

**Siège Social**

3600, boul Casavant Ouest
Sain-Hyacinthe, Québec
J2S 8E3
Téléphone : 450.773.1105
Télécopieur : 450.773.8461

Station Expérimentale

142, Rang Lainesse
Saint-Norbert, Québec
G0P 1B0
Téléphone : 819.369 4002
Télécopieur : 819.369.9589

EXTRACTION DU SUCRE DE BETTERAVE

Par:

Alfa ARZATE

Saint-Norbert d'Arthabaska, 27 Octobre 2005



TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des figures.....	iii
INTRODUCTION.....	1
L'HISTORIQUE DU SUCRE DE BETTERAVE.....	3
LA BETTERAVE SUCRIÈRE.....	6
LES OPÉRATIONS PRÉLIMINAIRES À L'EXTRACTION.....	9
LE PROCÉDÉ D'EXTRACTION.....	11
LES PARAMÈTRES DE CONTRÔLE DU PROCÉDÉ.....	31
SURVOL DE LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE.....	33
GLOSSAIRE.....	35
BIBLIOGRAPHIE.....	37
RÉFÉRENCES ÉLECTRONIQUES.....	40



Tableau 1 :	Composition moyenne de la betterave sucrière (Pennington et Baker, 1990).....	7
Tableau 2 :	Teneur en sucre des produits obtenus à partir de la betterave sucrière (Pennington et Baker, 1990).....	8
Tableau 3 :	Principaux paramètres du préchauffage et du chaulage (McGinnis, 1951).	23
Tableau 4 :	Valeurs de la pression de vapeur utilisées dans l'atelier d'évaporation (McGinnis, 1951).....	27
Tableau 5 :	Composition du sucre blanc [7].....	29
Tableau 6 :	Composition de la vergeoise brune [7].....	30



<u>Figure 1 :</u>	Betterave sucrière (« <i>Beta vulgaris</i> ») : a) racine, b) sillon saccharifère, c) collet et d) feuilles [4].....	6
Figure 2 :	Approvisionnement des betteraves (copyright@alcosuisse).....	9
Figure 3 :	Schéma de procédé pour l'extraction du sucre de betterave.....	12
<u>Figure 4 :</u>	Cossettes [5].....	11
<u>Figure 5 :</u>	Diffuseur horizontal à tube tournant [6].....	15
<u>Figure 6 :</u>	Installation pour l'épuration du jus de betterave [7].....	22
<u>Figure 7 :</u>	Filtre à tambour rotatif [6].....	24
<u>Figure 8 :</u>	Évaporateur [7].....	26
<u>Figure 9 :</u>	Chaudière à cuire [6].....	27



La betterave sucrière (« *Beta vulgaris* ») est un légume-racine bisannuel principalement cultivé dans les climats tempérés de l'Amérique du Nord, de l'Asie et de l'Europe. Au XVIII^{ième} siècle, la betterave sucrière a été adoptée en remplacement de la canne à sucre. En effet, elle contient jusqu'à 16 % de saccharose dans ses racines blanches, dont 80 % peut être extrait par un processus industriel.

Dès la fin du XVI^{ième} siècle, Olivier de Serres remarqua la forte teneur en sucre de la betterave, puis un siècle et demi plus tard, Andreas Marggraf étudia les possibilités d'extraction. Grâce aux efforts d'Achard, élève de Marggraf, la première sucrerie a ouvert ses portes en 1803 en Europe. La conjugaison du lancement de cette première sucrerie et du Blocus continental sur le sucre de canne instauré par Napoléon 1^{er} va entraîner l'explosion de la production de sucre de betterave en Europe. De cette façon, du sucre était produit en utilisant une plante cultivée sur place. La véritable industrie de sucre de betterave naît quand Delessert, raffineur à Passy, parvient à fabriquer le premier pain de sucre de façon contrôlée.

Le sucre emmagasiné dans la racine de la betterave est extrait en isolant le saccharose des autres composants de la plante. Étape par étape, les composants non-sucrés sont éliminés : lavage et découpage des betteraves en petits morceaux; extraction, épuration et évaporation du jus de betterave; cristallisation du jus concentré, malaxage et essorage du sucre. Le cœur du procédé d'extraction du sucre est l'évaporation. Celle-ci fait le lien entre la concentration du jus à faible teneur en sucre et la cristallisation du sirop à une teneur en sucre élevée.

L'industrie du sucre de betterave est généralement considérée comme un secteur mûr reposant sur les principes de base développés au XIX^{ième} siècle. Cette industrie a récemment éprouvé une quantité remarquable de changements, y compris des développements technologiques. L'économie d'énergie a toujours été un point clé dans l'avancement de la technologie. De plus, l'effet des opérations dans la sucrerie sur l'environnement a certainement influencé l'utilisation de nouvelles et diverses technologies. La réduction du volume d'eaux usées, la conversion du procédé à temps différé vers un procédé en continu et l'accroissement de l'extraction de saccharose sont à la base de ces changements technologiques.

Le procédé d'extraction du sucre de betterave est traditionnellement vu comme une tâche lourde qui demande beaucoup d'énergie et qui présente des risques environnementaux. En même temps, l'industrie en général est perçue comme étant conservatrice par rapport au développement technologique. Le développement et l'échange de technologie avec d'autres industries a cependant permis d'importer de nouveaux procédés et méthodes afin d'optimiser le procédé et d'atteindre une qualité supérieure du produit final.

Dans cette revue de littérature, un bref historique du sucre de betterave est présenté. Puis, les opérations préliminaires à l'extraction sont décrites, ainsi que chacune des opérations du procédé d'extraction. Les paramètres de contrôle du procédé et un survol de la recherche dans le domaine sont aussi abordés. Ce document a été rédigé dans le but de présenter le procédé de base de l'extraction du sucre à partir de la betterave, ainsi que les axes de recherche dans le secteur.

L'information présentée dans ce document a été principalement tirée d'ouvrages de référence de McGinnis (1951) et de Pennington et Baker (1990). De plus, plusieurs documents ont été repérés et cités seulement à titre d'exemple afin d'introduire les récents axes de recherche dans le domaine.



Au XVII^{ème} siècle, lorsque Olivier de Serres a écrit dans son livre intitulé *Le théâtre d'agriculture et mesnage des champs* : « La racine de la betterave, lorsque broyée, produit un jus semblable au sirop de sucre, tellement beau à voir pour sa vermeille couleur » présentait le premier indice montrant que le jus de betterave contenait du sucre.

Un siècle et demi plus tard, en 1747, Andreas Marggraf apporte la première preuve véritable au sujet du sucre contenu dans la betterave. Il parvient à extraire le sucre à partir des tranches minces de betterave, en utilisant l'alcool et en favorisant la cristallisation dans une fiole au repos où les cristaux sont récupérés après plusieurs semaines. Marggraf montre ainsi que la betterave sucrière contient du sucre véritable, parfaitement identique à celui que l'on connaît de la canne à sucre. Il évaluait à 5 % le taux de sucre contenu dans la betterave. Aucune utilisation n'a été faite de cette découverte jusqu'en 1799 quand Franz Karl Achard, élève de Marggraf, entreprend un projet expérimental pour la culture de la betterave et la production de sucre.

En 1802, Achard met cette découverte au profit de l'Académie prussienne. Son initiative débouche sur la mise en fonctionnement, à Kürnen-sur-Oder en Silésie en 1803, de la première fabrique de sucre de betterave au monde. La production artisanale permet de traiter 70 kg de betteraves par jour et d'obtenir ainsi 1,36 kg de sucre par chaque 45,35 kg de betterave. Malgré la faible efficacité du procédé et les pertes de sucre élevées, les usines fonctionnaient à plein régime grâce au prix élevé du sucre de canne régnant à ce moment-là.

L'Institut français, intéressé à cette application, évalue la faisabilité du projet et en conclut que la fabrication de sucre à échelle commerciale est tout à fait possible. Deux petites sucreries sont mises en fonctionnement dans la région parisienne. Le succès atteint par ces sucreries fut de courte durée. Faute de connaissances techniques suffisantes de la part de leurs fondateurs, elles durent fermer. Les Français perdent ainsi l'intérêt sur cette exploitation et consacrent leur attention à l'obtention de sucre à partir du raisin.

La vraie poussée pour le développement à grande échelle de l'industrie du sucre de betterave est venue avec les guerres napoléoniennes et le blocus continental en 1806. Puisque le seul sucre disponible pour la majorité des pays européens venait des plantations de canne des

colonies tropicales, lors de la fermeture des ports d'Europe, un sérieux manque de sucre s'est produit donnant lieu à une nouvelle opportunité pour le sucre de betterave.

Le succès obtenu par Benjamin Delessert, qui de sa propre initiative construit une petite usine à sucre de betterave à Passy, fait revivre l'intérêt des Français pour le sucre de betterave. En effet, en 1811, Delessert réussit à produire des cristaux de sucre de bonne qualité. Dans la même année, pour compenser la pénurie de sucre de canne, Napoléon signe un décret afin de céder 70 000 acres de terre pour la culture de la betterave et la construction de six stations expérimentales pour la production de sucre. Une quarantaine de sucreries était en opération une année après le décret.

Lorsque le blocage anglais fut levé, l'industrie du sucre de betterave connût des hauts et des bas, s'effondrant quand le sucre de canne des colonies inonda de nouveau le marché européen. Un grand nombre de sucreries ferment leurs portes après avoir subi d'importantes pertes. Une année après Waterloo, seulement deux sucreries continuent à fonctionner. Cependant, ces quelques années de grâce ont démontré que le sucre de betterave avait une place importante dans l'agriculture.

Avec les années, la manufacture du sucre de betterave a subi des améliorations qui lui ont permis de se repositionner et même d'être compétitif face au sucre tropical. L'abolition de l'esclavage, en 1848, engendre une forte hausse du prix du sucre de canne et une diminution de sa production. Les betteraviers en profitent. D'autant que les sucreries améliorent progressivement leurs rendements grâce à la construction de grosses unités de production.

