



AQUAREL

Gestion des effluents et des boues issus de la transformation laitière

Février 2018

Brice Bourbon
ACTALIA
b.bourbon@actalia.eu / 05 46 27 69 82

Les informations contenues dans cette publication ont été obtenues dans le cadre d'un Projet de recherche initié par le CNIEL, mené conjointement avec ACTALIA, grâce au soutien financier du CNIEL et des Agences de l'Eau Seine-Normandie et Loire-Bretagne.

Table des matières

Introduction	1
1. Les effluents de la transformation laitière.....	2
1.1 Volumes d'eaux usées en sortie des sites de transformation laitière	2
1.2 Caractéristiques des effluents.....	2
2. Les différents traitements applicables aux effluents issus de la transformation laitière	4
2.1 Prétraitements et traitements physico-chimiques	4
2.2 Les procédés biologiques aérobies	5
2.3 Les procédés biologiques anaérobies	5
2.4 Les traitements tertiaires	6
2.5 Des procédés innovants encore au stade de l'élaboration	7
3. Efficacité des traitements	8
3.1 Efficacité des traitements aérobies.....	8
3.2 Efficacité des traitements anaérobies.....	9
3.3 Efficacité des traitements physiques et/ou chimiques	9
3.4 Efficacité des traitements membranaires	10
4. La gestion des boues.....	11
Conclusion.....	13
Bibliographie	14

Introduction

Comme la plupart des industries agro-alimentaires, les sites de transformation laitière génèrent d'importants volumes d'effluents chargés en matière organique. Plusieurs solutions peuvent être envisagées par les transformateurs pour traiter ces derniers : le traitement sur site, le rejet de ces effluents au réseau communal ou l'épandage sur des parcelles agricoles situées à proximité.

Cette dernière solution a souvent été choisie par la filière laitière et est à l'heure actuelle encore mise en œuvre par certaines entreprises. Cependant, face aux volumes importants et à l'évolution de la réglementation sur la qualité des eaux rejetées en milieu naturel, plusieurs grands sites de transformation se sont dotés d'une station de traitement.

Les procédés de traitement des eaux rencontrés dans le secteur laitier sont multiples. La principale pollution étant de la matière organique, on retrouve beaucoup de filières boues activées comme dans les stations d'épuration urbaines. Toutefois, beaucoup de scientifiques essayent de développer de nouvelles techniques de traitement et mettent également l'accent sur les techniques membranaires afin de réutiliser l'eau traitée.

Ce document de synthèse présente de manière succincte les différents types de traitement des effluents rencontrés dans le secteur laitier (prétraitement, traitements aérobies, traitements anaérobies et traitements tertiaires) ainsi que des données d'efficacité de ces traitements issues de publications scientifiques. Les procédés de traitement des boues sont également abordés en dernière partie de ce document.

Les retours de l'enquête réalisée auprès des sites de transformation laitière ont permis de compléter cet état de l'art sur le traitement des effluents. Ces données complémentaires font l'objet d'une autre synthèse également publiée dans le cadre du projet AQUAREL.

1. Les effluents de la transformation laitière

1.1 Volumes d'eaux usées en sortie des sites de transformation laitière

Selon l'activité de transformation du site, les volumes d'effluents peuvent être très variables. Plusieurs études se sont intéressées à établir des ratios de volume d'effluents par litre de lait transformé pour divers types d'activité laitière. Ces ratios sont repris dans le tableau 1.

Tableau 1 : Volumes d'effluents (en litres) par litre de lait transformé

Source	Type de transformation					
	Beurre	Fromage	Lait	Multi-activités	Produits frais, desserts	Poudre
Dollé et Smati, 2005	0,76	3,26	1,21	2,51	3,92	1,57
AELB, 2010	X	3,0	1,6 ⁽¹⁾	0,9	X	1,7
AESN, 2003 ⁽²⁾	1,8	3,4	1,1	6,4	3,7	5,1

⁽¹⁾ ratio calculé pour des entreprises produisant du lait ainsi que des yaourts et des desserts lactés

⁽²⁾ les valeurs apparaissant dans le tableau sont calculées à partir des données issues de ce rapport

La fabrication du fromage et de produits frais est à l'origine des flux d'eaux usées les plus importants. Les valeurs déterminées pour le lait, le fromage et les produits frais/desserts sont similaires entre les différentes études. Seules des différences notables existent en ce qui concerne les sites producteurs de poudres, les sites multi-activités et les sites spécialisés dans la production de beurre.

