La compression mécanique de vapeur, un élément clé pour une industrie sucrière durable – son utilisation en atelier de cristallisation

Andreas LEHNBERGER, Irma GEYER,
BMA Braunschweigische Maschinenbauanstalt AG, Allemagne

L'utilisation de l'énergie dans l'atelier de cristallisation a une influence déterminante sur le besoin énergétique global de la production sucrière dans une sucrerie de betteraves. Étant donné l'évolution des conditions politiques et économiques de base, les différentes idées pour accroître l'efficacité énergétique de l'atelier de cristallisation doivent être examinées. Les méthodes classiques minimisent la quantité d'eau à évaporer dans l'atelier de cristallisation. Pour augmenter encore l'efficacité énergétique, il est intéressant d'aller plus loin et de mettre en place des concepts de cristallisation continue avec de la compression mécanique de vapeur (CMV). Ces réflexions visent à utiliser de plus en plus l'énergie électrique issue de sources renouvelables à la place d'une énergie thermique qui provient aujourd'hui surtout de combustibles fossiles.

ABSTRACT

Energy input in the sugar house is a key factor in the overall energy requirement of the sugar process in a beet sugar factory. Given the changing political and economic situation, concepts for better energy efficiency in the sugar house are under discussion. Reducing the volume of water to be evaporated in the sugar house to a minimum would certainly make sense. Some interesting concepts are considering the use of continuous crystallisation and mechanical vapour compression. They aim to increasingly replace thermal energy, today generated largely from fossil fuels, with electrical power from renewable sources.

INTRODUCTION

Une nouvelle ère commence en Europe pour les sucreries de betteraves. La loi européenne sur le climat [1] fixe des objectifs contraignants en Europe pour réduire les gaz à effet de serre (« European Green Deal »). Un premier objectif appelle la société européenne qui inclut l'industrie sucrière à réduire les émissions de CO_2 de 55 % d'ici 2030 dans la production sucrière par rapport aux niveaux de 1990. L'industrie sucrière devra ensuite atteindre le second objectif de la neutralité climatique d'ici 2050.

Les objectifs contraignants convenus annoncent un changement considérable pour l'industrie sucrière où beaucoup d'efforts vont être nécessaires pour mettre en œuvre les mesures correspondantes. Une étape essentielle de la décarbonation consiste à électrifier les processus thermiques de la production de sucre et, dans une étape ultérieure, d'avoir recours à une énergie électrique issue d'énergies renouvelables. Cela revient en substance à électrifier en grande partie au cours d'une première étape la production sucrière et à se procurer lors de l'étape suivante l'énergie électrique à partir de sources renouvelables [2].

En raison des coûts élevés de l'énergie primaire, les sucreries de betteraves européennes ont toujours eu pour objectif de produire du sucre avec une faible consommation d'énergie. Les sucreries ont donc l'habitude d'appliquer des mesures d'économie d'énergie. L'approche politique actuelle nécessite toutefois que celles-ci aillent plus loin et qu'elles puissent être utilisées de manière rentable.

Cet article se concentre sur les besoins énergétiques de l'atelier de cristallisation qui utilise la plus grande partie de la vapeur produite par l'atelier d'évaporation. Les grandeurs qui déterminent les besoins en vapeur sont l'eau apportée par le sirop et les besoins de fluides nécessaires à la refonte des sucres du 2e et du 3e jet, ainsi que la quantité d'eau de clairçage utilisée dans les centrifugeuses.

Depuis plusieurs décennies, différents concepts de cristallisation sont employés pour obtenir un processus de cristallisation automatisé et en grande partie reproductible. Selon la taille souhaitée des cristaux, on utilise souvent des procédés de cristallisation avec un ou deux pieds de cuite qui servent en premier lieu à garantir un sirop d'alimentation ayant une teneur en matière sèche maximale. Il est ainsi possible de diminuer l'apport en eau et donc les besoins en vapeur en aménageant le processus.

L'emploi de la cristallisation continue, qui se caractérise par un besoin régulier de vapeur avec une faible différence de pression entre la vapeur de chauffe et les buées, joue un rôle décisif, surtout dans les concepts avec de la compression mécanique de vapeur. L'énergie thermique (vapeur) alimentant l'atelier de cristallisation peut ici être substituée par de l'énergie électrique.

