

Caractérisation et traitement par coagulation-décantation d'un effluent de laiterie

Ahmed HAMDANI^{a*}, Mohamed CHENNAOUI^a, Omar ASSOBBHEI^a,
Mohammed MOUNTADAR^b

^a Laboratoire de Microbiologie Appliquée et Biotechnologie, Faculté des Sciences de l'Université Chouaib Doukkali, BP 20, El Jadida 24000, Maroc

^b Unité de Chimie Analytique et Génie de l'Environnement, Faculté des Sciences de l'Université Chouaib Doukkali, BP 20, El Jadida 24000, Maroc

Received 18 April 2003 – Accepted 3 October 2003

Published online 26 March 2004

Abstract – Dairy effluent characterization and treatment by coagulation-decantation. The qualitative and quantitative characterization of an effluent produced by a dairy plant located in the Doukkala region (Morocco) for one year showed that this plant consumed on average 632 m³/day of drinkable water, of which 85% was rejected as wastewater. This dairy effluent is overloaded with organic matter: [average chemical oxygen demand (COD): 6140 mg·L⁻¹ ± 10%], total Kjeldahl nitrogen (average TKN-N: 148 mg·L⁻¹ ± 10%), total phosphorus (average TP-P: 29 mg·L⁻¹ ± 10%), fecal coliforms (average FC: 2.33 × 10⁴ CFU·mL⁻¹ ± 10%) and fecal streptococci (average FS: 4.00 × 10⁴ CFU·mL⁻¹ ± 10%). These parameters go beyond the limit values fixed by the Moroccan project of norms relative to rejected liquids, which shows the necessity of treating this polluted liquid before releasing it into the natural environment. The treatment of this effluent, which consists of coagulation-decantation by iron chloride [FeCl₃, 6 H₂O], aluminium sulfate [Al₂(SO₄)₃, 18 H₂O] and calcium hydroxide [Ca(OH)₂], is insufficient for the removal of organic matter and nitrogen (the percentage of elimination does not surpass 40%). However, this treatment considerably reduced the suspended matter (94%) and total phosphorus (89%) with calcium hydroxide. Consequently, it respected the Moroccan standards for these two latter parameters. In order to suggest a more efficient treatment, this chemico-physical treatment may serve as a stage of pretreatment and it would then be necessary to proceed to a complementary biological process.

Dairy effluent / characterization / pollution / coagulation-decantation

Résumé – La caractérisation physico-chimique et bactériologique de l'effluent global brut rejeté par une industrie laitière située dans la région des Doukkala (Maroc) a révélé que ce rejet liquide est très chargé en matière organique exprimée en terme de demande chimique en oxygène (DCO moyenne : 6140 mg·L⁻¹ ± 10 %), en azote total Kjeldahl (N-NTK moyen : 148 mg·L⁻¹ ± 10 %), en phosphore total (P-PT moyen : 29 mg·L⁻¹ ± 10 %), en coliformes fécaux (CF moyenne : 2,33 × 10⁴ UFC·mL⁻¹ ± 10 %) et en streptocoques fécaux (SF moyenne : 4,00 × 10⁴ UFC·mL⁻¹ ± 10 %). Le traitement de cet effluent par coagulation-décantation à l'aide du chlorure ferrique, du sulfate d'aluminium et de la chaux, quoique insuffisant vis-à-vis de l'élimination de la pollution organique et azotée, dont le taux d'abattement optimal ne dépasse guère 40 %, a permis de réduire considérablement la matière en suspension (94 %) et le phosphore total (89 %) par la chaux et par conséquent de respecter les normes marocaines en vigueur pour ces deux paramètres. Dans le but de suggérer un traitement qui soit plus efficace, la coagulation-décantation peut servir comme une étape de prétraitement. Il serait donc nécessaire de procéder à un traitement biologique complémentaire.

Effluent laitier / caractérisation / pollution / coagulation-décantation

* Auteur correspondant : ahamdani@caramail.com

1. INTRODUCTION

Généralement les problèmes environnementaux de l'industrie laitière se situent au niveau de l'eau car elle rejette de gros volumes d'eaux résiduelles à pH variable et très riches en matière organique et bactériologique [8, 9, 13, 17].

Dans la région des Doukkala, la production laitière commercialisée par les centres de collecte du lait, qui représente 20 % de la production nationale, a plus que quadruplé de 1989 à 1998 passant de 25,8 à 108 millions de litres. Plus de 72 % de cette production est consommée par l'unité laitière faisant objet de notre étude, soit 215 000 L lait/j [10, 19]. Le lait réceptionné est transformé en lait de consommation, beurre, poudre et lben (lait fermenté).

Cette usine qui fonctionne en trois postes de 8 h durant toute l'année, s'approvisionne avec de l'eau potable à raison de 632 m³/j, ce qui donne un rapport litre d'eau consommée/litre de lait traité égal à 2,9. La grande partie de ces eaux (85 %) est restituée sous forme d'eaux usées qui sont directement rejetées dans le réseau d'assainissement communal sans le moindre traitement pour rejoindre par la suite la baie de la ville d'El Jadida [12]. Le traitement de cet effluent est donc indispensable pour préserver le milieu naturel.

