

# TECHNOLOGIE ALIMENTAIRE

Cours N°7: Les opérations unitaires des processus technologiques

Partie II

# Préambule

Les opérations unitaires des processus technologiques constituent les étapes de transformation d'une matière première agricole de qualité variable en un produit alimentaire de qualité maîtrisée.

Il y a trois manières d'aborder l'étude des opérations unitaires:

- En les classant en fonction du transfert mis en œuvre (transfert de chaleur par exemple);
- En les étudiant à travers un processus technologique de fabrication d'un produit;
- Ou en les classant en fonction de leur objectif principal (séparation, stabilisation ...).

# Préambule

C'est cette dernière opération qui a été choisie pour ce chapitre, qui traitera par ordre:

- Les opérations préliminaires;
- Les opérations de réduction de taille;
- **Les opérations de séparation;**
- Les opérations de mélange et de texturation;
- Les opération de stabilisation;
- Les opérations de conditionnement.

# 3. LES OPÉRATIONS DE SÉPARATION

---

# Introduction

Les opérations de séparation sont prédominantes en industries agroalimentaires. La plupart des aliments de base ont subi une étape de séparation lors de leur fabrication: huile à partir des graines végétales, sucre à partir de betteraves, ...

# Introduction

Dans ces processus technologiques, la séparation a deux fonctions principales:

- **l'extraction-clarification-fractionnement**, dont le rôle est de récupérer une ou plusieurs fractions d'un mélange. Par exemple extraction du sucre de la betterave, obtention de lait écrémé et de crème à partir de lait entier.
- **La standardisation** (en eau ou en un autre composant) pour répondre à un cahier des charges. Par exemple standardisation en matière grasse du lait, décaféénéisation du café.

# Introduction

On peut distinguer la séparation d'un mélange:

- **Hétérogène** (dispersion ou émulsion) par un transfert de quantité de mouvement : filtration ou décantation statique et centrifuge, extraction par pression;
- **Homogène** (solution) par un transfert de matière: cristallisation ou distillation, filtration tangentielle.

**Remarque:** dans le cas de l'extraction par solvant, il s'agit de séparer les constituants d'un mélange hétérogène par transfert de matière.

# Introduction

On peut identifier **trois conditions** nécessaires pour permettre la **séparation**:

- Que les phases à séparer soient différentes du point de vue de leurs propriétés physico-chimiques: différences de tailles, de masses volumiques, de mobilités, de points d'ébullition;
- La mise en œuvre d'une surface de séparation: surface de filtration de décantation, de chauffe....
- L'apport d'énergie afin de passer d'un état désordonné à un état ordonné.

# Introduction

La classification choisie pour aborder les opérations de séparation est la suivante:

- Opération de séparation sans changement d'état:
  - extraction (par pression et par solvant),
  - décantation (statique et centrifuge),
  - filtration (frontale et tangentielle);
- Opérations avec changement d'état:
  - cristallisation,
  - distillation.

# 3.1. Extraction solide/liquide

Cette opération permet de séparer une phase liquide appelée « extrait » d'une phase solide appelé « résidu ».

**Solvant:** liquide d'extraction qui dissous les solutés

**Solutés:** composants solubles à extraire

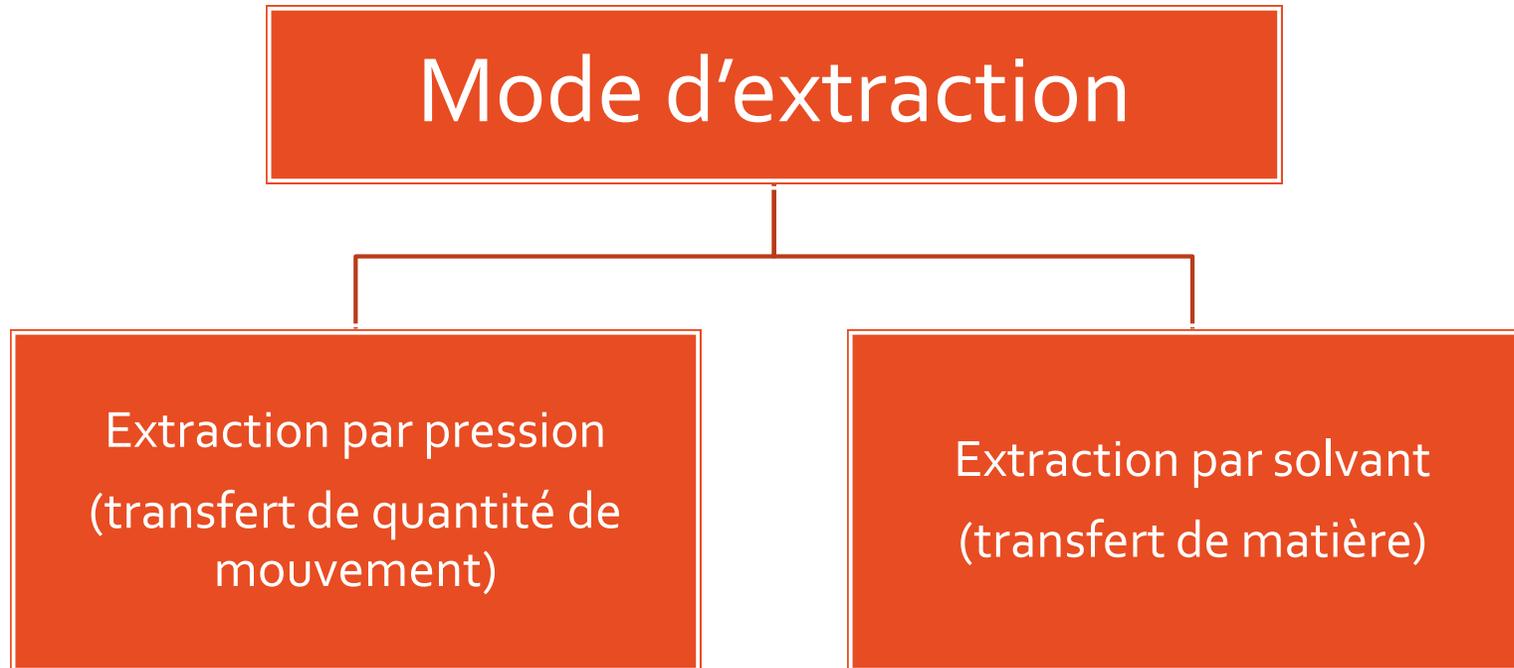
**Extrait:** phase riche en soluté composée de solvant et de soluté