LES MESURES HABITUELLES POUR RÉALISER DES ÉCONOMIES DE VAPEUR DANS L'ATELIER DE CRISTALLISATION

Différentes mesures sont appliquées dans l'atelier de cristallisation pour réaliser des économies d'énergie dans les sucreries. Un schéma de cristallisation classique avec 3 produits sert de base à la comparaison des mesures d'économie. Les 3 produits des 1er, 2e et 3e jets sont cristallisés à partir d'un sirop d'une teneur en matière sèche de 71 %. Les sucres des 2e et 3e jets sont refondus avec du jus avant évaporation (JAE) et ajoutés au sirop. Les produits obtenus sont le sucre blanc et la mélasse. Avec le calcul réalisé avec ces contraintes, l'atelier de cristallisation a besoin d'une quantité de vapeur de 11,8 kg/100 kg de betteraves (18 % taux de sucre dans les cossettes), ce qui correspond à une quantité de chaleur thermique

de 447 kWh_{th}/t de sucre. Les équipements électriques tels que les pompes, les agitateurs mécaniques et les centrifugeuses consomment en outre environ 35 kWh_{el}/t de sucre pour leur fonctionnement.

Des économies de vapeur sont possibles en augmentant la teneur en matière sèche du sirop en passant par exemple de 71 % à 74 %. Il est ainsi possible d'économiser environ 1,1 kg de vapeur/100 kg de betteraves, ce qui correspond à environ 9,4 % de la quantité de vapeur. Une autre mesure consistant à produire la refonte à partir du sirop au lieu du jus avant évaporation permet d'économiser à peu près le double en matière de vapeur : 2,6 kg/100 kg de betteraves, ce qui correspond à une économie de vapeur de 22 %.

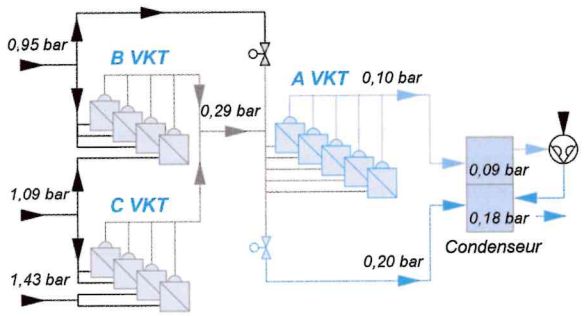

Figure 1 : Cristallisation avec double utilisation des buées de cristallisation avec des VKT (cuite continue verticale)

La troisième mesure considère la double utilisation des buées de cristallisation de la figure 1 qui a été réalisée avec une cristallisation continue des 1er, 2e et 3e jets dans des cuites continues verticales (VKT) au cours des années 1990 [3]. Les buées de cristallisation de la VKT du 2e jet et de la VKT du 3e jet sont employées pour chauffer la VKT du 1er jet. Cette mesure est possible, quand l'écart de température entre la vapeur de chauffe et les buées de cristallisation dans les différents appareils à cuire est faible ; ce qui est le cas dans ce concept réalisé avec des VKT. Les pressions indiquées dans la figure 1 montrent que les températures de cristallisation des 2e et 3e jets ont augmenté, alors que la température de cristallisation du 1er jet a baissé. Dans ce concept, la VKT du 1er jet est équipée de 5 compartiments afin de compenser la réduction significative de la vitesse de cristallisation aux températures plus basses. Au bout du compte, la cristallisation, avec une évaporation à double utilisation des buées, économise environ 2,5 kg/100 kg de betteraves par rapport au calcul de base, ce qui correspond à 19 % du besoin en vapeur sortant de l'atelier d'évaporation.

Ces trois mesures montrent le potentiel et les limites de ce qu'il est possible d'obtenir avec des mesures classiques. Même la combinaison de ces mesures ne permet pas d'atteindre les économies d'énergie exigées. D'autres mesures et technologies plus ambitieuses doivent être mises en œuvre pour atteindre les objectifs de la loi sur le climat.

LA COMPRESSION MÉCANIQUE DE VAPEUR AU SERVICE DE LA CRISTALLISATION

L'emploi de la compression mécanique de vapeur est largement répandu dans l'industrie nécessitant une évaporation et un séchage (brasserie, laiterie, dessalement de l'eau de mer, saliculture, industrie chimique) [4]. Cette technologie utilise un principe consistant à amener le faible niveau de température d'un flux thermique au niveau supérieur, comme les pompes à chaleur. La compression mécanique de vapeur combinée à la cristallisation est utilisée dans une sucrerie suisse depuis 1946 [5] et peut donc être considérée comme une technologie mature.

