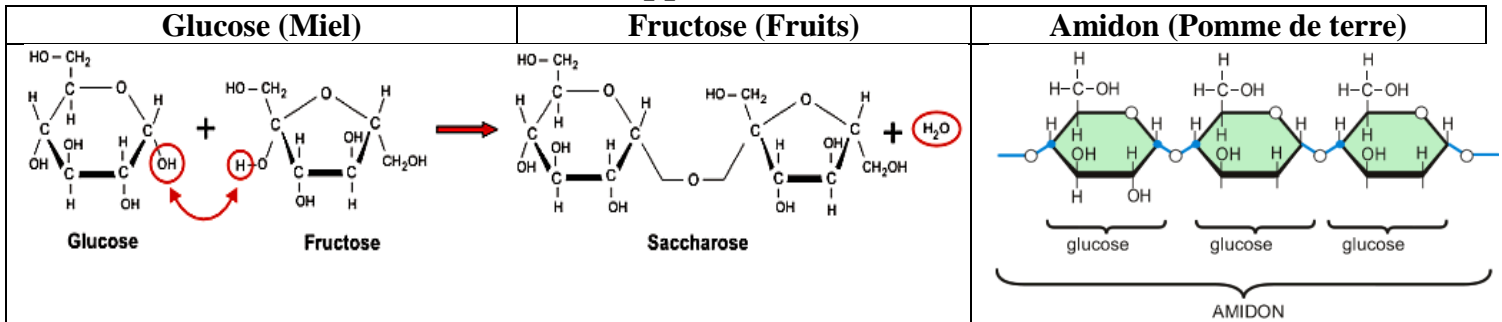
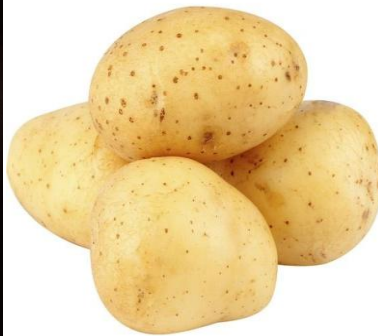


1. Généralité sur les sucres (Rappel)



- **Les sources de sucre :** La betterave sucrière et la canne à sucre (saccharose), les pommes de terre (amidon), les carottes (saccharose mais en petite quantité), le miel (le glucose), les fruits (le fructose), le lait (le lactose).



Dans tout le cours nous nous sommes intéressés au saccharose.

Le saccharose (également nommé saccarose, sucre de table ou sucre blanc) est un sucre au goût doux et agréable, très largement utilisé pour l'alimentation. Il est extrait de certaines plantes, principalement de **la canne à sucre** et de **la betterave sucrière**, et il est produit sous forme de petits cristaux blancs.

- **La masse molaire du saccharose** 342,29g/mol, **sa formule brute** $C_{12}H_{22}O_{11}$
- **Le point de fusion de saccharose** est 186°C et cette valeur varie en 182°C à 192°C selon la pureté de l'échantillon.
- **La solubilité du saccharose dans l'eau**

La solubilité (en g par g d'eau) du saccharose dans l'eau augmente en fonction de la température.

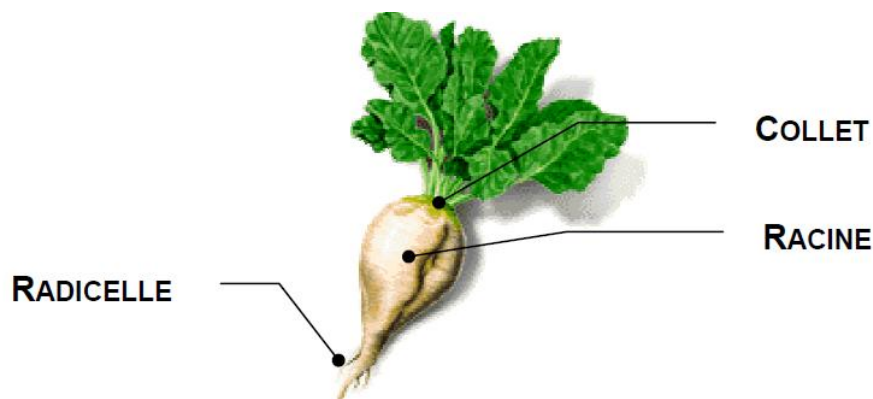
Exemples :

