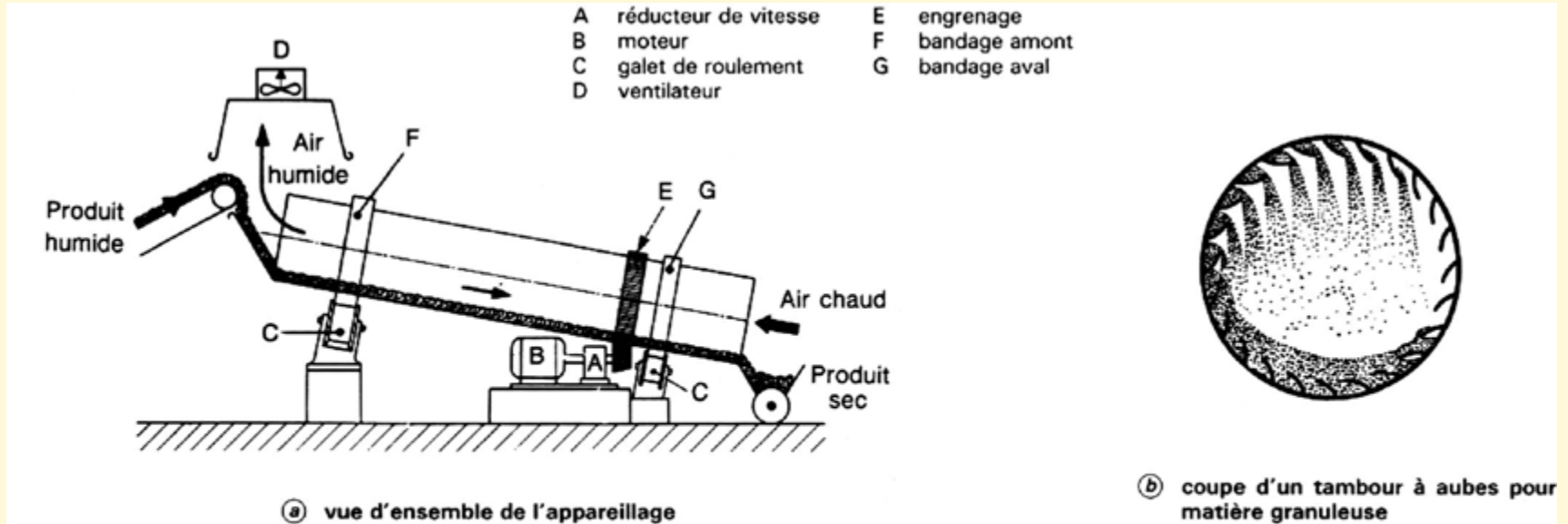


B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Sécheur continu à convection

Fig. Tambour sécheur rotatif, à convection par léchage



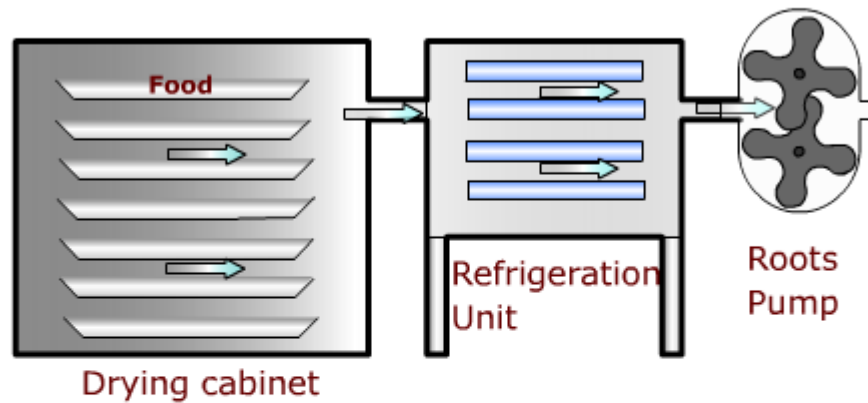
Dans le vocabulaire du séchage, le mot *tambour* désigne un cylindre en tôle, généralement de grande longueur, tournant lentement autour d'un axe légèrement incliné sur l'horizontale. Le produit humide est introduit à la partie supérieure par un tapis ou une vis d'Archimède ; il avance par gravité, les grains roulant les uns sur les autres.

Dans certains cas, des **aubes** en forme d'auges, ou des **pelles** fixées à l'intérieur du cylindre, remontent le produit pendant la rotation du tambour, puis le laissent retomber en pluie dans le courant d'air de séchage, augmentant ainsi considérablement la surface de contact.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Sécheur sous-vide



Copyright: R. Paul Singh

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Sécheur à pulvérisation (atomiseur)

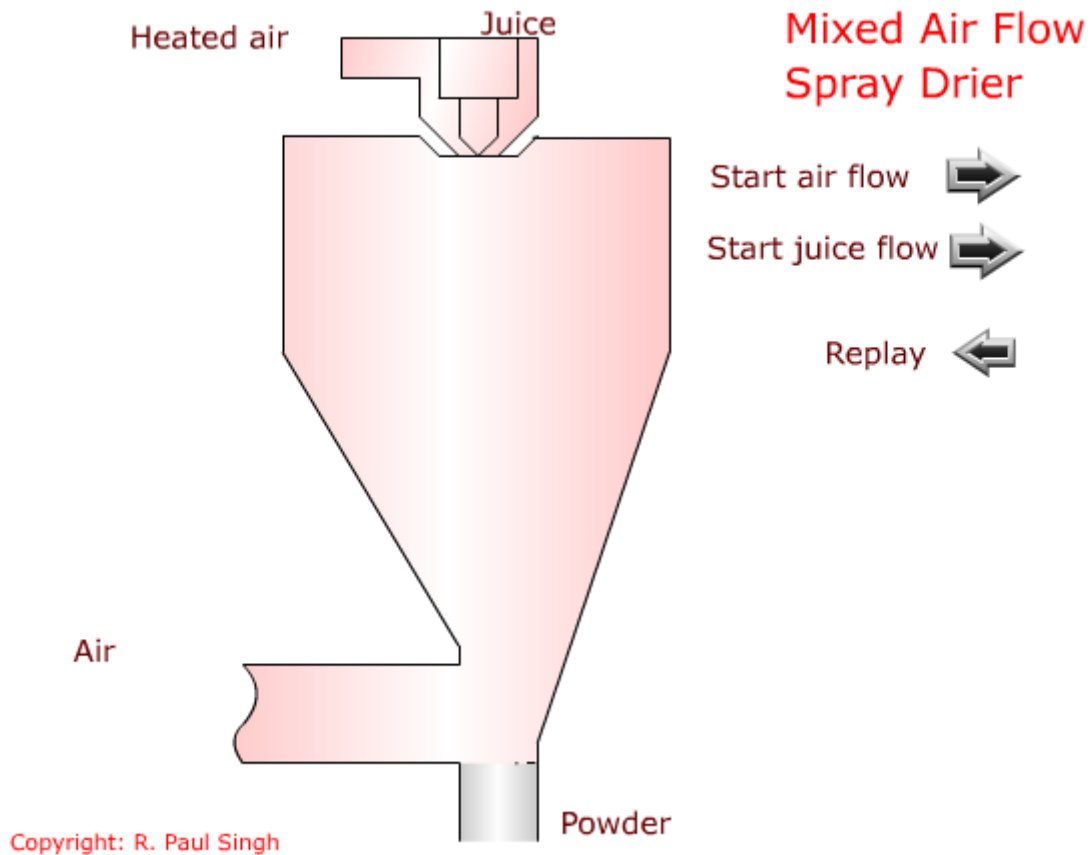
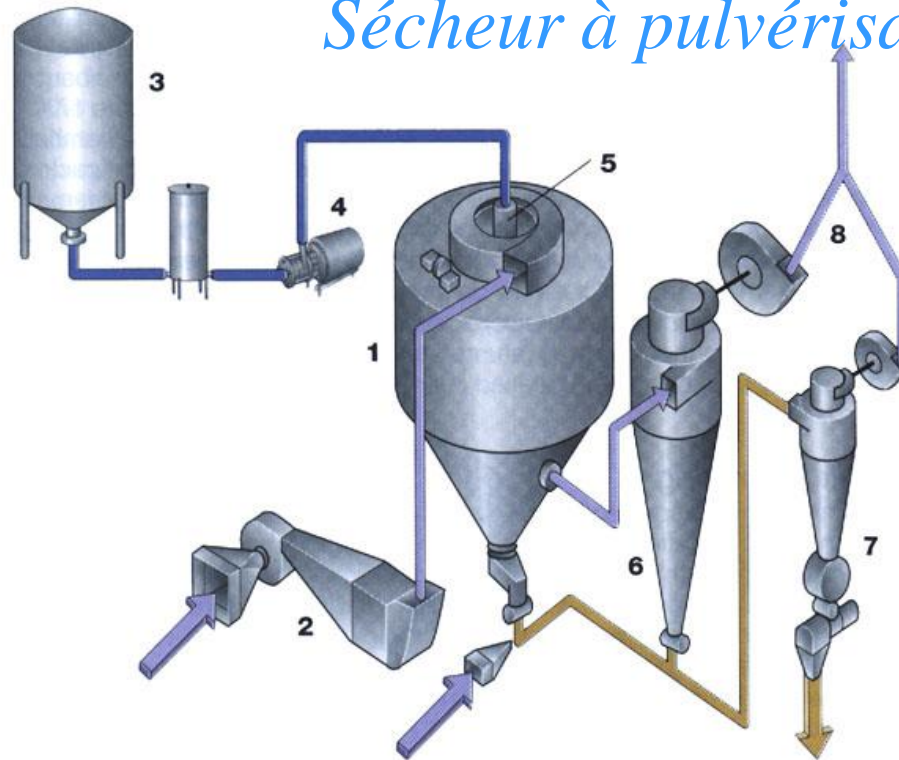