1.2 Caractéristiques des effluents

Les effluents issus de la transformation laitière sont caractérisés par des charges élevées de matière organique. En effet, les effluents de laiterie contiennent essentiellement de l'eau et du lait ou des résidus de produits laitiers dilués. Les produits de nettoyage peuvent également être à l'origine de taux élevés de phosphore. De plus, la qualité des effluents dépend des produits finis fabriqués sur le site. Le tableau 2 reprend les caractéristiques des effluents bruts générés par différents sites laitiers présents sur le bassin Loire-Bretagne et dont les activités diffèrent.

Tableau 2 : Caractéristiques des effluents bruts (en g/l) (Source : AELB, 2010)

Type de transformation	MES	DCO	DBO ₅	Azote réduit	Azote organique	Phosphore
Lait de consommation, yaourts et desserts lactés	0,33 - 5,1	0,53 - 14	0,33 - 8,1	0,03 - 0,21	0 - 0,16	0,01 - 0,08
Poudre	0,08 - 0,21	0,47 - 1,1	0,29 - 0,59	0,01 - 0,11	X	0,01 - 0,04
Fromage	0,02 - 1,9	0,22 - 7,4	0,14 - 5	0,01 - 0,24	0 - 0,09	0 - 0,19
Multi-activités	0,26 - 1,1	1,1 - 5,0	0,54 - 3,1	0,02 - 0,12	0 - 0,13	0,02 - 0,06

Au niveau européen, le document sur les Meilleures Techniques Disponibles (appelé le BREF) apporte également des informations sur les caractéristiques des effluents laitiers. Ces caractéristiques varient selon les types de production mais aussi selon les pratiques de gestion de l'eau appliquées au niveau des sites de transformation comme l'illustre le tableau 3.

Tableau 3 : Niveaux de pollution des eaux usées de laiterie (Source : EC (BREF), 2006)

Paramètre	Unité	Niveaux de pollution
Matières en suspension	mg/l	135 - 8500
DCO	mg/l	500 - 4500
DBO ₅	mg/l	450 - 4790
Azote	mg/l	15 - 180
Phosphore	mg/l	20 - 250
Ammoniac (-N)	mg/l	10 - 100
Graisses	mg/l	35 - 500
Protéines	mg/l	210 - 560
Sodium	mg/l	60 - 807
Chlorures	mg/l	48 - 469 (jusqu'à 2000)
Température	°C	12 - 40

En ce qui concerne le pH des effluents de laiterie, sa valeur oscille souvent entre 8 et 9. Dans le cas d'un épandage, les effluents doivent avoir un pH compris entre 6,5 et 8,5. Les effluents laitiers répondent donc en partie à ce critère et peuvent être valorisés de cette manière.

2. Les différents traitements applicables aux effluents issus de la transformation laitière

2.1 Prétraitements et traitements physico-chimiques

Les prétraitements sont des opérations destinées à extraire les substances qui, par leur nature ou leur dimension, pourraient nuire aux traitements ultérieurs. Les prétraitements et traitements physico-chimiques susceptibles d'être utilisés sur les sites de transformation laitière sont décrits dans le tableau 4. Les cinq premiers traitements sont, à cette occasion, des traitements qui sont couramment mis en place au sein de ces derniers.

D'après Moletta et Torrijos (1999), les traitements physico-chimiques ne suffisent pas à atteindre les seuils de rejets fixés par la réglementation. Ils sont donc principalement utilisés comme prétraitements, suivis d'un traitement biologique aérobie ou anaérobie.

Tableau 4 : Prétraitements et traitements physico-chimiques retrouvés sur les sites de transformation