Température (°C)	0	10	20	30	40
Solubilité (g de saccharose par g d'eau)	1,81	1,86	2,00	2,15	2,34

2. Transformation de la betterave en saccharose

2.1. La culture de betterave

- La France est le premier producteur mondial de sucre de betterave. Pendant l'automne, l'industrie reçoit en **moyenne 40 000 tonnes de betterave sucrière par jour**. La récolte est saisonnière. Elle a lieu de Septembre à Décembre. Pendant cette période, l'industrie travaille 24h/24h. Pendant le reste de l'année, le sucre est mis en boîte et les machines sont entretenues.
- La betterave sucrière (« Beta vulgaris ») est un légume-racine semé entre le mois de Mars et de Mai. Normalement, il leur faut deux ans pour arriver à maturité, cependant les agriculteurs n'attendent pas aussi longtemps, ils les cultivent après 8 à 9 mois car ils ont déjà accumulé assez de sucres dans leurs racines.



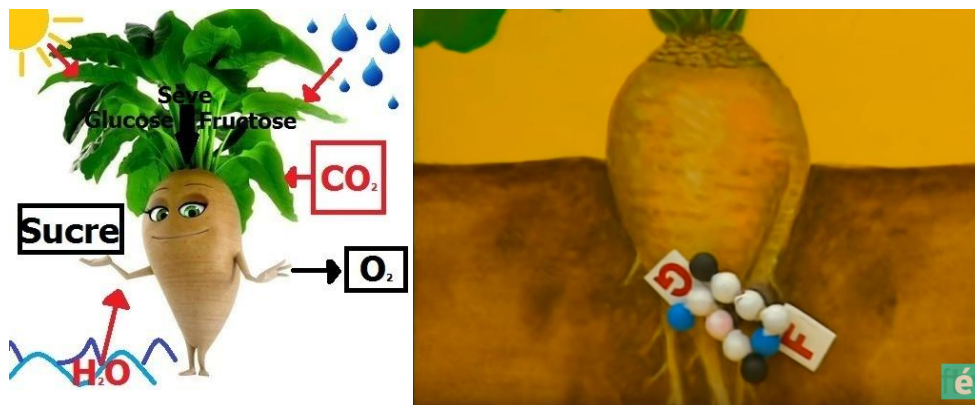
- La réserve en saccharose est située dans la racine, qui est constituée de 15 à 21% de son poids en sucre. Cette racine, est composée également de 75% d'eau et de 25% de matière sèche, cette matière sèche comprenant 5% de pulpe (utilisée pour l'alimentation végétale) et 75% de saccharose.



- L'arrachage mécanique des betteraves se fait à l'aide des machines en coupant les feuilles et le collet, puis en secouant très fort les racines pour enlever la terre. À la fin de la récolte on entasse le tout au bout des champs (les silos).
- La betterave sucrière doit être transformée immédiatement après sa récolte. En effet, on perd à peu près **200 g de sucre par jour et par Tonne**, vu qu'elle puise dans ses réserves pour se nourrir.
- **Plus il y a du soleil plus la récolte est bonne tout comme le raisin. Mais pourquoi ?**

C'est par les feuilles que la photosynthèse s'opère. Ainsi, plus une plante a de feuilles, plus son rendement est important. Les sucres se forment dans la betterave grâce à la photosynthèse : l'énergie du soleil, le gaz carbonique de l'air et l'eau du sol sont utilisés par les plantes vertes pour produire ces éléments nutritifs dont les plantes ont besoin pour vivre et se développer.

Pendant la journée, les feuilles produisent, ainsi le glucose et emmagasinent de l'énergie. Pendant la nuit, cette énergie sera utilisée pour produire le fructose. À l'aube, ces deux molécules se combinent pour donner le saccharose. Ce dernier va nourrir la plante, l'excès de saccharose va être stocké dans les racines pour constituer une réserve de nourriture. Schématisons le processus avec la betterave sucrière :



2.2. La réception de betterave

Le camion, chargé de betteraves, passe sur une bande (poids brut) et repasse sur la même bascule à vide (poids net).