Fig. II-30. Exemple 3 : Sécheur à pulvérisation

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Sécheur à pulvérisation (atomiseur)



Conventional spray dryer (one-stage drying) with conical base chamber.

- 1 Drying chamber
- 2 Air heater
- 3 Milk concentrate tank
- 4 High pressure pump
- 5 Atomizer
- 6 Main cyclone
- 7 Transport system cyclone
- 8 Air suction fans and filters



Cyclone

Atomiseur échelle pilote



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Atomiseur industriel !



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Atomiseur industriel !!!

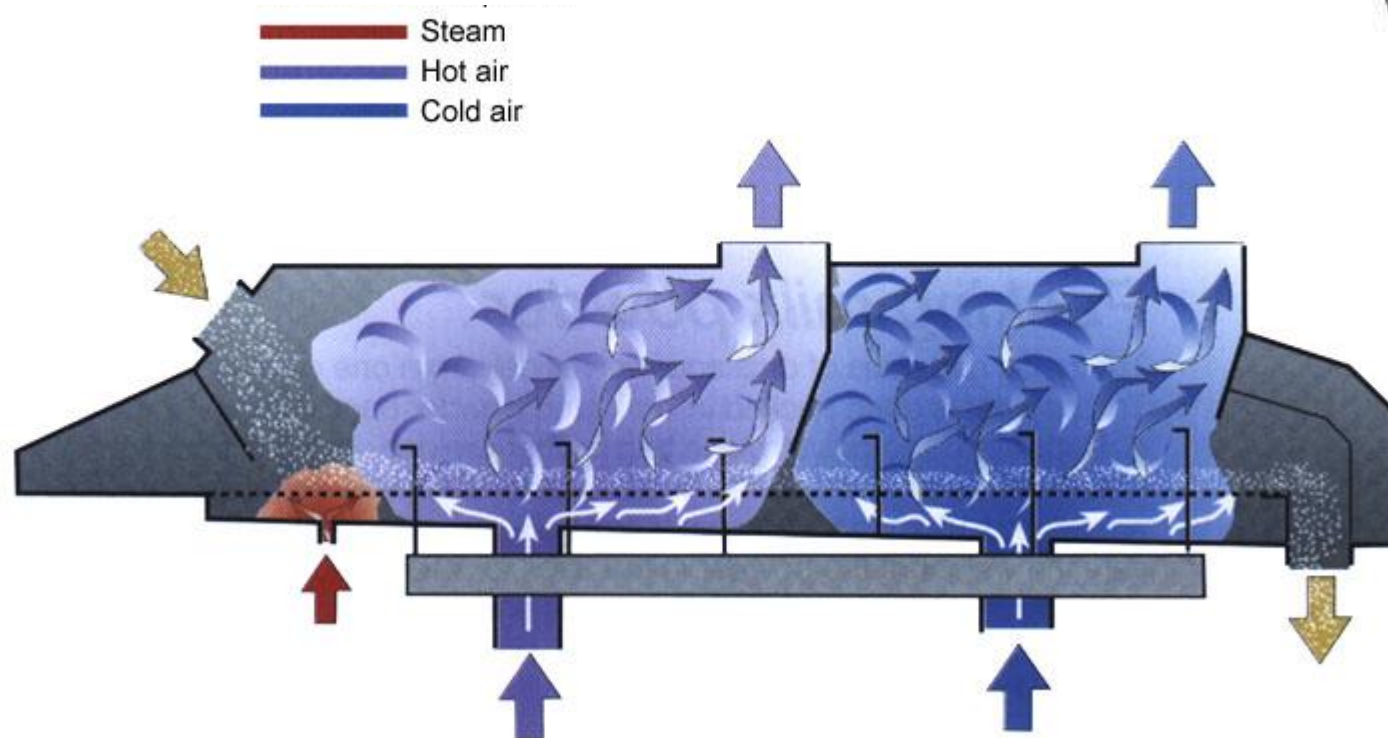


B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Sécheur à lit fluidisé

Fig. Sécheur à lit fluidisé avec échangeurs



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage





5,000 KG
CC 100.00

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Sécheur à lit fluidisé



Vue extérieure

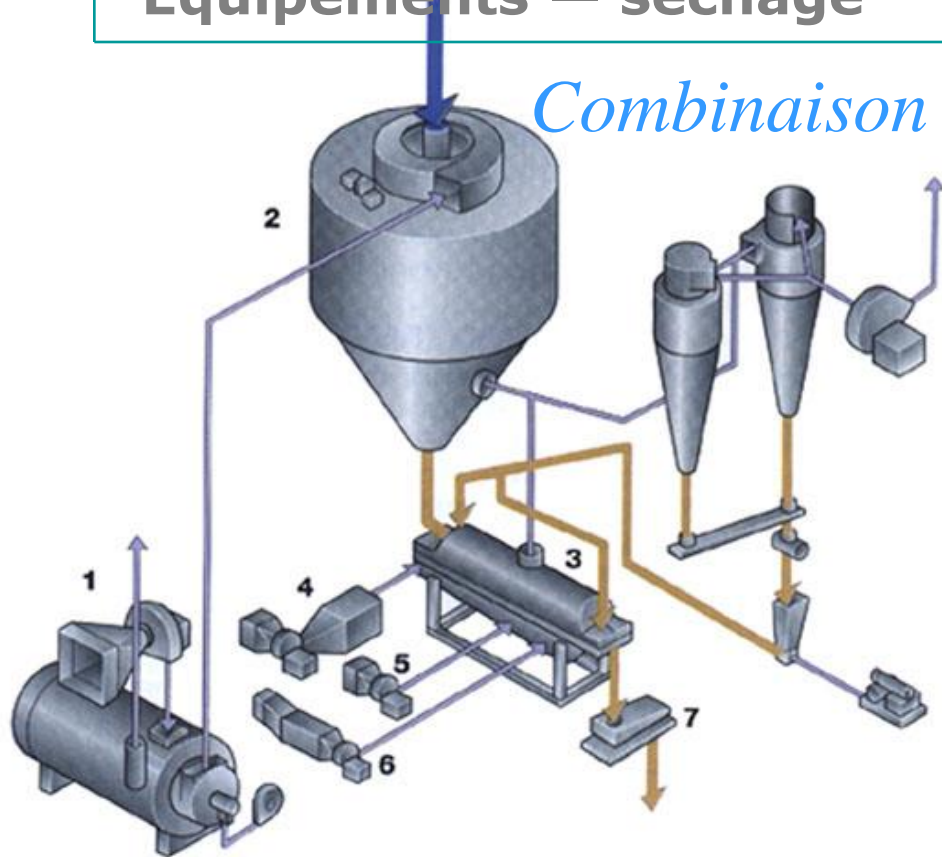


Vue intérieure

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Combinaison : atomiseur – lit fluidisé



Spray dryer with fluid bed attachment (two-stage drying).