Prétraitement	Objectif	Principe
Bassin tampon*	Ecrêter le débit	Bassin à l'entrée de la station d'épuration
Neutralisation*	Equilibrer le pH	Traitement chimique
Dégrillage, tamisage*	Séparer les éléments grossiers	Séparation physique à l'aide d'une surface percée d'orifices réguliers ou d'une grille fine
Flottation*	Extraire les graisses et substances non décantables	Injection de fines bulles d'air qui, en remontant à la surface, emportent les particules solides
Dégraissage*	Retirer les graisses	Séparation des graisses par différence de densité
Décantation	Séparer les substances plus ou moins denses que l'eau	Sédimentation dans un bassin
Bassin de détournement	Éviter les rejets non maîtrisés	Bassin accueillant les flux excédentaires
Dessablage	Extraire les particules minérales qui pourraient notamment endommager les pompes	Sédimentation des particules plus denses que l'eau
Précipitation	Extraire les particules non décantables	Ajout de produits chimiques puis décantation
Centrifugation	Séparer les liquides ou les solides	Discrimination par densité dans un récipient tournant à grande vitesse
Filtration	Extraire les solides en suspension	Filtration sur sable ou autre support minéral, par gravité ou sous pression

*prétraitements les plus couramment utilisés sur les sites laitiers

2.2 Les procédés biologiques aérobies

Les procédés biologiques aérobies consistent en une élimination des matières organiques biodégradables dans des conditions aérobies. Efficaces pour réduire la DCO et la DBO, les procédés aérobies sont les plus répandus sur les sites de transformation laitière. Il s'agit de procédés maîtrisés et rentables. Comme le soulignent les études menées par les agences de l'eau (AELB, 2010 ; AESN, 2003), les traitements les plus couramment rencontrés sont le procédé à boues activées et le lagunage aéré. Le tableau 5 dresse une liste des procédés aérobies utilisés sur les sites laitiers.

Tableau 5 : Traitements aérobies utilisés sur les sites de transformation

Traitement	Principe
Boues activées*	Contact entre les eaux usées à traiter et une biomasse active de microorganismes aérobies dans les boues en présence d'oxygène (air ou oxygène pur). Suivi d'une étape de décantation. Sur les sites laitiers, ce sont principalement des boues activées à aération prolongée qui sont installées.
Lagunage aéré*	Traitement par les algues, des bactéries, le soleil et le vent dans un bassin peu profond alimenté en oxygène par des aérateurs.
Lit bactérien	Formation d'un biofilm sur un support fixé. Contact entre les eaux usées et le biofilm.
Réacteur biologique séquentiel (SBR)	Même principe que les boues activées mais les étapes de contact et de décantation ont lieu dans un même réacteur.
Disques biologiques	Développement d'un biofilm sur une série de disques rotatifs partiellement immergés dans les eaux à traiter.
Filtres aérobies haut rendement	Filtration sur un support optimisé. Passage des eaux usées par une série de buses.
Bioréacteurs aérobies	Bioréacteur noyé aéré, submergé aéré, à lit fluidisé, lit mobile, biofilm flottant...

*traitements les plus couramment utilisés sur les sites laitiers

Il est également possible d'avoir recours à des traitements dits naturels, comme les filtres plantés de roseaux ou les bamboueraies.

2.3 Les procédés biologiques anaérobies

Les procédés biologiques anaérobies correspondent à la transformation d'une partie de la matière organique biodégradable en biogaz (méthane et dioxyde de carbone). Ces techniques, moins efficaces que les procédés aérobies pour extraire la matière organique des eaux usées, ont l'avantage de produire une moindre quantité de boues et de fournir une source de biogaz valorisable énergétiquement, d'après Rodríguez Susa (2005). Les procédés anaérobies utilisés pour traiter les effluents issus de la transformation laitière sont synthétisés dans le tableau 6.

Les effluents peuvent également être traités dans un bassin d'anoxie. La matière organique est alors biodégradée en absence total d'oxygène. Cette technique permet notamment d'éliminer l'azote.

Tableau 6 : Traitements anaérobies utilisés sur les sites de transformation

Traitement	Principe
Contact anaérobie	Contact entre les eaux à traiter et une biomasse anaérobie dans un réacteur étanche à l'air.
Lagunage anaérobie	Bassin couvert profond (3 à 4m) muni d'un brassage ou d'un garnissage pour améliorer la répartition des microorganismes.
Filtre anaérobie	Développement des microorganismes sur un garnissage puis séparation des gaz de la phase liquide.
UASB	Lit à boue ascendante anaérobie (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)
Réacteurs à lit fluidisé et expansé	Passage de l'effluent sur un matériau porteur, sable ou plastique, avec recirculation de l'effluent.
Bioréacteurs anaérobies	Réacteur SBR anaérobie, réacteur membranaire anaérobie, réacteur à biofilm anaérobie, etc.