Les betteraves sont payées en fonction de ces critères :

- Le poids marchand des betteraves (moins la terre, les cailloux, les collets...)
- La teneur en sucres de ces betteraves

À la réception, on prend un échantillon représentatif du camion entre 150 kg et 200 kg pour évaluer la terre-terre et la teneur en sucres (voir cours).

La tare-terre

La tare est composée majoritairement de terre, pierres ou graviers et de déchets organiques (herbes feuilles). La tare ne comprend pas les collets (partie supérieure de la racine + feuilles).

La teneur en sucre

Pour connaître la proportion de sucre contenue dans la betterave, on procède à un dosage sur échantillons. La mesure saccharimétrique est effectuée sur un filtrat résultant de la digestion aqueuse à froid de 40g de râpure de betteraves et d'une solution aqueuse de sous-acétate de Plomb. La richesse moyenne en sucre varie de 15 à 20 % de son poids.

2.3. Lavage

Les betteraves sont envoyés par bande transporteuse ou voie hydraulique vers le lavoir afin d'éliminer les pierres, les herbes, les radicules et les feuilles (élimination de la terre → séparation par densité → récupération des radicules). Les herbes récupérées sont séchées pour l'alimentation de bétails.



2.4. La diffusion

Les betteraves propres sortant du lavoir tombent dans le coupe-racines dont les couteaux entraînés par un disque de grand diamètre découpent les racines en fines lanières assez rigides appelées « cossettes ». Les cossettes de forme « faitière » (Figure 3) ont une longueur de 5 à 6 cm et une épaisseur de 0.9 à 1.3 mm, elles offrent ainsi une large surface, très favorable à l'extraction du jus par diffusion.

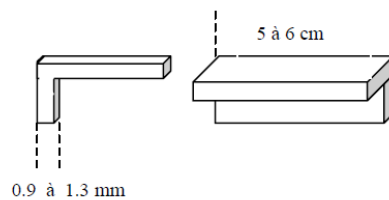


Figure 3 : Schéma d'une cossette de forme « Faïtière »

Le découpage de la betterave en des cossettes permet d'augmenter la surface d'échange et faciliter l'extraction du jus de sucre. Ces cossettes sont acheminées vers l'échaudoir pour augmenter la température à 70°C. Chauffer sert à libérer le saccharose qu'il est emmagasiné dans les vacuoles. En effet, cette température permet de rendre la membrane cellulaire plus perméable aux échanges et même de l'éliminer. Pour extraire le sucre, les cossettes ne sont pas écrasées, mais elles sont plongées dans un diffuseur (bain d'eau où le

solvant est l'eau) et là le sucre ne se dissout pas mais diffuse (principe du thé infusion). D'où la concentration du sucre dans l'eau augmente.



Le diffuseur est un cylindre de 60 mètres de longueur et de plus de 6 mètres de diamètre, dans lequel circule 300 m³ d'eau (300 tonnes) et autant de cossettes. Dans le diffuseur, les cossettes circulent à contre courant avec l'eau chaude (70-80°C) afin de dénaturer la membrane. Après dénaturation, les matières solubles du jus de betterave passent en solution à travers la membrane cellulosique perméable (loi de diffusion).