**Résidu:** phase pauvre en solutés, également appelé matières épuisées.

## ***Mise en situation:***

- Plonger des clous de girofle dans une solution d'alcool: l'odeur de la solution obtenue montre l'extraction des molécules odorantes constituantes du clou de girofle (telles que l'eugénol par exemple). Il s'agit d'une extraction par solvant (qui est ici l'alcool).
- Presser un citron pour obtenir du jus de citron. Il s'agit d'une extraction par pression.

## 3.1. Extraction solide/liquide



## 3.1. Extraction solide/liquide

Selon les fabrications, l'un ou l'autre ou les deux types d'extraction sont utilisés.  
Exemples:

- Extraction du sucre de la betterave: extraction par solvant;
- Extraction du jus de la pomme: extraction par pression;
- Extraction de l'huile des graines végétales: extraction par pression, puis éventuellement par solvant;
- Extraction du sucre de canne à sucre: extraction par solvant, puis pression.

# 3.1.1. Extraction par pression

## ❖Principes:

Une pression est appliquée au produit et permet une expulsion du jus qu'il contient.

Deux phases:

- Expulsion de l'extrait;
- Rétention du résidu: l'extrait traverse le support de séparation (toile par exemple).

Alimentation  
(broyat de pomme)



Extraction par pression



Extrait (jus de pommes)  
Résidu (marc de pommes)

## 3.1.1. Extraction par pression

### Indices positifs

- L'extraction par pression augmente le taux de matière sèche du résidu.
- Elle permet d'extraire le jus sans dilution du soluté par un solvant

### Indices négatifs

- L'extraction par pression produit un extrait chargé en particules (si le broyage préalable est trop fin).
- Elle entraîne un changement qualitatif de l'extrait (si la pression est trop importante). Ex : du jus de raisin: si on augmente la pression le taux de phénol extrait augmente.
- Elle détruit les cellules des tissus du résidu.

# 3.1.1. Extraction par pression

## ❖ Matériels et applications:

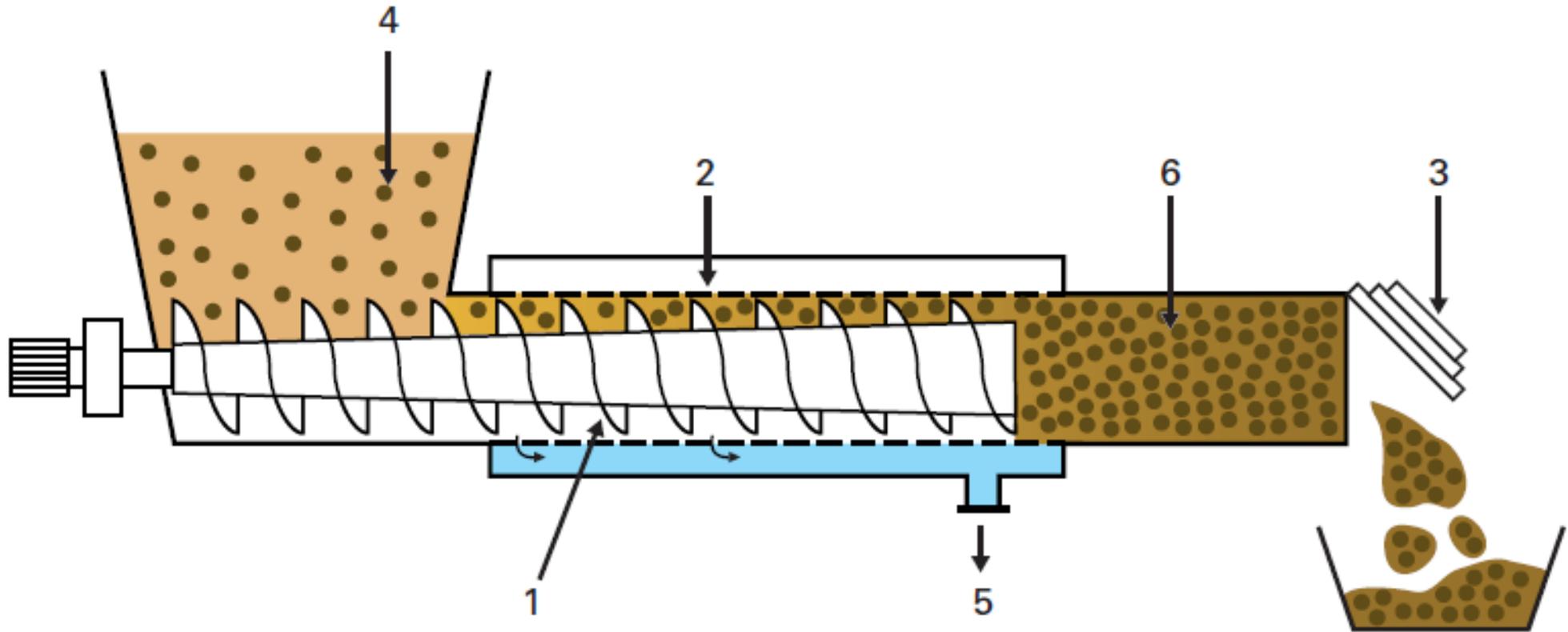
- Presse à plateaux (procédé discontinu): jus de pommes
- Presse à membrane (procédé discontinu): jus de raisin
- Presse à vis (procédé continu): huile
- Presse à bandes (procédé continu): jus de pommes

## 3.1.1. Extraction par pression

- ❖ **Exemple de matériel d'extraction par pression: le presseur à plateau (Vaslin)**
- **Principe de fonctionnement:** pression dans une cage cylindrique légèrement inclinée dans laquelle deux plateaux se déplacent sur une vis centrale (2 vitesses: 3 à 6 tr/min).
- **Caractéristiques** : discontinu, 500 à 7500 kg par cycle; durée d'un cycle : 1 à 3 heures avec 3 à 6 phases (pression/décompression), la pression est de l'ordre de 6 à 7 bars.
- **Application:** pommes, raisins ...