2.4 Les traitements tertiaires

On assiste aujourd'hui à l'essor des procédés de filtration membranaire, qui permettent d'obtenir une eau de qualité élevée. À titre d'exemple, Macedo et al. (2014) appliquent un traitement d'ultrafiltration suivie d'une étape de nanofiltration sur du lactosérum de brebis et obtiennent un taux de rétention de la DCO de 93%. Dans le secteur laitier, les membranes de microfiltration, d'ultrafiltration, de nanofiltration, d'électrodialyse et d'osmose inverse permettent d'obtenir une eau de qualité suffisante pour être réutilisée, comme l'affirment Kulkarni et Goswami (2014) :

« Membrane technology is the most important method in achieving the objective of reuse of wastewater in an era of water scarcity in many parts of the world. »

Les bioréacteurs membranaires (BRM) couplent un traitement biologique et une unité de filtration membranaire. Ils peuvent fonctionner en conditions aérobies ou anaérobies, avec une unité de filtration membranaire immergée ou en boucle externe.

En outre, pour le rejet des effluents dans les zones sensibles ou le recyclage des eaux, il est parfois nécessaire de recourir à un traitement de finition. Ces traitements ont pour objectif d'éliminer le phosphore et l'azote, les micropolluants ou encore les microorganismes pathogènes, comme il apparaît dans le tableau 7.

Tableau 7 : Principaux traitements tertiaires appliqués sur les sites de transformation

Substances à éliminer	Procédés applicables
Azote	<ul style="list-style-type: none"> - Nitrification-dénitrification par une alternance de conditions aérobie-anoxie - Colonne de désorption ou d'adsorption pour extraire l'ammoniac
Phosphore	<ul style="list-style-type: none"> - Élimination biologique : alternance de conditions aérobie/anaérobie - Élimination chimique : précipitation de phosphates métalliques insolubles
RSDE	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorption au carbone - Oxydation chimique
Bactéries	<ul style="list-style-type: none"> - Biocides oxydants ou non oxydants - Ozonation - Ultraviolets

2.5 Des procédés innovants encore au stade de l'élaboration

Des recherches sont menées à travers le monde dans le but de développer des techniques de traitement des eaux usées plus efficaces, produisant moins de rejets (boues, pollution de l'air) ou encore permettant de valoriser d'autres déchets. C'est le cas de l'étude de Sreekanth et al. (2014), dans laquelle il est question d'utiliser des micro-algues vertes pour biodégrader la matière organique des eaux usées de laiterie et produire simultanément du biodiesel. L'utilisation de micro-algues vertes pour le traitement des eaux usées est une technologie déjà disponible sur le marché.

Par ailleurs, plusieurs articles, tels que ceux de Bazrafshan et al. (2013) ou Torres-Sánchez et al. (2014) proposent l'utilisation de l'électrocoagulation pour le traitement des effluents de laiterie. Ces études, menées à l'échelle du laboratoire, ont conclu à une efficacité de traitement en abattement de la DCO allant de 70 à 99%.

3. Efficacité des traitements

De nombreux articles reportant les performances de traitement épuratoire de technologies innovantes appliquées aux effluents issus de la transformation laitière ont été consultés. Certaines technologies font l'objet de plusieurs articles, telles que les réacteurs SBR ou UASB. Les critères de comparaison varient d'une publication à l'autre, néanmoins l'abattement en DCO est presque systématiquement mentionné, il constitue donc un paramètre raisonnable de comparaison. Toutefois, ce dernier est fortement dépendant de la charge entrante et des conditions de fonctionnement du traitement, telles que le volume du réacteur, le pH ou la température du substrat traité. De ce fait, les valeurs d'efficacité de traitement obtenues en moyennant les résultats présentés dans les publications et qui apparaissent dans les tableaux suivants sont uniquement indicatives. De plus, celles-ci rapportent des performances maximales de traitement obtenues en laboratoire. Les conditions de fonctionnement diffèrent donc par rapport à une unité de traitement à l'échelle industrielle. Par exemple, le volume des réacteurs en laboratoire est de l'ordre du litre. Le substrat utilisé d'une étude à l'autre peut également différer puisque les essais peuvent porter sur un effluent de laiterie réel, un effluent synthétique obtenu par dilution de lait dans de l'eau ou encore du lactosérum.

