La déminéralisation par électrodialyse du lactosérum doux de fromagerie

par

R. DELBEKE

Groupe de travail pour l'amélioration de la qualité des produits laitiers
Station Laitière de l'Etat, Melle
Centre de Recherches Agronomiques de l'Etat, Gand (Belgique)

I. — INTRODUCTION

Dans beaucoup de pays on perd une grande partie des lactosérums acides (entre autres ceux provenant de la fabrication de fromages frais et de caséine acide) et même une partie des lactosérums doux n'est pas récupérée dans certains pays.

On peut prévoir que le déversement de ces effluents sera bientôt et définitivement interdit par les règlements, de plus en plus sévères, sur la pollution des cours d'eau.

La composition même du lactosérum en restreint les possibilités d'utilisation et le marché mondial de la poudre de lactosérum n'est pas particulièrement stable. L'offre de poudre de lactosérum augmentera à mesure que la surveillance de la pollution deviendra plus rigoureuse et ceci aura évidemment une influence défavorable sur le prix.

Le marché du lactose aussi est à peu près saturé et ne sera pas immédiatement en mesure d'absorber une forte augmentation de la production.

Il faut donc chercher d'autres moyens de valorisation si l'on veut écouler une grande partie du lactosérum en excédent. La déminéralisation est un de ces moyens et la demande en poudre de lactosérum déminéralisée augmente. Il existe aussi un marché en extension pour les concentrés de protéines lactosériques.

La Station Laitière de l'Etat à Melle étudie les possibilités des plus récentes techniques de valorisation, c'est-à-dire de l'électrodialyse et de l'échange d'ions pour la déminéralisation et de la filtration sur gel et de l'ultrafiltration pour la fabrication de concentrés de protéines. Tout en étudiant les possibilités de ces techniques, la Station accorde aussi son attention aux problèmes connexes et à

l'influence des principaux paramètres et cherche à évaluer grosso modo le coût des différentes opérations.

Nous analyserons ci-après les données recueillies au cours de la déminéralisation de lactosérum doux, provenant de la fabrication de fromage Gouda, par électrolyse à l'aide d'un module d'une marque déterminée. Un exposé des avantages et des inconvénients respectifs de certains systèmes d'électrodialyse ou de ceux de l'électrodialyse et de l'échange d'ions n'est pas envisagé ici.

II. — MODULE ET MEMBRANES

Les essais ont été effectués à l'aide d'un module de type WD 6/2 de la firme néerlandaise Werkspoor Water équipé de membranes Selemion, des types CMV et AMV, de la firme japonaise Asahi Glass.

Chaque membrane a une surface totale de $0,12 \text{ m}^2$ ($60 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) et une surface effective de $0,0775 \text{ m}^2$.

Le nombre de paires de cellules de l'exécution standard s'élève à 50, ce qui porte la surface effective totale à $3,875 \text{ m}^2$. Le nombre de paires de cellules par module peut être augmenté dans une mesure limitée.

La section transversale du circuit hydraulique a une superficie de $2,21 \text{ cm}^2$ ($0,13 \text{ cm} \times 17 \text{ cm}$).

III. — CONDITIONS DE TRAVAIL AU COURS DES ESSAIS

3.1. Surface effective des membranes

Le module a été équipé, pour les essais, de 12 paires de cellules totalisant $0,93 \text{ m}^2$ de surface effective.

Les membranes étaient disposées de façon à former deux cellules à concentré entre chacune des deux cellules à électrodes et les premières cellules à diluat. Certains constructeurs recommandent cet agencement afin de protéger les électrodes.

3.2. Circuits hydrauliques

Nous avons employé un lactosérum concentré, à 25 p. 100 d'extrait sec, obtenu au cours de la fabrication de fromage Gouda (mélange du premier et du deuxième sérums). Un batch de 15 l a été traité à 45°C au cours de chaque essai, jusqu'à élimination de 70 p. 100 ou de 90 p. 100 de la quantité initiale de cendre. La vitesse linéaire du

lactosérum dans les cellules à diluat était de 10 cm/s et la chute de pression dans le compartiment à lactosérum du paquet de membranes de 0,25 kg/cm². Nous n'avons pas employé d'acides ou de bases pour modifier le pH du lactosérum avant ou pendant les essais.

Au départ, le concentré consistait en un batch de 15 l d'une solution à 1,3 p. 100 de NaCl acidifiée au HCl jusqu'au pH 3 et d'une conductivité de 22 mS. Nous avons laissé la conductivité du concentré s'élever jusqu'à 60 mS, puis maintenu constants le volume, le pH et la conductivité.

Pour laver les électrodes nous avons employé un batch de 15 l d'une solution à 0,1 N de Na₂SO₄ acidifiée au H₂SO₄ jusqu'au pH 2,5. Le pH restait constant pendant l'essai.

Le concentré et le liquide de lavage des électrodes n'étaient ni chauffés, ni refroidis pendant l'essai.

Le lactosérum, le concentré et le liquide de lavage des électrodes coulaient dans le même sens à travers le paquet de membranes (« co-courant »). L'alimentation des cellules à électrodes s'accomplissait en parallèle.

La pression dans le compartiment à lactosérum et les cellules à électrodes était plus élevée de 0,02 kg/cm² que celle régnant dans le compartiment à concentré.

3.3. Tension et densité de courant

La densité de courant a été maintenue à 25 mA/cm² jusqu'à ce que l'on puisse régler la tension à 2,5 V par paire de cellules.

