



Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole inc.

Siège social et station expérimentale
142, rang Lainesse
Saint-Norbert d'Arthabaska, QC
G0P 1B0
Tél. 819 369-4000
Fax. 819 369-9589

REVUE DE LITTÉRATURE

L'ENTARTRAGE DES ÉCHANGEURS DE CHALEUR DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE : PROBLÉMATIQUE ACÉRICOLE

Par :

Alfa Arzate, ing., Ph.D.

Sandra Robaire, ing., M. Sc. A.

Aline Batungwanayo, ing.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	2
LISTE DES TABLEAUX	3
LISTE DES FIGURES	3
INTRODUCTION	4
GENERALITES SUR L'ENTARTRAGE	5
1. Encrassement	5
2. Entartrage.....	5
3. Développement de l'entartrage.....	6
4. Résistance thermique d'entartrage	8
5. Prévention de l'entartrage.....	8
L'ENTARTRAGE DANS LE MILIEU ALIMENTAIRE	10
1. Industrie de l'eau	10
2. Industrie sucrière (sucre de canne)	12
3. Industrie laitière	15
LE CAS ACERICOLE	19
1. Mécanisme de formation du sable de sucre.....	19
2. Description physique du sable de sucre	20
3. Les facteurs influençant la formation du sable de sucre.....	22
4. L'effet de la production de sable de sucre sur l'équipement et le produit fini.....	25
LE CONTROLE DE LA FORMATION DU TARTRE	31
1. Méthodes pour ralentir l'entartrage des casseroles.....	31
2. Technologies pour diminuer la formation de pierre de sucre.....	32
3. Nettoyage des casseroles	41
4. Filtration pour retirer la râche.....	42
VALORISATION DU SABLE DE SUCRE	44
PERSPECTIVES	45
BIBLIOGRAPHIE	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Conductivité thermique des composants du tartre et de l'acier inoxydable. 26	
Tableau 2 : Composition du sable de sucre selon différents travaux. 28	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Exemples de cas d'entartrage développé sur diverses surfaces d'échange de chaleur. 6	
Figure 2 : Schéma représentant le développement de l'entartrage. 7	
Figure 3 : Différentes formes du sable de sucre : a) pierre de sucre récupérée des surfaces d'un évaporateur, b) râche blanche et granuleuse récupérée et séchée après une opération de filtration (contient de la terre de diatomée) et c) râche brunâtre et collante récupérée du filtre-presse (contient de la terre de diatomée). 21	
Figure 4 : Granulométrie des cristaux contenus dans la râche : a) cristaux rhomboïdes et b) cristaux cubiques. 21	
Figure 5 : Configuration des casseroles à fond plat permettant l'inversion de l'écoulement. 32	
Figure 6 : Électrolyseurs pour l'ajustement du pH du vin. 33	
Figure 7 : Principe de fonctionnement du système TrueChem. 36	
Figure 8 : Quelques exemples des appareils magnétiques. 38	
Figure 9 : Quelques exemples des appareils électromagnétiques. 39	
Figure 10 : Système catalytique SOLA. 40	
Figure 11 : Système Aquabion. 41	

INTRODUCTION

L'entartrage (« *scaling* ») est défini comme la formation d'un dépôt solide, d'un matériel thermiquement isolant, adhérent aux surfaces d'échange de chaleur. Le type d'entartrage dépend de la nature de la solution chauffée et du procédé de chauffage utilisé. Dans le cas de systèmes alimentaires, l'entartrage est généré par des sels de solubilité inverse ou par des matériels thermiquement instables comme les protéines et d'autres polymères organiques (Ling & Lund, 1978). En acériculture, le phénomène d'entartrage est observé pendant l'évaporation de la sève d'érable. Au cours de cette opération, la température augmente, le pH se modifie et les composants de la sève d'érable se concentrent. Certaines réactions chimiques ayant lieu lors de l'évaporation produisent des matières, qui en raison de la température élevée et de la teneur en sucre croissante, deviennent sursaturées et précipitent. Ces matières insolubles sont composées principalement de sels minéraux et de sucres. De façon générale, une partie des matières insolubles se dépose sur les surfaces internes des casseroles de l'évaporateur déclenchant ainsi l'entartrage des casseroles. L'autre partie de cette matière demeure en suspension dans la solution. La composition et le mécanisme de formation de la pierre de sucre sont encore méconnus, mais son effet sur les surfaces des évaporateurs acéricoles est bien connu. En effet, la présence d'un dépôt de matériel thermiquement isolant réduit l'efficacité du transfert de chaleur et augmente les efforts mis pour nettoyer les surfaces entartrées. De plus, il pourrait entraîner une éventuelle perte de sucre et d'éléments nutritifs dans la couche de tartre et altérer les propriétés sensorielles du sirop d'érable, notamment en transmettant une couleur plus foncée et en développant des défauts de saveur (Allard & Belzile, 2004).

Ce document a pour but de fournir de l'information de base aux intervenants en acériculture qui souhaitent disposer d'un ensemble de connaissances générales leur permettant de comprendre le phénomène d'entartrage des évaporateurs acéricoles et ce, dans la perspective de développer des solutions adaptées pour pallier à ce phénomène naturel. Dans la première partie de ce document, les généralités sur le processus physique de la formation du tartre et les facteurs jouant un rôle dans ce processus sont présentées. La problématique au tour de l'entartrage existante dans l'industrie alimentaire est décrite en deuxième partie. Par la suite, les études réalisées sur la composition du sable de sucre sont récapitulées et quelques idées innovatrices pour valoriser ce produit sont aussi présentées. Enfin, les différentes technologies permettant de réduire l'effet d'entartrage sont développées.

GENERALITES SUR L'ENTARTRAGE

1. ENCRASSEMENT

L'encrassement qui est défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables dans les liquides et sur les surfaces d'échange de chaleur affecte une grande variété d'opérations industrielles. De façon générale, l'encrassement est classé en fonction des trois paramètres énumérés ci-dessous :

- a) le mécanisme qui contrôle la vitesse de déposition des matières solides;
- b) les conditions d'utilisation de l'échangeur de chaleur;
- c) le mécanisme dominant le phénomène, même s'il ne contrôle pas la vitesse de déposition.

Les facteurs influençant principalement le mécanisme de déposition des matières solides sont la température et le pH de la solution, la température de la surface d'échange de chaleur, la vitesse de la solution et dans certains cas, la pression. L'entartrage fait partie d'un de six types différents d'encrassement (Epstein, 1981).

2. ENTARTRAGE

L'entartrage est généralement associé à la formation d'un solide cristallin à partir d'une solution aqueuse. Il dépend donc de la composition de l'eau et des solutés faisant partie de cette solution (Epstein, 1981).

Lorsque les sels dissous sont à solubilité inverse (i.e. carbonate de calcium), la solution devient saturé au voisinage de la surface d'échange plus chaude. La cristallisation se produit sur cette surface créant ainsi un dépôt dur et collant. Lorsque la cristallisation se produit au sein même d'un liquide qui est plus chaud que la surface d'échange, le dépôt est plutôt mou et friable. Les sels à solubilité normale développent aussi un entartrage, mais plus rarement.

L'entartrage peut se produire dans les échangeurs de chaleur, dans les échangeurs refroidis à l'eau, dans les unités de dessalement d'eau de mer ou saumâtre, dans les chaudières, etc. Des exemples de cas d'entartrage sur des surfaces d'échange sont présentés à la Figure 1.

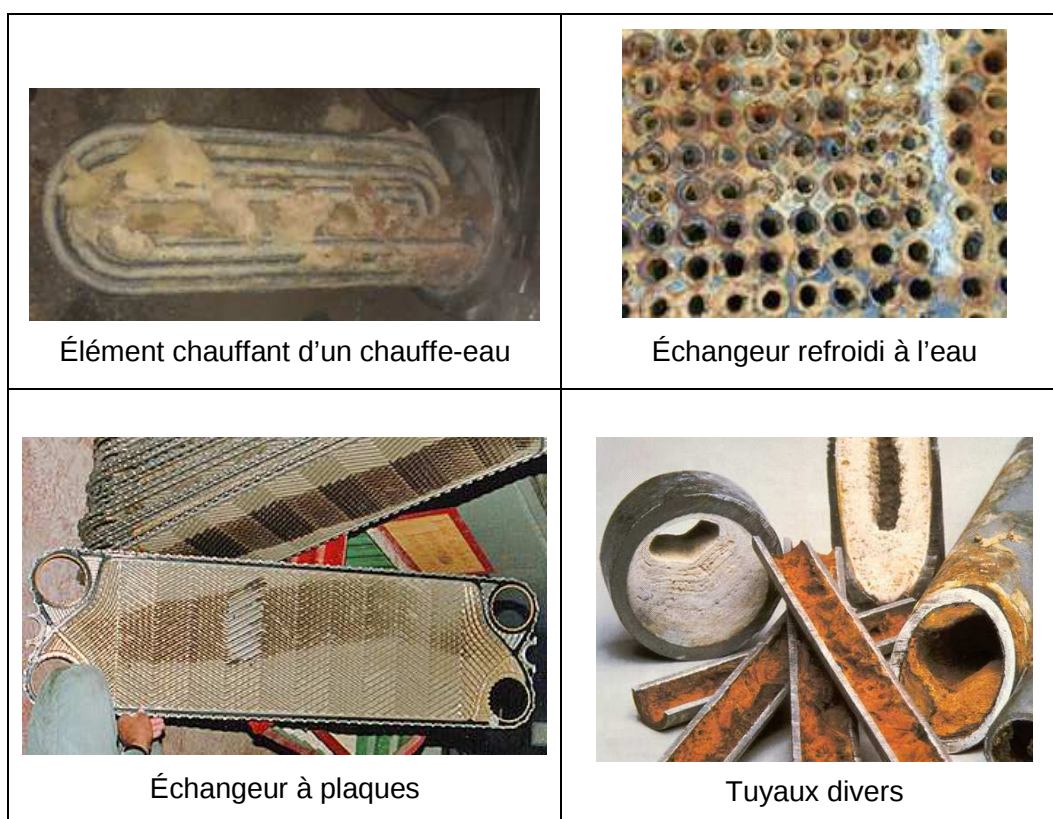


Figure 1 : Exemples de cas d'entartrage développé sur diverses surfaces d'échange de chaleur.

Sources des images : <http://www.polymaintenance.ch/fr/photos-detartrage.html>,
<http://detrigne.perso.sfr.fr/refroid2.html>, <http://www.sonatec.ch/index.php?id=232>,
http://www.dgarait.fr/etsgarait/?page_id=793

3. DÉVELOPPEMENT DE L'ENTARTRAGE

Le développement de l'entartrage comprend généralement les cinq étapes décrites ci-dessous. Ces étapes s'enchainent chronologiquement une après l'autre.

- a) La première étape, l'*initiation*, est associée au temps s'écoulant avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt sur une surface d'échange de chaleur propre. Cette étape se produit seulement lorsque les espèces chimiques responsables du tartre se trouvent en quantités dépassant la limite de leur solubilité. Les solutions deviennent sursaturées, ce qui est atteint de diverses façons, par exemple par l'évaporation, par le chauffage, par le refroidissement ou par l'ajout des agents réducteurs de la solubilité.

Le déclenchement de la nucléation peut avoir lieu spontanément ou de façon provoquée. Pendant la nucléation, les molécules de soluté s'associent pour former des agrégats. La stabilité de ces agrégats dépend de leur rayon critique. Si le rayon est inférieur au rayon critique, les agrégats se désintègrent rapidement. Si le rayon est supérieur au rayon critique, la croissance de l'agrégat se poursuit jusqu'à la formation d'un cristal.

- b) Le *transport des particules* vers la surface du dépôt est la deuxième étape. Avant de se déposer sur cette surface, les particules doivent être transportées à l'intérieur de la solution. En considérant que les particules ne se déposent pas que lorsqu'elles rentrent en contact avec une surface, cette étape devient critique. Ce transport est contrôlé par divers mécanismes (diffusion turbulente, impaction inertielle, champ de forces extérieures, etc.) et par d'autres facteurs tels que la taille des particules transportées, leur masse volumique et la viscosité de la solution.
- c) La troisième étape correspond à l'*adhésion des particules* sur la surface du dépôt déjà en place. Ces particules se maintiennent sur la surface grâce aux forces d'adhésion générées par l'attraction moléculaire (forces de Van der Waals), aux forces électriques ou aux forces capillaires.
- d) L'*entraînement des particules* déposées est considéré comme la quatrième étape. Il apparaît lorsque la force aérodynamique est supérieure aux forces d'adhésion d'une particule. L'entraînement se fait donc par érosion. Lorsque des agglomérats de particules sont entraînés, un phénomène d'écaillage est déclenché.
- e) La dernière étape est le *vieillissement du dépôt*, ce qui fait changer sa texture. À cette étape, le dépôt et l'entraînement des particules se produisent de manière simultanée. La consolidation ou l'écaillage de ce dépôt peut alors se confirmer.

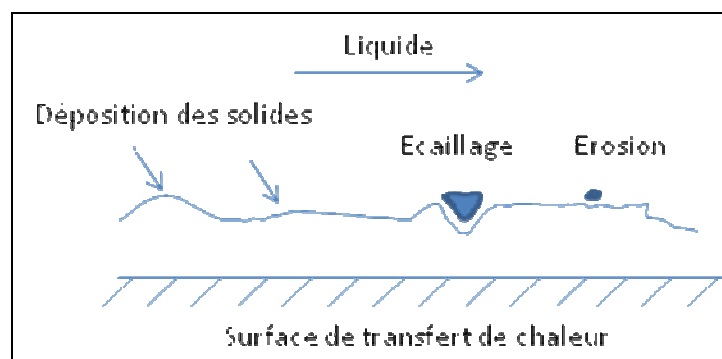


Figure 2 : Schéma représentant le développement de l'entartrage.

4. RÉSISTANCE THERMIQUE D'ENTARTRAGE

La couche de dépôt localisée sur la surface d'échange de chaleur crée une résistance thermique additionnelle s'opposant au transfert thermique. De façon générale, du point de vue du dimensionnement d'un échangeur de chaleur, cette résistance est traduite par un surplus de surface d'échange (facteur d'encrassement). Selon les conditions d'utilisation des échangeurs de chaleur et du type de tartre, le surplus de surface est estimé à partir de la résistance thermique globale de l'échangeur de chaleur propre et de la résistance thermique des dépôts.

Le facteur d'encrassement pour un nouvel échangeur de chaleur est égal à zéro et augmente avec le temps lorsque les dépôts solides s'accumuleront sur la surface de l'échangeur, et ce, jusqu'au son nettoyage. Il existe différentes démarches possibles pour faire l'estimation du surplus de surface d'échange. Il faut cependant, vérifier que le facteur d'encrassement reste dans les limites acceptables, soit 10 %, de 15 à 25 % ou de 30 à 50 %. Lorsque ce coefficient dépasse 50 %, il faut envisager l'utilisation de plusieurs échangeurs de chaleur ou des dispositifs de nettoyage en temps réel.