- 1 Indirect heater
 - 2 Drying chamber
 - 3 Vibrating fluid bed
 - 4 Heater for fluid bed air
 - 5 Ambient cooling air for fluid bed
 - 6 Dehumidified cooling air for fluid bed
 - 7 Sieve
- Milk
— Heating medium
— Powder

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

Equipements — séchage

Sécheur à lit fluidisé

Tab. Guide pour le choix des sécheurs		
Type d'appareil	Type de produit à sécher	Exemples
Tambour à conduction externe Sécheur à pulvérisation Lit fluidisé Lyophilisateur Sécheur sous vide partiel	Produits liquides ou pâteux étendables ou pulvérisables	Lait, jus de fruit, purées, gâteaux de filtration, liquides épaissis par ébullition.
Tambour à conduction externe Sécheur aéroportant Sécheur à tapis à percussion Sécheur à tapis à rayonnement Sécheur à pertes diélectriques	Produits solides en feuilles, en plaques ou en bandes continues	Cellulose, objets moulés.
Sécheur à bandes perforées Sécheur à plateaux perforés Sécheur sous vide Sécheur pneumatique Sécheur en lit fluidisé Sécheur à pluie de produit Vis chauffantes Tambour à palettes Tambour rotatif à convection Colonnes de séchage	Produits pâteux extrudables ou émiettables ou granulables. Produit solides divisés	Pigments, farines, sels et minéraux, sucre, pulpes, légumes découpés, céréales.
Sécheur à bande à percussion Sécheur à convoyeur Tambour rotatif à convection Broyeur sécheur Sécheur à pertes diélectriques Sécheur à rayonnement Sécheur à micro-ondes	Produits solides non divisés Produits solides en formats	Produits moulés d'origine et de nature diverses (alimentaire, minérale, chimique).

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

II. Pasteurisation et stérilisation

III. Evaporation et séchage

IV. Distillation

V. Cuisson-extrusion

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

IV. Distillation

Définition

Séparation par voie physique des divers constituants d'un mélange **liquide**, **liquéfiable** ou **fusible**. La phase vapeur est produite par évaporation en fournissant de la chaleur au système.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

I. Blanchiment

II. Pasteurisation et stérilisation

III. Evaporation et séchage

IV. Distillation

V. Cuisson-extrusion

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

V. Cuisson-extrusion

Définition

- Extrusion → latin *extrudere* qui signifie “pousser dehors”; procédé unitaire de transformation consistant à forcer un produit à travers un orifice de petite dimension : **la filière**.
- L’extrusion alimentaire est née de l’industrie plastique en 1935 quand ce procédé a été appliqué à l’extrusion continue des pâtes.
- Procédé de grande importance dans l’industrie alimentaire et dont l’utilisation est de plus en plus répandue.



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

V. Cuisson-extrusion

Types et applications

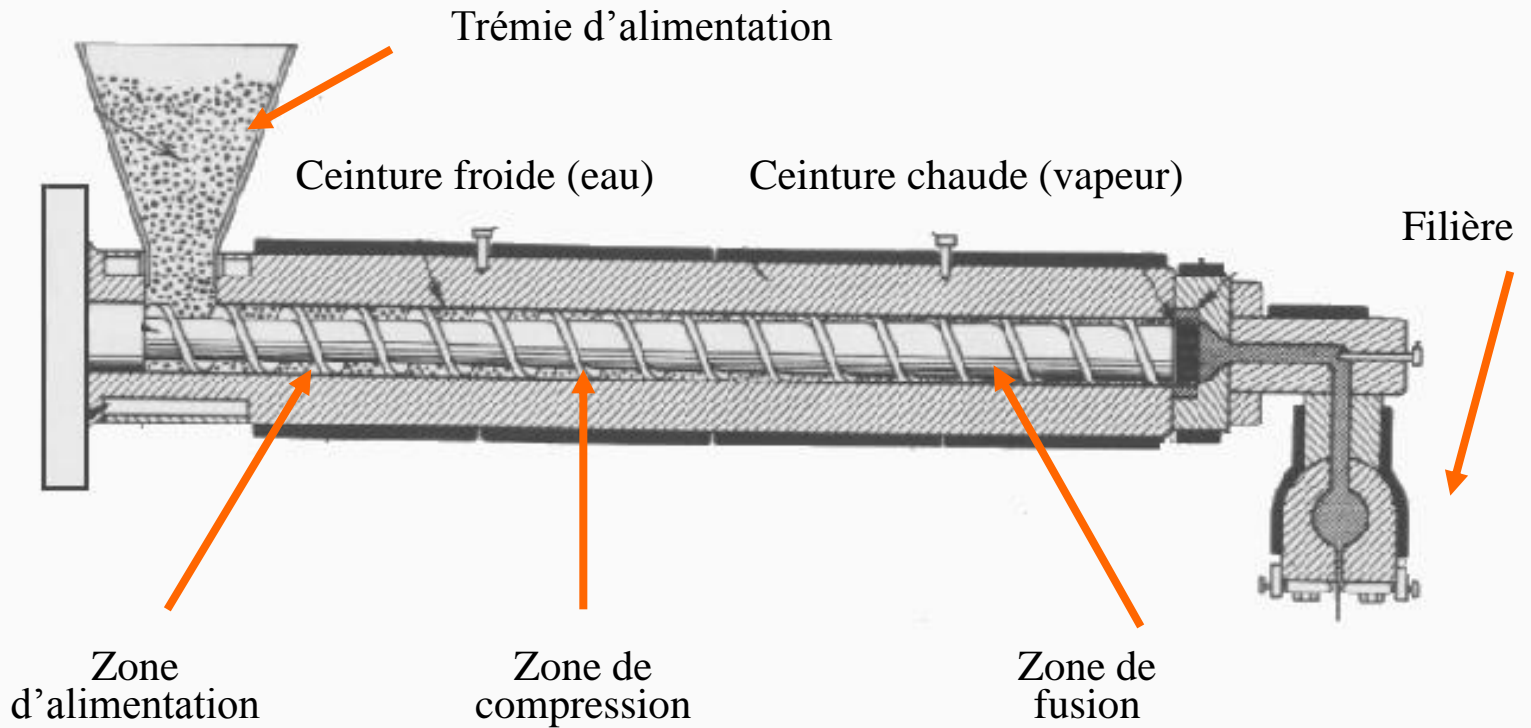
- **L'extrusion simple**
 - Généralement à une **température inférieure à 70°C**
 - Forte teneur en eau
 - Simple **mise en forme** du produit, qui conserve la forme de la filière
 - Pâtes alimentaires, pâtes à gâteaux et certains biscuits..
- **La cuisson-extrusion**
 - Produits hydratés ou non
 - Traitement mécanique et traitement thermique simultanés
 - Le **traitement mécanique** est un cisaillement combiné à une compression (jusqu'à 300 bar), une détente, un mélange.
 - Le **traitement thermique** est soit un chauffage, avec cuisson, soit un refroidissement, soit une combinaison des deux.