A partir de ce moment (quelques minutes après le début de chaque essai) la tension restait constante, de sorte que la densité de courant diminuait à mesure qu'augmentait la résistance du module.

3.4. Schéma de nettoyage

Le compartiment à lactosérum et le compartiment à concentré étaient nettoyés simultanément après chaque essai, à l'aide de batches de 10 l d'eau de puits ordinaire et de solutions à 0,1 N de HCl et de NaOH : 10 mn à l'eau, 20 mn au HCl, 10 mn à l'eau, 20 mn au NaOH, 10 mn à l'eau, 20 mn au HCl et 10 mn à l'eau.

On procédait ensuite à un rinçage à l'eau, en continu, jusqu'à ce que le pH de l'eau dépasse 5.

IV. — METHODES D'ANALYSE

La densité (masse spécifique, d_{4²⁰}^{20° C}) a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre.

La présence éventuelle de composants formant des précipités a été recherchée par centrifugation, pendant 15 mn à 40° C et à 1200 t/mn dans un centrifugeur Gerber, de 25 ml de lactosérum contenu dans des tubes de sédimentation à base conique graduée ; une deuxième centrifugation était parfois effectuée après dilution. Le nombre de ml de sédiment était multiplié par 4 pour permettre l'expression de la quantité de sédiment en ml par 100 ml de lactosérum.

La détermination des teneurs en extrait sec, en cendre, en azote total, en acide citrique, en chlorures et en phosphore était basée sur les méthodes IDF (1962, 1964, 1962 a, 1967, 1961, 1967 a).

L'azote non protéique a été déterminé par la méthode décrite par De Vleeschauwer et *al.* (1948).

La teneur en lactose a été déterminée par la méthode colorimétrique de Folin-Wu (longueur d'onde 580 nm), telle qu'elle a été décrite par Triebold et Aurand (1963), et les teneurs en Na, en K et en Ca par photométrie de flamme selon la méthode de Deijs et Kowsoleea (1967).

V. — DISCUSSION DES RESULTATS

5.1. Données relatives à l'électrodialyse

Les principales données relatives à l'électrodialyse sont rassemblées dans le tableau 1.

Il s'agit des valeurs moyennes de deux séries d'essais visant à éliminer respectivement 70 p. 100 et 90 p. 100 de la cendre initialement présente. Les données individuelles des essais ne s'écartaient que peu des valeurs moyennes. Les valeurs maximales et minimales ne sont pas mentionnées.

Les compositions des lactosérums employés pour l'une et pour l'autre série d'essais ne différaient que peu.

Des essais préliminaires ont indiqué que des diminutions de 80 p. 100 et 95 p. 100 de la conductivité du lactosérum correspondaient à peu de chose près à une élimination de respectivement 70 p. 100 et 90 p. 100 de la quantité initiale de cendre ; nous nous sommes donc basés sur la diminution de la conductivité pour arrêter les essais. Il ressort des données du tableau 1 que nous avons approché notre objectif de fort près dans la première série d'essais, tandis que seulement 88,4 p. 100 de la quantité initiale de cendre ont été éliminés dans la deuxième série, au lieu des 90 p. 100 désirés.

Le transport du « solvant » atteignait 3,8 p. 100 dans la déminéralisation à 70 p. 100 ; en d'autres termes, près de 3,8 p. 100 de la

		Elimination 70 p. 100 cendre initiale	Elimination 90 p. 100 cendre initiale
Lactosérum	p. 100 extrait sec	25,3	25,0
	p. 100 cendre, avant	2,04	2,03
	p. 100 cendre, après	0,64	0,26
	p. 100 cendre éliminée	70,0	88,4
	conductivité, en mS, avant	12,45	12,53
	conductivité, en mS, après	2,90	0,62
	diminution de la conductivité, en p. 100	79,9	95,1
Transport de « solvant », en p. 100		3,8	7,5
Densité de courant, en mA/cm ²			
après diminution de la conductivité de	50 p. 100	25,0	24,1
	60 p. 100	18,5	17,4
	70 p. 100	12,0	11,2
	80 p. 100	8,7	7,8
	90 p. 100		4,6
	95 p. 100		2,9
Consommation de courant continu, en Wh			
après diminution de la conductivité de	50 p. 100	74	76
	60 p. 100	104	106
	70 p. 100	140	143
	80 p. 100	184	187
	90 p. 100		261
	95 p. 100		341
Litres de lactosérum traités par m ² de membrane et par heure			
après diminution de la conductivité de	50 p. 100	72	71
	60 p. 100	57	56
	70 p. 100	41	39
	80 p. 100	28	26
	90 p. 100		13
	95 p. 100		8
Cendre éliminée par m ² de membrane et par heure, en gramme		444	145
Consommation de courant continu par gramme de cendre éliminée, en Wh		0,79	1,15
Consommation de courant continu par kg d'extrait sec déminéralisé, en Wh		47	94

quantité de lactosérum traitée ont été retrouvés dans le concentré. Dans la déminéralisation à 90 p. 100, on arrivait presque au double : 7,5 p. 100.

Malgré la tension constante, la densité de courant était à tout moment un peu moindre dans la deuxième série d'essais que dans la première. Ceci a eu pour conséquence que la durée du traitement requis pour obtenir une diminution de 80 p. 100 de la conductivité a été un peu plus longue et la consommation de courant continu un peu plus élevée. De ce fait, la diminution de 80 p. 100 de la conductivité qui a pu être obtenue pour 28 l de lactosérum par m² de membrane et par heure dans la première série d'essais, n'a pu être obtenue que pour 26 l dans la seconde série. Comme pratiquement tous les paramètres étaient faciles à régler et étaient aussi contrôlés efficacement, la cause doit être cherchée dans les minimes différences en composition des lactosérums et dans l'efficacité du nettoyage.