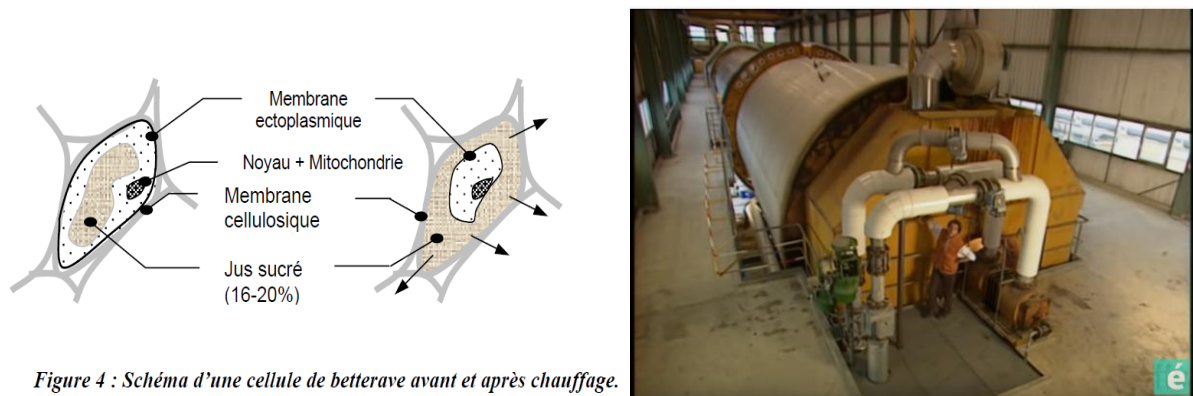
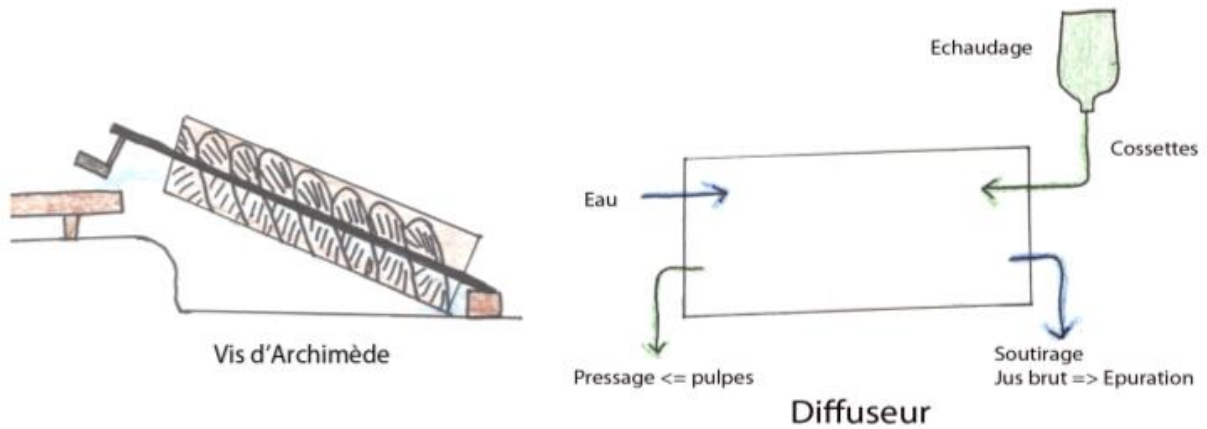


Figure 4 : Schéma d'une cellule de betterave avant et après chauffage.



L'extraction du sucre par diffusion permet d'obtenir une solution diluée de couleur noir-grisâtre, opalescent à environ 15 % M.S. (ou 15° Brix). Ce jus acide (pH = 6) contient :

- ✓ 13 à 14 % de sucre
- ✓ 1 à 2 % d'impuretés : organiques (protéines, pectines, autres sucres, acides organiques, colloïdes) et minérales : sels de Na⁺, K, Ca, Mg, etc...
- ✓ Le reste est de l'eau.
- ✓ Analyse type :

Contenu du jus	Exprimé %
Matières Sèches (M.S.)	15,48
Non-sucres (N.S.)	1,62
Sucre	13,86
Eau	84,52
Total	100,00

À la fin de la diffusion, nous obtenons un jus de couleur noir-grisâtre et des pulpes qu'on presse, on les fermente (bactéries lactiques) puis on les sèche et on les utilise pour l'alimentation animale.



2.5. L'épuration

L'épuration comprend plusieurs étapes :

Chaulage (précipitation des impuretés + coagulation des protéines) → 1^{ère} carbonatation (précipitation de l'excès de chaux) → 1^{ère} filtration (séparation du jus et des impuretés (tourteaux)) → deuxième carbonatation et deuxième filtration (précipiter la chaux encore présente dans le jus)

- **Le Chaulage:** Le lait de chaux est mélangé au jus sucré. C'est la première opération destinée à débarrasser le jus sucré des matières végétales solides et des sels minéraux, protéines et colorants naturels de la betterave. Ce principe très ancien élimine une partie des impuretés par ajout de lait de chaux. Cette chaux est produite dans les fours à chaux de la sucrerie à partir de pierres calcaires de haute pureté. Ajoutée dans les jus de diffusion, la chaux permet de piéger les substances indésirables en formant avec elles des corps solides : précipitation des impuretés + coagulation des protéines.
- **La première carbonisation,** On ajoute le dioxyde de carbone (CO₂) provenant du four à chaux, permettant de précipiter la chaux en excès dans le jus.
- **La première filtration:** sert à la séparation du jus et des impuretés (tourteaux). On récupère le jus plus ou moins clair et les tourteaux (sous-produit de l'industrie sucrière utilisé pour l'agriculture).