L'objectif de cette étude concerne la caractérisation qualitative et quantitative de l'effluent laitier global brut sur une année et l'évaluation des performances et des limites de son traitement par coagulation-décantation à l'aide du sulfate d'aluminium, du chlorure ferrique et de la chaux qui sont considérés comme étant les coagulants les plus usuels [3, 6, 7]. Enfin nous avons déterminé les facteurs influençant ce type d'épuration (dose, pH et durée d'agitation).

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Point de prélèvement

Les échantillons d'eau usée analysés ont été prélevés à partir du réseau d'égout

communal, recevant l'effluent laitier global brut rejeté, qui se trouve immédiatement à la sortie de l'unité laitière étudiée.

2.2. Mode et fréquence d'échantillonnage

Les mesures ont été effectuées sur des échantillons prélevés en discontinu durant une année allant de mars 1998 jusqu'à février 1999, à raison d'un cycle de 24 h par mois. Chaque campagne de mesure de 24 h comporte 96 échantillons prélevés (un échantillonnage toutes les 15 min).

Ces prélèvements instantanés de 15 min ont été mis dans des flacons stériles de 500 mL, conservés à 4 °C dans une glacière et transportés au laboratoire en 10 min pour être transvasés dans des flacons de 10 L. Ces derniers sont ensuite conservés au congélateur à -20 °C afin d'éviter toute évolution des caractéristiques de l'eau. Cette opération a été répétée pendant 4 h successives pour constituer un échantillon moyen de 8 L sur lequel nous avons déterminé les paramètres physico-chimiques et bactériologiques qui seront cités plus loin dans le paragraphe paramètres et méthodes analytiques à l'exception du pH et de la températures qui ont été enregistrés sur le terrain.

Les essais de coagulation-décantation ont été réalisés sur un échantillon moyen de 50 L représentatif de 24 h de rejets d'eau usée et fonction du débit.

2.3. Mesure de débit

Le débit a été déterminé en continu par la pose d'un déversoir triangulaire à l'exutoire du réseau en sortie de l'usine. L'angle d'ouverture choisi est fonction du débit à mesurer et les valeurs h ont été enregistrées par pose d'un limnigraphe type sonde piézo-résistive à mémorisation électronique des valeurs et exploitation de la relation $Q = f(h)$ par logiciel Lotus.

Le débit a été mesuré avec une moyenne d'erreur estimée à $\pm 5\%$.

Tableau I. Caractéristiques des coagulants utilisés et paramètres analysés.
Table I. Characteristics of the coagulants used and parameters analyzed.

Produit brut utilisé	Formule chimique	Agent de coagulation	Concentration (%)	Paramètres analysés
Poudre granulée blanche (titre 17 % d'alumine)	Al ₂ (SO ₄) ₃ , 18 H ₂ O	Al ³⁺	2	pH DCO
Solution liquide (1L contient 600 g FeCl ₃)	FeCl ₃ , 6 H ₂ O	Fe ³⁺	2	MES N-NTK P-PT
Pierre calcaire	Ca (OH) ₂	CaO	2	

2.4. Paramètres et méthodes analytiques

Les analyses physico-chimiques de l'eau usée ont été effectuées selon les méthodes décrites dans la norme AFNOR [2] et ont porté sur les paramètres suivants : température, pH, matière en suspension (MES), demande chimique en oxygène (DCO), demande biologique en oxygène (DBO), azote total Kjeldahl (N-NTK) et phosphore total (P-PT).

Les analyses bactériologiques ont comporté le dénombrement des streptocoques fécaux sur gélose de Slanetz et Bartley (Biokar diagnostics, Beauvais, France) à 37 °C et la numération des coliformes fécaux par la méthode du nombre le plus probable après culture sur bouillon lactosé bilié au vert brillant (Biokar) et incubation à 44,5 °C.

Toutes les analyses présentent une moyenne d'erreur d'environ ± 10 %.

2.5. Traitement par coagulation-décantation

Les différents essais de coagulation-décantation ont été effectués sur l'eau usée laitière à température du laboratoire (24 ± 2 °C) au moyen d'un appareil Jar-test (modèle JF/6, Isco, Milan, Italie) selon le principe suivant : dans une série de flacons contenant l'eau usée laitière, on introduit les agents coagulants dont les caractéristiques sont représentées dans le tableau I,

à des doses croissantes pendant une courte période d'agitation (3 min) mais à une vitesse d'agitation rapide (150 tours par min) permettant d'assurer une très bonne diffusion des adjuvants et une bonne déstabilisation chimique des colloïdes. On agite doucement (30 tours par min) durant 20 min, afin de favoriser la mise en contact des particules contiguës et éviter de briser les flocs formés. Enfin, on laisse décanter ces flocons dans une période de repos de 90 min.

L'efficacité de traitement a été appréciée analytiquement par le suivi du taux d'abattement de la MES, de la DCO, du N-NTK et du P-PT.