Le calcul de la consommation de courant continu a été basé uniquement sur la tension par paire de cellules (obtenue par mesurage direct entre 5 paires de cellules). L'indication de la consommation calculée d'après la tension aux électrodes n'a guère de sens ici.

La durée moyenne d'une déminéralisation à 90 p. 100 a été de 2 h 12 mn et correspond à la durée d'un batch recommandée par certains constructeurs pour limiter la prolifération des bactéries. La déminéralisation à 70 p. 100 n'a exigé que 34 mn.

On peut aisément déduire des données du tableau 1 que les frais diffèrent considérablement selon que l'on élimine 70 p. 100 ou 90 p. 100 de la quantité initiale de cendre. Si la quantité de lactosérum déminéralisée à 70 p. 100 s'est élevée à 28 l par heure et par m² de membrane, la quantité déminéralisée à 90 p. 100 n'atteignait plus que 8 l. Dans le premier cas on avait éliminé 444 g de cendre par heure et par m² de membrane contre seulement 145 g dans la deuxième série d'essais. Cette différence influe naturellement dans une très large mesure sur les frais d'investissement.

La consommation de courant continu par kg d'extrait sec déminéralisé s'est élevée pour la déminéralisation à 90 p. 100 à exactement le double de la consommation relevée pour la déminéralisation à 70 p. 100.

Une température élevée est favorable à l'efficacité du courant continu. Certains constructeurs conseillent de ne pas opérer à plus de 30° C quand la densité de courant est grande lors de la mise en marche. Au cours de nos essais effectués à 45° C, la densité de courant maximale atteignait 25 mA/cm² ; l'efficacité du courant nécessaire pour l'obtention d'un degré de déminéralisation déterminé est restée pratiquement inchangée malgré le nombre croissant d'essais et les membranes n'ont subi aucun dommage visible.

En augmentant la tension par paire de cellules et (ou) la vitesse linéaire, on peut augmenter la densité de courant jusqu'à un certain point sans que des phénomènes de polarisation néfaste se produisent de façon nettement décelables. Les frais d'investissement peuvent être quelque peu comprimés de cette manière. Nous sommes toutefois convaincus que les économies ainsi réalisées ne contribueraient que dans une mesure très restreinte à une réduction des frais totaux, ceci pour différentes raisons (entre autres l'abrégement de la longévité des membranes et une augmentation éventuelle de la consommation de courant alternatif).

5.2. Données d'analyse

Les principales données relatives à l'analyse du lactosérum sont rassemblées dans le tableau 2. Toutes les teneurs y sont exprimées en pourcentage de poids. Aucun composant formant des précipitations n'a été décelé dans aucun essai.

TABLEAU 2. — Résultats moyens de l'analyse

		Elimination 70 p. 100 de cendre initiale	Elimination 90 p. 100 de cendre initiale
Kg lactosérum	avant	16,65	16,62
	après	15,87	15,19
	perte, en p. 100	4,7	8,6
Extrait sec	p. 100 avant	25,300	25,000
	p. 100 après	24,400	23,900
	perte, en p. 100	8,1	12,6
Azote total	p. 100 avant	0,528	0,544
	p. 100 après	0,519	0,538
	perte, en p. 100	6,8	8,9
Azote non protéique	p. 100 avant	0,161	0,167
	p. 100 après	0,142	0,139
	perte, en p. 100	14,8	25,0
Azote protéique	p. 100 avant	0,367	0,377
	p. 100 après	0,377	0,139
	perte, en p. 100	1,6	3,2
Lactose (monohydrate)	p. 100 avant	19,820	19,422
	p. 100 après	20,038	20,263
	perte, en p. 100	3,6	4,7
Acide citrique (anhydride)	p. 100 avant	0,601	0,590
	p. 100 après	0,555	0,158
	perte, en p. 100	12,0	75,5

		Elimination 70 p. 100 de cendre initiale	Elimination de 90 p. 100 cendre initiale
Cendre	p. 100 avant p. 100 après élimination, en p. 100	2,040 0,640 70,0	2,030 0,260 88,4
Na	p. 100 avant p. 100 après élimination, en p. 100	0,252 0,082 69,1	0,253 0,020 92,9
K	p. 100 avant p. 100 après élimination, en p. 100	0,715 0,113 84,9	0,722 0,007 99,2
Ca	p. 100 avant p. 100 après élimination, en p. 100	0,192 0,050 75,0	0,205 0,033 85,3
Cl	p. 100 avant p. 100 après élimination, en p. 100	0,431 0,006 98,6	0,408 0,007 98,5
P	p. 100 avant p. 100 après élimination, en p. 100	0,185 0,089 54,8	0,175 0,031 82,8
Titre d'acidité en °N	avant après baisse	47 35 12	45 34 11
Acidité, en meq	avant après diminution, en p. 100	705 505 28,4	675 472 30,1
pH	avant après baisse	6,15 5,76 0,39	6,25 4,87 1,38

La déminéralisation à 70 p. 100 est allée de pair avec une perte moyenne de 4,7 p. 100 du nombre initial de kg de lactosérum ; cette perte s'est élevée à 8,6 p. 100 dans la déminéralisation à 90 p. 100. Cette différence est évidemment imputable en partie à la différence en transport du « solvant ».