5. PRÉVENTION DE L'ENTARTRAGE

Des méthodes mécaniques ou chimiques de prévention de l'entartrage peuvent être utilisées pour améliorer de façon significative les performances des échangeurs de chaleur et permettre aussi d'augmenter le temps de service entre deux arrêts de maintenance.

Les techniques de prévention de l'entartrage utilisées pour les liquides sont bien adaptées pour des cas qui développent des dépôts mous et friables avec une résistance de réentraînement faible. Diverses techniques sont disponibles pour le nettoyage en temps réel de la surface des échangeurs de chaleur; par exemple le nettoyage à boules, à brosses et à ressorts et les systèmes à inversion de débit.

Pour éliminer ou minimiser l'entartrage lors du traitement de l'eau, différents traitements chimiques peuvent être envisagés tel que la décarbonatation à la chaux, sur résine ou à l'acide; l'adoucissement; la germination ou l'ensemencement, ainsi que l'utilisation d'inhibiteurs d'entartrage. La technique de prévention à utiliser dépend du type de dépôt et de la nature de la surface chaude.

Si l'entartrage n'est pas traité, il entraîne une baisse progressive du rendement des échangeurs de chaleur car il agit comme un isolant. Éventuellement, la composition du tartre pourrait causer

une surchauffe et un bris de l'équipement. En général, les dépôts peuvent affecter l'efficacité opérationnelle, produire des dommages aux équipements, déclencher des interruptions non-programmées et augmenter les dépenses associées au nettoyage. L'encrassement des échangeurs de chaleur induit un certain nombre d'effets indésirables ayant un coût économique ou environnemental non négligeable.

L'ENTARTRAGE DANS LE MILIEU ALIMENTAIRE

Le type d'entartrage est différent d'industrie en industrie et dépend de la composition minérale de la solution à traiter. Les tartres souvent observés dans l'industrie sont composés de carbonate de calcium, de sulfate de calcium, de sulfate de baryum, de silice, de fer et d'autres sels. Les problèmes d'entartrage préoccupent beaucoup d'industries utilisant de l'eau dans leurs procédés de transfert de chaleur. Quelques exemples de ces industries sont la pétrolière, l'agroalimentaire, la minière, la marine et de l'eau (Cho, Fan, & Choi, 1997).

Pour mieux comprendre le phénomène d'entartrage dans l'industrie acéricole, ainsi que les facteurs l'influençant, la problématique existante dans les industries de l'eau, sucrière et laitière est présentée dans cette section. De plus, quelques lignes de recherche actives dans ces industries sont résumées.

1. INDUSTRIE DE L'EAU

Une eau dure contient un excès de sels dissous, tel que le carbonate de calcium (calcaire) et les sels de magnésium. La concentration de ces sels est au-dessus de leur limite de saturation, ce qui rend l'eau instable.

Une eau trop dure peut avoir des inconvénients lors de son utilisation. Certains sels, en particulier le calcaire, peuvent se déposer, sous forme de tartre, sur les parois des conduites ou des chaudières. Lorsque de l'eau dure est mise en contact avec une surface d'échange de chaleur, l'entartrage a lieu très fréquemment. À ce point de contact chaud, l'eau peut devenir localement sursaturée, même si elle ne l'était pas au départ. Le niveau de sursaturation de l'eau est le facteur clé qui détermine la vitesse d'entartrage. Étant donné que la nucléation qui se déclenche dans l'eau est principalement de type hétérogène, n'importe quelle matière étrangère réduisant la tension interfaciale entre les solides et l'eau peut promouvoir la nucléation (Cho, Fan, & Choi, 1997).

Le tartre provenant de l'eau est principalement composé de carbonate de calcium. Le mécanisme de déposition est contrôlé par plusieurs variables qui affectent la solubilité des minéraux, tel quel la température de l'eau, la température de la surface de dépôt, la vitesse du

liquide, le pH et la pression. La solubilité du carbonate de calcium diminue lorsque la température, le pH et la pression augmentent.

Les deux formes de carbonate de calcium (CaCO_3) décrites ci-dessous peuvent se développer :

- a) La calcite est un carbonate de calcium qui est formée à la température ambiante (c'est-à-dire en-dessous de 30 °C). Elle est facilement détachable des surfaces avec un acide faible (par exemple, un acide chlorhydrique dilué), est moins adhérent que l'aragonite, a une forme de cristal hexagonale, a les groupes CO_3 orientés en suivant la même direction et a une densité spécifique de 2,71.
- b) L'aragonite est aussi un carbonate de calcium, mais elle est formée à haute température (au-dessus de 30 °C). Elle est difficile à détacher, a une forme de cristal orthorhombique, a les groupes CO_3 orientés en direction opposée et a une densité spécifique de 2,94. L'aragonite forme un dépôt plus dur et plus dense que la calcite, donc, c'est une forme de tartre plus adhérente et plus laborieuse à enlever (Cho, Fan, & Choi, 1997).

Les méthodes chimiques traditionnellement utilisées pour le contrôle de l'entartrage ou l'adoucissement d'eau sont énumérées ci-dessous :

- a) La pré-précipitation des ions formant le tartre avec la lime ou la soude;
- b) L'addition de réactifs empêchant la formation de tartre;
- c) Le remplacement des ions formant le tartre par des ions solubles (tel que le sodium, Na^+ , ou le potassium, K^+) en utilisant l'échange d'ions.

Bien que toutes ces méthodes soient efficaces, elles changent substantiellement la chimie de la solution et sont dispendieuses (Xing, Ma, Chen, Wu, & Wang, 2006).

La recherche dans le domaine de l'entartrage de l'eau a pour but de trouver des technologies alternatives moins onéreuses que les méthodes chimiques traditionnellement utilisées. Selon certains travaux, la technologie d'anti-tartrage électromagnétique a un bon potentiel pour cette application. En utilisant cette technologie, il est possible d'altérer la structure des cristaux formés et d'augmenter la résistance thermique à l'entartrage. Le principe d'opération physique et chimique de cette technologie n'est pas encore bien compris, mais il y a plusieurs études dédiées à le comprendre (Cho, Fan, & Choi, 1997; Xing, 2008; Xing, Ma, Chen, Wu, & Wang, 2006). Autre technologie qui a été utilisée est celle basée sur un champ ultrasonore. Un effet d'ajournement de l'entartrage du carbonate de calcium a été observé dans la présence d'un champ ultrasonore appliqué sur les surfaces des échangeurs de chaleur. Il a été conclu que le

taux de croissance des cristaux changeait lorsqu'un champ ultrasonore était utilisé, mais le mécanisme de formation, ainsi que la nature, la morphologie et la taille des cristaux formés n'étaient pas influencés par ce champ ultrasonore (Dalas, 2001).

2. INDUSTRIE SUCRIÈRE (SUCRE DE CANNE)

L'épuration et l'évaporation sont deux opérations dans la production de sucre de canne qui demandent une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur. Ces opérations permettent de retirer la majorité des impuretés du jus et de le concentrer. Durant ces deux étapes, le jus devient saturé en certains sels et minéraux. La cristallisation et la précipitation de ces composants mène à la formation du tartre sur les échangeurs de chaleur. Pour cette application, les particules en suspension sont des fibres provenant de l'extraction et des impuretés noires (ou « boues ») provenant des champs de sucre de cane (Mwaba, 2003).

L'entartrage des surfaces des évaporateurs mène à une diminution de leur conductivité thermique. Donc, pour maintenir la température du jus constante dans le procédé d'épuration et pour évaporer la quantité d'eau requise dans les évaporateurs, il faut augmenter la température de chauffage. Cette solution est seulement une solution temporaire car entraîne plus de nettoyage.

Dans cette industrie, un facteur d'encrassement d'environ 35 % est utilisé, ce qui diminue le débit de la solution à traiter et rend l'équipement plus onéreux. De plus, un débit réduit favorise la formation de plus de dépôt (Mwaba, 2003).

Le vesou sortant de l'extraction est composé de sucres et de composants non-sucrés. Les composants non-sucrés sont de la matière rugueuse et colloïdale en suspension, des protéines dissoutes et des sels minéraux. Parmi les sels minéraux, il y a les phosphates, les sulfates, les silicates et les acides ou les sels organiques comme les oxalates. Lors de l'étape d'épuration, le phosphate de calcium précipite dans la solution. Selon les travaux de Mwaba (2003), les composants qui influencent l'entartrage sont les silicates, les sulfates, les phosphates et le calcium. D'autres composants qui ont une influence secondaire sont les oxalates, le magnésium et l'oxyde de fer et d'aluminium.

La composition du tartre semble être différente selon l'origine de la canne à sucre. Ainsi, en Zambie, le composé dominant dans le tartre est le sulfate de calcium (CaSO_4) ou l'hydrosulfate de calcium ($\text{CaSO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Mwaba, 2003). En Australie, la silice (SiO_2) et les deux formes cristallines de l'oxalate de calcium (monohydrate et dihydrate) sont identifiés comme les

composants les plus importants du tartre (Yu, Sheikholeslami, & Doherty, 2002; 2003; 2005). Une étude effectuée au Trinidad suggère que les composants majoritaires du tartre sont le sulfate de calcium et la silice (Schmidt & Wiggins, 1954).

Les chercheurs australiens ont aussi découvert que l'oxalate de calcium monohydrate est très peu soluble dans l'eau. La solubilité de ce composant et de la silice (SiO_2) dans des solutions sucrées diminuent avec l'augmentation de la concentration de saccharose et avec la diminution de la température (Yu, Sheikholeslami, & Doherty, 2003). Il a été constaté que la composition du tartre varie selon le stage d'évaporation où il est formé. Des tartres composés de phosphate sont plus fréquents dans les premiers stages d'évaporation, tandis que les sels de silice et de calcium se déposent dans les derniers vaisseaux à cause des effets de température et de concentration durant l'évaporation de jus de canne (Yu, Sheikholeslami, & Doherty, 2005).

L'oxalate de calcium et la silice forment un tartre très dur qui est résistant aux méthodes de nettoyage conventionnelles (produits chimiques acides et basiques et effet mécanique). Les autres formes de tartre dans les évaporateurs utilisés dans l'industrie sucrière sont relativement faciles à retirer. L'acide éthylène-diamine-tétraacétique (EDTA), un agent de chélation, est souvent utilisé pour enlever efficacement l'oxalate de calcium des évaporateurs (Yu, Sheikholeslami, & Doherty, 2005).

Une multitude de travaux scientifiques se sont penché sur le processus d'entartrage observé dans l'industrie sucrière afin de comprendre son mécanisme et les facteurs qui ont un effet sur la vitesse ou la quantité d'entartrage. La modélisation de ce phénomène est aussi un sujet d'intérêt car elle permet de planifier les cycles de nettoyage. Parmi les études visant à comprendre le mécanisme de l'entartrage, plusieurs études sont centrées sur l'idée d'étudier l'effet couplé des deux composants majoritaires du tartre (silice et oxalate de calcium), ainsi que leurs interactions (Yu, Sheikholeslami, & Doherty, 2002; 2004). L'effet de la présence du saccharose sur la cinétique et la thermodynamique de la co-précipitation de l'oxalate de calcium et la silice a aussi été étudié (Yu, Sheikholeslami, & Doherty, 2003).

Une étude basée sur l'analyse numérique de l'entartrage a conclu que quand un flux de chaleur variable est utilisé pour calculer la résistance du tartre, le taux d'entartrage augmentait. Donc, l'utilisation d'un flux de chaleur constante sous-prédit le taux de croissance du tartre (Mwaba, 2003). L'effet des conditions thermo-hydraulique, tel que la surchauffe de surface, la vitesse du fluide et le sous-refroidissement du liquide, sur l'entartrage d'oxalate de calcium et de silice a aussi été étudié (Yu, Sheikholeslami, & Doherty, 2005).

La modélisation de l'entartrage est un outil pratique pour prédire quels facteurs auront un effet sur le taux de formation et la quantité d'entartrage. Cet outil permettrait aussi d'optimiser le calendrier de nettoyage des évaporateurs pour minimiser les coûts qui y sont associés. Plusieurs études ont été réalisées pour modéliser l'entartrage dans l'industrie du sucre de canne (Yu, Sheikholeslami, & Doherty, 2005; Smaili, Vassiliadis, & Wilson, 2002; Mwaba, 2003). Smaili et collaborateurs. (2002) ont développé un logiciel qui peut mettre à jour les modèles d'entartrage à partir de données de l'usine et ajuster le calendrier de nettoyage en conséquence.

Pour réduire la quantité et le taux d'entartrage, des études ont été réalisées dans le but de déterminer l'effet de différentes technologies sur l'atténuation de la production de tartre. Ces travaux portaient sur :

- a) l'ajout de petites particules de différentes compositions. En effet, l'ajout de particules à un système en cristallisation change la nucléation et le taux de croissance des cristaux. L'effet de ces particules dépend de plusieurs facteurs tels que la taille, la forme, le type de matériel, la concentration, la masse volumique et la qualité de la surface des particules étrangères. Dans plusieurs cas, la présence de particules réduit l'entartrage, par contre, un effet contraire a aussi été observé. Par exemple, le dépôt de particules de sulfate de calcium (CaSO_4) augmente le taux d'entartrage en créant des sites de nucléation supplémentaires pour la croissance des cristaux. Quelques autres particules peuvent fournir des surfaces alternatives pour la cristallisation, ce qui réduit le nombre de cristaux formés sur la surface d'échange de chaleur. Les particules ajoutées peuvent même déloger des cristaux de la surface par frottement ou réduire le transfert d'ions du liquide à la surface. Quand les particules sont ajoutées après que l'entartrage ait déjà commencé, le taux d'entartrage diminuait par un facteur de quatre. Ceci pourrait être dû à l'obstruction de sites de croissance ou à l'enlèvement de la couche déjà formée en l'affaiblissant (Mwaba, 2003).
- b) les caractéristiques de surface du matériel de construction de l'équipement. De bonnes pratiques de nettoyage peuvent considérablement retarder l'initiation de la cristallisation (Mwaba, 2003).
- c) l'ajout des produits chimiques tel que le polymère d'acide acrylique à différentes masses moléculaires. Les polymères de petites masses moléculaires solubles dans de l'eau affectent les cristaux des minéraux qui forment le tartre, ainsi que leurs taux de déposition. Les polymères d'acide acrylique et d'acide maléique sont fréquemment

utilisés pour contrôler la formation de tartre dans les évaporateurs. L'effet de la variation de la masse moléculaire et l'identité du groupe fonctionnel délimitant le polymère d'acide acrylique sur la formation d'oxalate de calcium dans une solution de jus de sucre synthétique a été étudié. Les deux facteurs ont joué un rôle sur l'efficacité de l'inhibition (Doherty, Fellows, Gorjian, Senogles, & Cheung, 2004).