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

V. Cuisson-extrusion

L'extrudeur

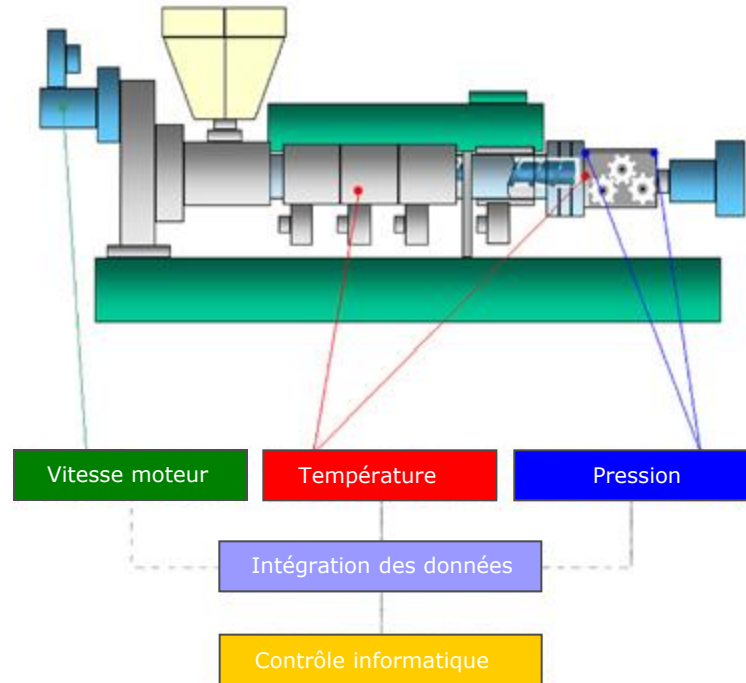
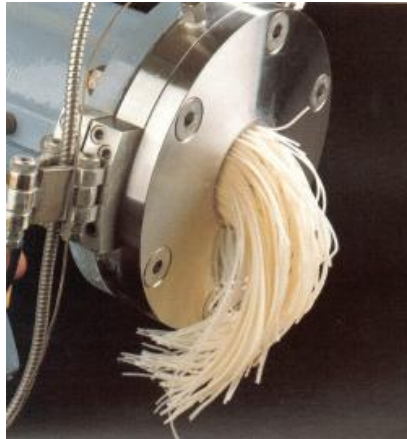
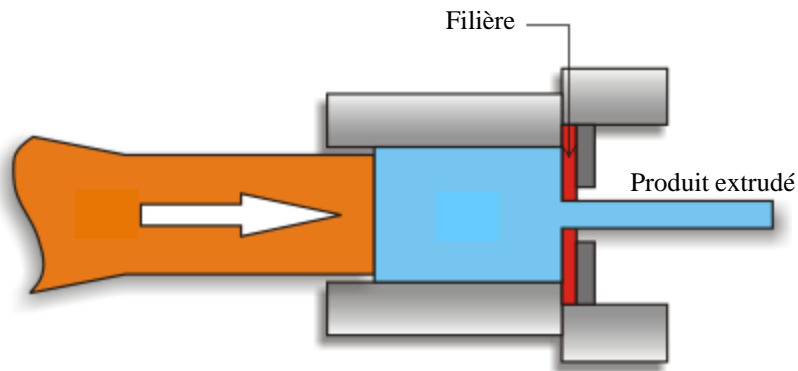
Fig. Coupe d'un extrudeur monovis à noyau de vis croissant



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

V. Cuisson-extrusion

L'extrudeur



B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

V. Cuisson-extrusion

Fig. Ensemble vis-fourreau (d'après Wenger)

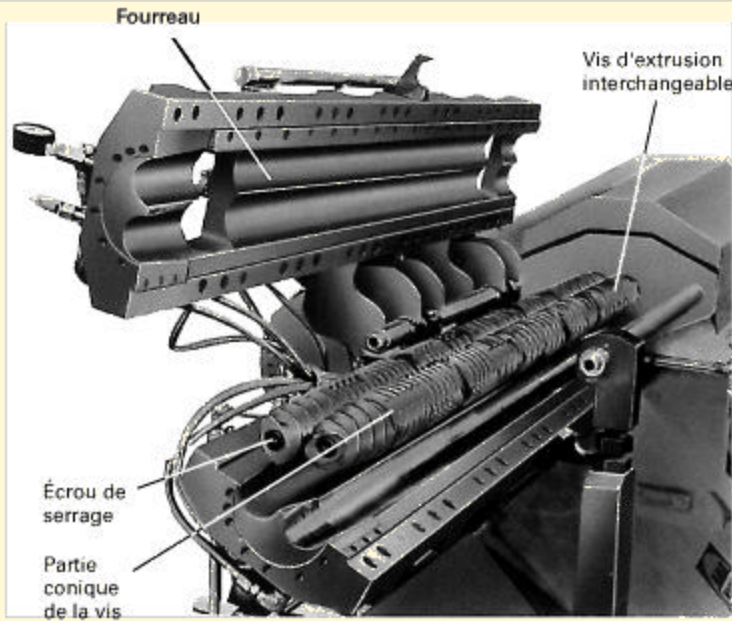
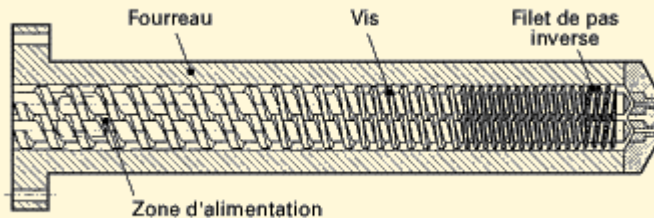


Fig. Coupe d'un extrudeur bivis (dessin A. Sire, INRA, Nantes)



Applications

Tab. Exemples d'applications agroalimentaires de la cuisson-extrusion et analogie par rapport aux procédés traditionnels

Secteur d'activité	Produits	Procédés traditionnels
Alimentation animale	<i>Pet food</i> (aliments pour animaux) Aliment poisson, crevette	Autoclave, four Presse, sécheur tambour
Amidon modifié	Amidon fluidifié Amidon réticulé	Cuve de réaction centrifuge Cuve de lavage, décanteuse
Boulangerie-biscuiterie	Pain plat Biscuit coextrudé Snack apéritif	Laminoir, four
Céréales pour le petit déjeuner	Pétale de céréale Céréale expansée	Jet cooker Maturateur/formeur, four
Confiserie	Chocolat Réglisse Bonbon mou (1) Chewing-gum (1)	Conche, malaxeur Cuiseur discontinu
Farine de céréale cuite	Aliment pour nourrisson Porridge (1) Panure (1) Petit déjeuner instantané Boisson instantanée	Sécheur cylindre Four de boulangerie
Préparations de pâte	Quenelle Pâte à choux (1)	Bac mélangeur Pétrin
Produits à base de protéines	Protéine végétale texturée Viande restructurée	Extrusion monovis Filage
Produits laitiers	Caséinates Fromage fondu	Tour d'atomisation Pétrin, réacteur agité

(1) Application non industrialisée.