Tout au long du XIX^{ième} siècle, en Europe, l'industrie du sucre de betterave a continué sur la voie du progrès. Les plus importants ouvrages sur l'agriculture et la technologie de la production de sucre de betterave ont été écrits à ce moment-là, par exemple : *Chimie appliquée à l'agriculture* (1823) et le *Manual of the art of making and refining sugar from beets* (1836) traduit du français. En même temps, cette industrie se fortifiait grâce aux améliorations, inventions et nouveaux développements qui ont eu lieu, générant ainsi des changements dans la technologie :

- Décoloration du sirop de sucre de betterave à l'aide du charbon animal (dès 1812),
- Conception de la presse à surface filtrante pour l'extraction du jus de betterave (1836),
- Utilisation de la chaux et de l'anhydride carbonique pour la purification du jus (1840),

- Mise sur pied des évaporateurs à multiple-effet déjà utilisés dans l'extraction du sucre de canne (1843),
- Utilisation de la centrifugation pour séparer les cristaux de la « masse-cuite »(1844),
- Utilisation de la diffusion en batterie (1863),
- Utilisation courante de l'autoclave à vide (1870),
- Présentation de la dynamique de la cristallisation proposée par G. Z. Wulff (1884).

En Amérique, les textes des explorateurs espagnols montrent que bien avant la production d'Achard (1802), les autochtones de la Californie produisaient des sucreries et du sucre de mélasse à partir de végétaux. En 1838, la première usine a été mise en fonctionnement dans l'état de Massachussetts par David Lee Child. Ce projet fut un échec et l'usine cessa de fonctionner en 1840. Suite à plusieurs tentatives d'exploitation de sucreries, l'installation d'une sucrerie en Californie (1888) devint finalement un grand succès. À partir de ce moment, la vitesse de croissance des sucreries aux États-Unis fut constante.

Au Canada, la première usine de sucre de betterave a été mise en fonctionnement au Québec en 1880. D'autres compagnie telles que *The Pioneer Sugar Company*, La Compagnie de sucre de betterave de la Vallée du Richelieu et l'Union franco-canadienne ont vu le jour dans la dernière décennie du XIX^{ième} siècle. Suite à de nombreuses recherches expérimentales, y comprise celle du gouvernement fédéral, des usines sont ouvertes au Québec, en Ontario, au Manitoba et en Alberta. De nos jours, la seule province productrice de sucre de betterave depuis 1997 est l'Alberta, où se trouve la seul usine de transformation de la betterave sucrière du Canada [1].

Dans le monde, la culture de betterave sucrière occupe environ 7 millions d'hectares, surtout en Europe du Nord et aux États-Unis. En 2004, la production mondiale de betterave sucrière était de 208,85 millions de tonnes [2]. La France est le premier producteur mondial de sucre de betterave devant les États-Unis et l'Allemagne. À l'heure actuelle, la betterave sucrière fournit environ 26 % de la production mondiale de sucre [3].



La betterave sucrière (« *Beta vulgaris* ») appartient, comme les épinards et la bête, à la famille des « chénopodiacées » ([Figure 1](#) [4]). Les variétés de betterave sucrière cultivées actuellement sont issues de la betterave de Silésie sélectionnée à la fin du XVIII^{ième} siècle par le chimiste allemand Achard. Ces variétés contiennent entre 15 % et 20 % de sucre, alors que la « Blanche de Silésie », dont elles sont issues n'en contenait que 7 %. Cette amélioration significative est le fruit d'une sélection rigoureuse des plantes.

La betterave sucrière préfère un climat tempéré, des terres riches, profondes et humides. Ses graines sont semées au printemps, après les gelées, de mi-mars à fin avril. Assez fragile, la betterave sucrière a besoin de traitements contre les maladies. Sa récolte commence en automne, fin septembre, et doit être terminée en décembre, avant les grands froids.

La betterave sucrière possède un cycle de deux ans. Le processus de fabrication du sucre a lieu pendant la première année. À la fin de cette période, les réserves en sucre sont maximales; la récolte est donc faite à ce moment-là. Pendant la seconde année, la plante se reproduit. Elle puise alors dans ses réserves de sucre pour produire une hampe florale qui évolue en fruits et graines afin de poursuivre son cycle végétatif.

Le sucre élaboré au niveau des feuilles par la photosynthèse est emmagasiné sous forme de saccharose dans la racine. Cette racine est de forme conique, parcourue par deux sillons et possède un collet plat. La racine est presque complètement enfouie dans le sol. En fin de croissance, elle mesure de 15 à 35 cm de long et jusqu'à 15 % à 20 % de son poids est constitué de sucre, surtout contenu dans sa partie la plus renflée. Ainsi, la teneur en sucre et sa pureté dans les feuilles est très faible, tandis que la racine mature contient une teneur élevée de sucre d'une grande pureté. Le collet, zone de transition entre la racine et les feuilles, contient certaines des substances de ces deux parties : nutriments, sucre et composants non-sucrés similaires à ceux retrouvés dans les feuilles. Le sucre dans le collet est donc plus coûteux à extraire.

Le sucre est réparti inégalement dans la racine. De façon générale, des différences d'environ 5,5 % et de 11 % pour le contenu en sucre et la pureté respectivement, peuvent être remarquées selon différentes sections de la racine. Dû à la physiologie du noyau et de la peau de la betterave, la quantité et pureté de sucre sont inférieures dans ces parties. Des protéines, pectines, minéraux (potassium et sodium), acides organiques, etc. constituent les composants non-sucrés. Tel qu'indiqué au Tableau 1, la betterave récemment récoltée contient 75,9 % d'eau, 2,6 % de composants non-sucrés, 16,0 % de sucre et 5,5 % de pulpe. La pulpe est composée de cellulose insoluble, d'hémicellulose et de pectine.

Tableau 1 : Composition moyenne de la betterave sucrière (Pennington et Baker, 1990).

COMPOSANT	TENEUR (%)
Eau	75,9
Non-sucrés	2,6
Sucre	16,0
Pulpe	5,5
Total	100,0

La production de sucre blanc correspond à 83,1 % du contenu en sucre dans la betterave sucrière. On en perd environ 12,5 % dans la mélasse. On note aussi d'autres pertes, telles que le sucre restant dans la pulpe après l'extraction, dans le tourteau de chaux après le lavage et dans les filtres rotatifs sous vide. Des pertes sont également dues à l'action bactérienne, au renversement de liquides tout au long du procédé, à l'inversion du sucre et à la caramélisation du sucre par exposition aux surfaces chaudes dans le procédé.

Les produits dérivés de la betterave sucrière sont la pulpe, partie tendre et riche en éléments nutritifs qui sert à l'alimentation animale; les feuilles, qui servent à fabriquer de l'engrais pour les champs; la mélasse, résidu sirupeux de la cristallisation qui sert, entre autres, à fabriquer la levure de boulangerie et l'alcool qui sert dans des produits ménagers, chimiques ou carburant.

Tableau 2 : Teneur en sucre des produits obtenus à partir de la betterave sucrière
(Pennington et Baker, 1990).

PRODUIT DÉRIVÉ	TENEUR EN SUCRE (kg de sucre/tonne betterave)
Sucre blanc	120,64
Mélasse	18,14
Pulpe	n.d.
Autres	6,34
Total	145,12



Afin de conserver leur richesse en sucre, les betteraves doivent être transformées rapidement, car une fois extraites du sol leur teneur en sucre diminue rapidement. C'est pour cette raison que les sucreries sont implantées à proximité des zones de culture, dans un rayon de 30 km en moyenne. Dès leur récolte, les betteraves passent à travers différentes étapes avant de se rendre à la sucrerie.

Une série de machines automatiques effeuillent, décollent, arrachent, alignent et chargent les betteraves dans les camions ou dans les wagons de train qui les transportent à la sucrerie (Figure 2). Les betteraves peuvent aussi être entassées au bord de la route pour être transportées plus tard. Chaque camion ou wagon chargé est pesé et plusieurs échantillons y sont prélevés pour évaluer la masse de terre qui adhère aux racines, ce qui est appelé tare-terre. Les échantillons permettent aussi de quantifier la portion de sucre contenue dans la betterave. La mesure saccharimétrique est effectuée sur un filtrat résultant de la digestion aqueuse de râpures de betteraves.



Figure 2 : Approvisionnement des betteraves (copyright @ alcosuisse).

À la sucrerie, les betteraves sont empilées à l'extérieur où les impuretés des champs sont enlevées à l'aide des grilles métalliques. L'entreposage des betteraves dépend du pays (conditions climatiques) et de sa production. Les betteraves peuvent donc être transformées dans les 48 heures suivant leur récolte ou être entreposées (surplus) pendant une période de 80 à 160 jours, dépendant de la température hivernale. Les betteraves sont donc empilées en tas (55 à 61 m de largeur et 6 à 7 m de hauteur) pour leur entreposage à la sucrerie.

Pendant l'entreposage, la betterave subit une perte de sucre due à sa respiration (200 à 400 g de sucre/tonne de betterave par jour). Cette perte dépend du temps d'entreposage, de la température de la racine et de la variété de betterave. La température doit donc être maintenue légèrement au-dessus du point de congélation afin de réduire la respiration de la plante et en conséquence la fermentation et l'échauffement du silo, ce qui induit une plus grande difficulté d'extraction du sucre en usine. De plus, le gel et le dégel du silo favorisent la dégradation de la betterave facilement identifiable par une coloration noire. Ces dégradations produisent, par exemple, des polysaccharides tels que les dextranes ou les lévanes qui rendront les étapes de purification et de filtration plus difficile. Les matières azotées sont aussi transformées avec hydrolyse des protéines en acides aminés. Ce taux d'azote soluble supplémentaire diminue la pureté des jus, et par la même augmente la perte en saccharose (chaque composante non-sucrée entraîne une quantité donnée de saccharose dans la mélasse).

Les betteraves sont ensuite acheminées dans un lavoir où elles sont d'abord brassées par des pales afin de les débarrasser de la terre, de l'herbe et des pierres. La queue et des petits morceaux de betterave, qui contiennent une grande quantité de sucre, sont séparés du restant pour après être mélangés avec la pulpe de betterave. Le lavage à l'eau à l'aide de buses à haute pression permet, par la suite, d'enlever aussi les bactéries thermophiles et productrices de gaz.



Le sucre de la betterave s'obtient au terme d'un travail d'extraction. Il s'agit d'isoler le saccharose en éliminant, par étapes, les autres composants de la betterave. Pour retirer le sucre des cellules végétales, il faut le séparer des impuretés et éliminer l'eau dans laquelle le sucre est dissous. Au terme de ces opérations, le sucre est successivement extrait, purifié, concentré et cristallisé sans aucune altération ni transformation chimique.

Le procédé d'extraction de sucre comprend principalement les opérations unitaires suivantes (voir le schéma de procédé à la Figure 3) :

1. Extraction (« Diffusion »)
2. Épuration
3. Évaporation
4. Cristallisation

Le pressage et le séchage de la pulpe de betterave, ainsi que la récupération du sucre à partir de la mélasse peuvent être considérés comme des étapes complémentaires du procédé.