- d) les systèmes d'antitartre ultrasonores. Une étude faite en Chine sur l'utilisation d'ondes ultrasonores pour réduire le tartre a eu des résultats très positifs. L'effet des divers paramètres sur la qualité du sucre blanc ont été examinés, par exemple, la viscosité du jus/sirop, l'intensité de l'évaporation, le coefficient de transfert de chaleur des évaporateurs, l'efficacité d'enlèvement du tartre, le temps nécessaire pour le nettoyage, l'utilisation de détergents chimiques et l'effet d'ultrasons. Les résultats montraient que la viscosité de solutions de sucre réduisait, que le coefficient de transfert de chaleur et l'intensité d'évaporation s'amélioraient et que le tartre était plus facilement retiré. Les détergents chimiques n'étaient plus nécessaires pour le nettoyage. Les ondes ultrasonores changeaient les caractéristiques physiques du tartre. Après le séchage, ce tartre était poussiéreux, doux et blanc plutôt que dense, dur et jaunâtre (Hu, Zheng, & Qiu, 2006). Une autre étude, effectuée aussi en Chine, a conclu que les ondes ultrasonores influençaient la forme cristallographique et la taille des cristaux. La diffusion d'ondes ultrasonores retardait et diminuait la croissance cristalline, réduisant ainsi la quantité de tartre (Lu, Xie, Yang, & Qiu, 2005).
- e) l'adoucissement du jus de canne en utilisant une technologie similaire à celle utilisée pour l'eau calcaire (échanges d'ions). Il a été observé une réduction de 50 % de la quantité de tartre formé lorsque le jus subissait un adoucissement avant d'être évaporé. Dans ce cas, la silice devenait le composant majeur du tartre au lieu du calcium ou du magnésium (Davis, Peacock, & Walthew, 1997).

3. INDUSTRIE LAITIÈRE

Le lait est traité avec un échangeur de chaleur pour prolonger sa durée de conservation et le rendre sans risque pour la consommation. L'entartrage des parois des échangeurs de chaleur est un des problèmes des plus importants dans l'industrie laitière. Tous les études réalisées pour l'application laitière concluent que le tartre déposé sur l'interface solide-liquide est composé de deux types de matières : les protéines dénaturées et le dépôt minéral (Ansari,

Sharma, & Datta, 2003; Morison & Tie, 2002; Changani, BalmarBeiny, & Fryer, 1997; Bansal & Chen, 2006; Jun & Puri, 2005).

Le premier type de tartre, les protéines, se forme à une température de 75 et 110 °C. Les dépôts sont blancs, doux, et spongieux (le film de lait), leur composition est de 50 à 70 % en protéines, de 30 à 40 % en minéraux et de 4 à 8 % en gras (Bansal & Chen, 2006). Les protéines du lactosérum, notamment le β -lactoglobulin, forment le tartre après une dénaturation et une aggrégation (Jun & Puri, 2005; Changani, BalmarBeiny, & Fryer, 1997).

Le deuxième type de tartre se développe quand la température est au-dessus de 110 °C. Les dépôts sont durs, compacts, avec une structure granuleuse et une couleur grise (la pierre de lait). La composition de ce type de tartre est de 70 à 80 % en minéraux (principalement le phosphate de calcium), de 15 à 20 % en protéines et de 4 à 8 % en gras (Bansal & Chen, 2006). Le phosphate de calcium, composant principal de la pierre de lait, est un sel à solubilité inverse, c'est-à-dire que sa solubilité diminue avec l'accroissement de la température (Morison & Tie, 2002). L'entartrage du phosphate de calcium est dû donc à sa sursaturation (Changani, BalmarBeiny, & Fryer, 1997; Morison et Tie, 2002). Tout prétraitement qui déstabilisera les minéraux dans la solution réduira alors probablement l'entartrage en gardant le précipité dans le liquide au lieu d'entartrer les surfaces de l'échangeur de chaleur.

Dans l'industrie laitière, plusieurs problèmes surviennent à cause de l'entartrage. Le premier est la réduction de l'efficacité du procédé, parce que le débit du liquide et le transfert de chaleur sont réduits. L'effet direct de l'entartrage est une diminution de la température de sortie du lait, ce qui génère un traitement de chaleur incomplet et résulte en une durée de conservation moins longue du produit (Nema & Datta, 2005). Puisque les dépôts peuvent entraîner une contamination, il faut aussi nettoyer fréquemment le système. Ce nettoyage nécessaire raccourcit le temps de fonctionnement et augmente les coûts (Ansari, Sharma, & Datta, 2003). Les coûts s'accumulent avec le besoin d'énergie supplémentaire, la productivité perdue, l'équipement supplémentaire, la main-d'œuvre, l'achat de produits chimiques, et l'impact écologique. Selon Bansal et Chen (2006), les coûts attribués à l'entartrage et au nettoyage de l'équipement correspond à environ 80 % des coûts de production dans l'industrie laitière.

Selon Morison et Tie (2002), les facteurs physiques qui minimisent l'entartrage sont un pH élevé (le phosphate de calcium est moins soluble à des pH élevés devenant complètement insoluble à un pH d'environ 7,3), un pré-chauffage plus intense, une concentration de citrate plus faible, et une température de surface plus basse. L'entartrage augmente quand la concentration de protéines est élevée. Bansal et Chen (2006) suggèrent qu'une augmentation du débit du liquide

et une réduction de la rugosité et de la mouillabilité de la surface diminuent aussi l'entartrage, mais que la présence microbienne a l'effet contraire. Le taux d'entartrage dépend aussi de la forme des échangeurs de chaleur, la présence de bulles d'air (la turbulence) et l'intensité de l'agitation (Jun & Puri, 2005).

Les lignes de recherche dans l'industrie laitière varient énormément, allant de l'étude de l'entartrage à l'aide des solutions modèle permettant de mimer le phénomène, à la modélisation de l'entartrage et à la recherche de technologies pour minimiser l'entartrage. Le développement des outils pour mesurer le tartre et évaluer le besoin de nettoyage, ainsi que l'établissement des pratiques de nettoyage efficaces ont aussi été étudiés.

De part sa nature, les caractéristiques du lactosérum varient beaucoup d'un jour à l'autre. C'est pour cela qu'une solution modèle a été développée pour imiter le lactosérum. Cette solution permet d'étudier l'entartrage minéral du lait d'une manière standard et reproductible (Morison & Tie, 2002).

Pour étudier l'entartrage, il faut aussi pouvoir mesurer la quantité ou l'épaisseur de tartre formé. Par contre, les dépôts de tartre ne sont généralement pas visibles de l'extérieur de l'équipement industriel et les dépôts peuvent être doux et fragiles, donc, l'épaisseur ne peut pas être précisément mesurée avec les instruments mécaniques conventionnels. Dans ce contexte, la surveillance de l'entartrage peut fournir de l'information utile pour des décisions opérationnelles dans les usines agroalimentaires tel que l'organisation des cycles de nettoyage des échangeurs de chaleur. Des mesures indirectes peuvent être effectuées tel que la mesure du taux de transfert de chaleur ou de la baisse de pression, mais des mesures directes seraient plus précises. Un groupe de chercheurs a développé une technique qui permet de mesurer in-situ l'épaisseur de dépôts sur une surface en utilisant la mesure de résistance électrique en temps réel (Chen, Li, Lin, & Ozkan, 2004). Un autre groupe a développé une technique acoustique non-intrusive utilisant des ondes de basse-fréquence pour détecter l'entartrage dans des échangeurs de chaleur à plaques (Merheb, Nassar, Nongaillard, Delaplace, & Leuliet, 2007).

De nos jours, pour réduire la quantité d'entartrage sur les surfaces des échangeurs de chaleur, les recherches proposent de modifier plutôt les propriétés des surfaces en acier inoxydable. Une raison pour préférer ce choix est que la modification, en ajoutant des produits chimiques, de la composition des solutions traitées dans le but de réduire l'entartrage peut être efficace, mais n'est pas autorisée pour la plupart des applications agroalimentaires. Une multitude de surfaces basées sur des changements à l'acier inoxydable et caractérisées selon leur énergie de surface, leur composition chimique, leur rugosité et leur topographie ont été étudiés. La

surface la plus prometteuse pour les dépôts non-microbiologiques (le phosphate de calcium, β -lactoglobulin) était le nickel-phosphore-polytétrafluoroéthylène (Ni-P-PTFE) puisqu'elle a retenu le moins de dépôts et était la plus facile à nettoyer. La surface de carbure de titane (TiC) était la plus convenable pour des dépôts microbiologiques (contamination) puisqu'elle retenait le moins de spores après le processus de nettoyage. Puisque dans un échangeur de chaleur, les températures atteignent généralement plus de 110 °C, la fraction principale du dépôt est non biologique. La surface Ni-P-PTFE est donc la surface préférable dans ce cas (Rosmaninho, et al., 2007). En 2008, le même groupe a étudié un autre type de surface en acier inoxydable modifiée, cette fois-ci revêtue d'une couche de nitrure de titane (TiN) (Rosmaninho, Rizzo, Muller-Steinhagen, & Melo, 2008).

Beaucoup de modèles, hydrodynamiques et thermodynamiques, ont été étudiés pour modéliser l'entartrage dans l'industrie agroalimentaire, notamment du lait. Les modèles incluent des modèles numériques, analytiques et empiriques, 1D, 2D et 3D, et des attributs transitoires, y compris le transfert de masse ou les réactions chimiques et les phases de protéines. Un modèle satisfaisant peut optimiser le processus pour obtenir les meilleures conditions d'opération qui minimisent les effets secondaires indésirables associés au chauffage, comme dans ce cas-ci, l'entartrage. Le développement de ce modèle exigerait une collaboration de plusieurs domaines indispensables qui incluent les théorèmes chimiques et physiques des composants du lait, les théories mathématiques des systèmes et processus dynamiques et les théories d'ingénierie de conception de système et d'optimisation. Les modèles d'entartrage, sous les hypothèses spécifiées, peuvent avoir la capacité prédictive sur une grande variété de conditions d'opération et peuvent être utilisés pour les applications en temps réel dans les usines agroalimentaires. De plus, la prédiction précise de la dynamique d'entartrage permettrait d'établir des stratégies de production et de conception optimales pour les échangeurs de chaleur (Jun & Puri, 2005; Nema & Datta, 2005; Jun & Puri, 2006; Ansari, Sharma, & Datta, 2003; Sahoo, Ansari, & Datta, 2005; Grijspeerdt, Mortier, De Block, & Van Renterghem, 2004).

Il existe aussi de la recherche sur les méthodes de lavage du tartre. Le lavage s'effectue généralement en deux étapes : les protéines sont enlevées par une solution caustique, typiquement l'hydroxyde de sodium, tandis que les minéraux sont dissous par un acide, tel que l'acide nitrique. Peu d'études sur l'interaction et l'ordre des étapes acide et caustique à suivre ont été faites. Une étude suggère que l'utilisation de l'acide avant le caustique augmente l'efficacité de nettoyage par un facteur de 2,5. Le traitement acide extrait, par lessivage, le calcium qui est contenu dans les dépôts. (Morison & Larsen, 2005).

LE CAS ACERICOLE

1. MÉCANISME DE FORMATION DU SABLE DE SUCRE

Quand une solution contient plus de solides dissous que ceux que l'équilibre de saturation permet, il est dit être sursaturé. L'augmentation de la teneur en sucre au cours de l'évaporation diminue la solubilité des autres composants de la sève d'érable due à la non-disponibilité de l'eau. Les molécules hydrophiles de saccharose attirent les molécules d'eau, favorisant les interactions saccharose-eau au détriment des interactions entre les autres composants et l'eau. Les limites de solubilité de ces autres composants sont donc abaissées (Bensouissi, 2007). Vers la fin de l'évaporation, l'équilibre de saturation est dépassé, ce qui rend la solution sursaturée en certains minéraux. Pour certains composants qui ont une solubilité inverse, l'augmentation de la température ou l'augmentation locale de la température sur les surfaces de l'évaporateur, peut aussi contribuer à la sursaturation. Cette sursaturation entraîne la précipitation d'une matière insoluble qui se manifeste des deux façons ci-dessous (Warren, 1911; Allard & Belzile, 2004) :

- a) La déposition de la pierre de sucre (« *scale* ») sur les surfaces internes des casseroles d'évaporation, ce qui génère l'entartrage de la surface des casseroles,
- b) La mise en suspension de la rache qui est habituellement enlevée après l'évaporation par filtration.

Le nom « *sugar sand* », ou sable de sucre, est généralement utilisé pour parler des deux formes de cette matière insoluble, mais parfois, il fait allusion seulement à la rache. Selon Warren (1911), la pierre de sucre et la rache apparaissent seulement quand la sève d'érable est presque complètement transformée en sirop, à une température de 102 – 103 °C.

La théorie suggère qu'il y a deux mécanismes qui gouvernent la formation de cette matière insoluble : la cristallisation et le dépôt de particules en suspension. La cristallisation comprend les trois étapes ci-dessous :

- a) L'atteinte de la *sursaturation*. La solution devient sursaturée quand elle contient plus de solides dissous que ceux que l'équilibre de saturation permet. Pour ré-établir l'équilibre, l'excès de solides dissous doit être ôté.
- b) La *nucléation* (formation de noyaux ou germes cristallins). La nucléation est la formation de particules minuscules stables pouvant exister dans la nouvelle phase. Si la formation

des particules est spontanée, la nucléation est de type homogène. La nucléation hétérogène se réfère au processus par lequel la formation est induite artificiellement. L'agent d'induction pourrait être des particules étrangères qui se trouvent soit dans la solution, soit sur les surfaces en contact avec la solution. Le taux de nucléation est gouverné par le degré de sursaturation, la température et les propriétés du milieu tel que la tension de surface et le volume moléculaire.

c) La *croissance* des cristaux.

2. DESCRIPTION PHYSIQUE DU SABLE DE SUCRE

L'apparence de la pierre de sucre et de la râche peut être très variée soit une matière blanche, poudreuse et cristalline soit une matière brune ou noir, huileuse, visqueuse et collante (Davis, HacsKaylo, Gallander, & Quinn, 1962; Sipple, 1981). Des images du sable de sucre (pierre de sucre et râche) sont présentées à la Figure 3. La Figure 3a représente la pierre de sucre récupérée directement de la surface d'une casserole à plis. Les Figures 3b et 3c représentent plutôt de la râche récupérée après l'opération de filtration. Ces deux formes de râche contiennent donc de la terre de diatomée. La râche présentée à la Figure 3b a subi un séchage après la filtration.

La râche brute est formée majoritairement d'un matériel amorphe, avec une petite quantité de cristaux rhomboïdaux et cubiques. L'analyse microscopique de la râche a montré que la plupart des cristaux sont de forme rhomboïdale, opaque ou transparente, ayant une taille moyenne de 20 μm x 2 μm . Le restant des cristaux sont cubiques avec une taille moyenne de 5 μm x 5 μm (Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1967). La géométrie des cristaux est illustrée à la Figure 4.