Le calcul du taux d'abattement d'un paramètre X, exprimé en pourcentage est basé sur la formule suivante :

$$\% \text{ abattement (X)} = \frac{C_i(X) - C_f(X)}{C_i(X)} \times 100$$

avec C_i : concentration initiale de X dans l'eau usée laitière et C_f : concentration finale de X dans l'eau usée laitière.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Caractérisation qualitative et quantitative de l'effluent laitier

3.1.1. Mesure de débit

Dans la région des Doukkala, la production laitière connaît deux périodes : haute

lactation (16 mars–15 septembre) et basse lactation (16 septembre–15 mars). Le volume de l'effluent rejeté quotidiennement pendant ces deux périodes est relativement variable avec une valeur moyenne de $544 \text{ m}^3/\text{j}$ ($2,5 \text{ L}$ d'eau usée/L de lait traité), une valeur minimale de $422 \text{ m}^3/\text{j}$ et une valeur maximale de $623 \text{ m}^3/\text{j}$. Le rapport 2,5 est légèrement plus élevée que celui mentionné dans la littérature [6, 18, 24]. Il serait donc nécessaire de réduire les volumes d'eaux résiduaires rejetées pour se situer entre 1,5 et 2. Un recyclage des eaux non polluées (eaux de refroidissement, condensats, eaux pluviales, etc.) après leur séparation des eaux usées fortement chargées en éléments polluants s'avère donc impératif.

3.1.2. Charges en éléments polluants de l'effluent laitier

Le tableau II présente les résultats des principales caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques de l'effluent global brut rejeté par la laiterie étudiée. Les valeurs enregistrées pour les paramètres MES, DCO, DBO₅, N-NTK et P-PT, ainsi que les valeurs de pH et de température dépassent largement les valeurs fixées par le projet marocain des normes des valeurs limites relatives aux rejets liquides. En effet, le pH de l'effluent analysé varie fortement, avec parfois des valeurs très acides (1,5) ou très basiques (13,4) en relation avec l'utilisation de l'acide nitrique ou de la soude pour le lavage. Il en est de même pour la température qui atteint parfois $43 \text{ }^\circ\text{C}$ suite aux rejets directs des eaux provenant des condenseurs frigorifiques ou barométriques. La charge organique annuelle, qui est en moyenne de $6140 \text{ mg d'O}_2/\text{L}$ pour la DCO et de $3067 \text{ mg d'O}_2/\text{L}$ pour la DBO₅, se situe dans le même ordre de grandeur que celle des eaux usées de la laiterie « ORLAC » de Bir-Khadem en Algérie [15]. Toutefois, ces valeurs sont très élevées en comparaison avec celles rencontrées en France, qui varient de 1500 à $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pour DBO₅, de 2600 à $3500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pour DCO [22, 26] et qui s'approchent des résultats obtenus par l'Institut de Recherches Laitières en Nouvelle Zélande [4, 8].

La charge bactérienne moyenne est respectivement de $2,33 \times 10^4$ et $4,00 \times 10^4 \text{ UFC}\cdot\text{mL}^{-1}$ pour les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux. Le rapport CF/SF est inférieur à 1, ce qui témoigne d'une contamination fécale d'origine animale de l'effluent étudié [5].

Ces résultats montrent qu'il est nécessaire de traiter cet effluent avant tout rejet ou utilisation éventuelle.

3.2. Traitement de l'effluent laitier par coagulation-décantation

Les différents essais de traitement par coagulation-décantation s'inscrivent dans le cadre d'un prétraitement de l'effluent laitier global rejeté par la laiterie dont les caractéristiques physico-chimiques sont indiquées dans le tableau III.

3.2.1. Traitement par les sels d'aluminium et de fer

3.2.1.1. Abattement de la demande chimique en oxygène

Les résultats obtenus montrent que la dose optimale de coagulation correspond à 1 g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\cdot\text{L}^{-1}$ (Fig. 1a) et $0,6 \text{ g}$ de $\text{FeCl}_3\cdot\text{L}^{-1}$ (Fig. 1b). Les taux d'abattement de DCO sont de l'ordre de 39 % dans le cas de l'utilisation du sulfate d'aluminium et de 35 % pour l'utilisation du chlorure ferrique. Étant donné que l'intérêt de la coagulation porte essentiellement sur la séparation des particules fines ou extra-fines et des colloïdes de la phase interstitielle par précipitation [11], les faibles taux d'abattement de DCO, peuvent être expliqués par la dominance de la fraction soluble qui représente 82 % de la DCO totale (voir Tab. III).

3.2.1.2. Abattement de la matière en suspension

Sur les figures 1a et 1b, on note que le traitement par coagulation-décantation de l'effluent laitier global a entraîné une chute

Tableau II. Valeurs moyennes et écarts-types des différents paramètres analysés durant une année (mars 98–février 99).
Table II. Mean values and standard deviation of different analyzed parameters during one year (March 98–February 99).