Les betteraves propres sont envoyées dans des coupe-racines qui les découpe en « cossettes » avec une forme faîtière pour éviter que les morceaux ne se collent les uns aux autres dans le diffuseur ([Figure 4](#) [5]). Les cossettes mesurant environ 0,9 à 1,3 mm d'épaisseur et de 5 à 6 cm de longueur assurent une surface maximale pour l'extraction du jus par diffusion.

À partir d'ici, on procède alors d'une façon semblable à celle utilisée pour l'extraction du sucre de la canne. Chacune des étapes présentées au schéma de procédé à la Figure 3 sont décrites ci-dessous :

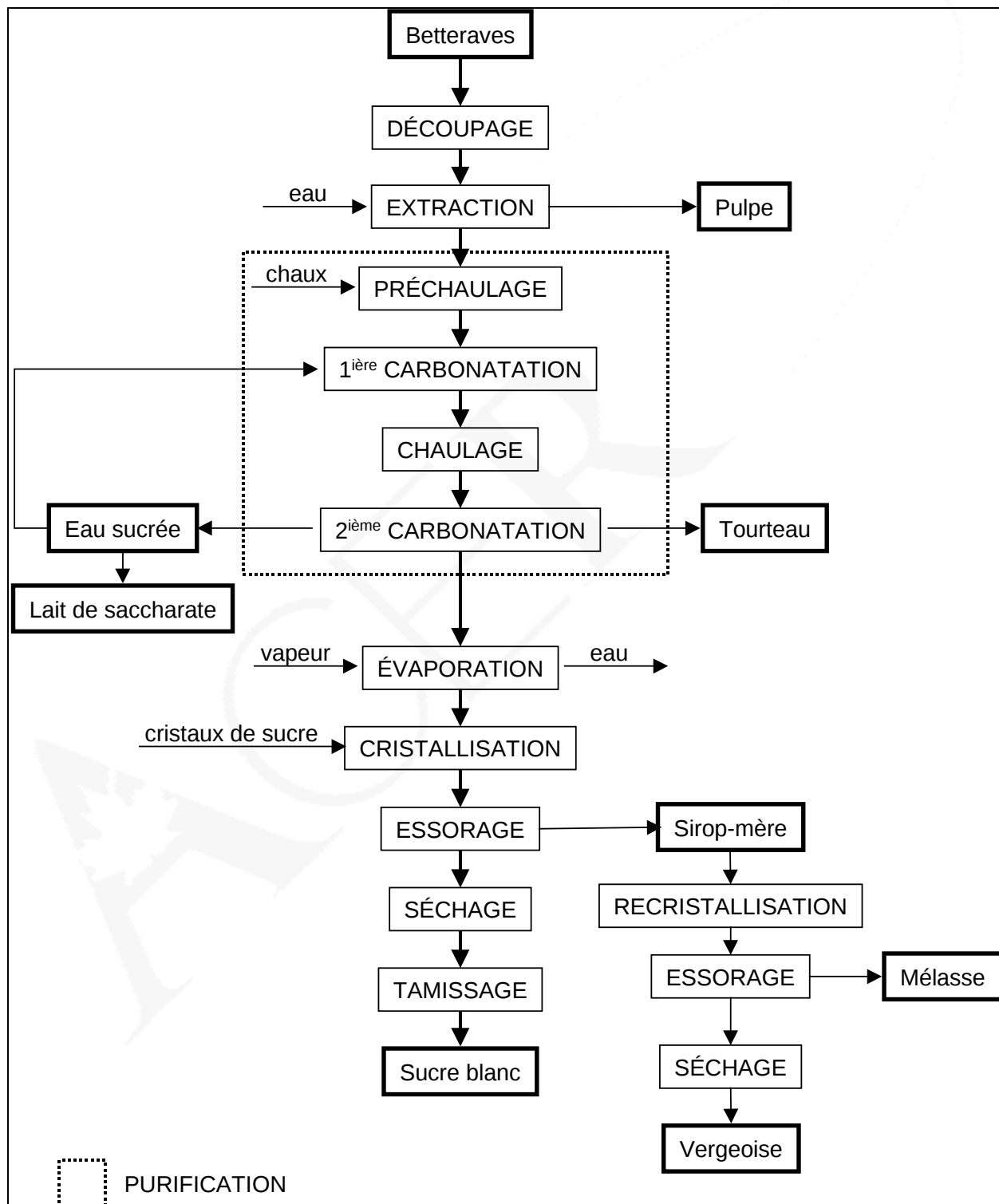


Figure 3 : Schéma de procédé pour l'extraction de sucre de betterave.

1. EXTRACTION (« Diffusion »)

1.1. But de l'opération

Dans cette opération, le sucre est extrait des cossettes par diffusion en utilisant de l'eau chaude (solvant) tout en limitant le transfert des impuretés dans le jus. Le phénomène de diffusion est basé sur le mouvement des molécules d'une région à concentration élevée (sucre emmagasiné dans le tissu cellulaire de la betterave) vers une autre à faible concentration (eau chaude).

1.2. Processus de diffusion du sucre

La betterave est formée d'une multitude de cellules constituées :

- d'une paroi cellulaire faite de cellulose, d'hémicellulose et de produits pectiques (acide pectique, protopectine, pectinates, pectates, etc.) servant à contrôler le transfert des solutions entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule selon les besoins du protoplasme cellulaire. Cette paroi est totalement perméable;
- d'un ectoplasme, membrane semi-perméable, qui ne laisse pratiquement passer que de l'eau;
- d'un cytoplasme composé de matière protéique très complexe;
- d'un noyau qui joue un rôle important dans la multiplication cellulaire;
- d'une vacuole remplie de jus cellulaire. Ce jus est une solution impure qui contient 12 % à 20 % de saccharose, 6 % à 8 % de composants non-sucrés et 72 % à 80 % d'eau. Les composants non-sucrés sont de matières minérales, de sels mixtes, de matières organiques azotées et non azotées.

Pour que la production de sucre pur soit possible avec un rendement acceptable, il est important, dès l'étape d'extraction, de réduire la quantité d'impuretés contenues dans le jus extrait. Le broyage ou pressage des betteraves n'est donc pas le mode qui convient.

Lorsque les cossettes sont plongées dans de l'eau chaude, la membrane ectoplasmique est dénaturalisée. Elle perd son pouvoir de régulation et agit simplement en tant que membrane semi-perméable empêchant ainsi la diffusion des solutés. Le protoplasme meurt par l'action de la chaleur (environ 55 °C) et se rassemble au centre de la cellule, tandis que la vacuole prend

sa place au contact de la membrane cellulosique. Comme cette dernière est totalement perméable, les vacuoles forment, d'une cellule à l'autre, un milieu continu riche en sucre.

Puisque l'objectif de la diffusion est d'extraire seulement le sucre, la création d'une membrane naturelle, permettant la séparation des albumines et autres molécules colloïdales du sucre, constitue une partie fondamentale de cette opération. Cette membrane est bâtie grâce à la dénaturalisation de la membrane ectoplasmique sous l'action de la chaleur. En dessous de 70 à 85 °C, le chauffage semble ne pas abîmer la paroi des cellules, mais le chauffage prolongé à une température plus élevée génère des dommages à la membrane et au processus de peptisation, entraînant ainsi l'entière perte de la rigidité de la cossette.

Dans l'opération d'extraction, le sucre et d'autres substances cristallines diffusent d'abord vers l'extérieur des cellules où leur concentration est nulle ou faible. Puisque les molécules sont séparées en fonction de leur taille lors de leur passage à travers la membrane ectoplasmique, la diffusion peut être considérée comme un processus de dialyse. De même, l'eau se répand dans les cellules en traversant la paroi cellulaire et dilue peu à peu la solution de sucre contenue dans la vacuole (processus d'osmose). La pression de diffusion du sucre est ainsi réduite et son taux de diffusion est ralenti. Lors de l'extraction du sucre, les deux processus, la dialyse et l'osmose, se produisent.

Si l'osmose se produit plus rapidement que la dialyse, la cellule, en absorbant un excès d'eau, peut se casser et libérer une partie de la matière colloïdale ou albumineuse, ou exploser permettant ainsi la sortie de toutes les substances en même temps que le sucre. Si les cellules sont écrasées ou leur paroi cassée, leur contenu sera vidé, entraînant ainsi l'obtention d'un jus de pureté inférieure. L'osmose peut donc compromettre l'extraction du sucre.

Le jus obtenu de l'extraction est une solution acide de sucre (pH ~ 6) et des composants non sucrés. Ce jus contient de 10 % à 15 % de sucre, ce qui correspond à environ 98 % du sucre des cossettes. Certains de ces composants peuvent être à l'état colloïdal, tel quel les protéines végétales, pectines et saponines. Le jus qui n'a pas été en contact avec l'air est presque incolore, mais après qu'il ait été exposé à l'air pendant quelques minutes, sa couleur tourne au noir violacé. Ce changement est probablement dû à une réaction d'oxydation et à la présence d'enzymes dans le jus.

1.3. Description de l'opération

Suite au découpage, les cossettes sont immédiatement chargées dans le diffuseur (en temps différé ou en continu). Le diffuseur est composé d'une série de cellules, en général de 12 à 24, orientées en ligne droite ou en cercle. L'eau chaude circule en sens inverse des cossettes et s'enrichit peu à peu de leur sucre. De cette façon, le sucre et une petite quantité d'impuretés sont extraits. Des cylindres horizontaux, des cylindres inclinées (avec deux vis tournant en sens inverse), des cylindres compartimentés tournants et des tours cylindriques verticales sont utilisés en tant que diffuseurs ([Figure 5](#) [6]).

Afin d'accélérer la vitesse d'extraction, le jus est chauffé lorsqu'il est transporté entre les cellules. La température maximale est limitée par la désintégration et la peptisation des cellules de la betterave, lesquelles ont lieu à des températures au-dessous de 80 °C dépendant des conditions d'entrée des cossettes. Le jus sucré ainsi obtenu est recueilli à l'une des extrémités, quantifié et immédiatement pompé à travers des échangeurs de chaleur afin d'atteindre une température de 85 °C avant de passer à l'opération d'épuration.

Les cossettes épuisées, contenant environ 92 % d'humidité, sont déchargées par le fond du diffuseur et envoyées à la presse pour être valorisées. La pulpe obtenue par pressage, contenant 76 % d'humidité, est ensuite séchée à l'air ambiant ou dans un séchoir à tambour tournant jusqu'à 10 % d'humidité. Ce sous-produit est utilisé pour préparer la nourriture animale. Le jus obtenu lors du pressage peut être réinjecté dans le diffuseur, pratique surtout utilisée en Europe.