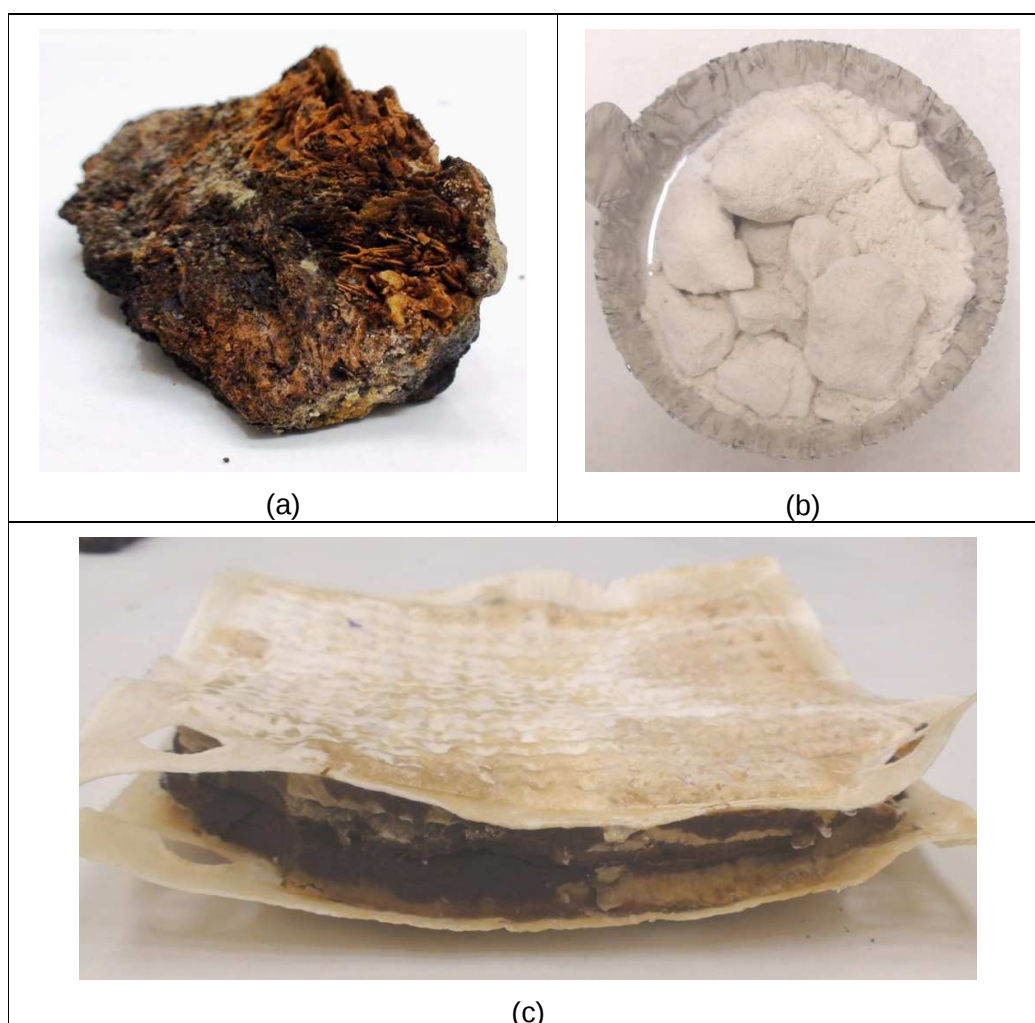


Figure 3 : Différentes formes du sable de sucre : a) pierre de sucre récupérée des surfaces d'un évaporateur, b) râche blanche et granuleuse récupérée et séchée après une opération de filtration (contient de la terre de diatomée) et c) râche brunâtre et collante récupérée du filtre-pressé (contient de la terre de diatomée).

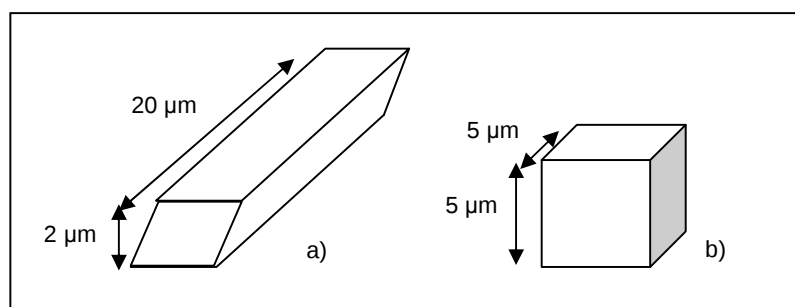


Figure 4 : Granulométrie des cristaux contenus dans la râche : a) cristaux rhomboïdes et b) cristaux cubiques.

Certaines études sur le sable de sucre effectuées pendant les 100 dernières années sont survolées dans cette section. Warren (1911) suggère que de 16 à 25 livres de r che sont obtenues à partir d'une masse de sirop d'érable produit d'environ 1 000  rables à sucre au cours d'une saison. Une autre étude propose que la quantité de pierre et de r che varie énormément d'une saison à une autre, ainsi qu'au cours d'une même saison pouvant aller de 0 à 2,63 % du sirop produit (Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1967). Par exemple, pour une production de 100 livres de sirop brut (non-filtré) jusqu'à 2,63 livres de r che peuvent être quantifiées. Sipple (1981), intervenant en acériculture avec plus de 40 ans d'expérience, suggère que la façon de récolter le sable de sucre et les manipulations spécifiques effectuées lors de la production pour contrer l'entartrage (par exemple, l'inversement des casseroles à fond plat) contribuent à fausser les résultats de la quantification de cette matière insoluble. Il conclut qu'il y a trop de variables pour pouvoir quantifier de façon standard et précise le volume de pierre et de r che produit pour des fins de comparaison.

La définition du sable de sucre utilisée dans chaque étude est différente pouvant se référer à la r che, à la pierre de sucre, ou à l'ensemble des deux. La quantification standard du sable de sucre est donc encore difficile à faire. La quantité et la forme que prend cette matière insoluble, r che ou pierre, varient énormément d'érablière en érablière, de saison en saison, et même de journée en journée pour une même  rabli re (Heiligmann, Koelling, & Perkins, 2006; Perkins & van den Berg, 2009).

La production de sable de sucre est liée à la température élevée atteinte dans l'évaporateur et à la haute teneur en sucre dans la solution. De façon générale, la pierre de sucre a donc une tendance à se retrouver dans les casseroles à fond plat où les conditions sont plus favorables à sa formation. De nos jours, la pierre de sucre est observée de plus en plus dans les casseroles à plis, ce qui est probablement dû à l'utilisation de concentrés de sève d'érable ayant une teneur en sucre élevée (> 8  Brix). En effet, les conditions propices au déclenchement du processus de formation de la pierre de sucre sont retrouvées plus tôt dans le procédé (haute teneur en sucre et température élevée). La vitesse à laquelle le sable de sucre se forme devient également plus rapide quand la teneur en sucre du concentré de sève d'érable est plus élevée à l'entrée de l'évaporateur (Heiligmann, Koelling, & Perkins, 2006).

3. LES FACTEURS INFLUENÇANT LA FORMATION DU SABLE DE SUCRE

Plusieurs études ont été effectuées pour déterminer les facteurs qui peuvent influencer la production de pierre de sucre, tel que les propriétés de la sève d'érable, les paramètres de

procédé, l'emplacement de l'érablière le développement microbien. Un survol de ces études est présenté dans cette section. Dans le cas où les études ont été réalisées dans un domaine autre que l'acériculture, une analogie est faite entre la solution étudiée et la sève d'érable tout en référant l'étude.

3.1 Propriétés de la solution

Certaines propriétés de la sève d'érable peuvent altérer la solubilité des minéraux et de ses autres composants influençant ainsi la production de la pierre de sucre, par exemple le pH et la température. La température de la solution est une des conditions de procédé ayant le plus d'effet sur la formation du sable de sucre (Cho, Fan, & Choi, 1997). En générale, une augmentation de la température est liée à une augmentation de la solubilité des composants, mais plusieurs sels minéraux ont une solubilité inverse, c'est-à-dire que leur solubilité diminue avec l'accroissement de la température. Des valeurs de pH différentes pour des sèves d'érable ayant une composition similaire peuvent aussi altérer la solubilité des composants de la sève d'érable et donc déplacer le phénomène de production de sable de sucre (Troup & Richardson, 1978).

3.2 Conditions de procédé

Les paramètres de procédé qui peuvent avoir un effet sur la production de pierre de sucre sont le temps et la température de chauffage, le débit et l'agitation de la sève d'érable, la température de la surface d'échange de chaleur, le type de matériel de construction de cette surface et son état (Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1967; Troup & Richardson, 1978; Cho, Fan, & Choi, 1997; Ling & Lund, 1978). Les caractéristiques de transfert de chaleur et de masse du système sont déterminées par le débit de la sève d'érable. Le débit devrait donc affecter le taux d'entartrage des casseroles. Par contre, il a été trouvé qu'au delà d'un débit maximal, une augmentation dans le mouvement du liquide ne peut pas augmenter significativement le taux de nucléation et ainsi, accroître le dépôt sur les surfaces d'échange de chaleur (Troup & Richardson, 1978). Le type et l'état du matériel de construction de l'évaporateur influencent le taux d'entartrage puisqu'une surface rugueuse a une plus grande tendance à promouvoir la nucléation qu'une surface lisse (Troup & Richardson, 1978).

3.3 Installations forêt

L'emplacement et le type d'érablière pourraient aussi avoir un effet sur la production de pierre de sucre. Ces facteurs pourraient être associés à la disponibilité du calcium dans les sols ou aux conditions climatiques (température et précipitations). Une étude effectuée par Davis et collaborateurs (1962) suggère qu'une érablière orientée vers le nord produit significativement plus de sable de sucre qu'une érablière orientée vers le sud. Aussi, une érablière en altitude élevée produit plus de sable de sucre qu'une érablière localisée plus près du niveau de la mer. Aucune différence n'a été détectée entre les différentes strates du sol (Davis, HacsKaylo, Gallander, & Quinn, 1962). Davis et collaborateurs (1962) suggèrent que l'espèce d'érable a un effet sur la quantité de pierre de sucre formée. En 1967, ce même groupe a publié une autre étude qui suggère des résultats un peu différents. Cette fois-ci, un effet significatif sur la formation de sable de sucre a été déterminé pour les interactions entre l'orientation et l'altitude, la strate du sol et l'orientation et la strate du sol et l'altitude. De plus, une faible quantité de sable de sucre était obtenue pour des érablières orientées vers le sud ou l'ouest à une altitude relativement basse. De même que l'étude de 1962, les chercheurs ont trouvé que les strates du sol ne jouent pas un rôle très important, mais par contre, la composition du sol (concentration de calcium), l'humidité du sol, et le taux d'absorption de calcium par le système de racines de l'arbre peuvent influencer la formation de pierre de sucre. Il semblerait que l'absorption du calcium est associée avec la température du sol, une température élevée mènerait à une grande absorption (Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1967).

D'un autre point de vue, Sipple (1981) suggère que la quantité de sable de sucre formée n'a aucun lien avec la strate du sol, l'altitude, l'orientation ou n'importe quel autre facteur associé à l'installation forestière. Ses observations sont basées sur deux productions à partir d'une même sève d'érable, dont une partie était fraîche et l'autre avait attendu deux jours avant l'évaporation. Pour ces deux expériences, il a observé différents types de sable de sucre se développer. La sève d'érable fraîche produisait du sable de sucre blanc et rugueux en forme de râche, tandis que la sève d'érable vieillie a laissée une matière ressemblant au goudron dans les surfaces de l'évaporateur. Il conclut donc que c'est la présence microbienne qui a un effet sur la forme de sable de sucre produit. Une présence microbienne plus élevée mènerait donc à la production de pierre de sucre au lieu de râche. Cette observation pourrait être aussi liée à l'observation faite à plusieurs reprises quant à l'augmentation de la pierre de sucre avec l'avancement de la saison (Davis, HacsKaylo, Gallander, & Quinn, 1962; Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1967). Au cours de la saison de sucre, la température ambiante augmente, ce qui entraîne une présence microbienne plus forte. Si la présence microbienne est liée à la

formation de pierre de sucre, cela expliquerait, à première vue, l'augmentation de la quantité de cette matière au cours de la saison.

4. L'EFFET DE LA PRODUCTION DE SABLE DE SUCRE SUR L'ÉQUIPEMENT ET LE PRODUIT FINI

La composition et le mécanisme de formation de la pierre de sucre sont encore méconnus, mais l'effet de l'accumulation de cette matière insoluble sur les surfaces des évaporateurs acéricoles est bien connu. Les effets sont en partie dus à la composition chimique de la pierre et de la râche, mais aussi à la forme physique de la pierre de sucre collée à la surface des casseroles et de la râche en suspension dans le sirop. Le besoin de filtration et de nettoyage entraîne également d'autres conséquences.

Selon la recherche de Gallander et collaborateurs (1967), 53 % (m/m) de la matière insoluble formée lors de l'évaporation de la sève d'érable correspond au sucre. Il semblerait que la présence du sucre dans le sable de sucre entraînerait une perte moyenne d'environ 1,5 % de la quantité de sirop produit dans chaque lot produit. Par exemple, si 1 000 L de concentré de sève d'érable à 8 °Brix sont évaporés, seulement 93 L de sirop à 66 °Brix seraient produits au lieu de 94,4 L théoriquement possible. Cela indique une perte de rendement de 1,4 L de sirop. La perte de rendement de sirop pourrait atteindre dans certains cas jusqu'à 10 %. Il faut noter aussi que parmi les composants du sable de sucre, il y a des minéraux et des acides organiques, qui représentent des éléments de haute valeur ajoutée. Bien que la perte de ces éléments ne soit pas bien documentée, elle pourrait dans certains cas diminuer la valeur commerciale du sirop d'érable produit.

Le dépôt de pierre de sucre qui entartre les parois intérieures des casseroles cause une réduction de l'efficacité énergétique de l'évaporateur car il diminue la transmission de chaleur à la solution en ébullition. En effet, la conductivité thermique des résidus est très petite en comparaison avec celle de l'acier inoxydable. Cette différence entraîne ainsi une diminution du coefficient de transfert de chaleur en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de la pierre de sucre (Gallander, Hacskeylo, Gould, & Willits, 1967). À titre d'exemple, les conductivités thermiques de certains composants faisant partie du tartre obtenu dans plusieurs industries sont présentées au **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, ainsi que la conductivité thermique de l'acier inoxydable (Mwaba, 2003). En effet, la formation d'une couche de tartre de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur peut diviser le coefficient de transfert thermique par deux et dans certains cas par trois (Bensouissi, 2007).

Tableau 1 : Conductivité thermique des composants du tartre et de l'acier inoxydable.