Le transport du « solvant » a aussi pour conséquence que les teneurs en certains composants du lactosérum, tels que l'azote total, l'azote protéique et le lactose, ne sont pas beaucoup plus basses ou sont parfois plus élevées après la déminéralisation qu'avant celle-ci.

La déminéralisation à 70 p. 100 a entraîné une perte de 8,1 p. 100 de l'extrait sec initial ; cette perte s'est élevée à 12,6 p. 100 dans

la déminéralisation à 90 p. 100. Ces pertes ne sont imputables qu'en partie à l'élimination de la cendre. Dans la déminéralisation à 70 p. 100, la quantité d'extrait sec perdue était constituée pour 70 p. 100 de cendre et pour 30 p. 100 d'autres composants du lactosérum ; les 8,1 p. 100 d'extrait sec perdus se décomposent donc en environ 5,7 p. 100 de cendre et 2,4 p. 100 d'autres composants. La perte en extrait sec après déminéralisation à 90 p. 100 ne comportait que 57 p. 100 de cendre et 43 p. 100 d'autres composants du lactosérum, de sorte que les 12,6 p. 100 d'extrait sec perdus se décomposent en environ 7,2 p. 100 de cendre et 5,4 p. 100 d'autres composants.

Les pertes d'azote non protéique se sont élevées à respectivement 14,8 p. 100 et 25 p. 100, mais les pertes d'azote protéique à seulement 1,6 p. 100 et 3,2 p. 100. La quantité totale d'azote perdue pendant la déminéralisation à 70 p. 100 était constituée de 77 p. 100 d'azote non protéique et de 23 p. 100 d'azote protéique ; une répartition à peu près identique a été constatée pour la déminéralisation à 90 p. 100. On peut admettre que la plus grande partie des protéines perdues ne se retrouve pas dans le concentré, mais est retenue dans les cellules à lactosérum. En valeur absolue, la perte de protéines (azote protéique $\times 6,38$) au cours des essais a naturellement été minime : 8 g et 13 g pour les déminéralisations à respectivement 70 p. 100 et 90 p. 100.

L'élimination des ions, exprimée en pourcentage, concorde à peu près avec ce que l'on peut escompter d'après la théorie générale. Les quantités d'ions Ca éliminées sont relativement élevées, aussi bien après 70 p. 100 qu'après 90 p. 100 de déminéralisation, mais ceci est peut-être imputable à la présence de CaCl_2 (ajouté pendant la fabrication du fromage). Seule l'élimination des ions Na s'écarte assez sensiblement des prévisions. En théorie, les ions K et Cl sont plus facilement éliminés que les ions Na, mais l'élimination de seulement 93 p. 100 des ions Na après une déminéralisation à 90 p. 100 est plutôt faible par rapport aux quelques 99 p. 100 atteints pour les ions K et Cl. De plus, seulement quelques 69 p. 100 des ions Na étaient éliminés après la déminéralisation à 70 p. 100. Aucune explication satisfaisante de ce phénomène ne peut, provisoirement, être donnée.

Environ 28 p. 100 du nombre initial de meq d'acides (1°N indique 1 meq d'acide par litre) étaient éliminés après la déminéralisation à 70 p. 100. On peut admettre que quasiment pas de lactose n'a été converti en acide lactique au cours de cette série d'essais : lactosérum concentré à nombre de germes peu élevé, électrodialyse à 45° C, durée moyenne de seulement 34 mn. Après 90 p. 100 de déminéralisation, il restait encore dans le lactosérum 70 p. 100 du nombre initial de meq d'acide. Il est difficile de déterminer en quelle mesure ceci est imputable à la formation d'acide lactique pendant l'électrodialyse (durée moyenne de 132 mn). D'une part,

environ 75 p. 100 de l'acide citrique étaient éliminés après la déminéralisation à 90 p. 100 (contre seulement 12 p. 100 après 70 p. 100 de déminéralisation) et, d'autre part, le minime écart en pourcentage d'élimination du lactose entre les déminéralisations à 70 p. 100 et à 90 p. 100 peut aisément s'expliquer par la grande différence en transport du « solvant », lequel contient naturellement une partie des composants du lactosérum.

VI. — ESTIMATION DU COUT DE L'ELECTRODIALYSE

Les teneurs en extrait sec et en cendre du lactosérum varient selon la saison et, surtout, selon le mode de fabrication du fromage (par exemple : quantités de KNO_3 et de CaCl_2 , composition de l'eau, degré de dilution du lactosérum).

Le lactosérum employé pour nos essais provenait de la laiterie expérimentale et contenait environ 5,43 p. 100 d'extrait sec et 0,44 p. 100 de cendre. L'analyse de lactosérums provenant d'un certain nombre de laiteries industrielles a démontré que les fabricants de poudre peuvent compter recevoir un lactosérum d'une densité moyenne de 1,0215 et à teneurs en extrait sec et en cendre de respectivement 5,4 p. 100 et 0,5 p. 100.

Nous nous proposons de calculer ici le coût de l'élimination quotidienne de respectivement 70 p. 100 et 90 p. 100 de la quantité initiale de cendre de 100 000 l d'un lactosérum du type précité. Ceci en supposant que l'on utilise les mêmes paramètres que dans les traitements expérimentaux.

Le tableau 3 donne un aperçu des conditions valables pour les calculs.