3.1 Efficacité des traitements aérobies

Le tableau 8 montre que les procédés de type boues activées et les réacteurs biologiques séquentiels, étudiés dans de nombreux articles, sont efficaces pour réduire la DCO des effluents de laiterie. Si l'efficacité de traitement varie largement en fonction des conditions d'application pour certains procédés, tels que le lagunage aérobie, il apparaît néanmoins que les traitements aérobies sont très efficaces pour réduire le taux de matière organique des eaux usées issues de la transformation laitière.

Tableau 8 : Efficacité des traitements aérobies

Traitement	Abattement DCO			Principales références bibliographiques
	Moyenne (%)	Écart-type	Nombre de valeurs	
Boues activées	96	2	8	Carvalho et al. (2013), Kushwaha et al. (2011)
SBR ⁽¹⁾ aérobie	94	5	19	Carvalho et al. (2013), Gürtekin (2014), Kushwaha et al. (2011), Triantafyllos et al. (2014)
JLBR ⁽²⁾	98	<1	3	Farizoglu and Uzuner (2011), Triantafyllos et al. (2014)
BRM ⁽³⁾	94	9	4	Andrade et al. (2013), Castillo de Campins (2005), Kushwaha et al. (2011)
Lagune aérobie	92	19	2	Castillo de Campins (2005), Moletta et Torrijos (1999)

(1) SBR : Sequencing Batch Reactor, (2) JLBR : Jet Loop BioReactor, (3) BRM : Bioréacteur membranaire

3.2 Efficacité des traitements anaérobies

Le tableau 9 met en évidence un abattement en DCO moyen plus faible pour les traitements anaérobies que pour les traitements aérobies. Cette observation est cohérente avec les résultats attendus et les conclusions de Rodríguez Susa (2005). Les traitements anaérobies permettent toutefois de produire du biogaz valorisable et limitent la production de boues. Par ailleurs, les réacteurs à boue ascendante anaérobie (UASB) sont au cœur de très nombreuses études pour traiter les effluents issus de la transformation laitière.

Tableau 9 : Efficacité des traitements anaérobies

Traitement	Abattement DCO			Principales références bibliographiques
	Moyenne (%)	Écart-type	Nombre de valeurs	
SBR ⁽¹⁾ anaérobie	79	12	6	Dehghani et al. (2014), Gürtekin (2014), Karadag et al. (2015), Kushwaha et al. (2011)
AFBR ⁽²⁾	83	9	10	Karadag et al. (2015), Kushwaha et al. (2011), Moletta et Torrijos (1999)
UASB ⁽³⁾	85	12	35	Carvalho et al. (2013), Karadag et al. (2015), Kavitha et al. (2013), Kushwaha et al. (2011), Martín-Rilo et al. (2015), Moletta et Torrijos (1999)
AMBBR ⁽⁴⁾	71	8	4	Karadag et al. (2015)

(1) SBR : Sequencing Batch Reactor, (2) AFBR : Anaerobic Filter Bioreactor, (3) UASB : Upflow Anaerobic Sludge Blanket, (4) AMBR : Anaerobic Membrane Biologic Bed Reactor

3.3 Efficacité des traitements physiques et/ou chimiques

Le tableau 10 compare l'abattement en DCO de plusieurs traitements physiques et/ou chimiques. Les valeurs obtenues comportent des écarts-types très élevés en raison d'une importante variabilité des conditions d'application des traitements. Il apparaît que les traitements physico-chimiques sont insuffisants pour traiter la matière organique contenue dans les effluents issus de la transformation laitière. C'est la raison pour laquelle ils sont utilisés en complément d'un traitement biologique aérobie ou anaérobie, en tant que prétraitement ou que traitement tertiaire.