<i>Matériel</i>	<i>Conductivité thermique (W/m K)</i>
Acier inoxydable	12 – 45
Carbonate de calcium	0,9 – 2,9
Sulfate de calcium	1,1 – 2,3
Phosphate de calcium	2,6
Phosphate de magnésium	2,3

Par ailleurs, les casseroles pourraient être endommagées en raison des points chauds développés localement autour du dépôt (Heiligmann, Koelling, & Perkins, 2006). L'accumulation de chaleur dans la tôle fait en sorte qu'elle se brûle et se déforme. Dans des cas extrêmes, il peut même y avoir rupture de joints de soudure (Allard & Belzile, 2004). La pierre de sucre a aussi tendance à rendre plus foncé le sirop entraînant ainsi une diminution de la classe de couleur. Cette diminution est due aux variations de température qui entraînent une déformation différentielle du métal et du dépôt provoquant le décollement partiel de la plaque de pierre de sucre. Une petite quantité de sirop se glisse alors entre la tôle et les sections partiellement décollées. Ce sirop « brûlé » ou « caramélisé » donne une couleur plus foncée et une saveur âcre ou fortement caramélisé au lot de sirop produit (Gallander, Hacskaylo, Gould, & Willits, 1967; Allard & Belzile, 2004; Heiligmann, Koelling, & Perkins, 2006).

La râche qui reste en suspension dans le sirop doit être filtrée avant la vente commerciale du sirop, autrement elle provoquera un aspect nuageux, une texture graveleuse et possiblement des problèmes digestifs (Heiligmann, Koelling, & Perkins, 2006). Parce qu'elle est formée d'une grande quantité de petites particules, la râche a tendance à boucher les vannes et le tuyau de sortie du sirop d'érable, et à colmater les filtres. L'étape de filtration, nécessaire pour atteindre le standard du sirop d'érable, peut coûter cher et être laborieuse majoritairement à cause du colmatage (Gallander, Hacskaylo, Gould, & Willits, 1967). Le colmatage du filtre-presse avec la râche génère une plus grande demande au niveau du nettoyage de cet équipement. Ce démontage peut en conséquence apporter un risque de perte de produit ainsi qu'un risque de contamination du sirop d'érable par des mauvaises manipulations. Sipple (1981) suggère que la râche peut jouer un rôle similaire à la terre de diatomée en formant un lit poreux qui aide la filtration du sirop.

Pour rétablir les conditions normales de production dans l'évaporateur, les casseroles, particulièrement les casseroles à fond plat, ont besoin de subir un lavage périodique et fréquent. Ce nettoyage utilise en général des produits chimiques acides, ainsi que du frottement profond de l'équipement. Cela entraîne des coûts importants d'achat de produits chimiques, de main d'œuvre pour le lavage et d'arrêts du procédé, puisqu'il y a une perte de production de sirop d'érable quand l'évaporateur n'est pas en marche. Les produits chimiques acides utilisés pour dissoudre et enlever la pierre de sucre peuvent aussi raccourcir la durée de vie de l'équipement (Lu, Xie, Yang, & Qiu, 2005).

5. COMPOSITION CHIMIQUE DU SABLE DE SUCRE

Toutes les recherches menées à date concluent que le composant principal du sable de sucre est le malate de calcium (Heiligmann, Koelling, & Perkins, 2006; Warren, 1911; Snell & Lochhead, 1914; Davis, Gallander, Hacskeylo, Gould, & Willits, 1962; Sipple, 1981; Gallander, Hacskeylo, Gould, & Willits, 1967; Nelson, 1928). Par contre, la composition exacte du sable de sucre n'est pas bien établie car elle semble varier avec chaque lot de sirop produit. Cette matière insoluble est composée de sucre (saccharose et sucres invertis), ainsi que de sels minéraux formés à partir d'acide malique ($C_4H_6O_5$) qui est le principal acide organique de la sève d'érable et de minéraux tel que le calcium (Ca), le magnésium (Mg), et la silice (SiO_2). D'autres composants moins présents sont le potassium (K), le manganèse (Mn), le phosphore (P), le fer (Fe), ainsi qu'une multitude d'acides organiques autres que l'acide malique. Une compilation des études sur la composition du sable de sucre est présentée au Tableau 2. La différence entre les chiffres présentés dans ce tableau réside dans le type de sable de sucre utilisé pour l'étude, le traitement effectué sur le sable de sucre avant l'analyse, le type et la précision des analyses et le nombre d'échantillons utilisés.

Il semblerait que dans tous les travaux, seulement la râche a été quantifiée. La pierre de sucre n'est pas donc considérée dans ces études. Le traitement de la râche avant l'analyse chimique était différente dans chaque étude. Dans plusieurs études, après la récolte de la râche à l'aide de la filtration, elle a été lavée à l'eau chaude pour retirer le sucre restant dans les matières insolubles avant l'analyse chimique (Warren, 1911; Snell & Lochhead, 1914). Ce lavage était suivi par un séchage de la râche visant à enlever l'eau. Par contre, il est observé que le lavage de la râche retire invariablement du calcium avec le sucre (Snell & Lochhead, 1914).

Tableau 2 : Composition du sable de sucre selon différents travaux.

Composant	Lavé et séché (sans sucre) <i>Warren, 1911</i>	Lavé et séché (sans sucre) <i>Snell & Lockhead, 1914</i>	Séché <i>Davis et al., 1962b</i>	Séché et ajusté (sans sucre) <i>Davis et al., 1962b</i>
Quantité de pierre de sucre (dans un lot)			0,05 – 1,42 % (matière sèche)	0,05 – 1,42 % (matière sèche)
Calcium (Ca)	17,16 %		0,61 – 10,91 %	3,15 – 18,57 %
Potassium (K)			0,146 – 0,380 %	0,220 – 1,473 %
Magnésium (Mg)	0,03 %	Petite quantité	0,011 – 0,190 %	0,048 – 0,468 %
Manganèse (Mn)		Petite quantité	0,06 – 0,29 %	0,205 – 1,064 %
Phosphore (P)		Petite quantité	0,03 – 1,18 %	0,103 – 2,906 %
Fer (Fe)		Trace	38 – 1250 ppm	131 – 4647 ppm
Oxyde Ferrique (Fe ₂ O ₃)	0,39 %			
Cuivre (Cu)			7 – 143 ppm	24 – 575 ppm
Bore (B)			3,4 – 23 ppm	11 – 57 ppm
Molybdène (Mo)			0,17 – 2,46 ppm	0,5 – 8,2 ppm
Silice (SiO ₂)	7,74 %	6 – 18,5 %		
Acide libre			0,07 – 0,37 %	0,29 – 1,12 %
Acide malique	51,48 %		0,76 – 38,87 %	3,93 – 54,91 %
Acide phosphorique	0,05 %			
Acides organique autre que l'acide malique			0,08 – 2,62 %	0,26 – 18,27 %
Matière organique inconnue	2,35 %			
Malate de calcium		65 – 80 %	1,30 – 49,41 %	6,72 – 74,76 %
Sucres totaux (en équivalent saccharose)			33,90 – 85,74 %	0 %
Saccharose	3,46 %			
Sucres invertis	2,31 %			
Dioxyde de carbone	0,66 %			
Humidité	2,60 %			
Matière soluble dans l'éther	0,37 %			
Matière non-déterminée	11,40 %	10 – 17 %	6,94 – 34,16 %	20,56 – 88,94 %

Une étude préliminaire, non-publiée, de Davis et Gallander (1959) a également conclu que le lavage pourrait dissoudre et donc enlever plusieurs des composants de la r che. C'est pourquoi les échantillons utilisés en 1962 par Davis et collaborateurs n'ont pas subi de lavage avant l'analyse chimique des composants. Un ajustement théorique a été cependant fait sur la composition de la r che afin de prendre en compte la teneur en sucre (Davis, Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1962). La dernière colonne du Tableau 2 montre les résultats ajustés tandis que l'avant dernière colonne montre les résultats de la r che brute.

La première étude de sable de sucre publiée, en 1899, par Huston et Bryan suggère que la r che est composée de 33,75 % de malate de calcium (12,89 % de calcium et 20,86 % d'acide malique) tandis que l'étude réalisée en 1911 par Warren et collaborateurs suggère qu'il y a 68,84 % de malate de calcium dans la r che.   première vue, il y a une grande différence entre les résultats de ces deux études. Cependant, la première étude se réfère plutôt à la r che brute qui n'est pas lavée et contient donc une grande teneur en sucre. En effet, la r che brute contient entre 4 et 85 % de sucre, avec une moyenne de 53 % (m/m) (Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1967). Les premières études donnent aussi des intervalles de composition étroits tandis que les études qui suivent dans le temps donnent plutôt des grands intervalles possibles pour chaque élément puisque la composition de la r che a tendance à changer de jour en jour pendant la saison, de producteur en producteur, et d'année en année. Ces intervalles pourraient refléter la composition de la sève d' rable. Les larges intervalles sont aussi en partie dus au plus grand nombre d'échantillons analysés (Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1967).

Le pH de la r che est entre 6,3 et 7,2 (Davis, HacsKaylo, Gallander, Gould, & Willits, 1962), ce qui représente un pH légèrement acide sur l'échelle de pH. Une étude qui s'est concentrée seulement sur les acides organiques contenus dans cette matière, suggère que les acides malique, formique, acétique, fumarique, succinique et citrique sont tous présents dans la r che du sirop d' rable. Des traces d'acide tartrique et tricarballoylique ont aussi été identifiées, ainsi qu'un acide inconnu (Nelson, 1928).

La présence de certains éléments dans la sève d'érable peut augmenter la quantité de sable de sucre produite. Pour identifier quels composants peuvent augmenter la quantité de ce dépôt, des coefficients de corrélation sont calculés entre la concentration de chaque composant dans la r che et la quantité total de r che produite dans le lot. Un lien direct a été trouvé entre la quantité de r che formée et la quantité de calcium et d'acide malique présente dans la r che. C'est-à-dire que quand la quantité de calcium et d'acide malique était plus élevé dans la r che,

il y avait aussi plus de r che produite dans le lot (Davis, HacsKaylo, Gallander, & Quinn, 1962; Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1967). La composition en calcium joue aussi un rôle significatif dans la variation de la couleur de la r che (Davis, HacsKaylo, Gallander, & Quinn, 1962). Heiligmann et collaborateurs (2006) font remarquer que la r che peut contenir de très hauts niveaux de plomb, donc une bonne filtration est nécessaire pour maintenir des niveaux de plomb conformes aux normes de qualité du sirop d r ble.

La réaction chimique principale qui est responsable de la formation de la pierre de sucre et de la r che est donc celle entre deux matières ioniques solubles, le calcium et l'acide malique, qui ensemble forment le malate de calcium. Celui-ci devient moins soluble avec l'augmentation de la température et l'augmentation de la concentration en saccharose avec l'avancement de l'évaporation de la sève d r ble (Willits, 1958). Il semblerait que la disponibilité de l'acide malique est directement associée au métabolisme de l'arbre (Bloor, 1912).

Il est bien connu que lorsque les bactéries ont la chance d'agir sur le sucre dans la sève d r ble, ils le transforment en sucre inverti et un sirop plus foncé est produit. Un raisonnement plausible est que ces mêmes bactéries consomment en partie le malate de calcium et produisent ainsi un résidu gluant, la pierre de sucre (Sipple, 1981). Ceci revient à dire que la forme de sable de sucre, qui rend les casseroles difficiles à laver et qui diminue l'efficacité de l'évaporation, peut être évitée si le développement bactérien est contrôlé.

LE CONTROLE DE LA FORMATION DU TARTRE

Actuellement, le phénomène d'entartrage est présent dans un grand nombre d'érablières. Peu importe la présence ou absence des facteurs qui déclenchent ou influencent sa formation, le sable de sucre est aléatoirement formé lors de l'évaporation de la sève d'érable. Des mesures doivent être prises dans les érablières pour pallier à ce problème. De façon générale, ces mesures permettent de ralentir la formation de sable de sucre, de changer sa nature (râche au lieu de pierre de sucre), d'enlever les ions responsables de la formation de ce tartre ou tout simplement de faire la prévention avec de cycles de nettoyage préventif des casseroles entartrées. Par contre, puisqu'il s'agit d'un phénomène variable d'une érablière à l'autre et d'une journée à l'autre, les techniques ou les produits utilisés doivent être adaptés à cette contrainte. Cette section présente les différentes technologies disponibles dans toutes les industries qui font face au problème de l'entartrage.

1. MÉTHODES POUR RALENTIR L'ENTARTRAGE DES CASSEROLES

De nos jours, il n'existe aucune technique efficace contre la déposition de pierre de sucre sur la surface des casseroles. Les efforts sont donc mis à réduire la vitesse d'accumulation de ces dépôts à des endroits critiques par une conception particulière de l'évaporateur, et surtout en évitant de surchauffer l'équipement (Allard & Belzile, 2004). L'utilisation d'un inverseur de coulée qui change périodiquement la direction de l'écoulement dans les casseroles à fond plat aide, dans certains cas, à minimiser le dépôt de pierre de sucre dans ces casseroles.

L'inverseur de coulée peut être intégré dans la configuration de la casserole à fond plat (Figure 5). Dans ce cas, le sirop sort de l'autre côté de l'évaporateur lorsque l'inversement a lieu. L'inverseur de coulée peut aussi simplement être un tuyau pour ramener la solution sortant des casseroles à plis à la casserole à fond plat la plus éloignée plutôt qu'à celle la plus proche. L'efficacité d'une telle configuration est basée sur la dissolution de la pierre de sucre. En effet, lorsque la coulée de solution est inversée dans la casserole, une solution non saturée passe au-dessus de l'accumulation de pierre de sucre tout en la diluant et la détachant de la casserole. Grâce à la faible viscosité et teneur en sucre de la solution sortant de la casserole à plis, la dissolution est assurée (Heiligmann, Koelling, & Perkins, 2006).

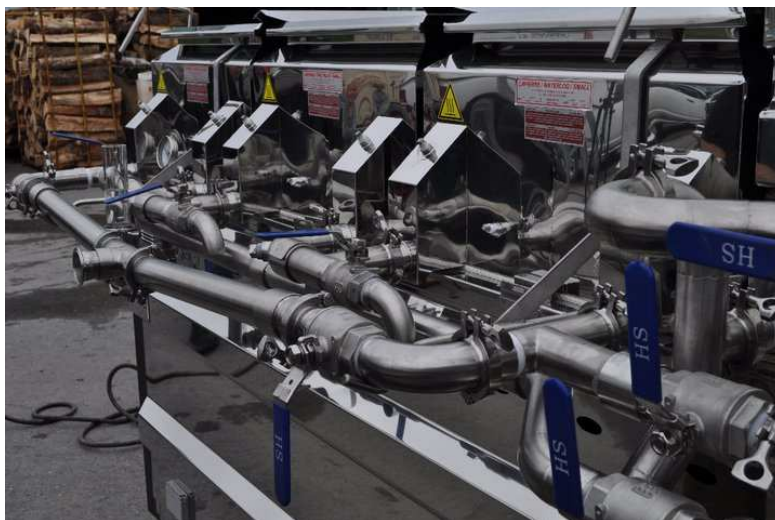


Figure 5 : Configuration des casseroles à fond plat permettant l'inversion de l'écoulement.

Source des images : <http://www.lessucriers.com/t108-inverseur-de-coulee>

En général, les producteurs n'ayant pas d'inverseur de coulée achètent une casserole à fond plat supplémentaire afin d'avoir un rechange pour remplacer la casserole la plus entartrée. De cette façon, la production n'est pas arrêtée pour une période prolongée pendant que le nettoyage est fait (Heiligmann, Koelling, & Perkins, 2006).