		Période de forte lactation Débit moyen = 593 m ³ /j					Période de faible lactation Débit moyen = 495 m ³ /j					Concentration annuelle moyenne	Projet marocain des valeurs limites
		nombre de données	valeur minimale	valeur moyenne	valeur maximale	écart type	nombre de données	valeur minimale	valeur moyenne	valeur maximale	écart type		
T	°C	28	23	33	43	3,1	29	19	28	42	3,6	-	30
pH	-	26	1,5	8,9	13,4	1,1	30	1,6	9	12,5	1,3	-	6,5–8,5
MES	mg·L ⁻¹	30	320	1019	2353	353	30	420	1296	4122	329	1157	50
DCO		30	3500	6375	12500	1860	30	2200	5906	10267	2095	6140	500
DBO ₅		30	1842	3197	063	927	28	1093	2938	5203	989	3067	100
N-NTK		30	102	153	220	42,9	29	64	143	261	45,4	148	30
P-PT		30	20	32	65	14,4	30	5,8	25,5	58	11,8	29	10
CF		UFC·mL ⁻¹	23	0,04 × 10 ⁴	1,97 × 10 ⁴	6,27 × 10 ⁴	5,28 × 10 ⁴	26	0,19 × 10 ⁴	2,7 × 10 ⁴	9,35 × 10 ⁴	9,06 × 10 ⁴	2,33 × 10 ⁴
SF	25		0,08 × 10 ⁴	3,52 × 10 ⁴	11,79 × 10 ⁴	9,37 × 10 ⁴	28	0,24 × 10 ⁴	4,49 × 10 ⁴	17,80 × 10 ⁴	17,45 × 10 ⁴	4,00 × 10 ⁴	-

– Pour tous les paramètres analysés, le nombre de données est de 36 mesures par période de lactation. Les valeurs qui correspondent à des accidents n’ont pas été prises en compte.

– Les concentrations annuelles moyennes enregistrées présentent des variations estimées à ± 10 %.

– For all analyzed parameters, the amount of data is 36 measurements per period of lactation. The values that correspond to accidents were not taken in consideration.

– The mean annual compounds are given with a variation estimated at ± 10%.

Table III. Qualité de l'effluent laitier global soumis aux essais de traitement par coagulation-décantation.

Table III. Quality of global dairy effluent submitted to coagulation-decantation tests.

Paramètres analysés	Unité	Valeur
pH	-	7,1
MES	mg·L ⁻¹	900
DCO totale	mg·L ⁻¹	5000
DCO soluble	mg·L ⁻¹	4100
N-NTK	mg·L ⁻¹	123
P-PT	mg·L ⁻¹	27

des teneurs en matière en suspension qui sont passées de 900 mg·L⁻¹ à 99 et 81 mg·L⁻¹ respectivement pour le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique, ce qui représente un taux d'abattement de 89 et de 91 %. Bien que ces taux de réduction des MES soient élevés, ce type de traitement ne permet pas de respecter la norme marocaine relative aux rejets liquides recommandée pour ce paramètre qui est de 50 mg·L⁻¹.

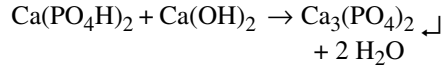
3.2.1.3. Abattement de l'azote et du phosphore

L'évolution des teneurs en azote et en phosphore en fonction de la dose du coagulant ajouté est illustrée sur les figures 1a et 1b. Les taux d'abattement respectifs du N-NTK et du P-PT ne dépassent pas 28 et 33,3 % pour la coagulation-décantation par le sulfate d'aluminium. Pour le chlorure ferrique, ces taux sont de 27 % pour les deux paramètres analysés.

3.2.2. Traitement par la chaux

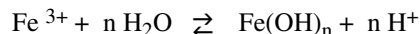
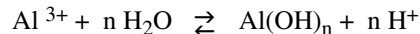
Comparativement aux deux autres coagulants et comme le montre la figure 1c, la chaux permet d'atteindre des taux d'abattement de la pollution contenue dans l'eau usée laitière nettement supérieurs. Des quantités de 0,63, 0,56 et 0,49 g·L⁻¹ de chaux ajoutée à l'eau usée ont conduit à des

abattements de 94, 89, 40 et 30 % respectivement pour MES, P-PT, DCO et N-NTK. L'action bénéfique sur l'enlèvement du phosphore total résulte de la formation de précipité d'hydroxyapatite calcique surtout à des valeurs de pH élevées (8 à 12) selon la réaction suivante [6] :



3.2.3. Effet du pH

Il est reconnu que le pH influence les taux d'abattement de la pollution contenue dans les eaux usées [20]. Pour notre étude, les pH optimaux pour l'élimination de la matière en suspension, de la demande chimique en oxygène, de l'azote total Kjeldahl et du phosphore total se situent entre 6 et 6,5 pour le coagulant à base d'aluminium (Fig. 2a) et entre 6,5 et 7 pour le coagulant à base de fer à l'exception de l'abattement des MES obtenu à pH 8 (Fig. 2b). Ces valeurs de pH sont proches de 6, pH permettant un abattement optimal selon Taha et al. [23] qui ont travaillé sur l'optimisation de la coagulation-décantation des eaux blanches de laiteries en faisant varier le pH et la dose des adjuvants, notamment le sulfate d'aluminium, l'alginate de sodium et l'acide alginique. Toutefois, elles sont supérieures à celles évoquées dans des études antérieures et qui sont légèrement acides [7, 16]. Par ailleurs, nous avons constaté que l'addition progressive des deux coagulants à l'eau usée laitière brute a provoqué une baisse du pH de 7 à 6,1 pour le composé aluminique et à 6,4 pour celui ferrique. Cette baisse de pH peut être expliquée par le fait que l'ajout des sels d'aluminium ou de fer à l'eau entraîne une libération d'ions H⁺ selon les réactions d'hydrolyse suivantes :



Ces valeurs sont toujours situées dans la gamme de pH optimal de coagulation obtenue pour ces deux coagulants, ne nécessitant donc aucune correction de pH de l'effluent.