Tableau 10 : Efficacité des traitements physiques et/ou chimiques

Traitement	Abattement DCO			Principales références bibliographiques
	Moyenne (%)	Écart-type	Nombre de valeurs	
Coagulation	66	23	11	Carvalho (2013), Loloëi et al. (2014), Oktav Akdemir and Ozer (2013), Triantafyllos et al. (2014), Yogesh (2013)
Précipitation	49	2	2	Carvalho et al. (2013)
Électro-coagulation	84	21	2	Bazrafshan et al. (2013), Torres-Sánchez et al. (2014)
Oxydation	79	18	5	Carvalho et al. (2013)
CSTR ⁽¹⁾	85	21	4	Carvalho et al. (2013), Karadag et al. (2015), Kushwaha et al. (2011)

(1) CSTR : Continuous Stirred Tank Reactor

3.4 Efficacité des traitements membranaires

Le tableau 11 compare l'efficacité des principaux types de membranes pour le traitement d'effluents de laiteries. Balannec et al. (2005) soulignent que, si la filtration membranaire d'un effluent fortement chargé en matière organique ne suffit pas pour lui donner une qualité compatible avec la consommation humaine, une cascade composée de deux filtrations par osmose inverse, ou nanofiltration et osmose inverse permettrait d'atteindre ce résultat. Néanmoins, le coût de traitement par filtration membranaire seule peut être prohibitif pour le traitement des effluents de laiterie.

Tableau 11 : Efficacité des traitements membranaires

Traitement	Abattement DCO			Principales références bibliographiques
	Moyenne (%)	Écart-type	Nombre de valeurs	
Cascade OI ⁽¹⁾ + OI	99	0	1	Koyuncu et al. (2000)
Cascade UF ⁽²⁾ + NF ⁽³⁾	99	0	1	Luo et al. (2012)
Osmose inverse	99	0	2	Balannec et al. (2005), Sarkar et al. (2006)
Nanofiltration	99	1	2	Balannec et al. (2005), Luo et al. (2012)
Ultrafiltration	95	0	1	Bennani et al. (2014)
Microfiltration	80	16	2	Oktav Akdemir and Ozer (2013), Sarkar et al. (2006)

(1) OI : Osmose Inverse, (2) UF : Ultrafiltration, (3) NF : Nanofiltration

4. La gestion des boues

Les boues issues de la transformation laitière correspondent au code 02 05 02 de la nomenclature des déchets décrite dans le Catalogue Européen des Déchets (CED). Les déchets, en particulier les boues, de la filière laitière sont en majeure partie épandus, bruts ou après un prétraitement, comme engrais ou fertilisant. En effet, les laiteries sont généralement situées en zones rurales et les volumes de boues sont souvent compatibles avec les surfaces agricoles disponibles. De plus, leur faible teneur en nitrates, en métaux et autres micropolluants est favorable à l'épandage. L'arrêté du 8 janvier 1998 définit les conditions d'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.

Néanmoins, dans des cas comme celui de la Bretagne, les surfaces d'épandage sont insuffisantes pour accueillir tous les déchets organiques des élevages, notamment le lisier, et des industries agro-alimentaires. L'apport excessif de nutriments sur les surfaces agricoles est nuisible à la qualité des eaux souterraines et de ruissellement, d'où l'adoption de réglementations plus strictes dans ces régions sensibles. De plus, Dollé et Smati (2005) rappellent que les boues de laiterie, du fait de leur composition initiale, sont difficilement décantables, résistent à la déshydratation et ont une mauvaise tenue en tas.

Information :

Il est à noter qu'un défaut de définition claire des étapes de la gestion des boues des sites de transformation laitière est à l'origine de malentendus. En effet, dans la version originale en anglais du BREF 2006, les étapes du traitement des boues sont définies telles que :

- 1) Conditioning = « improve the characteristics of the sludge so that is easier to thicken and/or dewater », qui est traduit par « transformation » en français
- 2) Stabilisation = « improve sludge thickening and/or dewatering and reduce odour and pathogens », traduit par « stabilisation »
- 3) Thickening = « increase the solids content of sludge by removing a portion of the liquid fraction », traduit par « épaissement »
- 4) Dewatering = « same as that of thickening with the difference that the solid content is much higher », traduit par « égouttage »
- 5) Drying = « reducing the water content by vaporisation of water to the air », traduit par « séchage »

D'après les exemples cités dans le BREF, l'étape 3 permet ainsi d'atteindre des siccités comprises entre 2 et 10 %, tandis que, après l'étape 4, les boues ont une siccité de 30 à 40 %. Il en résulte que le matériel de type table d'égouttage ou tambour d'égouttage ne sert pas à l'égouttage des boues mais à leur épaissement. Bourrier et al. (2010) définissent les étapes de traitement des boues en fonction de leurs caractéristiques, notamment la siccité, en sortie de l'étape de traitement. Il est nécessaire de prendre en compte le vocabulaire employé le plus couramment dans les sites de transformation laitière et de bien redéfinir les termes utilisés.