L'association de la compression de vapeur avec la cristallisation par évaporation est représentée dans la figure 2 sous forme d'un diagramme de principe et du diagramme enthalpie–entropie (diagramme d'état h-s). Les buées générées dans l'appareil à cuire disponibles dans l'état quasiment saturé 1 (pression p_1, température T_1) sont admises dans un compresseur mécanique dédié et y sont comprimées à une pression supérieure p_2. Le compresseur mécanique de vapeur consomme lui-même de l'énergie électrique pour entraîner ses roues à aubes. La compression polytropique de la vapeur de l'état 1 à l'état 2 entraîne une vapeur surchauffée (pression p_2, température T_2) qui doit être refroidie avant son utilisation dans l'appareil à cuire. Selon le type de compresseur, de l'eau est injectée dans la vapeur avant ou après le compresseur et refroidit donc la vapeur comprimée, dont la pression p_2 reste constante jusqu'à l'état 3 (pression p_2, température T_3). L'appareil à cuire dispose maintenant d'une vapeur de chauffe à l'état saturé et peut l'utiliser à nouveau sans problème pour une cristallisation.

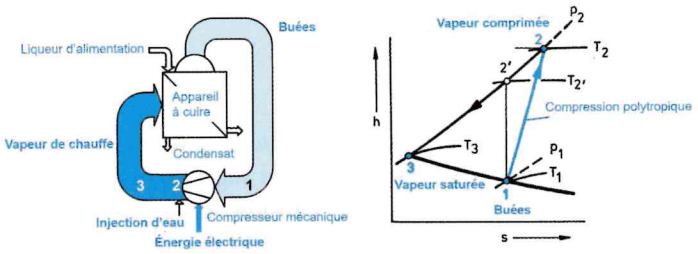

Figure 2 : Appareil à cuire avec compression mécanique de vapeur – diagramme de principe et diagramme enthalpie-entropie (diagramme h-s) conformément à [4]

L'eau injectée génère un excédent de vapeur de chauffe par rapport à celle nécessaire pour générer les buées de cristallisation dans un appareil à cuire. Cette vapeur peut être employée à d'autres fins de réchauffement. Le schéma de principe de la figure 2 montre clairement qu'en utilisant la compression mécanique de vapeur, la cristallisation peut être exploitée de manière purement électrique, indépendamment d'une alimentation en vapeur.

LES BESOINS ÉNERGÉTIQUES DE LA COMPRESSION MÉCANIQUE DE VAPEUR EN COMBINAISON AVEC LA CRISTALLISATION CONTINUE ET DISCONTINUE

Les besoins énergétiques pour la compression de vapeur sont déterminés par le rapport entre la pression fournie et la pression d'aspiration, par le rendement isentropique et par le rendement mécanique ou électrique de l'entraînement (en règle générale un moteur électrique soit avec un convertisseur de fréquence soit avec des réducteurs). Les fournisseurs de ventilateurs de compression mécanique de vapeur et de turbocompresseurs travaillent à optimiser les différents rendements, afin d'obtenir un meilleur rendement global acceptable d'un point de vue économique. Dans l'exposé suivant, une valeur de 0,81 qui découle d'un rendement isentropique de 0,90 et d'un rendement mécanique ou électrique de 0,90 est fixée globalement pour le rendement d'un étage de compression.

Une comparaison est effectuée entre les différents types d'appareils à cuire combinés à la compression mécanique de vapeur (tableau

1) pour estimer les besoins en énergie électrique par tonne de buées aspirées (besoins en énergie électrique spécifiques). Tous les types d'appareils à cuire sont exploités avec une pression vapeur de 0,20 bar abs. Selon leur conception, il est nécessaire d'avoir une pression de vapeur de chauffe ajustée en conséquence : les appareils à cuire discontinus peuvent fonctionner lors de la cristallisation de sucre blanc avec 1,00 bar abs, les appareils à cuire continus sans agitateur pour aider la circulation de la massecuite avec 0,85 bar abs. [5] ou une VKT [6] équipée d'agitateurs avec 0,70 bar abs.

Les besoins en énergie électrique spécifiques résultant du calcul pour la compression des buées présentent de nettes différences (tableau 1). Dans l'exemple de calcul, l'atelier avec une cristallisation continue réalisée avec une VKT nécessite 25 % d'énergie électrique en moins que l'atelier avec des appareils à cuire discontinus (DVK). Les appareils à cuire continus sans agitateur pour la circulation de la massecuite (CVP) nécessitent des besoins énergétiques pour comprimer les buées qui se situent à mi-chemin entre les besoins énergétiques des deux types d'appareil mentionnés auparavant.