Autres techniques de texturation

Flaking, Puffing, Granulation

Ex. instantanéisation

Propriétés du produit

- Structure aérée et poreuse
- Très bonne dispersion
- Excellente solubilité
- Faible masse volumique

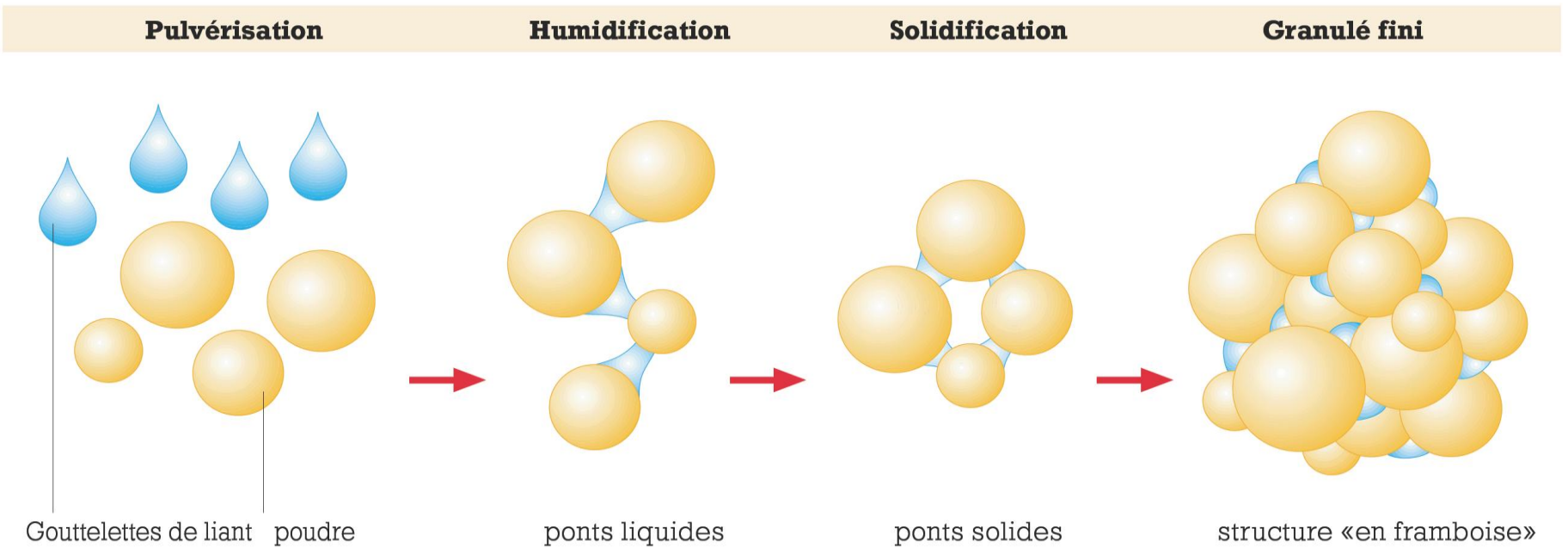


Autres techniques de texturation

Flaking, Puffing, Granulation

Ex. instantanéisation

Principe de l'instantanéisation



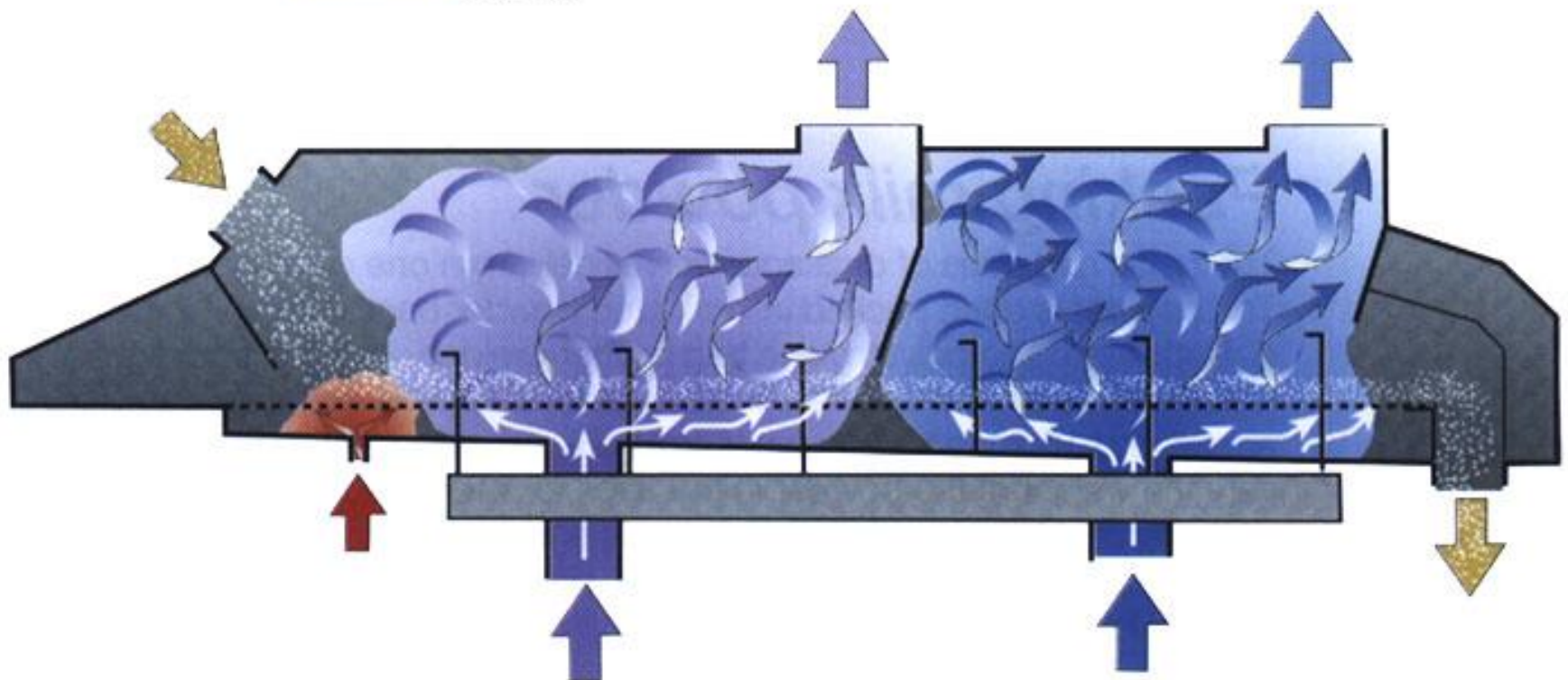
Autres techniques de texturation

Flaking, Puffing, Granulation

Ex. instantanéisation

Fluid bed for instantizing milk powder.

-  Milk powder
-  Steam
-  Hot air
-  Cold air



PARTIE II. Procédés des industries agro-alimentaires

A. Procédés à température ambiante

B. Procédés thermiques par ajout de chaleur

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

Fonctions du froid dans l'industrie agroalimentaire

Froid-maintien

- Stabilité des caractéristiques physiques, biologiques et chimiques
 - le maintien-stockage (associé à l'**entreposage** frigorifique) ;
 - le maintien-vente (associé à la **vente** et **distribution**) ;
 - le maintien-mobile (associé au **transport**).

Froid-procédé

- Traitement des produits
 - Ex. : le refroidissement en fin de cuisson, la production de glaces alimentaires, la cristallisation du sucre, la distillation, ou la lyophilisation.