## Presse à vis (procédé continu): huile



1 - Vis presseuse.

2 - Tamis.

3 - Obturateur réglable.

4 - Boue liquide ou pâteuse.

5 - Filtrat.

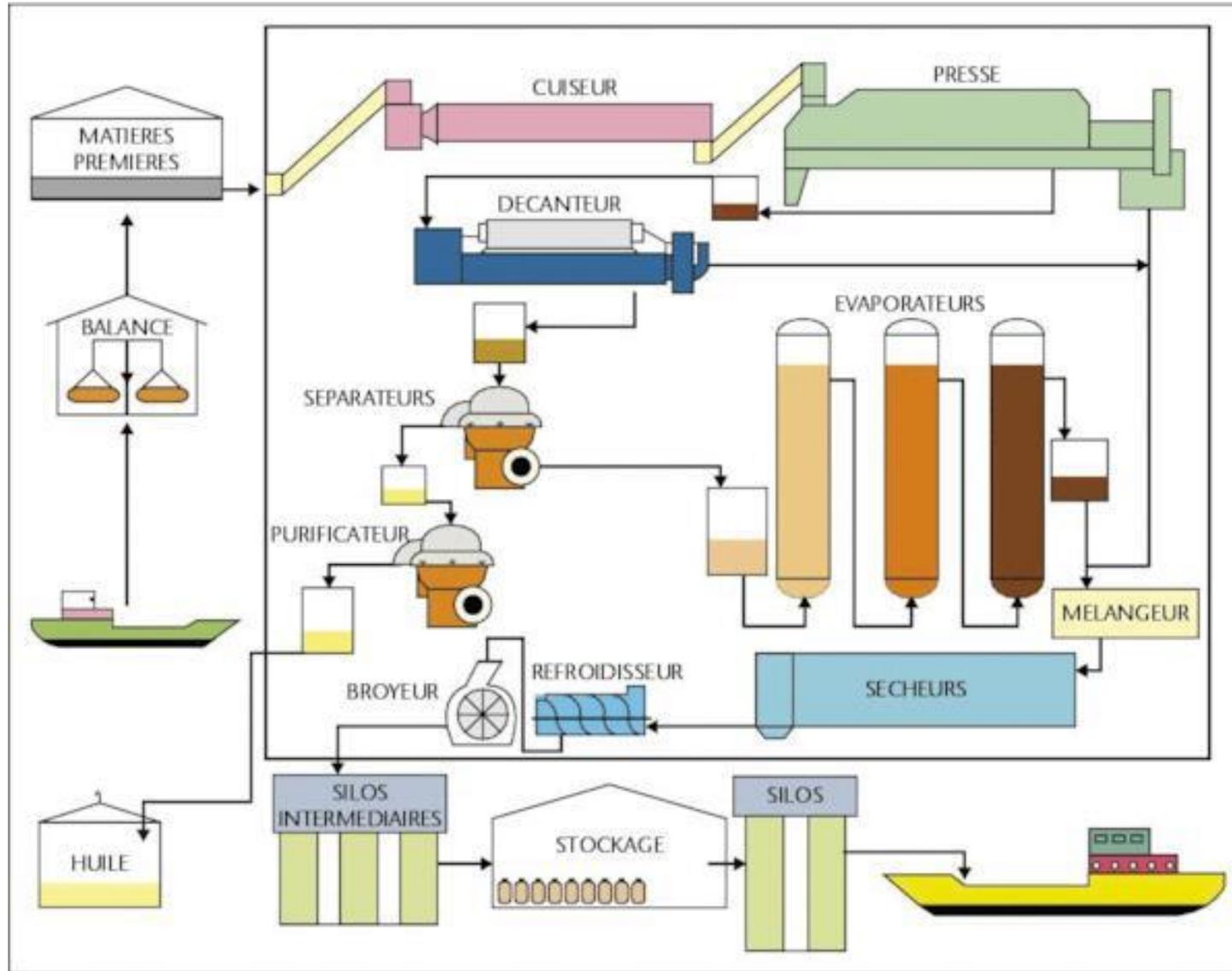
6 - Bouchon de boue déshydratée

# Extraction de l'huile de poisson

L'extraction historique de l'huile de foie de morue à partir de foies frais (ou congelés) se réalise par la cuisson des foies puis par un broyage et une centrifugation pour séparer l'huile des protéines et de l'eau.

L'extraction la plus courante d'huile de poisson est celle pratiquée sur les poissons bleus de type harengs, sardines, maquereaux, anchois, dans les usines mixtes de farines et d'huiles de poissons. Ce process enchaîne des étapes de cuisson et pressage de poissons entiers pour séparer d'une part les protéines récupérées dans la fraction farine et les lipides d'autre part récupérés dans l'huile.

# Extraction de l'huile de poisson



## 3.1.2. Extraction par solvant

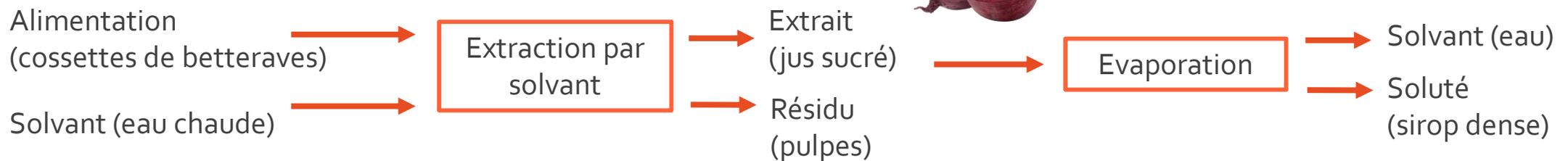


### ❖ Principes:

Il s'agit d'extraire les composés solubles de la matière première, par diffusion dans un solvant.