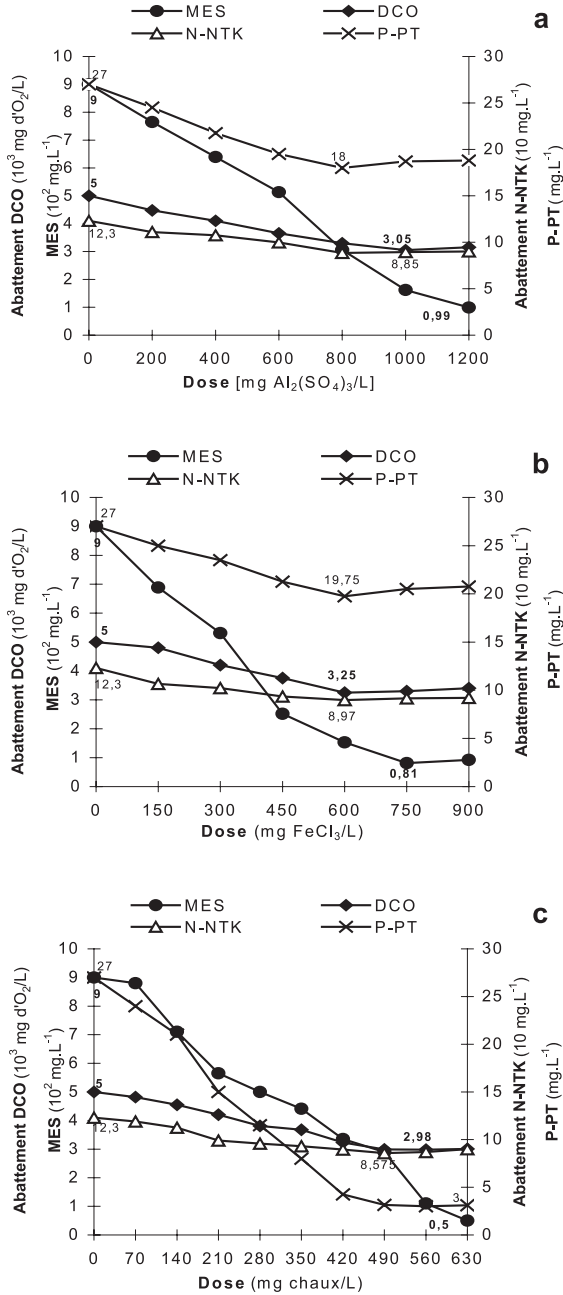


Figure 1. Abattement de DCO, MES, N-NTK et du P-PT à différentes doses de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$ (a), $FeCl_3 \cdot 6 H_2O$ (b) et $Ca(OH)_2$ (c).

Figure 1. Removal of COD, SM, TKN-N and TP-P at different doses of $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$ (a), $FeCl_3 \cdot 6 H_2O$ (b) and $Ca(OH)_2$ (c).