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

Techniques

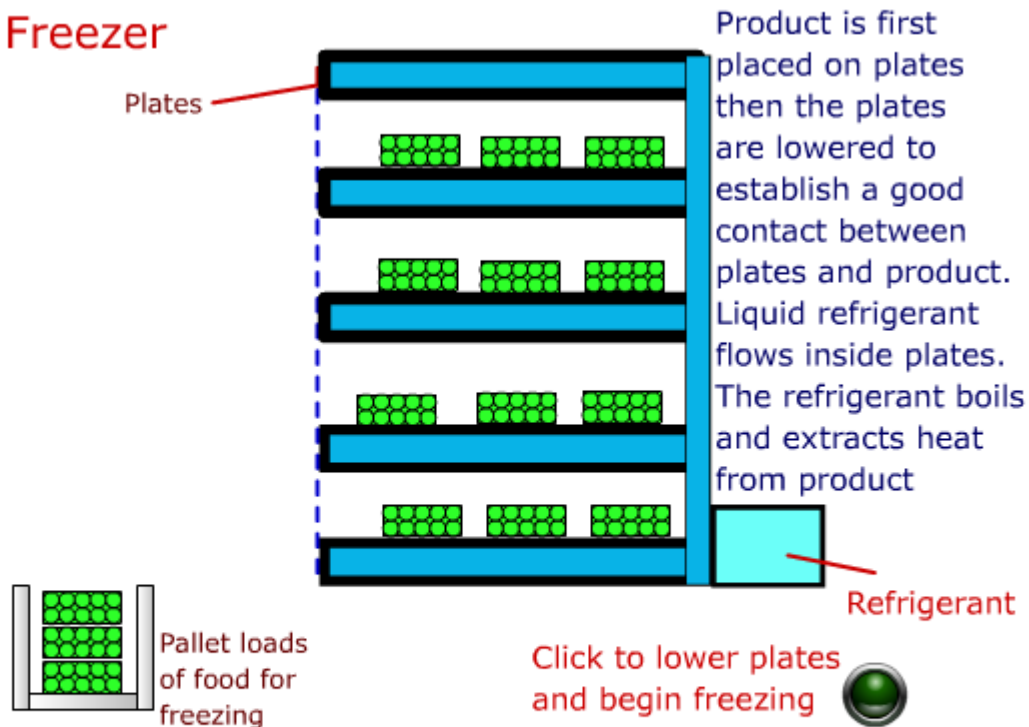
- Les procédés de réfrigération et de congélation se distinguent selon le moyen de refroidissement utilisé pour évacuer la chaleur :
 - **air**
 - **eau** ou solution aqueuse
 - **fluide** cryogénique
 - **surface** solide refroidie

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

Techniques par contact

Plate Freezer



C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur


I. Le froid-maintien

Techniques utilisant l'air

Spiral Air Blast Freezers

A spiral air blast freezer has three major components:

An endless conveyor belt stacked into a spiral 


An evaporator heat exchanger with a fan 

An insulated chamber to enclose the freezer 

[Click to view components](#)

Spiral freezers are popular because they provide more capacity for same floor area.

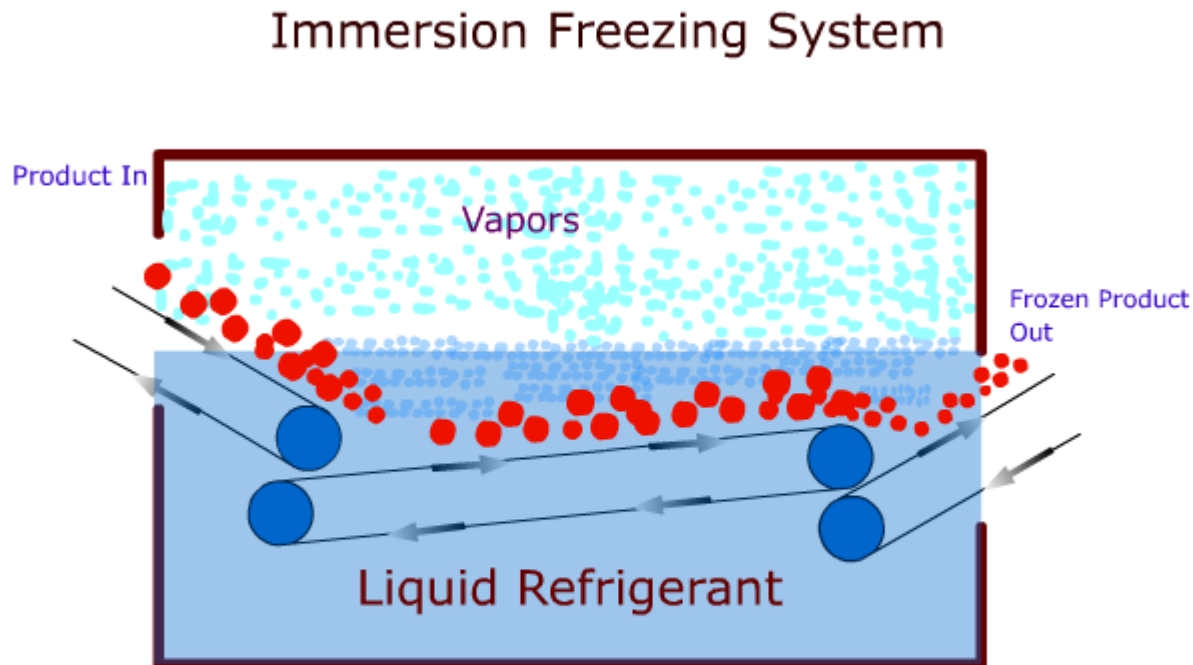
The endless conveyor belt is made from steel mesh so that air can easily pass through it. The conveyor is self stacking, thus forming a spiral.

View an animation of a spiral freezer 

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

Techniques par immersion dans un liquide



C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

Techniques

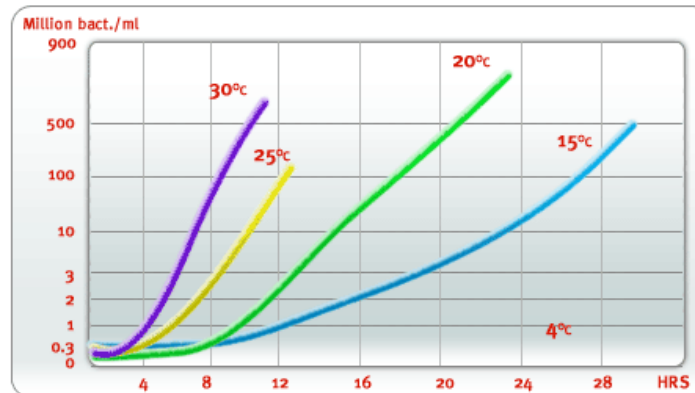
Tab. Applications et performances de différents procédés pour la réfrigération et la congélation			
Procédé	Réfrigération (température > 0 C)	Congélation (température < 0 C)	Coefficients de transfert de chaleur (W/(m ² · K))
Par air	Fruits, légumes Carcasses de viande	Tous produits	20 à 50 (tunnel à air pulsé) 60 (lit fluidisé)
Immersion (eau ou solution aqueuse)	Volailles Fruits et légumes Poissons	Poissons, crustacés	900
Cryogénie (azote liquide, neige carbonique)		Congélation flash Croûtage de produits	100
Par contact	Produits liquides (lait, etc.) Poissons (glace écaillé)	Lait, jus de fruit Filets de poisson Purées de légumes	100

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

Mode d'action de la réfrigération

- La réfrigération a pour effet de
 - **ralentir les réactions** enzymatiques et chimiques, et donc
 - **ralentir le métabolisme** et **la multiplication** des micro-organismes,



C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

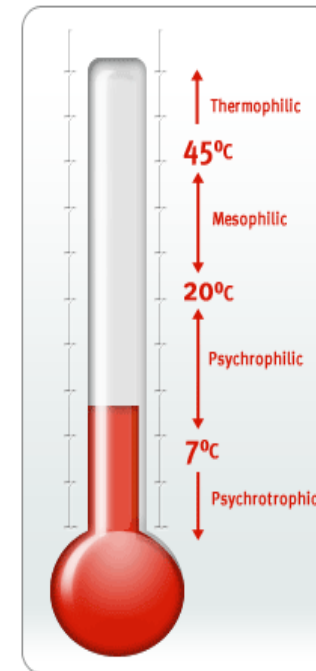
I. Le froid-maintien

Mode d'action de la réfrigération

- La réfrigération ne permet qu'une **conservation** relativement **courte**

Tab. Températures minimales de croissance de certaines bactéries pathogènes

Type de micro-organisme pathogène	Température minimale de croissance (°C)
<i>Listeria monocytogenes</i>	1
<i>Salmonella</i>	5 à 7
<i>Brochothrix thermosphacta</i>	- 0,8
<i>Clostridium botulinum</i>	3,3