TABLEAU 3. — Capacité de l'installation

100 000 l de lactosérum par jour

Lactosérum : mélange du premier et du deuxième sérums provenant de la fabrication de fromage Gouda

densité 1,0215 - titre d'acidité 10° N - pH 6,50

extrait sec 5,4 p. 100

cendre 0,5 p. 100

Déminéralisation : élimination de 70 p. 100 ou de 90 p. 100 de la quantité initiale de cendre

Paramètres : comme dans les traitements expérimentaux

6.1. Facteurs de base pour le calcul des frais indirects

Le tableau 4 donne un aperçu des facteurs de base pour le calcul des frais indirects.

TABLEAU 4. — Facteurs de base pour le calcul des frais indirects

	Elimination 70 p. 100 de cendre	Elimination 90 p. 100 de cendre
Nombre de modules WD 10/4 à 53 paires de cellules		12
Nombre de modules WD 10/4 à 54 paires de cellules	3	
Estimation des frais d'investissement (membranes non comprises), en FB	5 000 000	12 000 000
Amortissement, en années		5
Intérêt pour privation de capital, en p. 100		6
Assurance et divers, en p. 100 de l'investissement		2

Werkspoor Water met sur le marché des modules du type WD 10/4, dont l'exécution standard contient 50 paires de cellules totalisant 14 m² de surface de membrane active.

Nous supposons que l'on travaille 24 h par jour : 18 h (3 × 6 h) sont dévolues à la déminéralisation et 6 h (3 × 2 h) au nettoyage. Afin de freiner la prolifération des bactéries, la déminéralisation s'effectue par batches de 2 h (3 batches consécutifs, entrecoupés d'un bref rinçage).

Les 100 000 l de lactosérum contiennent 510,75 kg de cendre, de sorte que la déminéralisation à 70 p. 100 doit en éliminer 19 863 g par heure et celle à 90 p. 100 25 538 g par heure. Selon les données du tableau 1 ceci nécessite respectivement environ 44,8 et 176,2 m² de membranes, soit 3,2 et 12,6 modules standards, selon que l'on veut déminéraliser de 70 p. 100 ou de 90 p. 100. Le nombre de paires de cellules par module peut être augmenté dans une certaine mesure ; si on prend respectivement 3 modules à 54 paires de cellules et 12 modules à 53 paires on arrive largement au nombre requis de m² de membranes.

Les frais d'investissement, membranes non comprises, pour une installation automatique peuvent être estimés à 5 000 000 FB pour une déminéralisation à 70 p. 100 et à 12 000 000 FB pour une déminéralisation à 90 p. 100. L'investissement comprend : toutes les conduites électriques et hydrauliques internes, les pompes, les bacs de cir-

TABLEAU 5. — Facteurs de base pour le calcul des frais directs

		Elimination de 70 p. 100 de cendre	Elimination de 90 p. 100 de cendre
Schéma de fonctionnement	Nombre de jours par an	250	
	Nombre d'heures par jour	24	
	Nombre d'heures par jour destinées à la déminéralisation	18	
Membranes	Nombre de membranes	324	1272
	Prix moyen d'une membrane, en FB	500	
	Remplacement des membranes	tous les ans	
Electricité	Consommation de courant continu, en Wh par gramme de cendre éliminée, électrodes comprises	0,87	1,26
	Marge de sécurité, en p. 100, pour la consommation de courant continu	10	
	Consommation de courant alternatif, en p. 100 de la consommation de courant continu	50	
	Prix du kWh, en FB	1,1	
Eau	Consommation, en m ³ par jour	30	60
	Prix du m ³ , en FB	4	
Produits chimiques	Consommation de HCl à 35 p. 100, en kg par jour	40	70
	Consommation de NaOH à 30 p. 100, en kg par jour	30	50
	Prix du HCl à 35 p. 100, en FB/kg	2,4	
	Prix du NaOH à 30 p. 100, en FB/kg	1,5	
	Coût d'autres produits chimiques, en p. 100 du coût total en HCl et NaOH (Na ₂ SO ₄ , H ₂ SO ₄ , NaCl, nettoyage externe)	5	
Main-d'œuvre	Nombre d'heures - homme par jour	3	5
	Coût par heure - homme, en FB	160	
Entretien	Frais d'entretien, en p. 100 de l'investissement	1	
Production	Perte d'extrait sec, en p. 100	8,3	12,8
	Pourcentage d'eau de la poudre de lactosérum déminéralisé	3	
	Nombre de kg de poudre de lactosérum déminéralisé, par an	1 303 600	1 239 700

culution du lactosérum, du concentré, du liquide de rinçage des électrodes et des solutions de nettoyage et les réservoirs à produits chimiques concentrés. Il n'est pas tenu compte ici de frais relatifs au bâtiment.

Les autres facteurs figurant au tableau 3 ne nécessitent pas d'explications.

6.2. Facteurs de base pour le calcul des frais directs

Le tableau 5 donne un aperçu des facteurs de base pour le calcul des frais directs. Nous ne commenterons ici que ceux qui nécessitent quelques explications.

Les opinions diffèrent quant à la longévité des membranes. Celle des membranes cationiques peut être estimée à 1 ou 2 ans ; celle des membranes anioniques est moins grande. Il est sage de prévoir un remplacement annuel dans le calcul des frais ; c'est pourquoi le coût des membranes ne figure pas parmi les frais indirects. Les membranes anioniques sont sensiblement plus chères que les cationiques ; pour le module choisi le prix moyen est d'environ 500 FB.

D'après le tableau 1 il faut compter 0,79 ou 1,15 Wh en courant continu, selon que l'on déminéralise à 70 p. 100 ou à 90 p. 100, pour éliminer 1 g de cendre. Puisqu'il faut tenir compte ici de la tension mesurée entre les électrodes, la consommation totale est estimée à respectivement 0,87 et 1,26 Wh. La consommation de courant continu ainsi calculée est majorée de 10 p. 100 par mesure de prudence. Cette majoration n'influe que peu sur les frais totaux, comme le montre la récapitulation des frais (tab. 6).