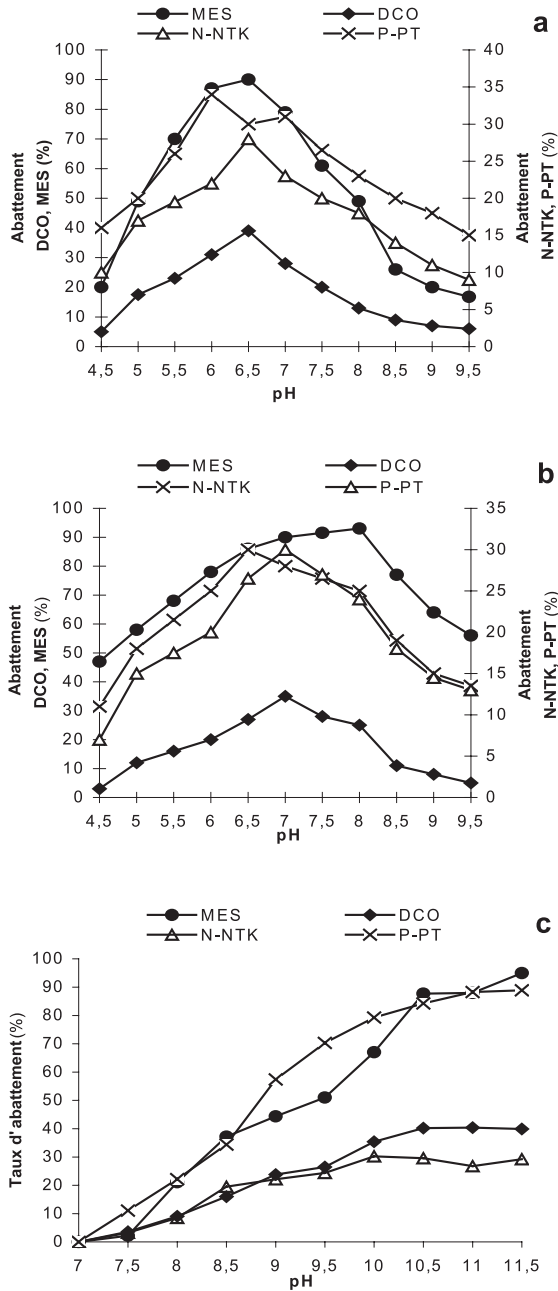


Figure 2. Taux d'abattement des paramètres physico-chimiques par le sulfate d'aluminium (a), le chlorure ferrique (b) et par la chaux (c), en fonction du pH.

Figure 2. Physico-chemical parameters' removal efficiencies as a function of pH from dairy effluent treated by aluminium sulfate (a), iron chloride (b) and calcium hydroxide (c).

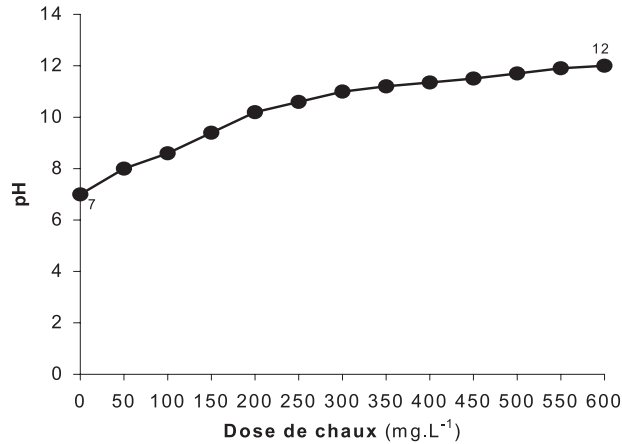


Figure 3. Évolution du pH en fonction de la dose de chaux ajoutée à l'effluent laitier.

Figure 3. pH evolution as a function of the calcium hydroxide dose added to dairy effluent.

Contrairement aux deux coagulants précédents et comme le montre la figure 3, l'addition progressive de la chaux a entraîné l'augmentation du pH de 7 à 12. D'autre part, le taux d'abattement des MES et la vitesse de précipitation du phosphore augmentent au-delà de pH 8 et l'optimum est obtenu à pH voisin de 11 (Fig. 2c). D'où l'intérêt de réajuster le pH de l'eau après chaulage pour le maintenir à une valeur conforme au projet marocain des normes.

3.2.4. Effet de la durée d'agitation

En plus de l'optimisation du pH et de la dose des coagulants, nous avons cherché à améliorer les rendements d'abattement des paramètres de pollution en fonction de la durée d'agitation. Les principaux résultats sont présentés dans le tableau IV qui montre que le maximum d'abattement est obtenu après 20 min d'agitation par les trois réactifs testés :

MES : 91 % pour FeCl₃, 90 % pour Al₂(SO₄)₃ et 94 % pour Ca(OH)₂ ;

DCO : 31 % pour FeCl₃, 35 % pour Al₂(SO₄)₃ et 38 % pour Ca(OH)₂ ;

N-NTK : 30 % pour FeCl₃, 32 % pour Al₂(SO₄)₃ et 31 % pour Ca(OH)₂ ;

P-PT : 17 % pour FeCl₃, 29 % pour Al₂(SO₄)₃ et 89 % pour Ca(OH)₂.

Au-delà de 20 min, le taux d'abattement de la pollution organique, azotée et phosphorée arrête d'augmenter puis se stabilise. Cette durée de 20 min serait donc le temps nécessaire pour que les floccs d'aluminium, de fer ou de chaux adsorbent une fraction de la pollution exprimée en termes de DCO, de MES, de N-NTK et de P-PT.

3.2.5. Devenir des boues physico-chimiques produites

La coagulation-décantation de l'effluent laitier permet de rejeter moins de pollution dans le milieu naturel, mais elle génère une boue physico-chimique qu'il faut sécher et éliminer par la suite. La connaissance de la qualité physico-chimique et bactériologique de ce produit s'avère donc indispensable avant de suggérer toute possibilité du traitement. Il est évident que ces coagulums contiennent la fraction particulaire et colloïdale décantable enlevée à l'eau usée laitière, notamment de la matière organique, de l'azote et du phosphore mais aussi une quantité de réactifs chimiques utilisés sous forme de précipités. La composition de ces

Tableau IV. Effet de la durée d'agitation à 30 trs/min sur le taux d'abattement de DCO, des MES, de N-NTK et du P-PT.

Table IV. Effect of coagulation duration at 30 rpm on removing COD, SM, TKN-N and TP-P.