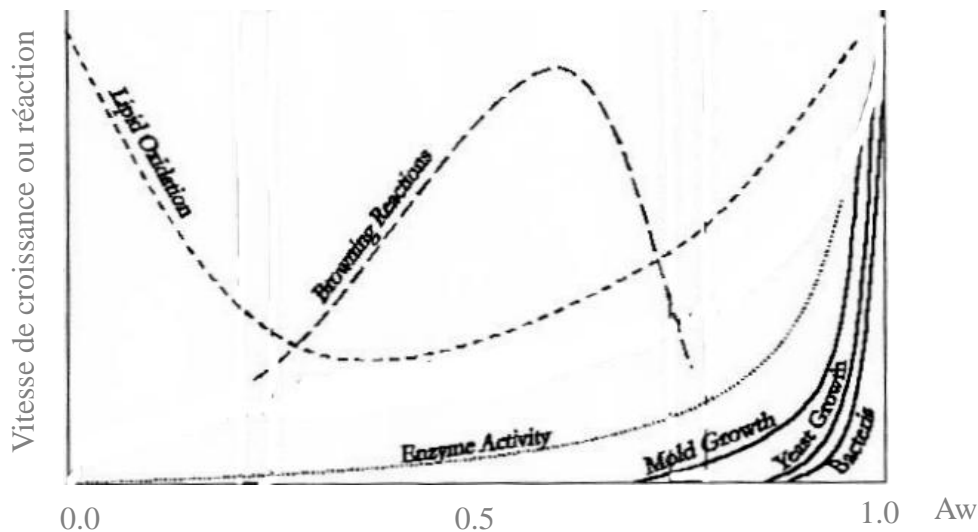
C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

Mode d'action de la congélation

- La congélation combine
 - la diminution de **la température** et
 - la diminution de **l'activité de l'eau**

→ Conservation de **longue durée**



C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

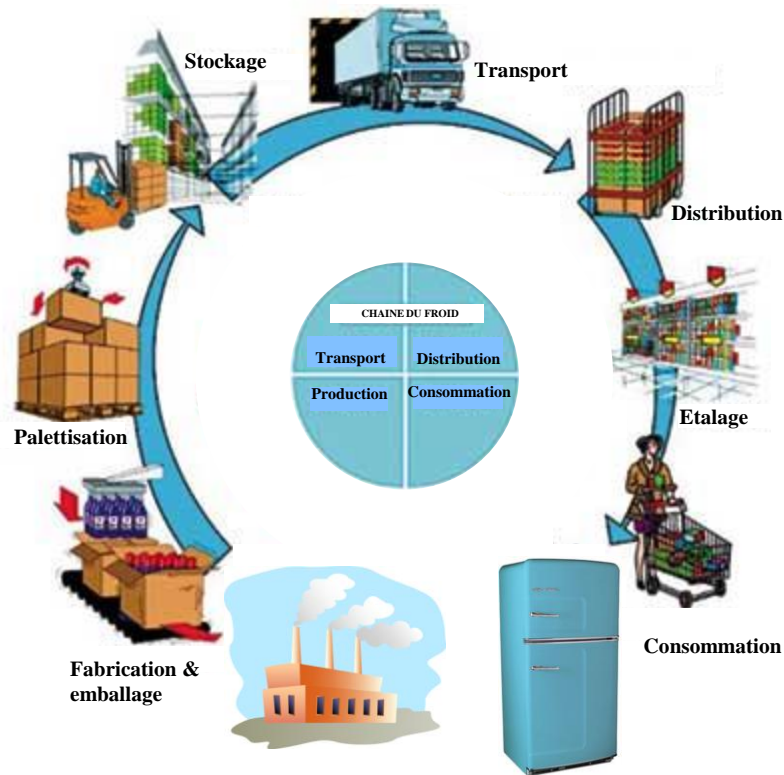
La chaîne du froid

- Les traitements de réfrigération et de congélation doivent absolument être réalisés sur des aliments sains, **aussitôt que possible** après les transformations (lavage, épluchage, blanchiment, pasteurisation, abattage etc.).
- Le **traitement doit être continu** jusqu'au consommateur (chaîne du froid).

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

La chaîne du froid



C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

Tab. Températures de conservation des denrées alimentaires		
Température	Catégories	Principaux produits concernés
- 18 °C		Glaces, crèmes glacées, sorbets Aliments surgelés
- 15 °C		Aliments congelés
0 à 2 °C sur glace fondante		Poissons, crustacés, mollusques autres que vivants
4 °C maximum	Aliments très périssables et dont l'absence de maîtrise de la température pendant une courte période peut présenter un risque microbien pour le consommateur, non stables à température ambiante	Denrées animales ou végétales cuites ou précuites, prêtes à l'emploi Préparations à base de denrées animales, abats, découpes de viandes, y compris sandwiches, salades composées Produits de la pêche saumurés Préparations à base de crème, d'œufs Lait cru, produits frais au lait cru Fromages découpés ou râpés Végétaux crus prédécoupés et leurs préparations Jus de fruits ou de légumes crus de pH supérieur à 4,5 Produits décongelés
8 °C maximum	Tout aliment périssable dont l'absence de la maîtrise de la température peut générer, pour le consommateur, un risque microbien moins immédiat.	Produits laitiers frais autres que laits pasteurisés Beurres et matières grasses Desserts lactés Desserts non stables à base de substituts de lait Produits stables à base de viande tranchée

Tab. Durée pratique de conservation de certains aliments réfrigérés ou congelés

Denrées entreposées	Température (°C)	Durée d'entreposage	Denrées entreposées	Température (°C)	Durée d'entreposage
Viandes réfrigérées			Légumes et fruits réfrigérés		
Bœuf	- 0,5/+ 0,5	2 à 4 semaines	Carottes	- 1/+ 1	4 mois
Porc	- 2/- 1	1 à 2 semaines	Haricots verts	+ 2	3 à 4 semaines
Mouton	- 1/+ 1	1 à 3 semaines	Oignons	- 3/0	6 à 8 mois
Viandes congelées			Tomates mûres	0/+ 1	10/14 jours
Carcasses (bœuf)	- 18 °C	12 mois	Abricots	0/+ 1	4 à 6 semaines
	- 25 °C	18 mois	Bananes	+ 11,5	3 semaines
	- 30 °C	24 mois	Cerises	0/+ 1	3 à 4 semaines
Steaks emballés (bœuf)	- 18 °C	12 mois	Pêches	0/+ 1	4 à 6 semaines
	- 25 °C	18 mois	Pommes	- 1/+ 3	3 à 10 mois
	- 30 °C	24 mois	Légumes et fruits congelés		
Steaks hachés emballés (bœuf)	- 18 °C	10 mois	Carottes	- 18 °C	18 mois
	- 25 °C	> 12 mois		- 25 °C	24 mois
	- 30 °C	> 12 mois		- 30 °C	> 24 mois
Carcasses (porc)	- 18 °C	6 mois	Haricots verts	- 18 °C	15 mois
	- 25 °C	12 mois		- 25 °C	24 mois
	- 30 °C	15 mois		- 30 °C	> 24 mois
Poissons réfrigérés			Petits pois	- 18 °C	18 mois
Frais en glace	0/+ 1	5/10 jours		- 25 °C	> 24 mois
Morue salée	+ 2/+ 4	12 mois		- 30 °C	> 24 mois
Poissons congelés			Framboises et fraises (sans sucre)	- 18 °C	18 mois
Poissons gras	- 18 °C	4 mois		- 25 °C	> 24 mois
	- 25 °C	8 mois		- 30 °C	> 24 mois
	- 30 °C	12 mois	Produits laitiers		
Poissons maigres	- 18 °C	8 mois	Beurre	- 1/+ 4	< 6 semaines
	- 25 °C	18 mois	Beurre (longue durée)	- 14	3 mois
	- 30 °C	24 mois	Fromage à pâte molle	0/+ 2	2 à 6 mois
			Fromage à pâte pressée	0/+ 5	3 à 4 mois
			Fromage à pâte dure	+ 10/+ 12	2 à 6 mois