En décrivant les conditions de travail nous avons signalé que la chute de pression n'était que de 0,25 kg/cm² pour le module WD 6/2. C'est là une valeur très basse et la consommation de courant alternatif ne s'élèvera, au plus, qu'à 50 p. 100 de la consommation de courant continu pour le module WD 10/4.

Malgré l'automatisation, il faut compter 3 ou 5 h-homme par jour selon que l'on déminéralise à 70 p. 100 ou à 90 p. 100. Ceci en comprenant le grand nombre d'heures-homme requises pour le remplacement « annuel » des membranes et pour le remplacement à des intervalles irréguliers d'une ou plusieurs membranes endommagées (ce qui nécessite également l'ouverture de tout le paquet). Il faut aussi tenir compte du nettoyage externe et de l'entretien de l'installation, de l'exécution de petites réparations, des différents travaux hors la mise en marche et de l'arrêt, ainsi que d'un minimum de surveillance pendant le fonctionnement.

Le tableau 2 montre que les pertes d'extrait sec se sont élevées à 8,1 p. 100 et 12,6 p. 100 pour les déminéralisations à respectivement 70 p. 100 et 90 p. 100. Le calcul des frais table, par prudence, sur des pertes de respectivement 8,3 p. 100 et 12,8 p. 100.

TABLEAU 6. — Récapitulation des frais, en FB

	Frais totaux		Frais par kg de poudre		Elimination de 70 p. 100 de cendre			Elimination de 90 p. 100 de cendre		
	élimination de 70 p. 100 de cendre	élimination de 90 p. 100 de cendre	élimination de 70 p. 100 de cendre	élimination de 90 p. 100 de cendre	part en p. 100 dans les			part en p. 100 dans les		
					frais indirects	frais directs	frais totaux	frais indirects	frais directs	frais totaux
Amortissement	1 000 000	2 400 000	0,767	1,936	71,4		51,5	71,4		51,0
Intérêt pour privation de capital	300 000	720 000	0,230	0,581	21,4		15,5	21,4		15,3
Assurance et divers	100 000	240 000	0,077	0,194	7,2		5,1	7,2		5,1
Total des frais indirects	1 400 000	3 360 000	1,074	2,711			72,1			71,4
Remplacement de membranes	162 000	636 000	0,125	0,513		30,0	8,3		47,3	13,5
Electricité	141 000	263 000	0,108	0,212		26,1	7,3		19,6	5,6
Eau	30 000	60 000	0,023	0,048		5,5	1,5		4,5	1,3
Produits chimiques	38 000	64 000	0,029	0,052		7,0	2,0		4,8	1,4
Main-d'œuvre	120 000	120 000	0,092	0,161		22,2	6,2		14,9	4,2
Entretien	50 000	120 000	0,038	0,097		9,2	2,6		8,9	2,6
Total des frais directs	541 000	1 343 000	0,415	1,083			27,9			28,6
Frais totaux	1 941 000	4 703 000	1,489	3,794						

6.3. Récapitulation des frais

Le tableau 6 indique les frais totaux, les frais par kg de poudre de lactosérum déminéralisé et donne un aperçu de la ventilation des frais.

Le coût total d'une déminéralisation à 90 p.100 est environ 2,4 fois plus élevé que celui d'une déminéralisation à 70 p.100, les frais indirects représentant dans les deux cas près de 70 p.100 du coût total.

La perte d'extrait sec étant plus grande dans la déminéralisation à 90 p.100 que dans celle à 70 p.100, le total des frais au kg de poudre déminéralisée à 90 p.100 est environ 2,5 fois plus élevé que le total des frais au kg de poudre déminéralisée à 70 p.100.

Le remplacement de membranes représente environ 30 p.100 et 47 p.100 des frais directs, mais seulement quelques 8 p.100 et 13 p.100 des frais totaux, selon le taux de déminéralisation. Parmi les frais directs, la consommation d'électricité figure en deuxième et la main-d'œuvre en troisième place. Leur part dans les frais totaux n'est pas bien élevée.

VII. — CONCLUSION

Le module-pilote WD 6/2 testé est pratiquement construit de la même façon que le module industriel WD 10/4, de sorte que les résultats expérimentaux se prêtent remarquablement à l'extrapolation.

Malgré la haute température de service et le grand nombre d'essais, l'efficiencia de courant est restée à peu près inchangée pour chaque degré de déminéralisation choisi. Ni les membranes, ni les électrodes n'ont subi de détériorations nettement décelables. La densité de courant n'a toutefois jamais atteint des valeurs élevées (maximum 25 mA/cm²). Des phénomènes de polarisation néfastes ne se sont pas produits et le schéma de nettoyage a donné satisfaction.

Après 70 p.100 et 90 p.100 de déminéralisation, la cendre représentait respectivement 70 p.100 et 57 p.100 de la quantité d'extrait sec perdue. Quand on déminéralisait à 90 p.100, les pertes d'acide citrique, d'azote non protéique, de protéines (azote protéique $\times 6,38$) et de lactose étaient plus élevées de respectivement 500 p.100, 65 p.100, 50 p.100 et 25 p.100 que quand on déminéralisait à 70 p.100. Ces différences sont imputables en partie au transport du « solvant » (lequel contient aussi des composants du lactosérum), plus intense pour un degré de déminéralisation élevé.