Les composants non-sucrés ne sont pas désirés dans le jus, car ils rendent difficile la purification et augmentent son coût. Ils augmentent aussi la perte de sucre dans la mélasse. La présence de ces composants rend très difficile la concentration du jus et diminue la vitesse de cristallisation du sucre, rendant ainsi l'opération coûteuse et difficile. Tous les efforts sont donc mis pour faire une extraction à haute pureté et concentration avec un minimum de pertes de sucre, tout en conservant une vitesse d'opération élevée.

L'eau utilisée pour l'extraction doit être libre de matériaux en suspension et avoir une faible alcalinité. Les matières organiques et non-organiques solubles contenues en grande quantité dans l'eau seront retenues dans le jus et rendront difficile la purification. Si l'eau est suffisamment alcaline pour neutraliser l'acidité naturelle du jus, des parties de tissu de la betterave seront dissoutes, et un jus très foncé sera produit.

2. ÉPURATION

2.1. But de l'opération

Le but principal de l'épuration est de séparer les composants non-sucrés du jus de diffusion (jus sucré) par précipitation, puis par sédimentation ou filtration. Ainsi, il est usuel d'épurer le jus par chaulage (ajout de la chaux – CaO) et carbonatations successives (ajout d'anhydride carbonique – CO_2).

2.2. Chaulage et carbonatation

La purification du jus sucré comprend quatre opérations partielles fondamentales qui ne sont pas toujours clairement identifiées dans le procédé industriel. Elles ont lieu très souvent simultanément, ou sont en partie supprimées, ou même apparemment n'ont pas lieu du tout. En réalité, elles se déroulent souvent les unes après les autres. Ces opérations sont les suivantes :

- ❑ Préchaulage
- ❑ Chaulage (appelé aussi défécation)
- ❑ Première carbonatation
- ❑ Deuxième carbonatation

Le chaulage a lieu en deux temps afin de réduire la quantité de chaux utilisée tout en maintenant une efficacité maximale. Une fois dissoute, la chaux commence immédiatement à réagir en présence des composants non-sucrés. Les réactions qui ont lieu sont principalement de deux types :

- ❑ Réactions induites directement par la présence des ions calcium (Ca^{2+}) qui réagissent avec des composés du jus
- ❑ Réactions induites par l'ion hydroxyde de la chaux

Le **préchaulage** correspond à une étape d'alcalinisation progressive du jus sucré afin de réaliser les étapes de :

- ❑ Précipitation sélective des impuretés : l'ion calcium assure la dissociation de certains acides organiques en formant avec leurs anions des sels de calcium (CaX_2) dont certains sont insolubles et précipitent. Les acides qui précipitent le mieux sont les acides oxalique, oxycitrique, citrique, tartrique et phosphorique. La quantité de base (OOH , NaOH) qui apparaît en solution après précipitation, est équivalente à la quantité d'anions qui précipitent avec le calcium. D'autres acides organiques, tels que les acides aminés et la bêtaïne ne précipitent pas avec la chaux et restent en solution. Ces sels sont particulièrement nuisibles, car ils augmentent le sucre-mélasse et rendent la cristallisation plus difficile.
- ❑ Coagulation et floculation des protéines et saponines : l'ion calcium induit également des réactions de coagulation des protéines, des saponines responsables du moussage et de matières colorantes du jus de diffusion. Le jus épuré n'a plus la coloration noir violacé et ne mousse plus. Les réactions mises en jeu lors de la floculation sont complexes et encore mal connues.

Le **chaulage** inclut des réactions entre la chaux et les composants non-sucrés qui ne donnent pas de précipités. L'ion hydroxyde de la chaux neutralise les acides libres du jus de diffusion. Il provoque aussi des réactions avec les sels d'aluminium, de fer et de magnésium qui précipitent sous forme d'hydroxydes. L'excès de chaux génère toute une série de réactions de décomposition sous l'influence de l'ion hydroxyde qui joue le rôle de catalyseur :

- ❑ Décomposition des sels d'ammonium
- ❑ Décomposition des amides avec dégagement d'ammoniac générant une réduction de pH et la formation de sels de calcium solubles
- ❑ Décomposition du sucre inverti avec formation d'acides lactiques, glucique, saccharinique et humique. Seuls les acides saccharinique et humique donnent un précipité avec la chaux, les autres forment des sels solubles. La solution acquiert alors une coloration jaune orangé
- ❑ Saponification des matières grasses et précipitation sous forme de sels de calcium
- ❑ Mise en solution de l'hémicellulose
- ❑ En milieu faiblement alcalin, précipitation de la pectine (ou acide pectinique) sous forme de pectinate de calcium

- ❑ En excès de chaux, saponification des pectines en alcool méthylique et acide pectique. Ce dernier donne avec le calcium un pectate de calcium qui est gélatineux et filtre mal.

Toutes ces réactions sont moléculaires, de type organique, et ont besoin d'un temps spécifique pour leur accomplissement. Le développement de la réaction, ainsi que sa vitesse dépendent de la concentration de la chaux en solution et de la température. Les réactions ont lieu au complet dans le jus chaulé chaud.

Après le chaulage, quand toutes les réactions possibles entre la chaux et les composants non-sucrés ont eu lieu, la **carbonatation**, troisième opération, débute. La carbonatation vise à précipiter l'excès de la chaux se retrouvant dans le jus à l'aide de l'anhydride carbonique. Il est conseillé de procéder en deux étapes : première et deuxième carbonatations.

Le but principal de la **première carbonatation** est de précipiter l'excès de la chaux sous forme de CaCO_3 et d'augmenter l'alcalinité du jus. Sur les précipités naissants, les matières colorées vont s'adsorber. Il s'agit des produits de dégradation alcaline des hexoses (PDAH) et des colorants provenant de la décomposition du sucre inverti. Pour éviter la redissolution des impuretés, le jus doit avoir une légère alcalinité excédentaire qui ne dépasse pas le pH du préchaulage (maximum de floculation).

La **deuxième carbonatation** permet de faire le déchaulage final du jus. Le jus est séparé du précipité, puis davantage carbonaté afin de neutraliser l'excès de chaux de la première carbonatation et de précipiter les cations Ca^{2+} des sels de chaux solubles sous forme de carbonate de calcium. À l'issue de cette seconde carbonatation, environ 1/3 des impuretés est éliminé et un jus clair est récupéré par filtration.

2.3. Substances importantes présentes lors de l'épuration

Eau – Le rôle principal de l'eau contenue dans le jus (80 % à 85 %) est d'agir en tant que solvant, facilitant ainsi l'hydratation et la dissociation électrique.

Saccharose – Du point de vue chimique, le saccharose est plutôt instable. Il est facilement hydraté en glucose et en fructose, particulièrement dans des milieux acides ou basiques. Dans un milieu très alcalin et sous l'action de la chaleur, conditions trouvées dans les évaporateurs et les autoclaves à vide, il peut former de l'acide oxalique, et avoir ainsi comme conséquence la formation d'oxalate de calcium. Le saccharose contient un grand nombre de groupes hydrophiles (OH) qui le rendent facilement soluble. Ces groupes peuvent être estérifiés et

former des sucrocarbonates pendant la carbonatation des jus chaulés. Ils peuvent aussi se dissocier, de sorte que le saccharose se comportant comme un acide polybasique dans les solutions alcalines, puisse former différents sels, ou des saccharates.

Glucose et fructose – Ces monosaccharides sont plus réactifs que le saccharose. Ils sont davantage détruits, c'est pourquoi il n'en reste que des traces, même si de grandes quantités de saccharose ont été inversées. Ils sont facilement oxydés, car ils contiennent les groupes CO et COH (sucres réducteurs). Dans un milieu alcalin chaud, ils se décomposent en acides et en produits colorés, tels les PDAH. Leurs groupes carbonyles peuvent réagir avec les groupes amino des acides aminés, via la réaction de Maillard, ayant pour résultat des produits très colorés et le dégagement de CO₂ (parfois observé lorsque les produits à faible pureté moussent).

Raffinose – Ce sucre est non-réactif et se retrouve dans la mélasse. Il est fortement dextrogyre et sa présence peut fausser la pureté du produit. Sa présence influence de même la forme des cristaux du saccharose.

Acides avec des sels de chaux solubles – Du point de vue de la purification du jus, ces acides ne sont pas importants.

Acides avec des sels de chaux insolubles – On retrouve dans ce groupe les acides sulfurique, phosphorique, oxalique, tartrique et citrique. De plus, les sels de potassium et de sodium, qui confèrent une alcalinité naturelle au milieu, jouent un rôle très important dans la précipitation du calcium des sels de chaux solubles lors de la deuxième carbonatation. L'alcalinité naturelle a, cependant, un effet défavorable sur le préchaulage ou la précipitation des protéines, car elle génère un pH élevé même à une basse concentration de carbonate de calcium. Ceci mène donc à une alcalinité finale élevée dans la première carbonatation.

Acides aminés – Ces acides (principalement glutamique et aspartique) semblent avoir une série d'effets indésirables. Lors du préchaulage, ils peptisent les précipités de protéines-chaux et rendent le préchaulage moins complet. Ils sont des solutions tampons très efficaces et réduisent le pH du jus lors de la deuxième carbonatation, entraînant ainsi un chaulage moins efficace. Les groupes CO des sucres réducteurs réagissent avec les groupes amino des acides aminés en produisant des produits colorés foncés selon la réaction de Maillard. Ils sont « *melassigenic* », ces substances retiennent le saccharose et empêchent sa cristallisation, réduisant ainsi le rendement de sucre blanc.

Amides – La glutamine et l'asparagine sont les principales amides retrouvées dans le jus. Leur groupe CONH_2 est facilement saponifié produisant des sels d'ammoniac. Dans un milieu alcalin, à leur tour, ces sels dégagent du NH_3 sous l'application de la chaleur et l'ébullition. Cet acide libre peut former des sels de calcium insolubles (par exemple, aspartate), générer une diminution de l'alcalinité du milieu et provoquer même l'inversion du saccharose. La perte d'alcalinité peut être avantageuse pour les évaporateurs, car ils seraient protégés contre la formation de carbonate de calcium.

Protéines et peptides – En principe, les protéines et peptides en solution colloïdale sont plutôt stables. Elles peuvent, cependant, être dénaturées; c'est-à-dire, perdre leur arrangement régulier dans l'espace par des conditions extrêmes de pH, de température et de traitements mécaniques. Les solutions de protéines dénaturées sont relativement instables, et peuvent précipiter.