Il existe deux techniques de compression mécanique de vapeur. Elles se distinguent par l'augmentation maximale de la pression pouvant être obtenue. Les ventilateurs de compression mécanique de vapeur augmentent la pression jusqu'à un facteur d'environ 1,4 ; tandis que les turbocompresseurs atteignent en tant que turbomachines une augmentation de la pression d'un facteur de 2. On obtient ainsi le nombre requis d'étages de compression avec les ventilateurs de compression mécanique de vapeur ou avec les turbocompresseurs (tableau 1, figure 3) pour les exemples d'utilisation indiqués auparavant en rapport avec la cristallisation par évaporation.

Tableau 1 : Besoins en énergie électrique spécifiques des différents types d'appareils à cuire pour comprimer les buées de cristallisation du sucre blanc

Type d'appareil à cuire	Appareil à cuire discontinu (DVK)	Appareil à cuire continu (CVP)	Cuite continue verticale (VKT)
Circulation de la massecuite	Avec agitateur	Circulation naturelle	Avec agitateur
Pression des buées de cristallisation	0,20 bar abs. (vapeur saturée à 60 °C)	0,20 bar abs. (vapeur saturée à 60 °C)	0,20 bar abs. (vapeur saturée à 60 °C)
Pression de la vapeur de chauffe nécessaire	1,00 bar abs. (vapeur saturée à 100 °C)	0,85 bar abs. (vapeur saturée à 95 °C)	0,70 bar abs. (vapeur saturée à 90 °C)
Taux de compression	5	4,25	3,5
Rendement global	0,81	0,81	0,81
Besoins énergétiques spécifiques	99,6 kWh_{el} / t de buées	88,4 kWh_{el} / t de buées	75,6 kWh_{el} / t de buées
Nombre d'étages avec des ventilateurs de compression mécanique de vapeur	5	5	4
Alternative : nombre d'étages avec des turbocompresseurs	3	3	2

Les besoins en vapeur et en énergie d'un atelier de cristallisation avec des cuites verticales (VKT) combinées à de la compression mécanique de vapeur (CMV)

L'emploi de la compression mécanique de vapeur dans l>atelier de cristallisation y réduit considérablement les besoins en vapeur. Les économies de vapeur pouvant être obtenues sont décrites dans les deux scénarios I et II suivants.

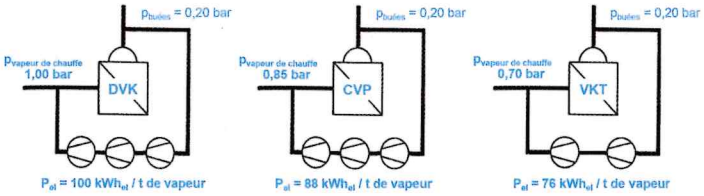

Figure 3 : Différents types d'appareils à cuire avec turbocompresseurs conformément au tableau 1, schéma simplifié

Dans le scénario I, les 3 cristallisations des 1er, 2e et 3e jets sont équipées de cuites continues verticales de type VKT et fonctionnent avec une compression de vapeur (figure 4 haut). Le compresseur des buées issues des VKT pour les 1er et 2e jets porte leur pression de 0,20 bar abs. à la pression de la vapeur de chauffe nécessaire de 0,70 bar abs. Grâce à l'eau injectée pour refroidir la vapeur, la quantité de vapeur de chauffe disponible augmente d'environ 8 %. Celle-ci suffit pour alimenter aussi bien les VKT des 1er et 2e jets que la VKT du 3e jet et des échangeurs de chaleur supplémentaires. En raison de l'élévation plus importante du point d'ébullition dans la massecuite, la VKT du 3e jet fonctionne avec une pression de buées inférieure à celle des VKT des 1er et 2e jets et possède un condenseur indépendant.