Le coût total d'une déminéralisation à 70 p.100 est plutôt modeste, mais celui d'une déminéralisation à 50 p.100 est assez élevé : pour une installation d'une capacité déterminée et fonctionnant dans des conditions expérimentales, nous sommes arrivés, en

incluant un remplacement annuel des membranes, à respectivement environ 1,5 et 3,8 FB par kg de poudre déminéralisée. Une déminéralisation à 90 p.100 par électrodialyse ne pose toutefois pas de problèmes et les frais directs (environ 1,1 FB par kg de poudre déminéralisée pour l'installation et les conditions de travail en cause ici) sont très acceptables. Les frais directs de la déminéralisation à 70 p.100 sont très bas (environ 0,4 FB par kg de poudre déminéralisée).

Résumé

L'offre de poudre de lactosérum augmentera à mesure que la surveillance de la pollution deviendra plus rigoureuse et ceci aura une influence défavorable sur le prix. Il faut donc chercher d'autres moyens de valoriser une importante quantité de lactosérum. La déminéralisation est un de ces moyens et l'on constate un accroissement de la demande de poudre de lactosérum déminéralisée.

Une discussion des données relatives à l'électrodialyse et à l'analyse du lactosérum, obtenues au cours de deux séries d'essais visant à déminéraliser de respectivement 70 p.100 et 90 p.100, est suivie d'une évaluation des frais de déminéralisation, basée sur les résultats des essais.

Les essais ont été effectués avec un module WD 6/2 de la firme néerlandaise Werkspoor Water équipé de membranes Selemion des types CMV et AMV de la firme japonaise Asahi Glass. Les principales conditions de travail étaient : lactosérum à 25 p.100 d'extrait sec et 2 p.100 de cendre, température de 45° C, vitesse linéaire de 10 cm/s, densité maximale du courant 25 mA/cm², tension constante de 2,5 V par paire de cellules.

Une déminéralisation à 70 p.100 a éliminé 444 g et une déminéralisation à 90 p.100 n'a éliminé que 145 g de cendre par heure et par m² de membrane. La consommation de courant continu s'est élevée à 0,79 Wh par gramme dans le premier cas et à 1,15 Wh dans le second ; pour le calcul on s'est servi de la tension par paire de cellules (mesure directe entre 5 paires de cellules).

La perte d'extrait sec s'est élevée à 8,1 p.100 dans la déminéralisation à 70 p.100 et à 12,6 p.100 dans celle à 90 p.100 ; dans le premier cas la quantité d'extrait sec perdue était constituée de 70 p.100 de cendre et de 30 p.100 d'autres constituants du lactosérum ; les valeurs correspondantes étaient de 57 p.100 et de 43 p.100 dans le second cas. Dans la déminéralisation à 70 p.100 l'élimination des ions Na a été moins considérable que normalement à prévoir.

Pour calculer les frais, on part d'une installation capable de déminéraliser à 70 p.100 ou à 90 p.100 un volume quotidien de 100 000 l

de lactosérum d'une composition déterminée (e.a. 5,4 p. 100 d'extrait sec et 0,5 p. 100 de cendre) et l'on suppose que l'on utilise les mêmes paramètres qu'au cours des déminéralisations expérimentales. Un aperçu des facteurs de base pour le calcul des frais directs et indirects conduit à une répartition des frais et au prix de revient total. Les frais totaux par kg de poudre déminéralisée sont plus élevés d'environ 2,5 fois pour la déminéralisation à 90 p. 100 que pour celle à 70 p. 100 : environ 3,8 FB au lieu d'environ 1,5 FB. Les frais indirects représentent environ 70 p. 100 des frais totaux.

Abstract

The quantity of whey powder offered will increase as pollution control is intensified, and this will reflect unfavourably on the price. Therefore other methods of valorization must be sought for a large portion of the whey. Demineralization is one of the means and the demand for demineralized whey powder is increasing.

A discussion of the data concerning electrodialysis and whey analysis obtained from two experimental series in which a demineralization of respectively 70 p. 100 and 90 p. 100 was aimed at, is followed by an estimate of the cost of demineralization, based on the experimental results.

The experiments were carried out with a module WD 6/2 of the Dutch firm Werkspoor Water, equipped with membranes Selemion types CMV and AMV of the Japanese firm Asahi Glass. The main working conditions were : whey containing 25 p. 100 dry matter and 2 p. 100 ash, temperature 45° C, linear velocity 10 cm/s, maximal current density 25 mA/cm², constant tension of 2.5 V per cell pair.

With a 70 p. 100 demineralization 444 g of ash was removed per h and per m² of membrane and with a 90 p. 100 demineralization only 145 g. In the first case the consumption of direct current amounted to 0.79 Wh per g ash removed and in the second case it was 1.15 Wh ; in the calculation use was made of the tension per cell pair (direct measurement between 5 cell pairs).

With a 70 p. 100 and a 90 p. 100 demineralization respectively 8.1 p. 100 and 12.6 p. 100 dry matter was lost, and in the first case the amount of dry matter lost consisted of 70 p. 100 ash and 30 p. 100 other whey constituents ; in the second case these values were 57 and 43 p. 100 respectively. With a 70 p. 100 demineralization fewer Na-ions were removed than would normally be expected.