Pectines – Les pectines solubles sont des acides polygalacturoniques en partie estérifiés. Elles sont très facilement saponifiées se coupant ainsi en chaînes plus courtes. Grâce à leur caractère de polyacide, elles forment des sels acides ou neutres. Leurs sels de chaux sont légèrement dissociés en pectates de calcium, qui sont plutôt insolubles.

Si des précautions ne sont pas prises, sous l'action de la chaleur les grandes molécules de pectines formeront des précipités volumineux, colloïdaux et fortement hydratés. Ces micelles rendent la solution gélatineuse et fortement visqueuse, ce qui rend la précipitation et la filtration difficiles. Les pectines présentent une activité optique très forte et sont très difficiles à clarifier. De ce fait, la détermination de la pureté du produit peut être faussée (pertes de saccharose). De plus, elles peuvent, par l'échange ionique, augmenter l'alcalinité naturelle.

Polyphénols – Ils sont responsables d'au moins un groupe de substances de coloration, les couleurs d'améthyste sensibles au pH et fréquemment obtenues dans les jus gazés de la première carbonatation.

Tyrosine – Le changement de couleur du jus vers le bleu foncé est attribué à l'action de la tyrosinase sur la tyrosine.

Saponines – Elles sont responsables de la formation de mousse dans le jus brut. Il semblerait qu'elles soient normalement éliminées pendant la purification du jus.

Bases azotées – La bétaine est la base représentative de ce groupe. Les bases azotées agissent en tant que solutions tampons. Elles peuvent affecter l'alcalinité naturelle dans la deuxième carbonatation, diminuer l'ionisation de l'anhydride carbonique et, par conséquent, augmenter le déchaulage des jus. De plus, elles peuvent se lier à l'acide carbonique en produisant des carbaminates. Dans le cas où la base azotée est volatile, elle peut causer la perte d'alcalinité du milieu. Elles sont probablement « *melassigenic* ».

Ammoniac – C'est la base azotée la plus importante. Elle est principalement responsable de la perte d'alcalinité. L'ion NH_4^+ , en se dissociant, devient un acide et donc les sels d'ammonium peuvent inverser de même les solutions de saccharose tièdes et provoquer la corrosion des évaporateurs. Une certaine perte d'alcalinité peut cependant être souhaitable pour le jus et les sirops fortement alcalins.

Fer et aluminium – Ils sont pratiquement éliminés par la chaux. Le fer peut catalyser des réactions d'oxydation avec la formation de couleur et mener à la formation de sucres blanc-grisâtre.

Sodium et potassium – Ils représentent la majorité des cations dans le jus frais. Ils sont fortement « *melassigenic* » et leur présence est avantageuse, d'autant qu'ils servent à produire l'alcalinité naturelle dont le jus a besoin.

Acide silicique – De forme colloïdale (provenant de la chaux), l'acide silicique n'est pas enlevé lors de l'épuration et, par conséquent, il augmenterait les incrustations dans les évaporateurs.

Chaux – Bien que sa réaction avec l'eau soit fortement exothermique, elle peut apparemment se dissoudre au froid sans hydratation et donner des solutions plus concentrées que celles préparées à partir du Ca(OH)_2 .

Hydroxyde de calcium – Il est utilisé sous forme de lait de chaux (suspension de Ca(OH)_2 dans de l'eau). Sa solubilité n'est pas constante, mais est déterminée par la nature de l'hydroxyde de calcium, la teneur en matière solide présente dans le milieu, la température et les concentrations du saccharose et des composants non-sucrés.

Anhydride carbonique – Avant de réagir, l'anhydride carbonique doit se dissoudre dans le jus et former l'acide carbonique. L'hydratation de ce produit dans des milieux alcalins est très importante du point de vue technique. De petites bulles et une agitation efficace sont favorables pour une meilleure adsorption. Il semblerait que lorsque l'acide carbonique neutralise les alcalis en présence des substances comportant des groupes OH, la formation de sucrocarbonates a

lieu. Ces produits sont des précipités difficiles à enlever et pourraient être partiellement responsables du retard de la précipitation du CaCO_3 lors de la deuxième carbonatation.

Acide carbonique – H_2CO_3 est un acide plutôt fort. Cependant, on le considère habituellement comme un acide faible parce qu'il ne peut pas exister en grandes concentrations. Il se dissocie facilement en eau et anhydride carbonique.

Anhydride sulfureux et acide sulfureux – L'acide sulfureux est bien plus fort que l'acide carbonique et peut, par conséquent, être utilisé pour la neutralisation de l'alcalinité excessive dans les jus et les sirops. De plus, il est un agent réducteur bien connu et peut servir ainsi à décolorer les jus par l'oxydation des substances de coloration. Par exemple, des produits colorés formés lors du chauffage du glucose sont décolorés par NaHSO_3 à un pH de 5,5.

Plus important semble être l'effet préventif de la présence des traces de SO_2 ou SO_3^{-2} sur beaucoup d'oxydations, par exemple lors de l'évaporation du jus (solution de saccharose). Le retardement considérable de l'oxydation de SO_3^{-2} vers SO_4^{-2} par le saccharose minimise la formation des dépôts de SO_4^{-2} dans l'évaporateur. En effet, le sulfate de calcium (SO_4^{-2}) est moins soluble que le sulfite de calcium (SO_3^{-2}) dans des solutions de saccharose. La solubilité des dérivés sulfatés est cependant influencée par la concentration de saccharose, la température et la présence d'autres substances.

Oxalate de calcium – Cette substance mène parfois à l'entartrage, même dans les autoclaves à vide. L'acide oxalique est un acide très fort, et dans le jus, il est toujours entièrement ionisé. Son sel de calcium est très légèrement soluble.

2.4. Description de l'opération.

La station de carbonatation est composée d'une série de réservoirs, en général de quatre à six, possédant une hauteur assez considérable ([Figure 6](#) [7]). Chaque réservoir est muni d'un système de tuyaux et de vannes de contrôle qui permettent d'alimenter le jus sucré, le lait de chaux ou le lait de saccharate et l'anhydride carbonique. Une évacuation pour les matériaux carbonatés est également prévue.

La chaux utilisée est appelée « lait de chaux » (mélange de solution aqueuse et suspension de chaux) ou « lait de saccharate » (suspension de saccharates de calcium et d'eau sucrée obtenue de la purification).

Avec des jus provenant de betteraves saines, très peu de chaux est ajoutée au préchauffeur : 0,2 % à 0,3 % de CaO , ce qui correspond à environ 1/5 de l'ajout total en chaux. Les

paramètres du préchauffage sont présentés au Tableau 3. Le jus passe dans un réchauffeur et est envoyé dans les bacs de chaulage. En général on chauffe à environ 85 °C, ce qui donne presque toujours de bons résultats. Cependant, de plus basses températures peuvent être avantageuses pour certains jus. Si le jus est trop chaud, la couleur peut se développer, l'absorption de gaz est plus lente et le moussage pendant la carbonatation peut être excessif. Si la température est trop faible pour un jus en particulier, la purification peut être excellente, mais un précipité difficile à filtrer et à laver peut en résulter. Dans les bacs de chaulage, le reste de la chaux est ajouté de façon massive jusqu'à une alcalinité totale entre 10 et 15 g CaO/L (Tableau 3). Des expériences indiquent que les meilleurs résultats sont obtenus si le lait de chaux n'est pas plus concentré que 32 °Brix ou le lait de saccharate n'est pas plus concentré que 27 °Brix. Il faut ajouter assez de chaux afin d'atteindre la bonne clarification et obtenir un précipité granulaire rapide à sédimenter. Le lait de chaux est alimenté des réservoirs équipés de niveaux pour mesurer la quantité de chaux débitée aux réservoirs du jus.

Tableau 3 : Principaux paramètres du préchauffage et du chaulage (McGinnis, 1951).

PARAMÈTRE	PRÉCHAULAGE	CHAULAGE
Alcalinité finale (g CaO/L)	2,5	10 – 15
Température (°C)	70 – 74 certains procédés à 40 – 45	85
pH final	11,5	n.d.
Temps de séjour minimum (min)	10 – 15	10

Par la suite, le jus chaulé est réchauffé et mis en présence d'un barbotage à l'anhydride carbonique. Divers arrangements sont employés pour distribuer l'anhydride carbonique pendant qu'il est alimenté du fond du réservoir. Le gaz épuisé est retiré des réservoirs de carbonatation par des purges reliées à une grande cheminée sur le toit de l'usine.

Dans l'opération normale d'une station de carbonatation en temps différé, la soupape d'admission sur un des réservoirs de carbonatation est ouverte, et du jus sucré est admis à un niveau prédéterminé. Tout le lait de chaux est alors ajouté, et le clapet à gaz est ouvert. La carbonatation continue jusqu'à ce que le jus atteigne l'alcalinité envisagée. Quand le clapet à gaz se referme, la soupape d'échappement s'ouvre et le réservoir décharge le jus trouble vers

le filtre-presse. Tandis qu'un réservoir est en train d'être carbonaté, le réservoir juste avant lui est en train d'être déchargé, et le réservoir après lui est en train d'être chargé de jus sucré. De cette façon, la carbonatation se déplace d'un réservoir à l'autre dans un ordre régulier.

L'anhydride carbonique est admis lentement au début, parce que le moussage est plus fort au début de la carbonatation. Le mélange de jus et de chaux perd bientôt son aspect liquide et commence à s'épaissir. Pendant que la saturation continue, un précipité gélatineux et visqueux, composé de carbonate de calcium, de saccharate de calcium et possiblement d'oxyde de calcium est formé. À cette étape, une couche de mousse lourde et stable est observée en surface du jus. Pendant que le gazage continue, ces sels complexes sont décomposés, le précipité gélatineux disparaît graduellement, le jus devient plus liquide, la mousse diminue et les bulles se cassent de plus en plus rapidement, jusqu'à ce que le carbonate de calcium granulaire formé précipite. À ce moment, la carbonatation est complétée.

Le temps de rétention dans les réservoirs de carbonatation est d'environ 15 minutes à une température de 85 à 88 °C. Cependant, la vitesse de carbonatation peut être affectée par le rapport entre la distance à parcourir par le gaz et la vitesse du gaz. Lors de la première carbonatation, pour éviter la redissolution des impuretés, le jus doit posséder une légère alcalinité excédentaire correspondant à un pH de 11,2. Logiquement le pH de la première carbonatation ne devrait pas descendre en dessous de celui du préchaulage (maximum de floculation). Le jus traité est envoyé vers le clarificateur où les impuretés sont enlevées. La boue épaisse qui en résulte est filtrée et lavée dans un filtre à tambour rotatif afin de réduire la perte de sucre ([Figure 7](#) [6]).