On distingue quatre phases:

- Mise en contact de l'alimentation et du solvant;
- Transfert de matière (soluté) par diffusion depuis l'alimentation vers le solvant par différence de concentration;
- Séparation mécanique du résidu et du solvant;
- Séparation du solvant et du soluté par évaporation.



## Tableau : différentes techniques d'extraction par solvant

Technique	Produit traité	Objectifs
Lavage (entraînement par eau chaude ou froide de constituants solubles)	Grains de caillé de fromagerie Cossettes de betterave Coagulum de caséinerie Huiles brutes Viandes, végétaux	Réduction du lactose Récupération du saccharose Purification de la caséine (complément alim.) Démucilagination, désacidification Récupération de protéines
Percolation (coulage du solvant chaud)	Mouture de café Tourteaux Café	Boisson (café classique) Récupération de l'huile résiduelle Extraction de la caféine
Décoction (solides dans un solvant en ébullition)	Plantes fonctionnelles et médicinales	Composants aromatiques et thérapeutiques
Infusion (solides dans un solvant chaud presque à l'ébullition)	Mouture de café Thé, plantes fonctionnelles et médicinales	Boisson (café turc) Extraction du maltose pour hydrolyse et fermentation composants aromatiques, thérapeutiques
Macération (solides dans un solvant froid ou moyennement chaud)	Morceaux de caillette de veau Plantes fonctionnelles	Extraction présure (chymosine) Colorants, composants aromatique thérapeutiques, extraction du cholestérol
Elution	Divers	Technique d'analyse par dosage: chromatographique

## 3.1.2. Extraction par solvant

### Indices positifs

- L'extraction par solvant extrait le soluté dans la matière première.
- Elle purifie la matière première.

### Indices négatifs

- L'extraction par solvant dilue le soluté, il y a donc nécessité de séparer soluté et solvant par distillation ou évaporation. Elle risque aussi de contaminer le soluté par le solvant.

## 3.1.2. Extraction par solvant

### ❖ Matériels et applications:

#### - Appareils à lit immobile:

- Percolateurs simples, diffuseurs: matières végétales (café, arômes, huiles, betteraves).

#### - Appareils à lit mobile:

- Extracteurs à compartiments: matières végétales oléagineuses (huiles);
- Extracteurs à paniers: matières végétales oléagineuses (huiles);
- Extracteurs à tapis: matières végétales oléagineuses (huiles).

#### - Appareils avec agitation:

- Excréteurs avec agitateur: caséine du lait;
- Extracteurs à racloir: matières oléagineuses (huiles);
- Extracteurs à vis: matières oléagineuses et betteraves (sucre);
- Extracteurs à palettes verticales: matières oléagineuses (huiles);
- Extracteurs à chaînes et plateaux: betteraves (sucre).

## 3.2. Décantation statique et centrifuge

On distingue deux types de décantation:

- **La décantation statique;**
- **La décantation centrifuge** ou centrifugation.

Ces techniques ont pour rôle de:

- Clarifier la phase dispersante: clarification d'un jus de fruits brut par centrifugation;
- Séparer les constituants d'une émulsion: écrémage du lait;
- Concentrer la phase dispersée: centrer une suspension de levure par centrifugation.

Ces opérations mettent en œuvre un transfert de quantité de mouvement dû à un gradient de masse volumique.

## 3.2.1. La décantation statique

### ❖ Principes:

La phase dispersée se déplace dans la phase dispersante sous l'action de l'accélération de la pesanteur (g).

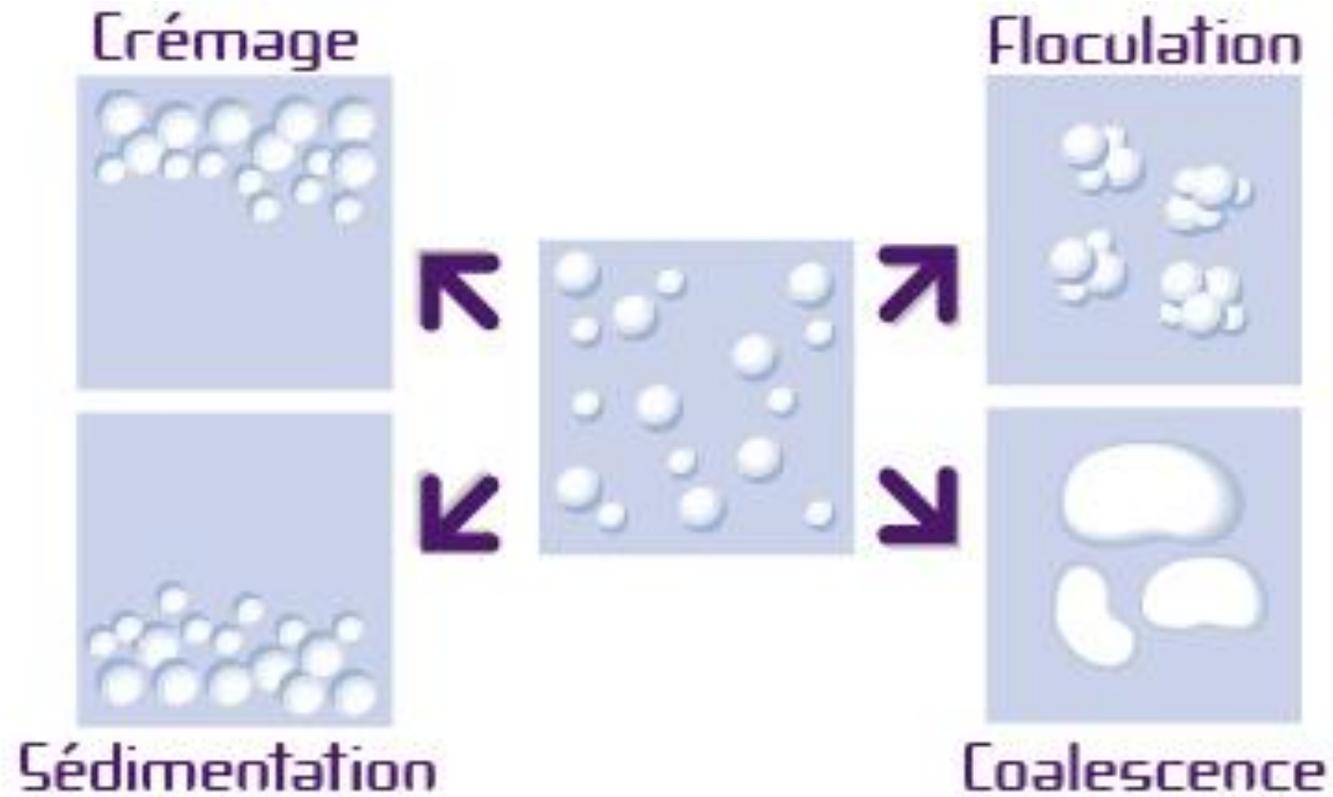
Si  $\rho_p > \rho_f$ , le déplacement est dirigé vers le bas, il y a sédimentation (exemple: trouble d'un jus de fruits)