Tourteau

- **La deuxième carbonatation et la deuxième filtration** sont là pour enlever les restes de chaux.



Jus après
Carbonisation

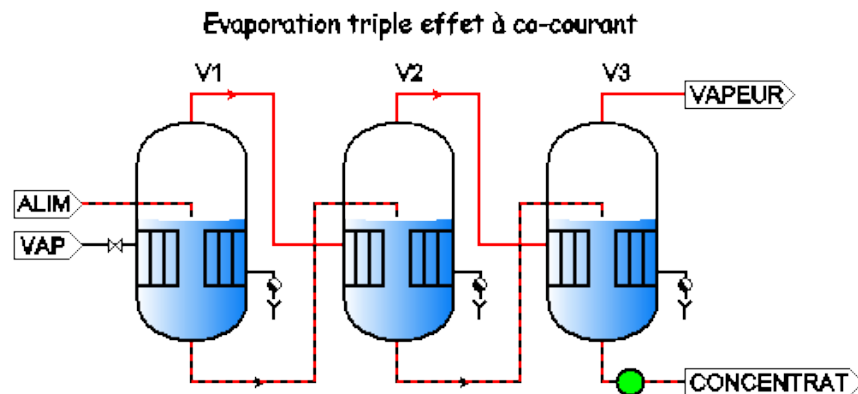
L'analyse du jus après épuration permet d'obtenir les résultats suivants (à comparer avec le tableau précédent):

Contenu du jus	Exprimé %
Matières Sèches (M.S.)	14,94
Non-sucre (N.S.)	1,08
Sucre	13,86
Eau	85,06
Total	100,00

2.6. L'évaporation

Cette étape permet de concentrer le jus de sucre (de 13-14% sucre à 68,5% sucre). Elle s'effectue par 4 à 6 évaporateurs à basse pression (l'évaporation peut donc se faire à une température inférieure à 100 °C pour éviter la caramélisation du sucre). On parle d'évaporateurs à multiples effets (gain d'énergie, voir le cours d'opération unitaire, chapitre évaporation).

- **Exemple :**



L'atelier d'évaporation permet de concentrer le jus épuré ou jus avant évaporation (JAE) de 13 -14 % de M.S. jusqu'à obtenir un sirop à une concentration proche de la saturation, soit 68.5 g de M.S/ 100g . Le JAE est de couleur jaune paille et contient environ 1 % d'impuretés dissoutes.