Le jus clarifié passe à la deuxième carbonatation pour se faire enlever les dernières traces de chaux. La température du jus est rapprochée le plus possible de la température d'évaporation du jus (95 °C). Du CO₂ est ajouté au jus. Parfois, il est bouilli pendant quelques minutes dans le but de casser les bicarbonates formés auparavant. Du carbonate de calcium est encore formé, lequel est enlevé par filtration à pression. Le filtrat est par la suite traité avec une petite quantité de dioxyde de soufre dans le but de minimiser la formation de couleur pendant les étapes subséquentes. Le dioxyde de soufre réduit la formation de substances colorantes dues aux réactions de Maillard, réduit les groupes chromophores des substances colorées et se fixerait sur les fonctions carbonyles des sucres réducteurs.

Le résultat de cette deuxième carbonatation, un jus clair, possède un pH final d'environ 9,2 (alcalinité de 0,15 g CaO/L) et une pureté de 93 % environ. Les solides sont séparés par sédimentation et récupérés sous forme de floculant. Le floculant est filtré et lavé des sucres

dans des filtres à vide. Le tourteau est repulpé et utilisé comme engrais. Le filtrat est connu sous le nom d'eau sucrée (« petit jus »). Il est utilisé pour la préparation du lait de saccharate. Tout surplus d'eau sucrée est retourné à la première carbonatation.

Le charbon activé est employé pour l'adsorption des corps de couleur, des colloïdes, des substances causant des goûts et des odeurs indésirables, et d'autres impuretés. Le rôle du charbon activé est d'améliorer la couleur du sucre. L'échange ionique est un autre type de méthode utilisée récemment. Il s'agit de faire passer le jus dilué à travers des barrières d'un matériel résineux synthétique actif (membranes) qui enlève les impuretés ionisées.

3. ÉVAPORATION.

3.1. But de l'opération.

Le but principal de l'évaporation est de concentrer par ébullition le jus épuré (10 % – 15 % de saccharose) jusqu'au sirop à une concentration proche de la saturation (68,5 g de matière sèche /100 g de sirop).

3.2. Description de l'opération.

Après filtration, le jus est pompé à travers des échangeurs de chaleur et envoyé vers l'atelier d'évaporation. L'évaporateur est composé d'une série de chaudières successives dans lesquelles la pression diminue, les dernières travaillant sous pression réduite. L'évaporation s'effectue donc de façon continue dans une série d'évaporateurs à multiple-effet. La pression est abaissée d'effet en effet, le dernier étant sous vide, afin de limiter l'élévation du point d'ébullition du sirop et de compenser l'augmentation de sa viscosité.

Ces évaporateurs sont au nombre de quatre à six, sous pression pour les 4 à 5 premiers (125 à 130 °C) et sous vide pour le dernier (85 °C) pour éviter la caramélisation du sucre. Ils sont essentiellement un ensemble d'évaporateurs à simple effet (corps d'évaporation).

La vapeur utilisée pour fournir la chaleur au premier effet est produite par l'usine. Pour les effets subséquents, on utilise la vapeur formée lors de l'évaporation du jus dans l'effet précédent. Un tel système permet l'utilisation répétée de la même énergie calorifique et nécessite une réduction de pression et de température pour les effets subséquents. Le dernier évaporateur est lié à un condensateur barométrique. Ce système a un rendement thermique remarquable,

puisque avec 1 kg de vapeur utilisée dans le premier évaporateur, on peut, en théorie, évaporer autant de kilogrammes d'eau qu'il y a de corps d'évaporation.

Le sirop jaune paille très dense sortant de l'évaporateur est éventuellement entreposé pour être cristallisé plus tard. Ce sirop contient environ 1 % d'impuretés dissoutes.

3.3. L'évaporateur.

Traditionnellement, les **évaporateurs à faisceau de tubes horizontaux** ont été utilisés dans les sucreries aux États-Unis depuis que l'équipement a été breveté en 1879. Dans ce type d'évaporateur, la vapeur circule à l'intérieur des tubes et le jus à l'extérieur. Les tubes ont en général $\frac{3}{4}$ à 1 po de diamètre externe. L'**évaporateur à calandre** a aussi été utilisé ([Figure 8 \[7\]](#)). Cet évaporateur est composé essentiellement d'une coquille cylindrique contenant une série de tubes formant une couronne annulaire autour de la descente centrale (puits). Le fond et le couvercle de la coquille sont bombés, la vapeur produite par l'évaporation du jus est récupérée par le couvercle à l'aide d'un séparateur. Les tubes ont rarement plus de 5 à 6 pieds de longueur, et 1,5 à 2 po de diamètre extérieur. Le puits cylindrique occupe approximativement $\frac{1}{4}$ du diamètre de la coquille. Ce type d'évaporateur est aussi connu sous le nom d'évaporateur Robert ou de type standard.

Ces dernières années, des **évaporateurs à grimpage** ont été installés (évaporateur type Kestner). Ces équipements ont des tubes verticaux de 18 à 22 pieds de longueur, et environ 1,5 po de diamètre externe. Dans ce cas, il n'y a pas de puits central. Le jus entre sous la feuille de tubes inférieurs et circule à l'intérieur des tubes vers le haut. La chaleur pour l'évaporation est fournie par la vapeur circulant à l'extérieur des tubes. De cette façon, un mélange jus-vapeur quitte l'extrémité supérieure des tubes avec une vitesse élevée. Le dessus du faisceau de tubes est prolongé d'un ou deux pieds dans une chambre ou dôme cylindrique. Une cloison de type parapluie sépare le liquide de la vapeur dans le dôme, de sorte que le jus puisse être retiré du fond du dôme, et la vapeur à partir du dessus du dôme.

Dans l'industrie sucrière à base de betterave, la pression dans les évaporateurs dépend du type d'évaporateur. Au Tableau 4, les valeurs de la pression de vapeur utilisées couramment dans chaque type d'évaporateur sont présentées.

Tableau 4 : Valeurs de la pression de vapeur utilisées dans l'atelier d'évaporation (McGinnis, 1951).

TYPE D'ÉVAPORATEUR	PRESSION VAPEUR (psi)
À faisceau de tubes horizontaux	< 17
À calandre	> 30
À grimpage	> 45

Avec un ensemble d'évaporateurs donnés, la quantité d'eau qui peut être évaporée dépend presque entièrement de la façon dont la chaleur peut être transmise à travers les tubes, ou en d'autres termes dépend du coefficient global de transfert thermique. En conséquence, tout ce qui affecte ce coefficient affecte aussi la capacité des évaporateurs. Les facteurs qui affectent le coefficient sont la vitesse de la vapeur, l'évacuation des gaz incondensables, l'enlèvement des condensats, la propreté de la surface d'exposition (entartrage), la composition du tube, la quantité de jus dans l'évaporateur, la viscosité du jus, la différence de température, la conductivité du liquide, le pH, la masse volumique du jus, etc.

Un jus visqueux est moins facilement pénétré par des bulles de vapeur. La viscosité augmente avec la concentration et diminue avec la température. Puisque ces deux changements se produisent pendant que le jus passe d'un corps d'évaporation à un autre, le jus devient plus visqueux et le taux de transfert thermique diminue dans les effets postérieurs.

4. CRISTALLISATION.

4.1. But de l'opération.

Le but de cette opération est de former la masse-cuite par cristallisation du sucre contenu dans le sirop. L'introduction de très fins cristaux dans le sirop amorce la cristallisation du sucre, puis le sirop cristallise et se transforme en masse-cuite, sirop coloré contenant en suspension de multiples petits cristaux.

4.2. Description de l'opération.

La cristallisation a lieu dans les chaudières à cuire, appelées cuites ([Figure 9](#) [6]). Afin d'éviter la caramélisation, l'ébullition doit être réalisée à base température, ce qui demande un

fonctionnement sous vide. Les cuites sont en réalité des autoclaves à vide. Le sirop est ainsi amené à l'état de sursaturation, c'est-à-dire qu'il contient une plus grande concentration de sucre en solution que la solubilité normale du sucre dans l'eau à cette température. À ce stade, le sirop est alorsensemencé généralement par injection d'une petite quantité de sucre en poudre (très fins cristaux bien calibrés). Les noyaux de cristaux se forment spontanément. Dans une deuxième phase, le sirop est maintenu en légère sursaturation pour laisser grossir les fins cristaux introduits dans le sirop. Puis, à l'aide d'un contrôle soigneux de la sursaturation au moyen du niveau de vide, de température, d'addition de liqueur fraîche et de vapeur, les cristaux se développent jusqu'à ce qu'ils aient atteint la taille désirée. On obtient ainsi la masse-cuite résultant du mélange de cristaux et du « sirop-mère ».

Lorsque la vitesse de cristallisation diminue et que la chaudière est pleine, le serrage de la chaudière à cuire a lieu. L'alimentation en sirop est arrêtée et l'évaporation de la masse-cuite est poursuivie. Cette cuisson permet d'évaporer l'eau excédentaire et d'épuiser le sirop-mère. La masse-cuite est alors déchargée de l'autoclave à vide vers un grand silo, qui est équipé d'un agitateur et parfois d'un dispositif de chauffage. Du mélangeur, la masse-cuite est déchargée auxessoreuses (centrifugeuses). La centrifugeuse est composée d'un panier en tôle perforée qui tourne sur un axe vertical à grande vitesse dans une coquille externe (1500 rpm). Sous l'action de la force centrifuge, le sirop brun qui enveloppe les cristaux est éjecté vers l'extérieur en quittant le panier par les perforations. Il ne reste plus sur la paroi interne de l'essoreuse que le sucre cristallisé blanc.

Après un bref lavage en surface par pulvérisation d'eau et de vapeur, les cristaux de sucre sont envoyés aux dessiccateurs et aux refroidisseurs. Ce sont des tambours cylindriques en rotation avec des déflecteurs qui dirigent le sucre et lui permettent de tomber dans le courant d'air en mouvement. De l'air chaud et filtré passe dans le premier tambour, et de l'air froid par le second. Le sucre est alors tamisé, classé, pesé et entreposé en vrac dans des silos, ensaché ou conditionné dans des ateliers spécialisés avant expédition. Le sucre blanc est produit à 99,96 % de pureté et à une humidité d'environ 0,02 %. La composition moyenne du sucre blanc est présentée au Tableau 5.