Coagulant	Taux d'abattement (%)											
	MES			DCO			N-NTK			P-PT		
	Al ³⁺	Fe ³⁺	CaO	Al ³⁺	Fe ³⁺	CaO	Al ³⁺	Fe ³⁺	CaO	Al ³⁺	Fe ³⁺	CaO
Durée (min)												
03	39	25	42	12	10	12	10	07	9	06	04	15
05	68	58	69	21	16	19	18	14	17	14	08	37
10	77	72	85	29	24	27	26	22	24	21	13	59
15	90	91	94	35	31	38	32	30	30	29	17	90
20	91	91	96	37	33	41	38	32	31	33	25	93
25	87	92	95	36	32	40	37	31	29	32	23	91
30	89	89	-	35	31	-	40	30	-	30	22	-

– Le pH a été fixé à 6,5 ; 8 et 11, respectivement, dans le cas d'utilisation du sulfate d'aluminium, du chlorure ferrique et de la chaux.

– La dose des réactifs chimiques est de 1200 mg de [Al₂(SO₄)₃, 18 H₂O], 750 mg de [FeCl₃, 6 H₂O] et 630 mg de Ca(OH)₂.

– The pH values are fixed at 6.5, 8 and 11, respectively, for using aluminium sulfate, iron chloride and calcium hydroxide.

– The dose of coagulant agents is 1200 mg of [Al₂(SO₄)₃, 18 H₂O], 750 mg of [FeCl₃, 6 H₂O] and 630 mg of Ca(OH)₂.

boes constitue donc une richesse agromomique certaine qui pourrait être valorisée à deux niveaux : un amendement organique et une valeur fertilisante minérale qui peuvent enrichir et compléter la réserve du sol et servir à la nutrition des plantes. Vidou [25] a indiqué que la phase solide des boes de laiteries est plus riche en composés azotés organiques dont la minéralisation dans le sol est très progressive et que 60 à 90 % de cet azote se transforme en azote minéral rapidement assimilable par les végétaux. D'autre part, contrairement à certaines boes de stations urbaines ou industrielles, les boes provenant du traitement des effluents de laiteries sont soit dépourvues de substances toxiques, soit ces dernières sont présentes à des teneurs inférieures aux limites de la norme AFNOR U44-041 [1, 11, 21, 25]. L'absence d'effet phytotoxique est en faveur d'une valorisation agricole qui semble être la solution la plus évidente pour ce type de boue à condition de respecter les

recommandations d'épandage des boes (où épandre ? à quelle saison ? à quelle dose ? nature des cultures ? mise en œuvre technique ? etc.). Selon Hassen et al. [14], la charge bactérienne contenue dans les eaux usées se trouve toujours éliminée et concentrée dans les boes, ce qui représente un risque potentiel pour une éventuelle valorisation à des fins agricoles, d'où l'intérêt d'affiner ces boes. À cet égard, il faut noter l'heureuse incidence du chaulage de l'effluent traité, qui entraîne une élévation du pH et par conséquent arrêt de la croissance bactérienne et inhibition du pouvoir fermentescible des boes. En plus, le chaulage augmente l'aptitude des boes à subir la déshydratation mécanique [11].

À part la valorisation en agriculture, les deux autres modes d'élimination finale qui peuvent être envisagés sont l'incinération et la mise en décharge. Bien que l'incinération aboutisse à une réduction optimale des boes tant en volume qu'en poids et

l'obtention d'un produit inerte (cendres), elle nécessite une déshydratation plus poussée et par conséquent une forte consommation d'énergie, d'où le problème de coût et des moyens à mettre en œuvre. Concernant la mise en décharge, elle n'est plus utilisée aujourd'hui à cause des exigences de siccité imposées aux produits réceptionnés en décharge (lois du 13 juillet 1992 en France).

4. CONCLUSION

L'étude de la caractérisation physico-chimique et bactériologique a révélé que l'effluent étudié présente deux caractéristiques principales. La première est sa richesse en matière organique facilement biodégradable, en azote, en phosphore et en bactéries indicatrices de contamination fécale. Les variations plus ou moins élevées de débit, de température, de pH et de charge polluante représentent la deuxième caractéristique.

Les essais de traitement par coagulation-décantation ont montré que les trois coagulants utilisés permettraient de débarrasser l'effluent laitier global brut de sa matière en suspension et de diminuer sa charge organique, azotée et phosphorée. Le meilleur résultat est enregistré avec la chaux car des performances d'abattement de 94 et 89 % ont été obtenues respectivement pour les MES et le PT, ce qui garantit le respect des normes marocaines en vigueur pour ces deux paramètres.

Malgré ces résultats, ce type de traitement reste un traitement partiel qui ne permet qu'une faible élimination de la pollution organique et azotée dont le pouvoir polluant est très élevé. Pour assurer un traitement complet, la coagulation-décantation devrait être obligatoirement complétée par un traitement biologique qui permettrait de réduire la charge polluante au maximum et de respecter les valeurs fixées par le projet marocain des normes.