In calculating the cost we started from an installation which can daily demineralize 100,000 l of whey of a determined composition (i.a. 5.4 p. 100 dry matter and 0.5 p. 100 ash) to 70 p. 100 or to 90 p. 100 ; it is assumed that the same parameters are used as in the experi-

mental trials. A review of the basic factors for the calculation of the indirect and direct costs, leads to a cost distribution and the total cost. The total costs per kg demineralized powder are approximately 2.5 times as high for a 90 p. 100 demineralization as for a 70 p. 100 one, approximately 3.8 as compared with approximately 1.5 BF. The in direct costs constitute almost 70 p. 100 of the total costs.

Zusammenfassung

Das Angebot an Molkepulver wird in dem Maße ansteigen, wie der Kampf gegen die Umweltverschmutzung zunimmt, und das wird sich ungünstig auf den Preis auswirken. Für eine große Menge Molke müssen daher andere Valorisationsmittel gefunden werden. Die Entmineralisierung ist eines dieser Mittel, und die Nachfrage nach entsalztem Molkepulver nimmt zu.

Eine Besprechung der in zwei Versuchsreihen mit Elektrodialyse und Molkenanalyse erhaltenen Daten, wobei eine Entmineralisierung von 70 p. 100 beziehungsweise eine solche von 90 p. 100 ins Auge gefaßt wurde, ist gefolgt von einer auf Grund der Versuchsergebnisse durchgeführten Schätzung der Entsalzungskosten.

Die Versuche wurden mit einem Modul WD 6/2 der holländischen Firma Werkspoor Water durchgeführt, das mit Selektion-Membranen der Type CMV und AMV der japanischen Firma Asahi Glass ausgerüstet war. Die hauptsächlichsten Arbeitsbedingungen waren : Molke mit 25 p. 100 Trockensubstanz und 2 p. 100 Asche, Temperatur 45° C, lineare Geschwindigkeit 10 cm/s, maximale Stromdichte 25 mA/cm², konstante Spannung 2,5 V pro Zellenpaar.

Bei 70 p. 100 iger Entmineralisierung wurden pro Stunde und pro m² Membran 444 g Asche ausgeschieden, und bei 90 p. 100 iger Entmineralisierung nur 145 g. Im ersten Fall betrug der Verbrauch an Gleichstrom 0,79 Wh pro g ausgeschiedene Asche, und im zweiten Fall 1,15 Wh ; bei der Berechnung benutzte man die pro Zellenpaar herrschende Spannung (direkte Messung zwischen 5 Zellenpaaren).

Bei 70 p. 100 iger und 90 p. 100 iger Entmineralisierung gingen 8,1 bzw. 12,6 p. 100 Trockenmasse verloren, und im ersteren Fall bestand die verlustige Trockenmasse zu 70 p. 100 aus Asche und zu 30 p. 100 aus anderen Molkebestandteilen. Im zweiten Falle betrugen diese Werte 57 bzw. 43 p. 100. Bei 70 p. 100 iger Entsalzung wurden weniger Na-Ionen ausgeschieden als man normalerweise erwarten würde.

Zwecks Berechnung der Kosten geht man von einer Anlage aus, die täglich 100.000 Liter Molke einer bestimmten Zusammensetzung (u.a. 5,4 p. 100 Trockenmasse und 0,5 p. 100 Asche) bis zu 70 p. 100 oder 90 p. 100 entsalzen kann; vorausgesetzt, daß man dieselben Parameter wie bei den Versuchsentmineralisierungen benutzt. Ein Überblick über

die — der Berechnung der indirekten und direkten Kosten dienenden — Grundfaktoren führt zu einer Kostenverteilung und zum Gesamtgestehungspreis. Die Gesamtkosten pro kg entmineralisiertes Molkepulver liegen für eine 90 p.100 ige Entmineralisierung ca. 2,5 mal höher als für eine solche von 70 p.100: das sind ca. 3,8 anstatt ca. 1,5 BF. Die indirekten Kosten betragen ungefähr 70 p.100 der Gesamtkosten.

Reçu pour publication le 30 août 1974.

Références

- DEIJES (W. B.) and KOWSOLEEA (A. R.) (1967). — Emmision-flame photometric determinations of Na, K, Ca and Mg in plant material and in faeces, urine and milk from cows. *Meded. Inst. biol, scheik. Onderz. LandbGew.*, Jaarb. 1967, Meded. 350, 101.
- DE VLEESCHAUWER (A.), HENDRICKX (H.) und HEYNDRIKX (G.) (1948). — Onderzoekingsmethoden van zuivelprodukten. *N.V. Standaard-Boekhandel, Antwerpen*, p. 56.
- HCNN (1952). — Bepaling van de normzuurtegraad (°N) van melk. *Hoofd-commissie voor de Normalisatie in Nederland*, N 913.
- IDF (1961). — Determination of the salt content of cheese. *International dairy federation, Brussels, International standard FIL-IDF*, 17.
- IDF (1962). Determination of the total solids content of milk. *International dairy federation, Brussels, International standard FIL-IDF*, 21.
- IDF (1962 a). — Determination of the total nitrogen content of milk by the Kjeldahl method. *International dairy federation, Brussels, International standard FIL-IDF*, 20.
- IDF (1964). — Determination of the ash content of processed cheese products. *International dairy federation, Brussels, International standard FIL-IDF*, 27.
- IDF (1967). — Determination of the citric acid content of cheese and processed cheese products. *International dairy federation, Brussels, International standard FIL-IDF*, 34 A.
- IDF (1967 a). — Determination of the phosphorus content of milk. *International dairy federation, Brussels, International standard FIL-IDF*, 42.
- TRIEBOLD (H. O.) and AURAND (L. W.) (1963). — Food composition and analysis. *D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, New Jersey*, p. 348.
-