2. TECHNOLOGIES POUR DIMINUER LA FORMATION DE PIERRE DE SUCRE

2.1 Méthodes chimiques

Plusieurs technologies basées sur des méthodes chimiques peuvent contribuer à diminuer la formation de tartre sur les surfaces des conduites et des équipements. Une de ces méthodes a été adaptée directement de l'adoucissement de l'eau dure, l'**échange d'ions**. Cette technologie est aussi utilisée dans l'industrie sucrière. Le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) sont enlevés de la solution et remplacés par le sodium (Na). Les cations sont retenus par une résine d'échange de cations avec une force de rétention différente selon la charge et la taille des ions. Il s'agit d'un processus dynamique dont l'équilibre est affecté par les concentrations des espèces dans la solution et sur la résine. La régénération régulière de la résine est donc nécessaire, ce qui entraîne un coût significatif pour l'achat de la saumure. L'utilisation d'une telle méthode au cas acéricole diminuerait la quantité de calcium et de magnésium dans la sève d'érable diminuant ainsi aussi la production de sable de sucre. Des travaux ont montré qu'il

existe une corrélation positive entre la concentration de calcium dans la sève d'érable et la quantité de sable de sucre formé (Davis, HacsKaylo, Gallander, & Quinn, 1962; Gallander, HacsKaylo, Gould, & Willits, 1967).



Figure 6 : Électrodyaliseurs pour l'ajustement du pH du vin.

Source des images : <http://www.reussir-vigne.com/actualites/acidification-ajuster-le-ph-avec-l-electrodialyse-bipolaire:OXXGF1N8.html>

Une technologie similaire à la précédente a déjà été utilisée sur la sève d'érable, la déminéralisation partielle par **électrodialyse** (Bazinet, Gaudreau, Lavigne, & Martin, 2007). Un électrodialyseur est composé de plusieurs membranes alternativement anioniques et cationiques (Juby & Pulles, 1990). Lors de l'action d'un champ électrique, la membrane anionique autorise le passage des anions et la membrane cationique laisse franchir les cations, ce qui mène à la déminéralisation partielle de la sève d'érable. La technologie d'électrodialyse a efficacement diminué le niveau d'acide malique et de calcium dans les concentrés de sève d'érable. La quantité de sirop d'érable produite n'a pas changé, par contre, le pH de la sève d'érable et du sirop d'érable a diminué lorsque l'électrodialyse était utilisée. La concentration de cendres dans le sirop a aussi diminué, pendant que la transmission de lumière a augmenté avec le traitement. Aucun effet n'a été observé sur les caractéristiques sensorielles ou la viscosité du sirop. Cette étude suggère que la technologie d'électrodialyse pourrait probablement diminuer la quantité de sable de sucre formée lors de l'évaporation. Toutefois,

aucune mesure directe n'a pu être réalisée de la quantité de sable de sucre produite (Bazinet, Gaudreau, Lavigne, & Martin, 2007).

Dans l'industrie sucrière, la méthode d'**addition directe de produits chimiques** à la solution traitée est utilisée pour atténuer l'entartrage. Les polymères d'acide acrylique et d'acide maléique sont fréquemment utilisés pour contrôler la formation de tartre dans les évaporateurs utilisés dans l'industrie sucrière (Doherty, Fellows, Gorjian, Senogles, & Cheung, 2004). Selon Bensoussi (2007), les principales classes d'agents antitartres utilisés en sucrerie de betterave sont les polyphosphates, les polyphosphonates et les polycarboxylates. Des exemples de produits chimiques commerciaux antitartre utilisés dans l'industrie sucrière sont le CIBA Antiprex A et l'Evaptreeet XY (Katryan, 2001). Une multitude de produits chimiques ont aussi été étudiés afin d'établir leur effet sur l'entartrage de l'eau. L'addition de produits chimiques peut changer la solubilité des sels responsables de l'entartrage des casseroles, et ce, en l'augmentant ou la diminuant. Elle peut aussi avoir un effet sur la nucléation en réagissant avec les sels de tartre. Par exemple, des acides tels que l'acide sulfurique peuvent être ajoutés pour réduire le pH de la solution, ce qui pourrait éventuellement réduire la nucléation. L'addition sous-stœchiométrique (quantité inférieure à celle nécessaire pour compléter la réaction) de certains composés peut aussi ralentir l'apparition de tartre et/ou ralentir son taux de formation (Troup & Richardson, 1978).

Le sirop d'érable est un produit pur et 100 % naturel qui ne contient ni colorant, ni additifs et qui provient d'une concentration directe de la sève de l'érable. Cet aspect naturel du sirop d'érable est un de ces attraits qui augmente sa valeur commerciale. Tout traitement chimique a le désavantage de changer la composition chimique du liquide à traiter. Donc, les additifs chimiques et les traitements ioniques ne permettent pas, à priori, de respecter l'aspect naturel du sirop d'érable.

2.2 Méthodes mécaniques

Les méthodes de détartrage, basées sur l'action mécanique, incluent l'ajout de particules inertes et l'injection d'air. De plus, l'analyse des caractéristiques du matériel de construction et de l'état des surfaces d'échange de chaleur est un outil pour la prévention de l'entartrage.

Les **particules** possédant des propriétés cristallographiques similaires à la matière qui sédimente agissent comme sites de nucléation secondaires. L'ajout de ces particules au liquide peut empêcher la formation de tartre sur les surfaces d'échange de chaleur, puisque la précipitation se réalisera dans la solution (Troup & Richardson, 1978; Xing et al., 2006; Wang,

2006). Cette pratique entraîne donc une augmentation de râche et une diminution des dépôts de pierre de sucre sur les casseroles.

L'agitation mécanique produite par l'air pendant **l'injection d'air** dans les casseroles pourrait avoir comme effet le détartrage des casseroles de l'évaporateur. Cependant, une étude effectuée par le Proctor Maple Research Center de l'Université de Vermont conclut que l'injection d'air ne réduit pas la quantité de dépôt minéral en suspension ou déposé sur les surfaces des casseroles de l'évaporateur (van den Berg, Perkins, Isselhardt, Godshall, & Lloyd, 2009).

La modification du **matériel de construction des surfaces** de l'échangeur de chaleur a particulièrement été étudiée dans l'industrie laitière, mais aussi dans l'industrie sucrière et celle de l'eau. Le début de l'entartrage dépend des caractéristiques de la surface de transfert de chaleur, tel que l'énergie de surface, la composition chimique, la rugosité, et la topographie. De bonnes pratiques de nettoyage qui laissent une surface lisse, sans égratignures et sans débris peuvent alors considérablement retarder l'initiation de l'entartrage. Par exemple, l'entartrage de l'eau dure était négligeable quand les canalisations étaient faites en plomb, un métal diamagnétique (substance dont l'aimantation induite est de sens opposé à celui du champ inducteur). Par contre, les canalisations de nos jours sont en fer ou en acier, tous deux hautement paramagnétiques (substances qui, soumises à un champ magnétique uniforme, acquièrent une aimantation de même sens que le champ appliqué). Le calcium, lui, est aussi paramagnétique, et donc, il est attiré par les canalisations et les appareils thermiques en fer ou en acier, et par conséquent il les entartre. Le choix de matériel des évaporateurs pour la production de sirop d'érable n'est pas très vaste. La grande majorité de ceux-ci sont fabriqués en acier inoxydable pour répondre aux besoins de l'industrie agroalimentaire. Par contre, les surfaces en acier inoxydable peuvent être modifiées par de nombreuses technologies pour changer leurs propriétés, et ces changements peuvent influencer le taux d'entartrage des casseroles (Rosmaninho, et al., 2007).

2.3 Méthodes ultrasonores

Les appareils à **ultrasons** sont composés d'un générateur d'ultrasons et d'un transducteur qui est fixé sur la paroi extérieure de la casserole ou à un autre emplacement dans l'équipement, comme sur un tuyau avant l'entrée à l'évaporateur. Le générateur produit de l'énergie électrique à haute fréquence qui est envoyée aux transducteurs. Par la suite, ceux-ci transforment cette énergie en vibrations, puis les vibrations sont transmises à la casserole ou au tuyau où est fixé

le transducteur. Les ondes ultrasonores déclenchent successivement des phases de compression et de décompression de la solution. La décompression provoque la formation d'une multitude de bulles microscopiques qui viennent ensuite imploser violemment au cours de la phase de compression; phénomène appelé cavitation (Alan, 2006). La cavitation érode le tartre qui se fragmente et décolle de la surface de l'évaporateur. Parallèlement, l'autre mécanisme en action dans ce procédé ultrasonore est le passage d'ondes qui facilitent la nucléation spontanée. Ceci provoque la formation de noyaux atomiques dans le liquide plutôt que sur la surface d'échange de chaleur. Une grande proportion des composants non-sucrés peuvent donc se déposer sur les noyaux plutôt que sur la surface des casseroles. Quand le transducteur est fixé directement sur la surface de transfert de chaleur, il n'y a généralement pas de cavitation parce que des fréquences plus basses sont utilisées. Par contre, le phénomène de « *microstreaming* » est introduit, où des petits tourbillons sont induits dans le liquide. Ces tourbillons brisent la couche limite et enlèvent les noyaux atomiques qui se forment adjacents à la surface en métal avant qu'ils puissent y adhérer (Troup & Richardson, 1978). Le système ultrasonore peut fonctionner pour longtemps sans avoir besoin d'une attention particulière car il est hautement automatisé et facile à opérer. Un exemple d'appareil à ultrasons utilisé dans l'industrie acéricole et dans d'autres industries est le TrueChem (Figure 7).

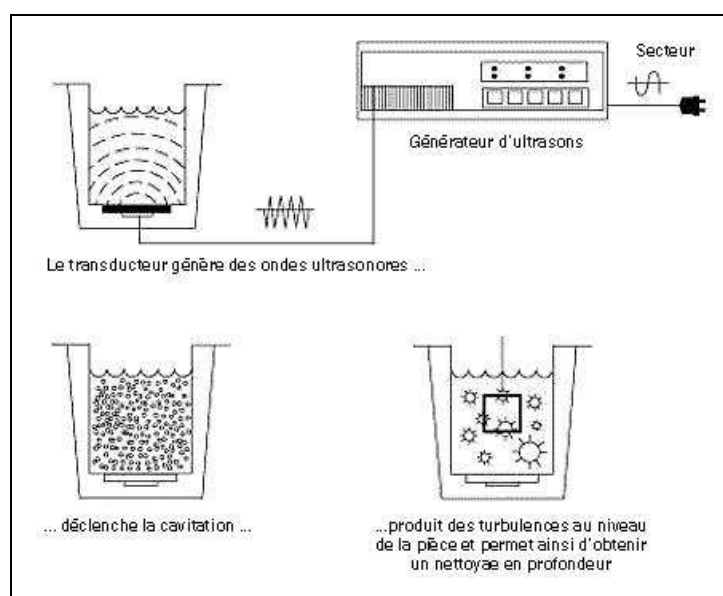


Figure 7 : Principe de fonctionnement du système TrueChem.

Source des images : <http://www.truechem.ca/content/node/22>

2.4 Méthodes magnétiques

Les appareils magnétiques et électromagnétiques fonctionnent sur les mêmes principes de base. La différence entre eux est que les appareils magnétiques (aimant permanent) sont conçus pour un débit donné et sont intégrés dans les conduites. Une fois installés, ces appareils sont difficiles de déplacer. Les appareils électromagnétiques ont la flexibilité de pouvoir être déplacés pour être montés à différents endroits. En ce qui concerne la puissance du champ magnétique de ces appareils, elle est généralement moins forte que celle utilisée dans les appareils magnétiques permanents. Pour varier la puissance du champ magnétique produit en fonction du débit de la solution à traiter, l'appareil doit être relié à un transducteur de débit. Le champ magnétique doit être amplifié avec une décroissance du débit du liquide. La puissance du champ magnétique produit est non seulement déterminée par le nombre d'enroulements et les dimensions du câble, mais aussi par l'amplitude du signal stimulant (De Baat Doelman, 1991).

Les appareils électromagnétiques produisent des impulsions de courant pour créer des champs magnétiques qui varient dans le temps. Ces impulsions sont transmises au liquide à travers la tuyauterie par l'intermédiaire de câbles enroulés autour des tuyaux. Ces ondes magnétiques induisent un champ électrique dans le tuyau. Il faut noter qu'aucun composant n'est ajouté ni enlevé du liquide à traiter, donc aucune intervention n'est faite au niveau de la composition chimique du liquide (Xing et al., 2006).

Le concept clé de ces technologies, utilisant des champs magnétiques, est la précipitation des sels minéraux avant qu'ils n'entrent dans l'équipement de transfert de chaleur et forment du tartre. Le champ magnétique induit qui oscille avec le temps fournit l'agitation moléculaire nécessaire aux ions minéraux chargés pour qu'ils entrent en collision et sédimentent. Le niveau de sursaturation est le facteur clé qui détermine la vitesse de l'entartrage. La précipitation forcée est expliquée par la théorie de nucléation hétérogène. Le champ magnétique qui oscille augmente le nombre de collisions entre les molécules, ce qui génère la nucléation. L'oscillation du champ oriente les charges des ions et diminue leur dipôle magnétique, augmentant ainsi leur taux de nucléation. Dans le cas de l'eau, la formation de calcite a lieu plutôt que d'aragonite à cause de la température à laquelle les cristaux sont formés. Le traitement magnétique ou électromagnétique transforme les ions minéraux dissous en cristaux de sels minéraux par précipitation contrôlée. Le niveau de sursaturation diminue significativement, ainsi que l'entartrage des surfaces d'échange de chaleur (Cho, Fan, & Choi, 1997).

Par contre, ces appareils électromagnétiques consomment de l'électricité, ce qui nécessite d'une part une prise électrique à disposition et d'autre part une dépense supplémentaire en consommation électrique. Un des manufacturiers d'appareils électromagnétiques précise que la consommation électrique d'un tel appareil n'est que de 1 W/h. Un autre inconvénient de cette méthode est qu'elle n'est pas applicable quand la viscosité est élevée (Bensouissi, 2007). Une viscosité élevée ralentit le mouvement des particules, ce qui à l'effet contraire du champ magnétique. L'effet de cet appareil a donc moins d'ampleur.

Cette technologie est encore relativement nouvelle et il existe encore beaucoup de scepticisme sur le mécanisme d'action des champs magnétiques. Le débit, la température, le niveau de sursaturation du liquide et la puissance du champ magnétique sont sans doute des paramètres importants à surveiller ou contrôler pour que cette technologie soit efficace. Il a aussi été observé que des câbles électriques de haute tension localisés proches des installations peuvent interférer avec les appareils électromagnétiques et peuvent même inverser les effets du traitement (Carter, 2008). Des exemples d'appareils magnétiques sont l'Enviromizer et le JaTech TM (Figure 8). Des exemples d'appareils électromagnétiques sont le D-Calc, le Scalehammer, le Scalewatcher, le ScaleBlaster, le Soo-soft, le Hydropath et le Magnitizer (Figure 9).