Dans les ateliers, le sucre est transformé vers des produits spécifiques, tels que le sucre blanc cristallisé, le sucre blanc en poudre, le sucre moulé en morceaux et le sucre glace.

Tableau 5 : Composition du sucre blanc [7].

COMPOSANT	SUCRE BLANC	
	Moyenne	Intervalle
Saccharose (%)	99,80	n.d.
Eau (%)	0,05	n.d.
Minéraux totaux (%)	0,04	n.d.
Calcium (mg/100 g)	0,60	(0 – 2)
Fer (mg/100 g)	0,30	(0,1 – 0,5)
Magnésium (mg/100 g)	0,20	(0 – 0,3)
Phosphore (mg/100 g)	0,30	(0 – 0,5)
Potassium (mg/100 g)	2,00	(0 – 6)
Sélénium (µg /100 g)	traces	(0 – 0,3)
Sodium (mg/100 g)	0,30	n.d.

4.3. Sous-produits de la cristallisation.

Le sirop-mère, composé d'eau, de sucre et de quelques impuretés, est soumis à une nouvelle cuisson avec formation de cristaux et à un nouvel essorage. De ces opérations, la **vergeoise** est obtenue. La vergeoise est toujours issue de la betterave sucrière. La vergeoise blonde est obtenue à partir du sirop récupéré de l'essorage de cristaux de sucre blanc, tandis que la vergeoise brune est obtenue à partir du sirop récupéré de l'extraction de la vergeoise blonde. La vergeoise est un sucre de consistance moelleuse, coloré et parfumé par la cuisson de sirops de sucre de betterave. Selon le sirop utilisé, la vergeoise sera blonde et légèrement aromatisée ou brune et dotée d'un arôme plus prononcé. Afin de visualiser la différence entre la composition du sucre blanc et de la vergeoise brune, la composition moyenne de cette dernière est présentée au Tableau 6.

Tableau 6 : Composition de la vergeoise brune [7].

COMPOSANT	VERGEOISE BRUNE	
	Moyenne	Intervalle
Saccharose (%)	96,40	n.d.
Eau (%)	1,40	(0,70 – 1,90)
Minéraux totaux (%)	0,80	(0,60 – 1,10)
Fibres alimentaires (mg/100 g)	0,20	n.d.
Calcium (mg/100 g)	8,50	(4 – 15)
Fer (mg/100 g)	6,00	n.d.
Potassium (mg/100 g)	240,00	(200 – 280)
Sélénium (µg/100 g)	traces	(0-1,2)
Sodium (mg/100 g)	35,00	(15 – 73)

Le sirop résultant de la troisième cuisson est cuit lors d'une étape ultime pour donner la vergeoise brune et la mélasse. La mélasse contient entre 40 % et 69 % de saccharose, du sucre inverti et des composants inorganiques non-sucrés. Elle est utilisée pour la production d'alcool, la fabrication d'aliments pour le bétail, la production de levures de boulangerie, etc.



Tout au long du procédé d'extraction du sucre, différents paramètres de procédé sont suivis et contrôlés afin de mettre un terme à chacune des opérations au bon moment. Les paramètres couramment utilisés sont présentés ci-dessous :

1. EXTRACTION

Les variables à contrôler dans le diffuseur sont l'uniformité, la rigidité et l'épaisseur des cossettes; le taux d'alimentation en cossettes dans le diffuseur; le patron de température dans le diffuseur; le rapport entre la quantité de jus extrait et la quantité de cossettes alimentées au diffuseur, le temps de diffusion, le temps de remplissage des cellules et la vitesse d'écoulement du jus.

Afin de déterminer la quantité de sucre contenu dans le jus, des mesures saccharimétriques sont effectuées sur différents échantillons lors de la réception des betteraves. Pour ce faire, des râpures de betterave sont digérées à froid à l'aide d'une solution aqueuse d'acétate de plomb. Le filtrat résultant de cette digestion est utilisé pour effectuer la mesure saccharimétrique.

2. PRÉCHAULAGE ET CHAULAGE

Le pH est le principal paramètre à suivre dans ces opérations. La mesure du pH est prise pendant que la chaux est ajoutée, puis la valeur est ajustée à une valeur finale. Une fois que la valeur visée a été atteinte, le temps de chaulage est quantifié.

3. CARBONATATION

Première carbonatation – Pour déterminer le point final de la carbonatation, l'arrêt doit être déterminé. L'observation à la lumière de l'état du précipité dans un verre est une pratique de base. D'autres méthodes de détermination du point final peuvent être employées, par exemple l'observation de la vitesse avec laquelle les bulles se cassent à la surface de l'échantillon, détermination du moment auquel un minimum de mousse est produit, l'identification de l'odeur

du jus, et le titrage en laboratoire des échantillons pour déterminer l'alcalinité du jus. Dans la pratique, toutes ces méthodes peuvent être employées sur un même échantillon. Le titrage est cependant la méthode la plus sûre pour assurer l'alcalinité du jus, ainsi que son homogénéité avant d'être envoyé aux filtres.

Deuxième carbonatation – Le contrôle de cette étape est basé sur le suivi du pH ou de l'alcalinité du jus gazé. La commande automatique de pH est souvent employée dans cette opération.

Des méthodes de mesure en laboratoire pour déterminer l'alcalinité ou le pH correspondant à la concentration optimale de sels de chaux présentes dans le jus sont aussi disponibles. Cependant, ces méthodes dépendant de la nature du jus chaulé doivent être réalisées pour chaque jus au moment même de la carbonatation.

4. ÉVAPORATION

Cette opération est contrôlée d'une part, par le temps d'évaporation, la pression et la température dans les évaporateurs et d'autre part, par la mesure de degré Brix et la quantification de la masse d'eau évaporée.

5. CRISTALLISATION

Afin de mesurer la concentration de saccharose dans la masse-cuite, sa conductivité électrique est mesurée et interprétée comme une fonction de la sursaturation du sirop. On considère la viscosité comme un paramètre de sursaturation du sirop et la conductivité électrique comme l'indicateur le plus représentatif de cette propriété. De plus, le degré de sursaturation du sirop peut être corrélé à l'élévation de son point d'ébullition, paramètre possible à quantifier.



De nos jours, la recherche sucrière porte sur les domaines de l'économie d'énergie, de l'optimisation de procédé et du traitement des rejets.

La consommation d'énergie tout le long du procédé d'extraction de sucre dépend de la demande énergétique des différentes étapes du procédé et de l'efficacité de la transformation d'énergie dans les systèmes thermiques. En raison du surplus de sucre sur le marché mondial, les investissements dans les sucreries sont très rares. La modification des installations déjà existantes est donc la solution pour l'optimisation de la consommation d'énergie. Les travaux de Mazaeda et De Prada (2005), Urbaniec (1989, 2004), Thompson (1999), Mabillot (1999), Wunsch et Avram-Waganoff (1999), Tekin et Bayramoglu (1998) proposent des analyses et des méthodes à être appliquées aux sucreries dans le but d'évaluer leur consommation d'énergie et d'envisager la stratégie à prendre pour réduire leur consommation (réaménagement de l'atelier d'évaporation, remplacement d'un ou de tous les évaporateurs, renouvellement de la technologie d'évaporation, automatisation des opérations dans la sucrerie, etc.). Des articles contemporains présentant l'état du développement de l'industrie sucrière à base de betterave sont aussi disponibles (Dixon, 2004; Suhr et Schuize, 2003; Mrini, Senhaji et Pimentel, 2002; Merkes *et al.*, 2001; Mabillot, 1999; Merkes *et al.*, 1996).

Des recherches sont aussi réalisées afin d'améliorer la séparation des composants non-sucrés et, par conséquent, le rendement du procédé d'extraction. Pour ce faire, des expériences au niveau laboratoire sont réalisées dans le but d'apporter des solutions de rechange à l'industrie sucrière. Ces études sont basées sur l'évaluation de la performance des techniques d'ultrafiltration et de nanofiltration, ainsi que d'électrodialyse (Gyura, Šereš et Eszterle, 2005; Djuric *et al.*, 2004; Djuric, Gyura et Zavargo, 2004; Gyura *et al.*, 2002; Lutin, Bailly et Bar, 2002; Bichsel et Sandre, 1982). De plus, des techniques pour éliminer la pulpe et réduire de façon sensible la coloration des jus épurés, ainsi que la teneur en sels de chaux ont été aussi développées (Grabka et Baryga, 2001; Grabka et Baryga, 1999).

L'optimisation de chacune des opérations impliquées dans le procédé d'extraction, le développement de nouvelles techniques, l'application de la technologie provenant d'autres industries et l'automatisation du procédé au complet sont aussi des sujets à l'étude.

Des recherches pour mettre au point un extracteur solide-liquide utilisant un champ électrique sont en cours (Jemai et Vorobiev, 2003; Eshtiaghi et Knorr, 2002; Bouzrara et Vorobiev, 2001). Le but de ces travaux est d'évaluer la performance de ce traitement lorsqu'il est utilisé avec un pressage pour l'extraction du jus de betterave (désintégration des cellules, extraction du sucre à température ambiante, réduction du temps de l'opération, etc.).

Des études pour évaluer la performance des évaporateurs à plaques lors de la concentration du jus de betterave ont été aussi réalisées dans certaines sucreries (Hawkins, Niepoth et Morgenroth, 1999; Morgenroth, Jayatilaka et Punter, 1997). L'efficacité thermique des évaporateurs, le temps d'évaporation, le développement de la couleur du jus lors de sa concentration, la facilité d'opération, les coûts d'installation sont quelques sujets d'intérêt dans ces recherches.

L'amélioration du procédé d'extraction du sucre, dans le but d'augmenter l'économie d'énergie ou de permettre l'application d'une méthode de contrôle, est un sujet primordial de nos jours : l'utilisation de nouveaux équipements pour le pressage et pour la cristallisation/séchage du sucre en continu est explorée par Caspers et collaborateurs (2003); les critères de performance des centrifugeuses et leur impact sur les opérations dans les sucreries sont présentés par Grimwood et Thompson (1999), des solutions en matière de contrôle et de supervision à distance ont été développées par Bertuzzi et Castaldini (1999) pour un atelier d'évaporation.

Du côté environnemental, des travaux ont été réalisés dans le but de réduire la consommation d'eau dans les sucreries, ainsi que de mieux éliminer les eaux usées. Ces travaux proposent des options à mettre en œuvre dans les sucreries (Reddad *et al.*, 2004; Zbontar Zver et Glavic, 2005).