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-maintien

- Le froid constitue la première technique de conservation **non invasive** des aliments : préserve les qualités originelles de la denrée.
- En France, un consommateur achète en moyenne par an jusqu'à
 - 520 kg d'aliments réfrigérés
 - 30 kg d'aliments surgelés
 - 7 L de glaces et crèmes glacées

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

I. Le froid-procédé

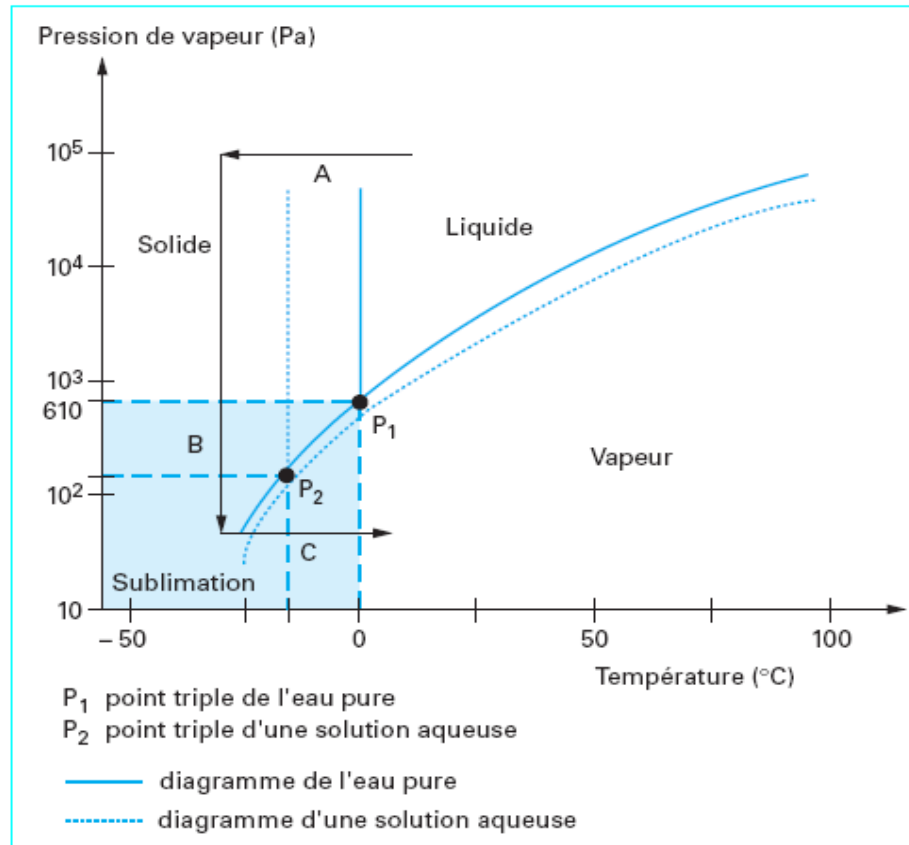
Exemple de la lyophilisation

- La lyophilisation, appelée autrefois cryodessiccation, est une opération de **déshydratation à basse température** qui consiste à éliminer par **sublimation**, la majeure partie de l'eau contenue dans un produit.
- Elle autorise une **conservation à long terme** grâce à l'abaissement de l'activité de l'eau du produit.
- Procédé permettant d'obtenir des produits secs d'**excellente qualité** au plan des caractéristiques organoleptiques, du respect des qualités biologiques et de la préservation des vitamines.

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

La lyophilisation

Principe

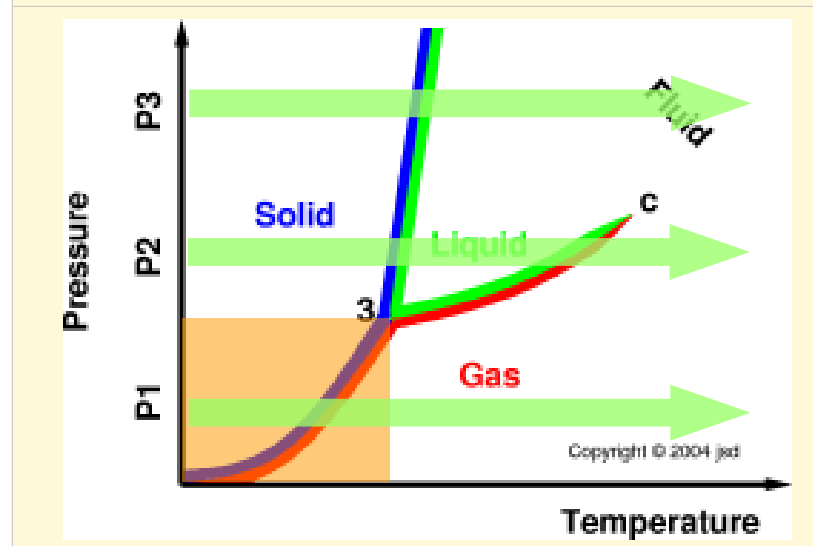


C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

La lyophilisation

Principe

Fig. Diagramme d'état de l'eau pure et d'une solution contenant un soluté



- Procédé combinant l'action du **froid** et celle du **vide** en provoquant la **sublimation** de la glace d'un produit initialement congelé.
- L'eau cristallisée passe directement à l'état vapeur, sans transition par la phase liquide.

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

La lyophilisation

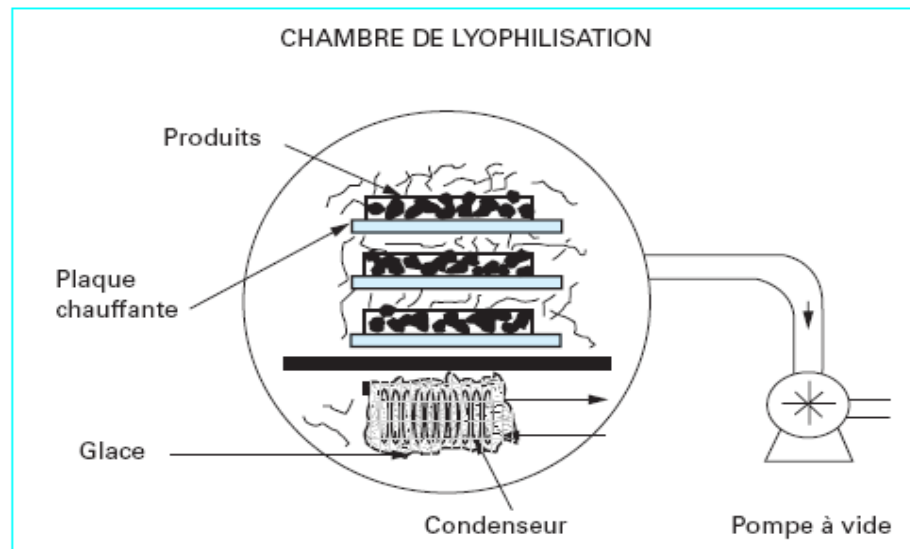
Principe

- Deux phases peuvent être identifiées lors du processus de séchage par lyophilisation :
- une **phase de sublimation** ou **dessiccation primaire** qui permet l'élimination de 85 à 90 % de l'eau d'un produit ;
- une **phase de désorption** ou **dessiccation secondaire** qui permet l'élimination des 10 % d'eau liée restants et, en fin de processus, l'obtention d'un produit contenant moins de 2 % d'humidité.

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

La lyophilisation

Équipement - Lyophilisateur



Équipement de lyophilisation avec chauffage par conduction

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

La lyophilisation

Equipement - Lyophilisateur



Lyophilisateur pilote

C. Procédés thermiques par soustraction de chaleur

La lyophilisation

Equipement - Lyophilisateur



Lyophilisateur industriel