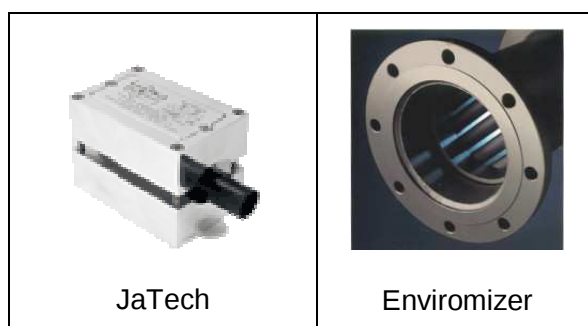


Figure 8 : Quelques exemples des appareils magnétiques.

Sources des images : <https://www.jatech.fr/traitement-des-eaux-dures.php>,
<http://www.carlandersonagency.com/environm.htm>.

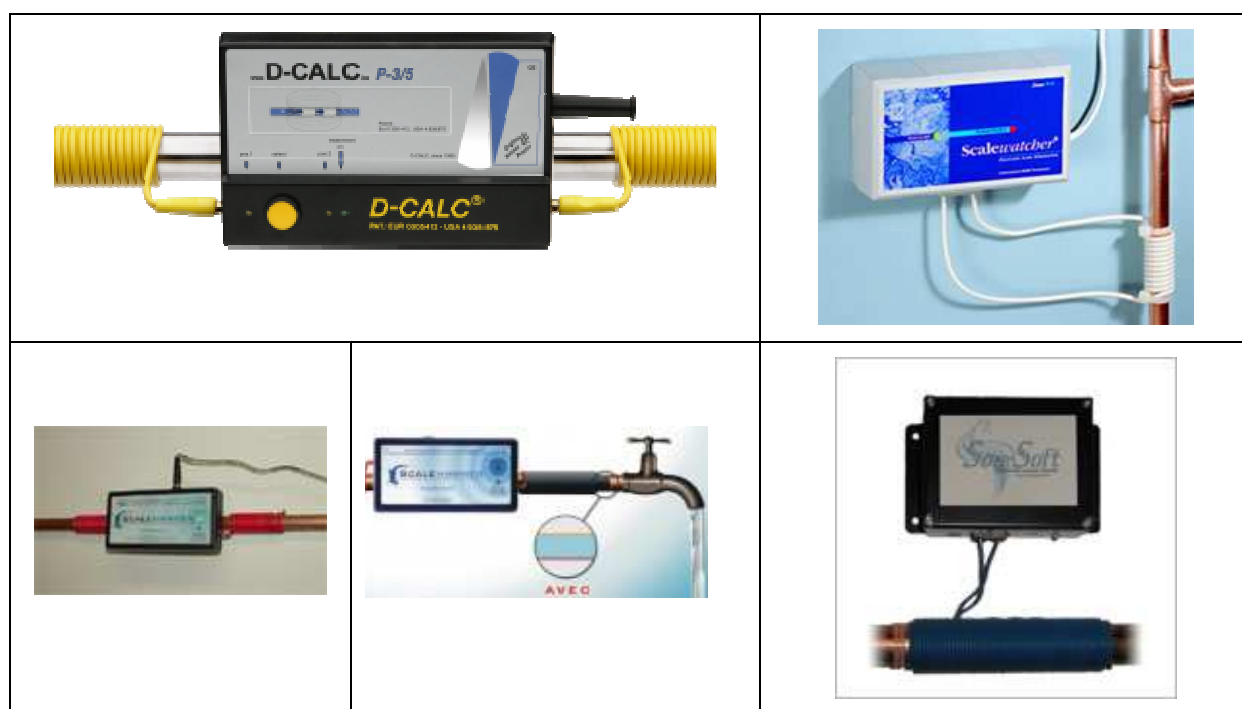


Figure 9 : Quelques exemples des appareils électromagnétiques.

Sources des images : <http://www.dcalc.be/>, <http://www.scalehammer.com/fr/>,
<http://www.scalewatcher.com/fr/pour%20votre%20maison.html>, <http://scaleblastercanada.com/>,
<http://www.poolandspa.com/catalog/Product852984.cfm>

Les appareils **catalytiques** fonctionnent aussi sur la base du magnétisme. Un boîtier, généralement en bronze, contenant une cartouche catalytique est branché directement à l'entrée de la ligne de sève d'érable. Ce système ne requiert ni électricité, ni l'ajout de produits chimiques. Le boîtier est isolé électriquement par des embouts synthétiques. La cartouche catalytique crée une action antimagnétique pour que les sels minéraux en sédimentation n'adhèrent pas aux parois des échangeurs de chaleur. La cartouche est une chambre très diamagnétique, qui perturbe l'effet paramagnétique des matières entartrantes. Une modification du champ moléculaire disperserait les éléments paramagnétiques que l'eau contient. Cette modification ne demeure pas essentiellement dans l'eau qui s'écoule, mais sur les parois en métaux, qui deviennent, en surface, des éléments diamagnétiques. Ces appareils catalytiques sont donc en mesure de soulever les dépôts qui se sont déjà formés sur les parois de l'équipement et d'intégrer ces dépôts à la solution. L'effet catalytique est obtenu par contact entre éléments para et diamagnétique.

La cartouche doit être généralement changée de temps en temps. Pendant 11 mois, l'appareil est en phase de charge ou en traitement d'induction et pendant le dernier mois de l'année, l'appareil doit être mis en phase de décharge où les cellules catalytiques sont retirées de l'appareil pour effectuer l'action cinétique inverse. Des exemples d'appareils catalytiques sont le SOLA, le Rainwater international et l'Hydrokalk.

Le système catalytique SOLA a été essayé dans l'industrie acéricole pour réduire l'entartrage des casseroles (Figure 10). Les résultats montraient une réduction de 85 à 90 % des dépôts de pierre de sucre sur les casseroles. Par contre, ce qui ne s'est pas déposé en forme de pierre de sucre était retenu à l'étape de filtration du sirop en forme de râche. Le filtre-presse se colmatait beaucoup plus vite. Un phénomène semblable serait probablement observé avec toutes les technologies mentionnées dans cette section puisqu'elles sont toutes basées sur l'idée d'une précipitation contrôlée où les sels minéraux entartrants seraient précipités dans la solution avant d'entartrer les surfaces des casseroles. Il reste à décider quelle est le meilleur de ces deux phénomènes à traiter : l'entartrage des casseroles ou le colmatage des filtres.



Figure 10 : Système catalytique SOLA.

Sources des images : http://www.solavite.fr/nosproduits_residence.html

2.5 Méthodes électrolytiques

La méthode **électrolytique** d'antitartre utilise l'électricité statique pour générer une microélectrolyse (différence de potentiel) lors du passage de l'eau à travers un corps qui contient une anode en zinc. L'anode en zinc se consomme lors du passage de l'eau. Les ions de zinc qui sont libérés agissent comme des noyaux de cristallisation. Ces noyaux deviennent des surfaces sur laquelle les particules ont tendance à s'agglomérer au lieu d'adhérer aux

parois des échangeurs de chaleur. Aucune alimentation électrique externe n'est nécessaire pour cet appareil. Le corps est installé de façon permanente sur un tuyau d'eau à traiter, mais doit être changée en moyenne après 10 ans d'utilisation dû à l'usure de l'anode en zinc (Genioos, 2008). Un exemple d'appareil électrolytique utilisé dans l'industrie de l'eau est l'Aquabion (Figure11).

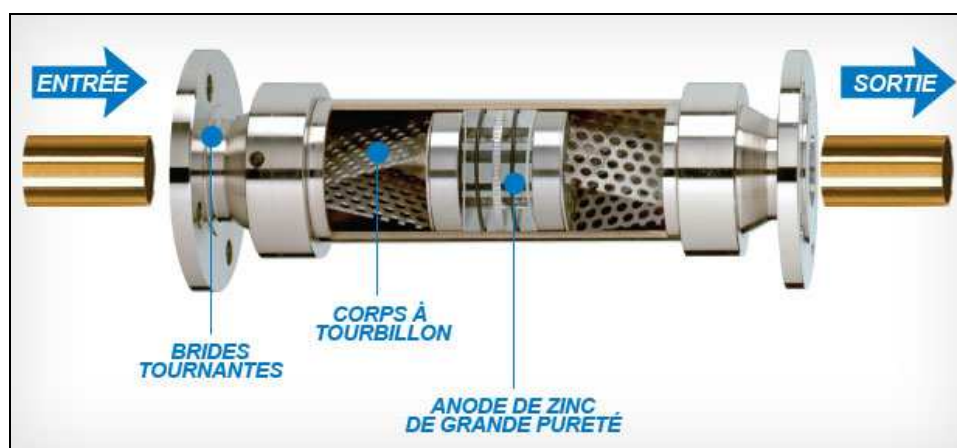


Figure 11 : Système Aquabion.

Sources des images : <http://www.aquabion.ca/>

3. NETTOYAGE DES CASSEROLES

Quand la production de pierre de sucre ne peut pas être évitée, il faut nettoyer les casseroles de temps en temps pour retrouver ses conditions de propreté originales. Toutes les casseroles des évaporateurs sont maintenant fabriquées en acier inoxydable (nuances 304 ou 316) et la grande majorité sont fabriquées avec des soudures de type TIG ou MIG. Les casseroles en acier inoxydable avec soudure de type TIG ou MIG sont généralement résistantes à l'action corrosive des sucres réducteurs et des radicaux acides des solutions de lavage. Par contre, il faut éviter d'utiliser une solution de lavage contenant du chlore libre tel que l'eau de javel (hypochlorite de sodium) ou une solution contenant de l'acide chlorhydrique ou muriatique.

De façon générale, les dépôts de pierre de sucre, principalement trouvés dans les casseroles à fond plat, peuvent être éliminés par un simple trempage avec de l'eau potable faiblement minéralisée ou avec du filtrat produit lors de la concentration par membrane de la sève ou encore avec du condensat du préchauffeur (Heiligmann, Koelling, & Perkins, 2006). L'eau est utilisée à la température ambiante parce que même si les sucres, qui constituent une fraction

importante de la pierre de sucre, sont plus solubles dans l'eau chaude, la partie minérale du dépôt est insoluble à chaud et préfère le froid. La circulation rapide de l'eau sur les surfaces peut augmenter l'efficacité du lavage des casseroles (Allard & Belzile, 2004). Si nécessaire, l'action de récurage peut compléter le lavage en utilisant des outils qui ne rayent pas les surfaces métalliques.

Quand le trempage à l'eau n'est pas suffisant ou que la quantité de dépôt est très importante, il faut utiliser un produit de lavage accepté par l'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA). Si l'utilisation d'un produit chimique est nécessaire, il faut se référer aux instructions du fabricant du produit pour trouver la concentration, le volume, la technique d'utilisation et la méthode d'élimination correcte du produit utilisé. Les produits de lavage utilisés sont généralement à base d'acides faibles tels que l'acide phosphorique, ou des acides organiques tels que l'acide succinique, acétique, gluconique ou sulfamique (Allard & Belzile, 2004). Un nouveau produit chimique, le Dérock 33, qui est fortement basique (pH=13) promet de nettoyer les casseroles sans ternir son émail. Il semblerait qu'il peut détartrer à 100 % les casseroles sans odeurs et ce, sans frottement nécessaire.

Dans l'industrie sucrière, le lavage des casseroles par une combinaison de techniques mécanique et chimique a récemment été remplacé par le lavage à l'EDTA (éthylène-diamine-tétraacétate de sodium), un agent chélateur (composé ayant la propriété d'inactiver les ions métalliques). D'ailleurs, ce n'est pas seulement dans l'industrie sucrière que les chélateurs sont utilisés, mais aussi dans les puits de pétrole. Les chélateurs enlèvent les tartres minéraux en détachant et complexant les ions métalliques, augmentant donc la solubilité du tartre en déplaçant l'équilibre vers la dissolution. Selon l'application, quelques sels d'EDTA fonctionnent mieux que d'autres (Schmidt & Wiggins, 1954; Abdul-Latif, Al-Madfai, & Ghanim, 1988).

4. FILTRATION POUR RETIRER LA RÂCHE

La présence de sels minéraux, sous forme de rache, dans le sirop d'érable donne une apparence terne ou brouillée au sirop et lui confère une texture désagréable. Il existe donc des règlements qui exigent la filtration du sirop d'érable avant d'en faire la mise en marché. Étant donné que la masse relative (kg/litre de sirop) et les caractéristiques physiques (taille et structure des cristaux, présence ou absence de composants, etc.) de la rache varient de jour en jour et d'érablière en érablière, il est donc presque impossible de définir une méthode de filtration standard.

Dans les érablières de petite taille, la filtration du sirop d'érable par gravité est généralement utilisée. Cette technologie très simple consiste à faire passer le sirop encore chaud à travers une fibre synthétique d'une porosité de l'ordre de 20 à 30 microns. Plus la porosité d'un filtre est faible, meilleure est la qualité de la filtration.

La filtration sous pression offre une performance plus adaptée aux grandes érablières. L'utilisation d'un filtre-presse permet de faire filtration plus rapide et généralement de meilleure qualité que la filtration par gravité. Par contre, ce type de filtration nécessite une source externe d'énergie (une pompe), ce qui rend le système plus coûteux en termes d'investissement et d'opération. La filtration sous pression suppose l'utilisation de la terre de diatomées, une poudre blanche et inerte qui effectue la filtration. Les filtres de support, eux, servent uniquement à retenir et à distribuer uniformément la poudre filtrante. La porosité du lit formé par la poudre est définie par la granulométrie et le mode de chargement du matériel, elle devrait varier entre 15 et 20 microns (Allard & Belzile, 2004). La porosité du filtre de support est de l'ordre de 20 à 30 microns. Le volume de terre de diatomées à utiliser varie selon la taille du filtre presse et la quantité de râche dans le sirop d'érable produit.

VALORISATION DU SABLE DE SUCRE

Le sable de sucre, matière insoluble formée lors de l'évaporation de la sève d'érable, est récupérée suite à la filtration ou le nettoyage des casseroles. Elle pourrait être réutilisée ou valorisée, ce qui permettrait de diminuer les pertes économiques associées à ce sous-produit de la transformation de la sève d'érable. Par exemple, le sucre contenu dans la râche peut être récupéré. Après la filtration sous pression à l'aide du filtre-presse, de l'eau chaude peut être utilisée pour « désucrer » le filtre. Cette eau peut très bien être récupérée et réintroduite dans l'évaporateur en même temps que la sève ou le concentré de sève d'érable (Allard & Belzile, 2004).

Dans le journal le New York Times datant de 1912, un article suggère d'utiliser la râche comme levure chimique. Selon cet article, la râche contient 50 % d'acide malique sous forme de sel de calcium. L'acide malique est de qualité supérieure à l'acide tartrique utilisé couramment dans les levures chimiques. Ainsi, l'acide malique pourra donc remplacer le bitartrate de potassium (la crème de tartre). La formulation de la levure chimique référée dans cet article est 57 parts de bimalate de calcium, 25 parts de bicarbonate de soude et 18 parts d'amidon (Warren & Grose, 1912).