Si  $\rho_p < \rho_f$ , le déplacement est dirigé vers le haut, il y a crémage (exemple: de l'huile dans du vinaigre).

$\rho_p$ : masse volumique des particules dispersées ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$\rho_f$ : masse volumique du fluide dispersant ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

# Mécanismes principaux de déstabilisation d'une dispersion liquide



## 3.2.1. La décantation statique

### Indices positifs

- La décantation statique réduit la turbidité du produit.
- Elle évite une sédimentation ou un crémage lors du stockage.

### Indices négatifs

- La décantation statique entraîne un risque de perte de matière au niveau de la phase intermédiaire et un risque éventuel de trace d'agents flocculants (filtration nécessaire).

## 3.2.1. La décantation statique

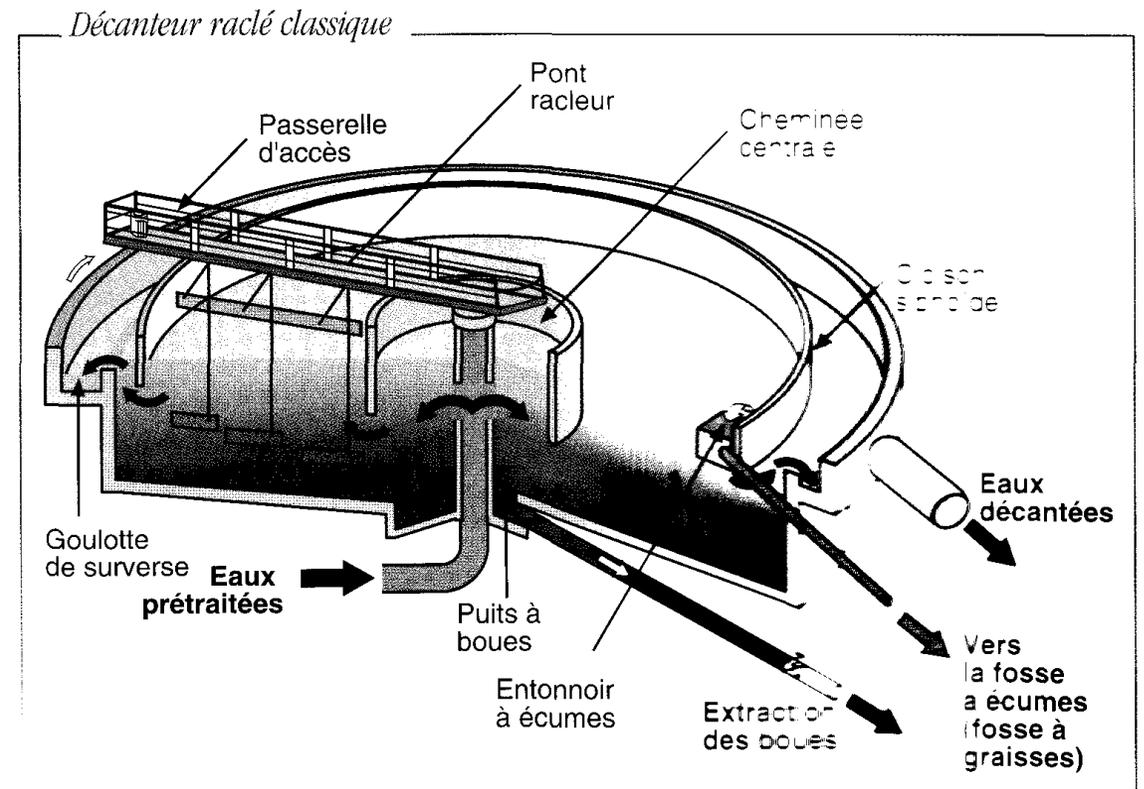
### ❖ Matériels et applications:

- **Décanteur horizontal parallélépipédique:** traitement des eaux usées.
- **Décanteur raclé:** traitement des eaux usées.
- **Décanteur vertical cylindro-conique:** traitement des eaux usées.
- **Cuve de décantation:** jus de fruits enzymé.

## 3.2.1. La décantation statique

### ❖ Exemple de matériel de décantation statique : le décanteur raclé classique

La décantation est assurée dans des décanteurs statiques ou raclés. La vitesse lente de l'eau permet le dépôt des MES au fond du décanteur. Cela constitue les boues primaires qui sont évacués par pompage. L'efficacité d'un décanteur est améliorée lorsque l'arrivée des eaux se fait par une cheminée centrale ou « clifford », qui permet de les répartir régulièrement et de briser l'effet de jet (qui perturbe la décantation). Les décanteurs sont équipés de cloisons siphonides qui permettent de retenir les flottants et graisses résiduelles.



## 3.2.2. La décantation centrifuge

### ❖ Principes:

La phase dispersée se déplace dans la phase dispersante sous l'action de l'accélération centrifuge (force centrifuge).