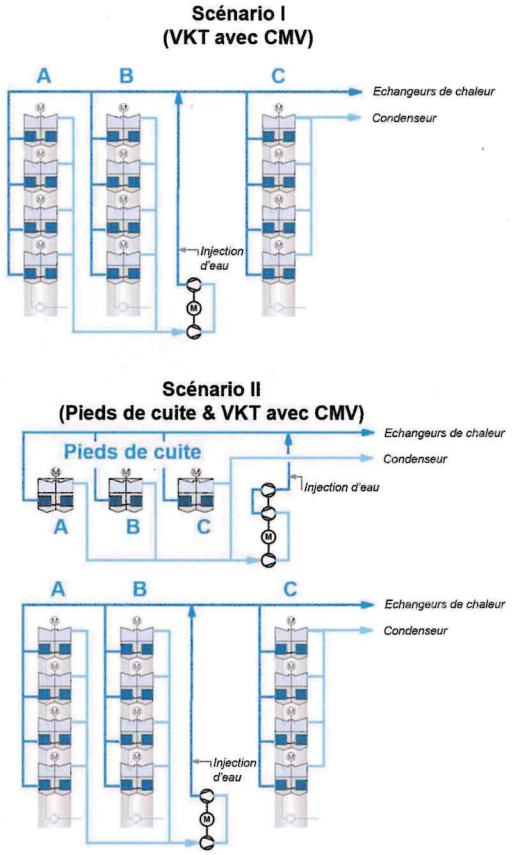

Figure 4 : Atelier de cristallisation VKT avec CMV – (haut, scénario I) et VKT & pieds de cuite avec CMV (bas, scénario II)

Dans le scénario II (figure 4 bas), on exploite en plus des appareils à cuire continus (VKT) également les appareils à cuire discontinus destinés au pied de cuite des 1er, 2e et 3e jets avec un compresseur

de vapeur séparé. Il faut dans ce cas-là comprimer les buées de 0,20 bar abs. à 1,00 bar abs. Les buées comprimées et refroidies à la température de la vapeur saturée sont aussi à la disposition d'autres échangeurs de chaleur en plus des appareils à cuire. Les buées inutiles sont orientées vers le côté basse pression jusqu'à un condenseur.

Dans les deux scénarios, les résultats du calcul des besoins énergétiques sont comparés avec le cas de référence dans le tableau 2. Dans le cas de référence, il faut aussi de l'énergie électrique pour entraîner les pompes, les agitateurs, les centrifugeuses et les sécheurs de sucre en plus de la vapeur provenant de l'atelier d'évaporation. Weidner [7] l'a évalué à 32,24 kWh_{el}/t de sucre. Celle-ci est arrondie et estimée ici à 35 kWh_{el}/t de sucre. Le besoin en énergie total de l'atelier de cristallisation du cas de référence sans compression des buées est ainsi représenté par l'énergie thermique (vapeur) à hauteur de 447 kWh_{th}/t de sucre et par l'énergie électrique à hauteur de 35 kWh_{el}/t de sucre.

L'utilisation de la compression de vapeur permet de réduire de 72 % les besoins en vapeur de l'atelier de cristallisation et de passer à 126 kWh_{th}/t de sucre dans le scénario I (VKT avec CMV) voire même de les réduire de 95 % et de passer à 21 kWh_{th}/t de sucre dans le scénario II (pieds de cuite & VKT avec CMV). En contrepartie, l'emploi du compresseur de buées nécessite une énergie électrique supplémentaire se montant à 37,5 kWh_{el}/t de sucre dans le scénario I et à 54,1 kWh_{el}/t de sucre dans le scénario II. Les scénarios tiennent compte des pompes supplémentaires (par ex. pompe à vide pour le condenseur de la VKT du 3e jet) avec 2 kWh_{el}/t de sucre en plus.

Les besoins en énergie électrique sont multipliés par 2,1 pour tout l'atelier de cristallisation dans le scénario I et par 2,6 dans le scénario II. Ainsi, 321 kWh_{th}/t de sucre sont remplacés par 39,5 kWh_{el}/t de sucre dans le scénario I, ce qui correspond à un quotient de 8,1. Dans le scénario II, ce rapport est de 7,6, ce qui est donc légèrement inférieur en raison d'une compression plus élevée pour les appareils à cuire discontinus des pieds de cuite.

La quantité de vapeur résiduelle dans le scénario II (pieds de cuite et VKT avec CMV) est disponible pour des réchauffements ayant besoin d'une pression élevée, par exemple l'atelier de séchage du sucre et les centrifugeuses.