RÉFÉRENCES

- [1] Agence de Bassin Loire Bretagne, Traitement des eaux usées de l'industrie agro-alimentaire, Qualité de l'Environnement et Productions Alimentaires, 1989, pp. 167–188.
- [2] Association Française de Normalisation (AFNOR), Eaux, méthodes d'essai, recueil de normes françaises, AFNOR, Paris, 1986.
- [3] Baptiste P., Les traitements d'épuration avant admission sur une station collective. Rapport de stage sur l'épuration des effluents agro-alimentaires, Agence de l'Eau Adour Garonne, 1994.
- [4] Barnet J.W., Effluent treatment systems of the dairy industry, *Austr. Biotechnol.* 4 (1994) 26–30.
- [5] Borrego J.J., Arrabal F., Romero P., Study of the microbiological pollution of a Mallaga littoral area. II. Relationship between fecal coliforms and fecal streptococci, in: VI^e journées sur l'étude des pollutions. 2–4 décembre, Cannes, France, 1982, pp. 561–564.
- [6] Dégremont, Memento technique de l'eau. Tome I. Tec. et Doc. Lavoisier, Paris, France, 1989.
- [7] Desjardin R., Lengo K., Ndong S., Étude comparative de la performance de divers coagulants préhydrolysés sur l'enlèvement de la matière organique dissoute, *Vecteur Environnement* 29 (1996) 37–45.
- [8] Donkin M.J., Bulking in anaerobic biological systems treating dairy processing wastewaters, *Int. J. Dairy Technol.* 50 (1997) 67–72.
- [9] Garrido J.M., Omil F., Arrojo B., Mendez R., Lema J.M., Carbon and nitrogen removal from a wastewater of an industrial dairy laboratory with a coupled anaerobic filter-sequencing batch reactor systems, *Wat. Sci. Technol.* 43 (2001) 249–256.
- [10] Gueddari A.E., L'agriculture dans les Doukkala : situation actuelle et perspectives. Actes du colloque structuration et gestion de la région des Doukkala-Abda. 26–27 février, Publications de l'Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc, 1998, pp. 65–85.
- [11] Guettier P., Iwema J.P., Mathian R., Raby D., Vachon A., Vidou P., L'assainissement des agglomérations : Techniques d'épuration actuelles et évolutions. Étude inter-agences numéro 27. Agences de l'eau, Paris, France, 1994.
- [12] Hamdani A., Caractérisation et essais de traitement des effluents d'une industrie laitière : aspects microbiologiques et physico-chimiques. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences d'El Jadida, Maroc, 2002.

- [13] Hamdani A., Assobhei O., Mountadar M., Caractérisation et essais de dénitrification biologique d'un effluent de laiterie située dans la ville d'El Jadida (Maroc), *Eau Ind. Nuisances* 242 (2001) 50–54.
- [14] Hassen A., Jedidi N., Kallali H., Ferchichi M., Gharbi A., Chebbi F., Chefai A., Saidi N., Shayeb H., Ennabli M., Élimination des indicateurs bactériens et des métaux lourds au cours d'un traitement des eaux usées domestiques dans une station pilote semi-industrielle, *Sci. Tech. Eau* 27 (1994) 34–41.
- [15] Khoudir A., Lamari H., Louehli S., Traitement biologique en lit fixe d'une eau usée de laiterie, *Eau Ind. Nuisances* 203 (1997) 37–39.
- [16] Lefebvre E., Legube B., Coagulation par Fe(III) de substances humiques extraites d'eaux de surface : effet du pH et de la concentration en substances humiques, *Wat. Res.* 24 (1990) 591–606.
- [17] Moletta R., Torrijos M., Impact environnemental des effluents de la filière laitière, *Tech. Ing. F-1500* (1999) 1–9.
- [18] Moletta R., Torrijos M., Traitement des effluents de la filière laitière, *Tech. Ing. F-1501* (1999) 1–21.
- [19] Mossadeq F., Les contraintes de la filière lait, *Economiste* 993, 5 avril (2001) 7.
- [20] Robert J.S., Sheldon J.B.D., Coagulation and precipitation of a mechanical pulping effluent. I. Removal of carbon, colour and turbidity, *Wat. Res.* 30 (1996) 1169–1178.
- [21] Sachon G., Traitement des eaux résiduaires d'industries agro-alimentaires. Colloque « Productions Alimentaires et Environnement », 11 décembre 1990, Paris, France, 1990.
- [22] Seraline P.P., Industries alimentaires et agricoles : mieux consommer, moins polluer, *Eau Ind. Nuisances* 214 (1998) 30–32.
- [23] Taha S., Tremaudan G., Dorange G., Étude comparative entre les techniques de coagulation-décantation et d'ultrafiltration frontale pour l'élimination du COT des eaux blanches, in: *Les procédés d'épuration des effluents et déchets des industries biologiques et alimentaires*, Tec. et Doc. Lavoisier, Paris, France, 1995, pp. 55–60.
- [24] Torrijos M., Gsell B., Moletta R., Application d'un procédé SBR à la dépollution des eaux usées de petites coopératives laitières, *Eau Ind. Nuisances* 202 (1997) 31–35.
- [25] Vidou P., Épandage des boues de stations d'épuration de laiteries. Étude publiée par l'Agence de Bassin Loire Bretagne, Orléans, France, 1984.
- [26] Zaouche M., La pollution de l'eau par les établissements industriels, *R. I. A.* 291 (1981) 73–81.