La phase lourde est récupérée à la périphérie et la phase légère au centre.

## 3.2.2. La décantation centrifuge

### Indices positifs

- La décantation centrifuge réduit la turbidité du produit
- Elle permet une épuration bactérienne
- En outre, elle évite une sédimentation ou au crémage lors du stockage

### Indices négatifs

- La décantation centrifuge risque d'entraîner des pertes de matière lors du débouillage.

## 3.2.2. La décantation centrifuge

### ❖ Matériels et applications:

- **Ecrémeuse à assiettes ou disques:** écrémage du lait, du lactosérum, clarification du jus de fruit, ....
- **Décanteur centrifuge:** clarification du lait de soja, de l'huile d'olive
- **Centrifugeuse à bol tubulaire :** clarification d'huiles végétales
- **Essoreuses:** cristaux, fibres cellulosiques, sucres
- **Centrifugeuse à chambres concentriques: clarification:** jus de fruits.

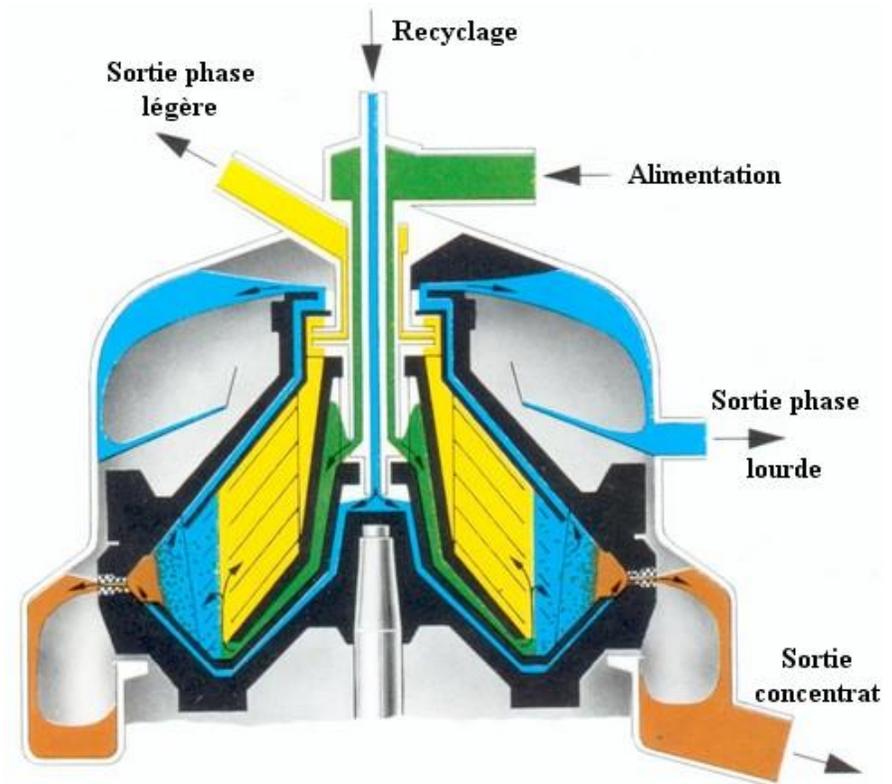
## 3.2.2. La décantation centrifuge

### ❖ Exemple de matériel : centrifugeuse à assiette

#### ❖ Principe:

Séparateur centrifuge semi-hermétique à débouillage automatique (écrémage du lait chaud).

Séparation en continu de la phase légère et de la phase lourde. Les débouillages sont assurés par le mouvement vertical d'un fond mobile plaqué contre le chapeau du bol par une pression hydraulique. Par expulsion de l'eau dans la chambre d'ouverture, le fond du bol descend par différence de pression et démasque des orifices par lesquels les boues sont éjectées grâce à la force centrifuge.



# Document multimédia

[https://www.youtube.com/watch?v=dxTT\\_bP6lwl&t=166s&ab\\_channel=CarlosLao](https://www.youtube.com/watch?v=dxTT_bP6lwl&t=166s&ab_channel=CarlosLao)



## 3.3. La filtration

La filtration est une opération de séparation qui consiste à séparer une phase dispersée d'une phase continue par passage à travers un milieu filtrant.

Deux objectifs peuvent être visés:

- Extraction d'un solide (récupération d'une levure après fermentation);
- Purification d'un liquide (clarification d'un jus de fruits).

Cette opération met en œuvre un transfert de quantité de mouvement dû à un gradient de pression. Ce gradient de pression est appliqué pour s'opposer à la résistance du médium de filtration au passage du produit.