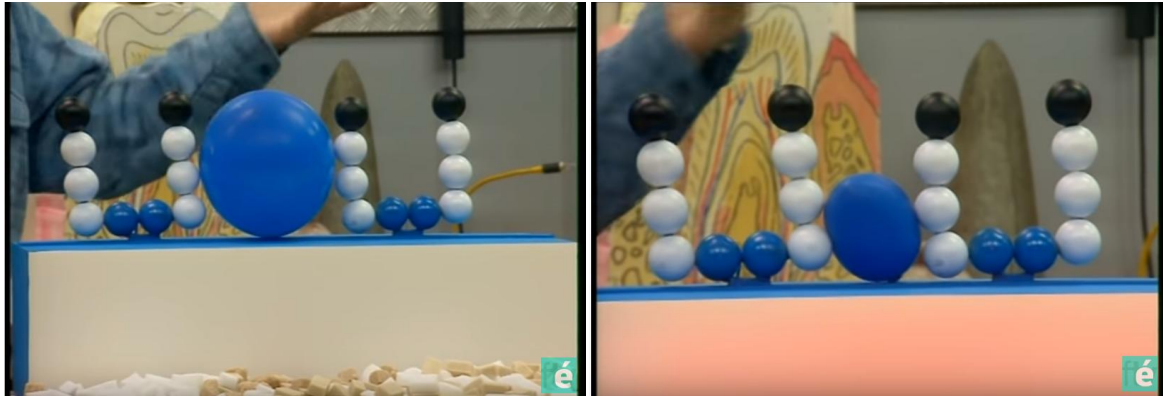
Sirop de saccharose

2.7. La cristallisation (voir cours cristallisation)

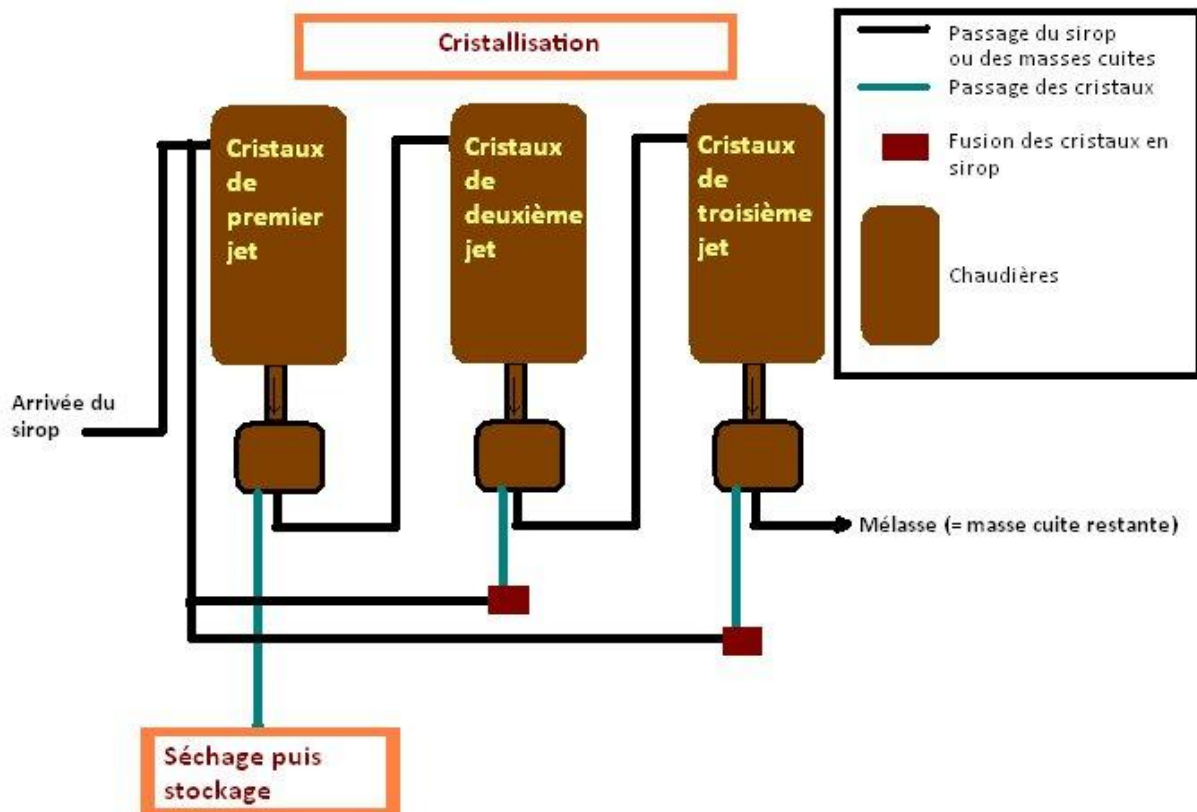
Cette étape est la phase ultime de purification du sucre. Elle permet de séparer les impuretés contenues dans le sirop. Cette opération est réalisée à l'inverse de l'épuration calco-carbonique, puisqu'on élimine le saccharose sous forme de cristaux alors que les impuretés restent concentrées dans le liquide pour donner en final une solution résiduelle épuisée : *la mélasse*.

A la fin de l'évaporation le sirop de sucre se trouve dans les conditions suivantes :