Allantoïne	Produit d'oxydation de l'acide urique et de certains végétaux, employé pour la préparation des eaux de toilette, des toniques et de certaines crèmes.
Aspartate	Acide aminé non essentiel.
Bétaïne	Substance rencontrée dans la pulpe des betteraves se comportant comme la choline.
Choline	Base azotée, apparentée à la vitamine B, dont les dérivés jouent un rôle dans le fonctionnement du système parasympathique. Dans la nature, elle existe à l'état libre dans de nombreux tissus animaux et végétaux.
Cossette	Fine lanière de betterave obtenue en général mécaniquement et utilisée pour l'extraction du sucre.
Dextrane	Polysaccharide synthétisé par certaines bactéries et levures.
Dextrogyre	Caractère d'une molécule qui dévie vers la droite le plan polarisé de la lumière.
Glutamine	Monoamide de l'acide glutamique.
Hémicellulose	Constituant des fibres végétales en plus de la cellulose et de la lignine ayant un poids moléculaire inférieure à celui de la cellulose.
Hydrophile	Substance qui absorbe ou attire l'eau.
Lévane	Polysaccharide synthétisé par certaines bactéries et dont l'hydrolyse donne du fructose.
Masse-cuite	Mélange pâteux de cristaux de sucres (saccharose, dextrose, etc.) et de leurs eaux-mères, résultant de la cristallisation d'un sirop de sucre
Mélasse	Résidu incristallisable obtenu après avoir enlevé du sirop le sucre cristallisé, se présentant sous forme de sirop dense et visqueux.
« <i>Melassigenic</i> »	Caractère lié à la perte de rendement de sucre blanc.

Oxamide	Poudre blanche microcristalline, presque insoluble dans l'eau, que l'on obtient en décomposant à chaud l'oxalate d'ammonium.
Pectates	Sel de l'acide pectique.
Peptisation	Hydrolyse d'une protéine en peptides.
Phénol	Dérivé monohydroxylé du benzène, de formule C_6H_5OH .
Acide polygalacturonique	Composé résultant de la dépolymérisation de la pectine.
Polyphénol	Composé possédant plusieurs fonctions phénols.
Raffinose	Triholoside non réducteur accompagnant le saccharose dans les jus de betterave.
Saponine	Glucoside d'origine végétale, généralement incolore et amorphe dont la solution aqueuse mousse par simple agitation.
Semi-perméable	Qualifie une membrane qui laisse passer certaines substances en solution mais s'oppose au passage d'autres substances de la même solution.
Sucrocarbonate	Composés complexes de sucre qui forment de gels et peuvent générer des pertes de sucre.
Thermophile	Microorganisme qui peut vivre à des températures variant de 40 à 70 °C et dont le développement est optimal à 55 °C.
Tyrosinase	Enzyme du groupe des oxydases catalysant la transformation de la tyrosine en mélanine (pigment noir cutané).
Tyrosine	Acide aminé aromatique non indispensable formé par oxydation de la phénylalanine.



- BERTUZZI S. et CASTALDINI S. (1999). Automation and Remote Control of an Evaporation Plant. *International Sugar Journal – Beet Sugar*, 101(1211), 543-550.
- BICHSEL S.E. et SANDRE A.M. (1982). Application of Membrane Technology to Juice Concentration. *International Sugar Journal*, 84(1005), 266-268.
- BOUZRARA H. et VOROBIEV E. (2001). Non-thermal Pressing and Washing of Fresh Sugarbeet Cossettes Combined with a Pulsed Electrical Field. *Zuckerindustrie*, 126(6), 463-466.
- CASPERS G., HEMPELMANN R., KRELL L. et TSCHERSICH J. (2003). BMA Technology for Process Improvement and Energy Saving. *International Sugar Journal*, 105(1250), 71-77.
- DIXON T.F. (2004). Uptake of Technology – Delivery Industry Benefits. *International Sugar Journal*, 106(1267), 368-375.
- DJURIC M., GYURA J. et ZAVARGO Z. (2004). The Analysis of Process Variables Influencing Some Characteristics of Permeate From Ultra- and Nanofiltration in Sugar Beet Processing. *Desalination*, 169(2), 167-184.
- DJURIC M., GYURA J., ZAVARGO Z., ŠEREŠ Z. et TEKIC M. (2004). Modelling of Ultrafiltration of Non-sucrose Compounds in Sugar Beet Processing. *Journal of Food Engineering*, 65(1), 73-82.
- ESHTIAGHI M.N. et KNORR D. (2002). High Electric Field Pulse Pretreatment : Potential for Sugar Beet Processing. *Journal of Food Engineering*, 52(3), 265-272.
- GRABKA J. et BARYGA A. (1999). Purification of Raw Juice With Activated Defeco-Carbonation Deposit. *International Sugar Journal – Beet Sugar*, 101(1210), 494-497.
- GRABKA J. et BARYGA A. (2001). Effect of Removing Sugar Beet Fine Pulp During Raw Juice Purification. *International Sugar Journal – Beet Sugar*, 103(1231), 310-313.
- GRIMWOOD G.C. et THOMPSON P.D. (1999). Process Performance of High Capacity Centrifugals. *International Sugar Journal – Beet Sugar*, 101(1210), 505-510.

- GYURA J., ŠEREŠ Z. et ESZTERLE M. (2005). Influence of Operating Parameters on Separation of Green Syrup Colored Matter From Sugar Beet by Ultra- and Nanofiltration. *Journal of Food Engineering*, 66(1), 89-96.
- GYURA J., ŠEREŠ Z., VATAI G. et BÉKÁSSY M. (2002). Separation of Non-sucrose Compounds from the Syrup of Sugar-beet Processing by Ultra- and Nanofiltration Using Polymer Membranes. *Desalination*, 148, 49-56.
- HAWKINS D., NIEPOTH K. et MORGENROTH B. (1999). Experience with EVAPplus Failing-Film Plate Evaporators. *International Sugar Journal – Beet Sugar*, 101(1209), 447-456.
- JEMAI A.B. et VOROBIEV E. (2003). Enhanced Leaching From Sugar Beet Cosettes by Pulsed Electric Field. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 405-512.
- LUTIN F., BAILLY M. et BAR D. (2002). Process Improvements with Innovative Technologies in the Starch and Sugar Industries. *Desalination*, 148, 121-124.
- MABILLOT M. (1999). Optimisation of Energy at BEGHIN/SAY Nantes Refinery. *International Sugar Journal – Beet Sugar*, 101(1203), 172-177.
- MAZAEDA R. et DE PRADA C. (2005). Supervision and Optimised Process Control in Sugar Beet Factories. Manuscript to be submitted.
- MCGINNIS R.A. (1951). *Beet-Sugar Technology*. Reinhold Publishing Corporation. USA. 574 p.
- MERKES R., HJUNG G., MUGELE H. et ZIEGLER K. (1996). The State of Sugar Beet Production Technology in Germany – Results of a 1994 Sugar Factory Survey. *Zuckerindustrie*, 121(7), 496-504.
- MERKES R., KROHL M., MUGELE H. et SAUER M. (2001). Sugarbeet Production Technology in the year 2000 : Cost Reduction, environmental Protection, Sustainability. *Zuckerindustrie*, 126(10), 804-811.
- MORGENROTH B., JAYATILAKA D. et PUNTER G. (1997). Development of Plate Evaporator Technology, The Market Place and the Choice for the Sugar Engineer. Technical Session 5C(i). *EuroTechLink*, 27 p.
- MRINI M., SENHAJI F. et PIMENTEL D. (2002). Research, Reviews, Practices, Policy and Technology – Energy Analysis of Sugar Beet Production Under Traditional and Intensive

Framing Systems and Impacts on Sustainable Agriculture in Morocco. *Journal of Sustainable Agriculture*, 20(4), 5-29.

- PENNINGTON N.L. et BAKER C.W. (1990). *Sugar : A User's Guide to Sucrose*. AVI Book. USA. 331 p.
- REDDAD Z., GERENTE C. ANDRES Y. et CLOIREC P. Le. (2004). Ecological Approaches and Residuals Characterization – Lead Removal by a Natural Polysaccharide in Membrane Reactors. *Water Science and Technology*, 49(1), 163.
- SUHR M.R. et SCHUIZE B.-C. (2003). Technology in Use in the Modern Beet Sugar Factory. *International Sugar Journal*, 105(1250), 52-59.
- TEKIN T. et BAYRAMOGLU M. (1998). Review Paper – Energy Loss Minimization Analysis of Sugar Production Process from Sugar Beet. *Food and Bioproducts Processing*, 76(3), 149-154.
- THOMPSON P. (1999). Technical Articles – Reducing Energy Consumption in Beet Factories. *International Sugar Journal – Beet Sugar*, 101(1208), 394-400.
- URBANIEC K. (1989). *Modern Energy Economy in Beet Factories*. Collection Sugar Series Vol. 10. Elsevier Publishers. USA. 382 p.
- URBANIEC K. (2004). The Evolution of Evaporator Stations in the Beet-sugar Industry. *Journal of Food Engineering*, 61, 505-508.
- WUNSCH H. et AVRAM-WAGANOFF P. (1999). Technology Transfer Between Beet and Cane Sugar Industries – Possibilities for Energy Savings Including Cogeneration. *Zuckerindustrie*, 124(6), 451-455.
- ZBONTAR ZVER L. et GLAVIC P. (2005). Water Minimization in Process Industries: Case Study in Beet Sugar Plant. *Resources Conservation and recycling*, 43(2), 133-147.



[1] Agriculture et Agroalimentaire Canada.

http://www.agr.gc.ca/misb/spec/index_f.php?s1=bet&page=intro (Page consultée le 22 août 2005).

[2] Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture – FAO.

<http://www.fao.org/es/ess/top/commodity.jsp?lang=FR> (Page consultée le 23 août 2005).

[3] Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement – CNUCED.

<http://r0.unctad.org/infocomm/francais/sucre/marche.htm> (Page consultée le 23 août 2005)

[4] Institut National de la Recherche Agronomique – INRA.

<http://www.inra.fr/Internet/Produits/HYPPZ/CULTURES/3c---019.htm> (Page consultée le 13 septembre 2005).

[5] Université des Sciences et Technologies de Lille – USTL.

<http://www.univ-lille1.fr/pfeda/iaal/docs/iaal2003/verq/decoup%27cossettes.htm> (Page consultée le 22 septembre 2005).

[6] Académie d'Amiens.

<http://www.ac-amiens.fr/etablisements/0601296h/intromah.htm> (Page consultée le 22 septembre 2005).

[7] Centre d'Études et de Documentation du Sucre – CEDUS.

<http://www.lesucre.com/site/index.php> (Page consultée le 23 août 2005).