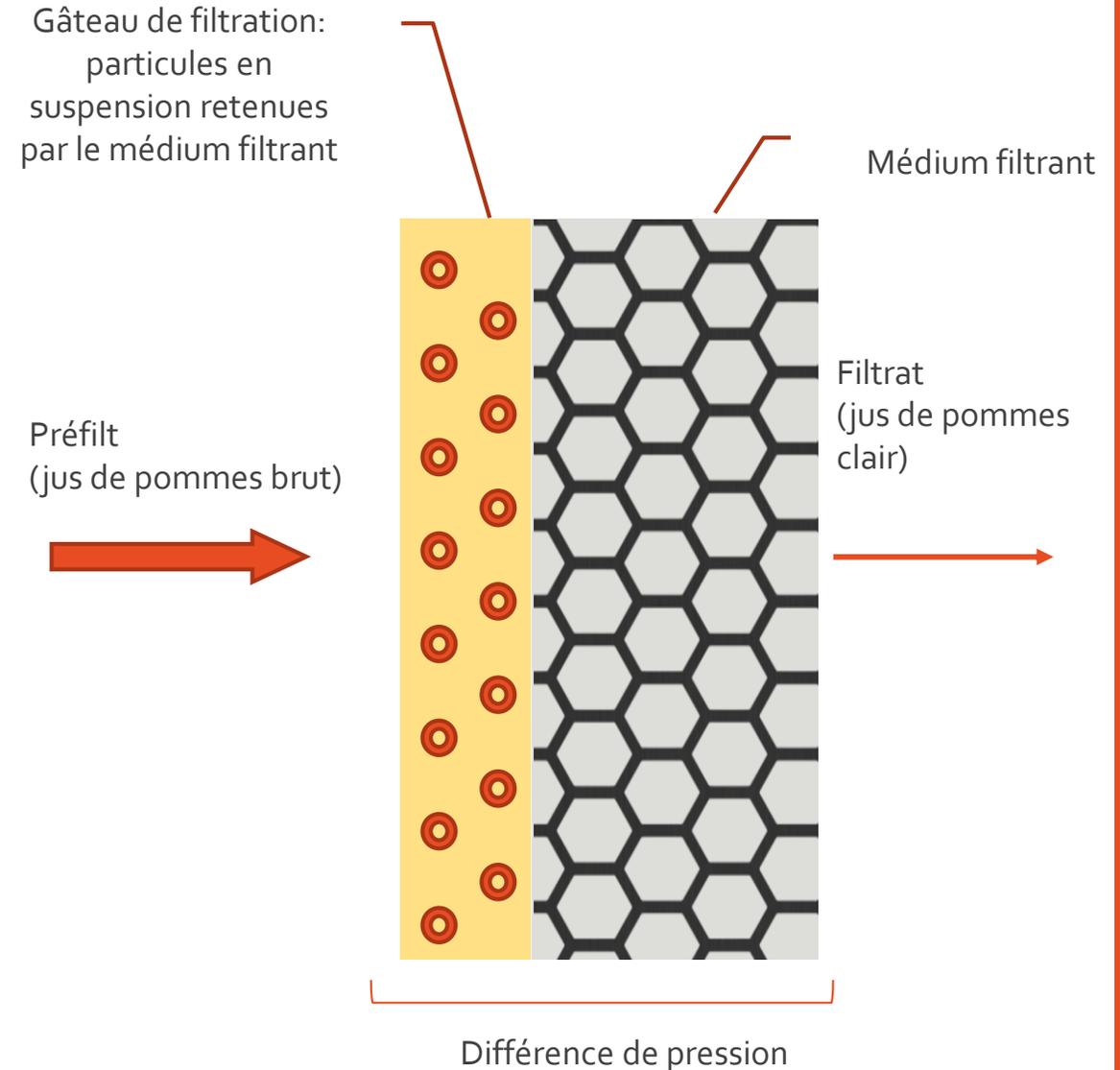
## 3.3. La filtration

### ❖ Application: la clarification du jus de pommes

Au cours de la filtration, la résistance à l'écoulement augmente, donc le débit de filtration diminue.

Le médium filtrant peut être constitué:

- d'un filtre épais composé de cellulose. Ce type de médium, dans certains cas, peut être régénéré (lavé et stérilisé à la vapeur) afin d'allonger sa durée de vie;
- Des particules en suspension dans le liquide à filtrer, qui forment un gâteau de filtration;
- D'un adjuvant de filtration ajouté pour favoriser la formation d'un gâteau de filtration (diatomites, perlites, cellulose, charbon actif).



## 3.4. La cristallisation

La cristallisation est une opération de séparation avec changement d'état. C'est le changement d'état physique qui donne lieu à la formation d'une phase cristallisée, c.-à-d. ayant une structure géométrique bien définie et régulière. Les cristaux d'une même substance possèdent des caractères communs bien définis.

### Petite expérience:

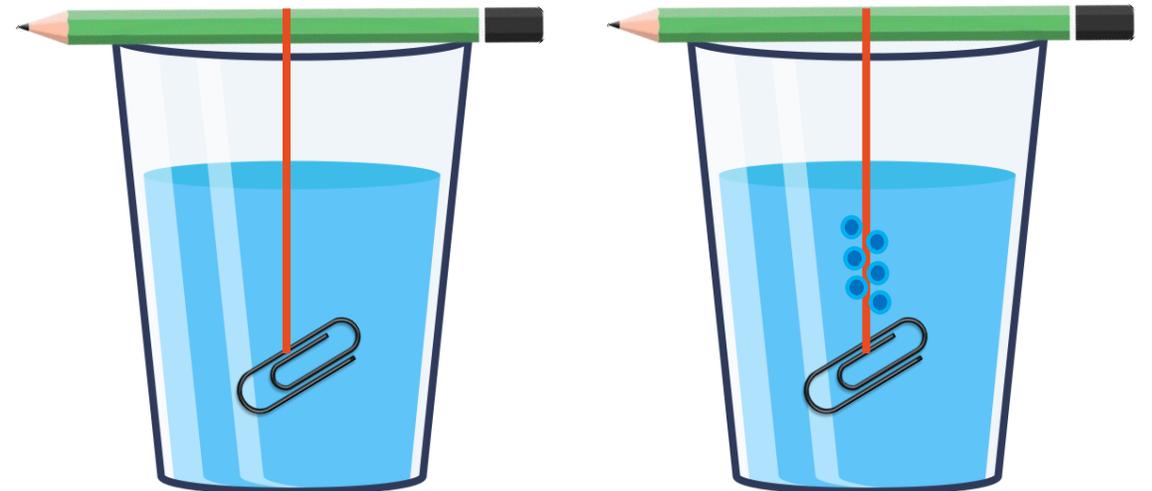
Dissoudre un verre de sucre dans un demi-verre d'eau chaude.

Y ajouter du sirop pour aromatiser.

Attacher un fil à un crayon et à un trombone (comme indiqué sur le schéma).

Laisser refroidir la solution et attendre un jour ou deux.

Il y a formation de cristaux le long du fil.



## 3.4. La cristallisation

Ce changement d'état est utilisé dans les applications suivantes:

- **Purification d'un soluté:**
  - Cristallisation du saccharose à partir d'un jus sucré extrait de la betterave,
  - Cristallisation du sel marin dans les salines.
- **Congélation:** formation de cristaux de glace dans les produits congelés ou surgelés pour baisser l'activité de l'eau;
- **Modification de la texture:** solidification de cristaux de matière grasse (par exemple le chocolat, la margarine, ou les crèmes glacées);
- **Cristallisation non souhaitée:**
  - Cristallisation de l'huile d'olive au froid,
  - Cristallisation des sucres dans le miel.