- Brix = 65 %
- Sucre = 60.5 %
- Pureté = 93 %

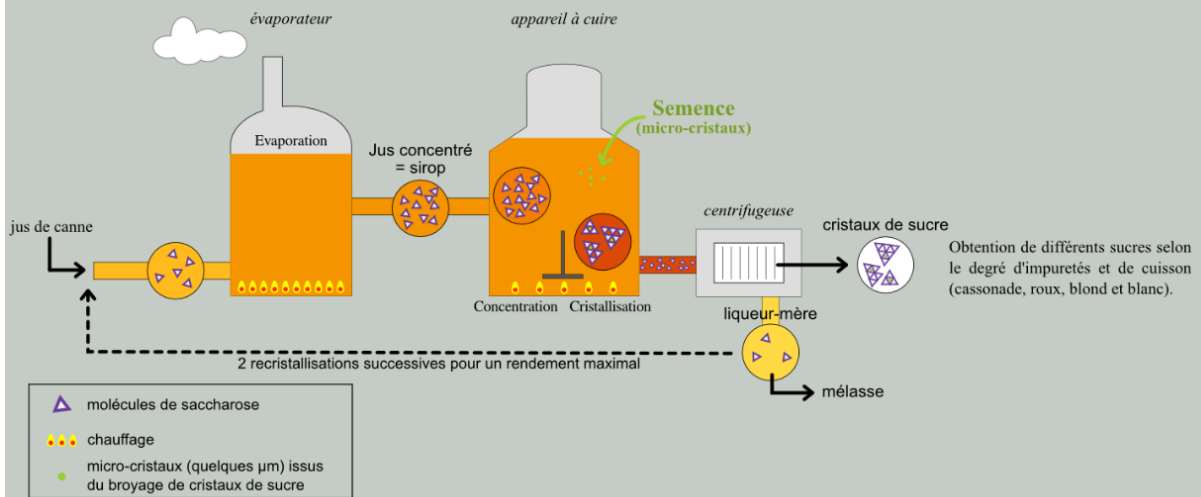


Enlèvement de l'eau et rapprochement des molécules. Lorsque le jus du sucre atteint les 65%, les molécules se rapprochent et le sucre se cristallise.



À la fin de cette opération, nous récupérons la mélasse : sous-produit de l'industrie sucrière utilisé pour la production de levure boulangère.

La cristallisation industrielle du sucre...

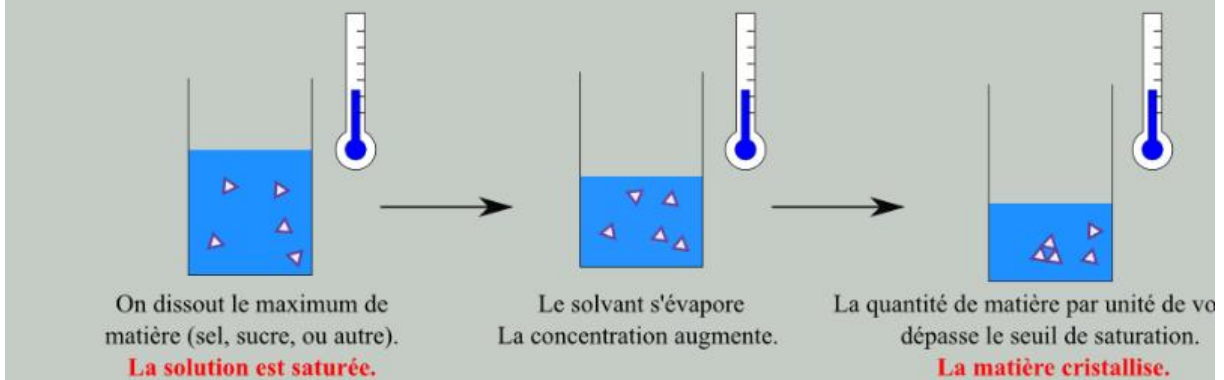


L'ajout de la semence permet de maîtriser le nombre et la taille des cristaux.

En cas de germination spontanée du saccharose, les germes, dont on ne peut maîtriser ni le nombre ni la forme, forment des cristaux de forme et tailles aléatoires.

En usine, seule a lieu la phase de croissance de la cristallisation.

Cristallisation par évaporation



2.8. Centrifugation

Cette étape est réalisée par les turbines (centrifugation) tournant à 1500 tr/min afin de séparer les cristaux de sucre blanc et la mélasse.



Mélasse



Levure fraîche (pain)

2.9. Le séchage

Le sucre cristallisé blanc est évacué du fond de la turbine sur un transporteur à secousses. Encore chaud (45- 60°C) et humide (1%), le sucre est séché par de l'air chaud dans des cylindres – séchoirs rotatifs ou en lits fluidisés, puis refroidi afin d'atteindre une teneur en eau comprise entre 0.03 et 0.06%.