Depuis le début du XXI^{ème} siècle, une attention particulière a donc été apportée à ce dépôt puisqu'il pourrait avoir une valeur commerciale. Toutefois, la purification du malate de calcium ou des autres composés d'intérêt pourrait avoir un rendement très variable dépendant de la composition des échantillons. Dans ce contexte et en considérant les avancées faites dans le domaine de la chimie synthétique, la commercialisation de la râche est vite devenue peu économique.

PERSPECTIVES

En acériculture, le phénomène d'entartrage, qui est un phénomène physico-chimique naturel, est observé pendant l'évaporation de la sève d'érable. Au cours de cette opération, la température augmente, le pH se modifie et les composants de la sève d'érable se concentrent. Certaines réactions chimiques ayant lieu lors de l'évaporation produisent des matières, qui en raison de la température élevée et de la teneur en sucre croissante, deviennent sursaturées et précipitent. Ces matières insolubles sont composées principalement de sels minéraux et de sucres. De façon générale, une partie des matières insolubles se dépose sur les surfaces internes des casseroles (pierre de sucre) de l'évaporateur déclenchant ainsi l'entartrage des casseroles. L'autre partie de cette matière demeure en suspension dans la solution (râche) et est habituellement retirée après l'évaporation par la filtration du sirop d'érable.

L'amplitude de ce phénomène physico-chimique dépend des conditions d'opération telles que l'intensité de chaleur dans l'évaporateur et le débit de la solution, mais dépend aussi de la composition de la solution en évaporation. Les effets de la production de sable de sucre sur la productivité de l'érablière sont nombreux. Ils incluent la diminution de l'efficacité de transfert de chaleur dans l'évaporateur, la production d'un sirop d'érable plus foncé et parfois avec des défauts de saveur, des pertes en sucre, l'augmentation de main-d'œuvre attitrée au nettoyage, les coûts additionnels dus aux arrêts du procédé et le coût d'achat de produits de lavage supplémentaires.

Ce document compile les travaux réalisés dans divers domaines où une problématique similaire à celle de la formation de sable de sucre se présente. Les possibilités existantes pour diminuer la formation de dépôt entartrant sont vastes. Il faut donc cibler les plus pertinentes pouvant s'appliquer à l'acériculture afin de respecter la réglementation en vigueur. Les travaux de recherche future devront être menés dans le but de déterminer quelle technologie serait la plus efficace pour contrer la formation de sable de sucre lors de l'évaporation de la sève d'érable et ce, avec une perspective générale de tout le procédé de transformation. De plus, en considérant que la concentration en sucre dans la sève d'érable alimentée à l'évaporateur est de plus en plus élevée, il serait pertinent de revoir la régie de production et le design de l'évaporateur afin de harmoniser l'opération de transfert de chaleur avec les nouvelles caractéristiques de la matière à traiter, soit un taux élevé en solides solubles.

Puisque le phénomène d'entartrage a un effet direct sur la filtration du sirop d'érable, le procédé de filtration devrait être inclus dans les études relatives au sable de sucre, en particulier à la

râche. La variabilité de la matière première doit aussi être considérée. Cette approche globale permettrait de résoudre le problème au lieu de simplement le transférer à une autre étape de la ligne de production.

Deux types de recherche pourraient être mise en place pour répondre à ce problème. La première, recherche appliquée, serait basée sur une évaluation technico-économique d'une ou plusieurs technologies cibles. La deuxième, recherche scientifique, serait basée sur une étude de compréhension et caractérisation du phénomène de formation du sable de sucre, que ce soit de façon expérimentale ou théorique en modélisant le système. L'objectif de ces études serait d'identifier les facteurs clés qui contrôlent la production de sable de sucre. Ce deuxième type de recherche permettrait alors de décider quelle technologie serait la plus applicable en acériculture sur la base de connaissances acquises.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdul-Latif, N. A., Al-Madfai, S. H., & Ghanim, A. N. (1988). Removal of scale deposited on heat-transfer surfaces using chemical methods. *Industrial and Engineering Chemistry Research* , 27 (8), 1548-1551.
- Allard, G., & Belzile, M. (2004). *Cahier de transfert technologique en acériculture*. Québec: CRAAQ, 656.
- Ansari, I., Sharma, M., & Datta, A. (2003). Milk fouling simulation in a double tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer* , 30 (5), 707-716.
- Bansal, B., & Chen, X. D. (2006). A critical review of milk fouling in heat exchangers. *Comprehensive reviews in food science and food safety* , 5, 27-33.
- Bazinet, L., Gaudreau, H., Lavigne, D., & Martin, N. (2007). Partial demineralization of maple sap by electrodialysis: impact on syrup sensory and physiochemical characteristics. *Journal of the Science of Food and Agriculture* , 87, 1691-1698.
- Bensouissi, A. (2007). *Auxiliaires technologiques utilisés en sucrerie de betterave et qualité du sucre blanc*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne.
- Bloor, W. (1912). Studies on malic acid. I. The transformation of malic acid to sugar by the tissues of the maple (*Acer Saccharinum*). *Journal of the American Chemical Society* , 34 (4), 534-539.
- Bontemps, A., Garrigue, A., Goubier, C., Huetz, J., Marvillet, C., Mercier, P. & Vidil R. (X). Échangeurs de chaleur – *Problèmes de fonctionnement*. *Techniques de l'ingénieur*. B 2 344, 12.
- Carter, T. (2008). Magnetic Water Softeners. Consulté le Novembre 24, 2009, sur Ask the Builder: http://www.askthebuilder.com/310_Magnetic_Water_Softeners.shtml
- Changani, S., BalmarBeiny, M., & Fryer, P. (1997). Engineering and chemical factors associated with fouling and cleaning in milk processing. *Experimental Thermal and Fluid Science* , 14 (4), 392-406.
- Chen, X. D., Li, D. X., Lin, S. X., & Ozkan, N. (2004). On-line fouling/cleaning detection by measuring electric resistance - equipment development and application to milk fouling detection and chemical cleaning monitoring. *Journal of Food Engineering* , 61, 181-189.
- Cho, Y. I., Fan, C., & Choi, B.-G. (1997). Theory of electronic anti-fouling technology to control precipitation fouling in heat exchangers. *International Communication in Heat and Mass Transfer* , 24 (6), 757-770.
- Dalas, E. (2001). The effect of ultrasonic field on calcium carbonate scale formation. *Journal of Crystal Growth* , 222, 287-292.

- Davis, D. R., Gallander, J. F., Hacskaylo, J., Gould, W., & Willits, C. (1962). The chemical composition of maple sugar sand. *Journal of Food Science* , 28 (2), 182-190.
- Davis, R., Hacskaylo, J., Gallander, J., & Quinn, F. (1962). Sugar sands are important part of maple sugar research. *Ohio Farm and Home Research* , 47 (2).
- Davis, S., Peacock, S., & Walthew, D. (1997). Pilot plant investigation of clear juice softening. *Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association* , 71, 161-165.
- De Baat Doelman, J. P. (1991). *Brevet n° 5074998*. Netherlands.
- Doherty, W., Fellows, C., Gorjian, S., Senogles, E., & Cheung, W. (2004). Inhibition of calcium oxalate monohydrate by poly(acrylic acid)s with different end groups. *Journal of Applied Polymer Science* , 91, 2035-2041.
- Epstein, N. (1981). Fouling in heat exchangers. *Fouling of heat transfer equipment*. Washington, DC: Somerscales EFC. Knudsen J.C. 701.
- Gallander, J. F. (1964). *Relationship of the chemical constituents of maple sugar sand to the amount formed during maple syrup processing*. The Ohio State University.
- Gallander, J. F., Hacskaylo, J., Gould, W., & Willits, C. (1967). *Environmental and Chemical Factors Associated with Maple Sugar Sand Formation*. Wooster, Ohio: Ohio agricultural research and development center.
- Genioos. (2008). *Fiche technique : antitartre à procédé galvanique*. Consulté le Décembre 2, 2009, sur Aquabion: <http://www.genioos.fr/fpdb/File/Aquabion.pdf>
- Grijpspeerdt, K., Mortier, L., De Block, J., & Van Renterghem, R. (2004). Applications of modelling to optimise ultra high temperature milk heat exchangers with respect to fouling. *Food Control* , 15, 117-130.
- Heiligmann, R. B., Koelling, M. R., & Perkins, T. D. (Éds.). (2006). *North American Maple Syrup Producers Manual*. Ohio State University Extension.
- Hu, A., Zheng, J., & Qiu, T. (2006). Industrial experiments for the application of ultrasound on scale control in the Chinese sugar industry. *Ultrasonics Sonochemistry* , 13 (4), 329-333.
- Huston, H., & Bryan, A. (1899). *Analysis of maple sugar*. Indiana Agricultural Experimental Station.
- Isselhardt, M., van den Berg, A., Perkins, T. (2012). Chemical composition of scale in maple syrups evaporators. *Maple Digest* , 24A (4), 23-28.
- Juby, G., & Pulles, W. (1990). *Evaluation of electrodialysis reversal for desalination of brackish mine service water*. Pretoria: Water Research Commission.
- Jun, S., & Puri, V. (2005). Fouling models for heat exchangers in dairy processing : a review. *Journal of Food Process Engineering* , 28, 1-34.

- Jun, S., & Puri, V. (2006). A 2D dynamic model for fouling performance of plate heat exchangers. *Journal of Food Engineering* , 75, 364-374.
- Katryan, A.M. (2001). Evaporator anti-scalant trials at Blairmont central factory. Proceedings of the XXVII West Indies Sugar Technologists Conference. Trinidad and Tobago, April. Unpaginated.
- Ling, A., & Lund, D. (1978). Apparatus for studying fouling of heated surfaces by biological fluids. *Journal of Food Science* , 43, 390-393.
- Lu, H.-Q., Xie, C.-f., Yang, R.-F., & Qiu, T.-Q. (2005). Preventing fouling in evaporators through ultrasound. *International Sugar Journal* , 107 (1280), 456-461.
- Merheb, B., Nassar, G., Nongaillard, B., Delaplace, G., & Leuliet, J. (2007). Design and performance of a low-frequency non-intrusive acoustic technique for monitoring fouling in plate heat exchangers. *Journal of Food Engineering* , 82 (4), 518-527.
- Morison, K., & Larsen, S. (2005). Spinning disc measurement of two-stage cleaning of heat transfer fouling deposits of milk. *Journal of Food Process Engineering* , 28, 539-551.
- Morison, K., & Tie, S.-H. (2002). The development and investigation of a model milk mineral fouling solution. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* , 80 (C), 326-331.
- Mwaba, M. G. (2003). *Analysis of Heat Exchanger Fouling in Cane Sugar Industry*. Ndola, Zambia: Eindhoven University Press.
- Nelson, E. (1928). The acids of maple sugar "sand". *Journal of the American Chemical Society* , 50, 2028-2031.
- Nema, P., & Datta, A. (2005). A computer based solution to check the drop in milk outlet temperature due to fouling in a tubular heat exchanger. *Journal of Food Engineering* , 71, 133-142.
- Perkins, T. D., & van den Berg, A. K. (2009). Maple syrup - Production, Composition, Chemistry, and Sensory Characteristics. *Advances in Food and Nutrition Research* , 56 (4), 101-143.
- Rosmaninho, R., Rizzo, G., Muller-Steinhagen, H., & Melo, L. (2008). Deposition from a milk mineral solution on novel heat transfer surfaces under turbulent flow conditions. *Journal of Food Engineering* , 85, 29-41.
- Rosmaninho, R., Santos, O., Nylander, T., Paulsson, M., Beuf, M., Benezech, T., et al. (2007). Modified stainless steel surfaces targeted to reduce fouling - Evaluation of fouling by milk components. *Journal of Food Engineering* , 80, 1176-1187.
- Sahoo, P., Ansari, I., & Datta, A. (2005). Milk fouling simulation in helical triple tube heat exchanger. *Journal of Food Engineering* , 69, 235-244.
- Schmidt, N., & Wiggins, L. (1954). Descaling of evaporator heating surfaces in cane sugar factories. *Industrial and Engineering Chemistry* , 46 (5), 867-870.

- Supple, L. (1981). Sugar sand. *Maple Syrup Digest* , 21 (3), 5-7.
- Smaili, F., Vassiliadis, V., & Wilson, D. (2002). Optimization of cleaning schedules in heat exchanger networks subject to fouling. *Chemical Engineering Communications* , 189, 1517-1549.
- Snell, J., & Lochhead, A. (1914). The analysis of maple products, IV - the composition of sugar sand. *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry* , 6 (4), 301-302.
- Troup, D., & Richardson, J. (1978). Scale nucleation on a heat transfer surface and its prevention. *Chemical Engineering Communications* , 2 (4), 167-180.
- TrueChem Limited. (2006). Consulté le October 21, 2009, sur <http://www.truechem.ca/pn/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=8>
- van den Berg, A. K., Perkins, T. D., Isselhardt, M. L., Godshall, M. A., & Lloyd, S. W. (2009). Air injection into concentrated maple sap during processing: impact on syrup composition and flavour. *Journal of the Science of Food and Agriculture* , 89, 1770-1774.
- Warren, W. (1911). "Sugar Sand" from maple sap; a source of malic acid. *Journal of the American Chemical Society* , 33 (7), 1205–1211.
- Warren, W., & Grose, M. (1912). Chemists describe new baking powder. *The New York Times*. September.
- Xing, X.-K. (2008). Research on the electromagnetic anti-fouling technology for heat transfer enhancement. *Applied Thermal Engineering* , 28, 889-894.
- Xing, X.-K., Ma, C.-F., Chen, Y.-C., Wu, Z.-H., & Wang, X.-R. (2006). Electromagnetic anti-fouling technology for prevention of scale. *Journal of Central South University of Technology* , 13 (1), 68-74.
- Yu, H., Sheikholeslami, R., & Doherty, W. (2002). Composite fouling characteristics of calcium oxalate monohydrate and amorphous silica by a novel approach simulating successive effect of a sugar mill evaporator. *Industrial and Engineering Chemistry Research* , 41 (14), 3379-3388.
- Yu, H., Sheikholeslami, R., & Doherty, W. O. (2003). Composite fouling of calcium oxalate and amorphous silica in sugar solutions. *Industrial and Engineering Chemical Research* , 42 (4), 904-910.
- Yu, H., Sheikholeslami, R., & Doherty, W. O. (2005). Effect of thermohydraulic conditions on fouling of calcium oxalate and silica. *AIChE Journal* , 51 (2), 641-648.
- Yu, H., Sheikholeslami, R., & Doherty, W. O. (2005). Modeling of calcium oxalate and amorphous silica composite fouling. *AIChE Journal* , 51 (4), 1214-1220.

Yu, H., Sheikholeslami, R., & Doherty, W. O. (2004). The effect of silica and sugar on the crystallographic and morphological properties of calcium oxalate. *Journal of Crystal Growth* , 265, 592-603.