## 3.4. La cristallisation

La cristallisation a lieu dans une zone de solubilité spécifique à chaque composé, liée à deux paramètres: **la concentration** en ce composé et **la température**. Lorsque ces conditions sont réunies, la solution se trouve en état de sursaturation.

La cristallisation d'un soluté dans un liquide met en œuvre deux processus successifs:

- La nucléation: formation de cristaux
- La croissance des cristaux

## 3.4. La cristallisation

### ❖ Principes:

On doit distinguer le cas de la cristallisation simple où il n'y a qu'un soluté à cristalliser et celui de la cristallisation fractionnée lorsque l'on doit séparer plusieurs solutés.

- **Cristallisation simple:** les procédés de cristallisation simple peuvent être classés suivant le mode d'obtention de l'état de sursaturation.
  - **Les procédés thermiques:** la sursaturation est réalisée en refroidissant simplement la solution ou par évaporation du solvant.
  - **Les procédés physico-chimiques:** ils consistent à modifier les propriétés du système en ajoutant un corps étranger à la solution.
- **Cristallisation fractionnée:** c'est une opération qui consiste à effectuer des cristallisations successives d'une solution contenant plusieurs solutés en vue d'obtenir ces solutés à l'état plus ou moins pur dans des fractions solides ou liquides. La mise en œuvre du procédé est basée sur les différences de solubilité des solutés ou sur les différences de vitesse de cristallisation.

## 3.4. La cristallisation

### ❖ Matériels et applications:

- Appareil à faisceaux tubulaires (sucre);
- Appareil à plaques horizontales (sucre);
- Cuite horizontale compartimentée (sucre);
- Cristallisateur/refroidisseur (corps gras);
- Echangeurs à surface raclée (margarine, crème glacée).

## 3.4. La cristallisation

### Indices positifs

- La cristallisation augmente la stabilité du produit.
- Elle modifie la texture (chocolat) et permet l'obtention de soluté pur (saccharose, sel).

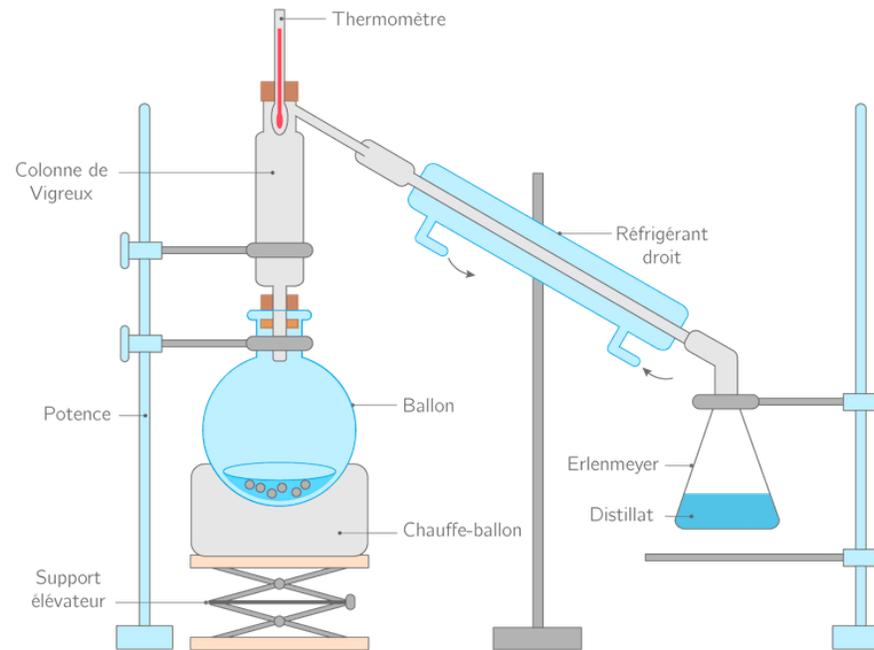
### Indices négatifs

- La cristallisation entraîne l'apparition de cristaux en formes d'aiguilles; il y a donc exsudation (si la cristallisation est trop lente).
- Elle peut provoquer l'apparition d'impuretés contenues dans les cristaux (si des vibrations ont lieu lors de la cristallisation).

# 3.5. La distillation

**Distillat** : phase vapeur après condensation  
**Résidu**: reste à l'état liquide

La distillation est une opération de séparation, avec changement d'état.



## 3.5. La distillation

### ❖ Principes:

Il s'agit de séparer les constituants d'un mélange selon leur **température d'ébullition**. Cette opération est donc basée sur la vaporisation partielle d'un mélange liquide.

Les installations comportent:

- Une colonne, elle permet d'assurer un contact aussi intime que possible entre la phase liquide et la phase vapeur, de manière à maintenir l'état d'équilibre;
- Un bouilleur (ou chaudière): c'est un réservoir chargé au départ du mélange à distiller associé à un dispositif de chauffage;
- Un condenseur qui refroidit les vapeurs de distillat.

## 3.5. La distillation

### Indices positifs

- La distillation extrait les composés volatils aromatiques de la matière première.
- Elle permet de valoriser les coproduits (mélasse).

### Indices négatifs

- La distillation risque d'accentuer les défauts de goût de la matière première fermentée (fruits, mélasses de sucrerie, céréales).
- Elle nécessite une étape de dilution à l'eau lorsque les degrés d'alcool obtenus (62 à 85°) sont supérieurs aux taux commerciaux.

# Références bibliographiques

- <https://m.20-bal.com/law/16772/index.html?page=16>
- Alain Branger, Marie-Madeleine Richer, Sébastien Roustel, 2007/ Alimentation et processus technologique. Educagri éditions.
- [https://www.ocl-journal.org/articles/oclj/full\\_html/2010/04/oclj2010174p219/oclj2010174p219.html](https://www.ocl-journal.org/articles/oclj/full_html/2010/04/oclj2010174p219/oclj2010174p219.html)