Tableau 2 : Besoins énergétiques de l'atelier de cristallisation dans le cas de référence, les scénarios I et II

Besoins énergétiques de l'atelier de cristallisation	Sans CMV (Cas de référence)	VKT avec CMV (Scénario I)	Pieds de cuite & VKT avec CMV (Scénario II)
Vapeur vers l'atelier de cristallisation	11,8 kg/100 kg betteraves 447 kWh_{th} / t de sucre	3,3 kg / 100 kg betteraves 126 kWh_{th} / t de sucre	0,6 kg/100 kg betteraves 21 kWh_{th} / t de sucre
Besoin en énergie électrique des équipements de l'atelier de cristallisation	35,0 kWh_{el} / t de sucre	37,0 kWh_{el} / t de sucre	37,0 kWh_{el} / t de sucre
Besoin en énergie électrique du compresseur de vapeur	-	37,5 kWh_{el} / t de sucre	54,1 kWh_{el} / t de sucre
Total du besoin en énergie électrique	35,0 kWh_{el} / t de sucre	74,5 kWh_{el} / t de sucre	91,1 kWh_{el} / t de sucre

RÉSUMÉ ET PERSPECTIVES

Cet article montre comment l'utilisation de la compression mécanique de vapeur permet de réduire nettement le besoin en vapeur dans l'atelier de cristallisation. L'énergie thermique est alors remplacée par de l'énergie électrique. Selon la configuration des installations et leur niveau d'extension, la vapeur peut être presque entièrement remplacée par de l'énergie électrique. L'électrification complète de l'atelier de cristallisation est ainsi à portée de main.

Pour les besoins en énergie électrique mis en œuvre, il est décisif de prévoir la différence de pression entre les buées de cristallisation et la vapeur de chauffe au niveau des appareils à cuire. Des équipements nécessitant un rapport de pression très faible, comme la cristallisation continue avec des agitateurs pour la circulation de la massecuite, demande moins d'énergie électrique en exploitation. Le choix des appareils à cuire est déterminant pour les coûts d'exploitation futurs.

Dans le cadre de la réduction de la consommation énergétique globale d'une sucrerie, les technologies correspondantes seront utilisées dans l'atelier de cristallisation soit individuellement ou combinées. L'utilisation de méthodes classiques d'optimisation de l'efficacité énergétique, notamment la réduction de la quantité d'eau à évaporer dans l'atelier de cristallisation, reste justifiée si elle est économiquement réalisable. Ce cas d'application optimisé sera ensuite électrifié, permettant alors de réduire les besoins en énergie électrique par rapport aux exemples présentés ci-dessus. En conséquence, la mise en œuvre de la compression de vapeur à cet effet sera moindre.

L'économie de vapeur dans l'atelier de cristallisation a un impact considérable sur la facture énergétique d'une sucrerie. La fonction de l'atelier d'évaporation pour la concentration du jus avant évaporation (JAE) en sirop et la fourniture simultanée de chaleur pour d'autres ateliers de la production doit continuer à être assurée avec les avancées technologiques évoquées pour l'atelier de cristallisation. L'introduction de la compression mécanique de vapeur dans une sucrerie nécessite d'autres mesures, notamment dans l'atelier d'évaporation. Celles-ci doivent être considérées séparément. ■

RÉFÉRENCES

[1] The European Parliament and the Council of the European Union (2021) Regulation (EU) 2021/1119 of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'). Official Journal of the European Union | L 243/1. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-DE-FR/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119

[2] Ricke-Herbig M, Schollmeyer O (2021) Roadmap Greenhouse Gas Neutral Sugar Industry in Germany. Sugar Industry 146, 86–91. https://doi.org/10.36961/si26236

[3] Tschersich J (1996) Kristallisation mit Doppeleffektverdampfung - Realisierung des Konzepts: Verdampfungskristallisation und Anlagentechnik [Cristallisation au moyen d'une évaporation à double effet – réalisation du projet : cristallisation par évaporation et technique d'installation]. Zuckerind. 121, 231-236

[4] Austmeyer K E, Bruhns M, Dickopp A, Hoyer F, Kleinhenz K, Wimmerstedt R, Wöhlk W (1988) Mechanische Brüdenkompression [La compression mécanique de vapeur]. VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf

[5] Herold H (1987) Konstruktion und Arbeitsweise der kontinuierlichen Kochapparate von Fives-Cail Babcock in Elsdorf [Construction et mode d'utilisation à Elsdorf des appareils à cuire continus de Fives-Cail-Babcock]. Zuckerind. 112, 118-122

[6] Brunner H R, Geckert K, Frankenfeld T (1992) III. Energietechnik und Wärmewirtschaft der Zuckerfabrik + Raffinerie Aarberg AG [III. Technique énergétique et économie de chaleur de la sucrerie + raffinerie Aarberg AG]. Zuckerind. 117, 454-458

[7] Weidner S (1989) Elektroenergie-Einsparung im Zuckerhaus [Économies d'énergie électrique dans l'atelier de cristallisation]. Zuckerind. 114, 15-24