On retiendra trois étapes dans le traitement des boues : le prétraitement physico-chimique, l'épaississement / égouttage / déshydratation et le séchage. Les prétraitements des boues ont pour objectif de faciliter leur égouttage, limiter le développement de pathogènes et réduire les émissions olfactives indésirables. La deuxième étape du traitement consiste à réduire le volume des boues en diminuant la quantité d'eau qu'elles contiennent. Elle peut ou non être suivie d'une étape de séchage afin d'atteindre une siccité très élevée. Les boues sont ensuite éliminées ou utilisées, par exemple pour une valorisation agricole telle que l'épandage ou le compostage.

Le stockage et l'élimination des boues nécessitent de réduire le volume de boues et de les assainir. Pour cela les différentes technologies présentées dans le tableau 12 sont disponibles. Le choix de la technologie à mettre en place dépend des caractéristiques des boues mais aussi de leur utilisation.

Tableau 12 : Principaux traitements des boues de laiterie

Procédé	Objectif	Principe
Chaulage	Stabilisation des boues	Ajout de chaux
Floculation	Amélioration de la séparation solide-liquide	Ajout de produits chimiques (polymères, chlorure ferrique...)
Flottation	Séparation solide-liquide	Injection de microbulles. Les particules se fixent sur les microbulles et sont entraînées vers la surface
Décantation	Augmentation de la siccité	Sédimentation
Égouttage	Augmentation de la siccité (5 – 10%)	Table ou tambour d'égouttage
Filtre planté de roseaux	Augmentation de la siccité (15 – 25%)	Épandage des boues sur des couches de sables de granulométries différentes
Filtre-bande	Augmentation de la siccité (≈20%)	Floculation, égouttage gravitaire, pré-pressage, pressage
Centrifugation	Augmentation de la siccité (20 – 30%)	Ségrégation par densité en imposant une rotation à grande vitesse
Filtre-presse	Augmentation de la siccité (≈30%)	Passage entre des toiles tendues sur des plaques pressées par un vérin hydraulique
Séchage	Augmentation de la siccité (>90%)	Vaporisation de l'eau des boues dans l'air. Serre de séchage, sécheur thermique...
Méthanisation	Réduction de la masse de boues (40 à 50%)	Transformation de la matière organique des boues en biogaz (65 à 70% CH ₄ + CO ₂)
Compostage	Valorisation agricole	Fermentation aérobie de boues partiellement déshydratées mélangées à des déchets verts
Épandage	Traitement par le sol - Valorisation agricole	Épandage des boues brutes ou partiellement déshydratées sur les surfaces agricoles

Conclusion

Avec la génération d'importants flux d'eaux usées chargés en matière organique et l'évolution de la réglementation sur la qualité des eaux rejetées dans le milieu naturel, les sites de transformation laitière sont confrontés à une véritable problématique en ce qui concerne la prise en charge de leurs effluents.

Les procédés permettant de les traiter sont nombreux et certains d'entre eux ont démontré leur efficacité. Si les réacteurs aérobies ou anaérobies sont les plus rencontrés sur les sites de transformation, il ne faut cependant pas négliger de nouveaux types de traitement tels que les traitements membranaires qui permettent une réutilisation de l'eau traitée.

Une meilleure gestion des effluents passe donc par l'utilisation de technologies de traitement efficaces mais l'économie d'eau à la source (mise en place de bonnes pratiques et d'outils de production économes en eau) constitue également un levier pour la réduction de leurs volumes et de leur impact environnemental.

Bibliographie

Rapports :

AGENCE DE L'EAU LOIRE-BRETAGNE (AELB), *Ratios polluants en industrie dans le bassin Loire-Bretagne*, 2010.

AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE (AESN). Rapport de VILLEY, S. : *Bilan de l'industrie laitière et évolution de 1991 à 2001 sur le bassin Seine-Normandie*, 2003.

DOLLÉ, J. B., et SMATI, M., Institut de l'élevage, *Les effluents et boues des industries laitières*, 2005.

EUROPEAN COMMISSION (EC), *Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industries (BREF)*, 2006.

Ouvrage :

BOURRIER, R., SATIN, M., et SELMI, B., *Guide technique de l'assainissement, Collecte – Épuration – Conception – Exploitation*, 4ème édition, Référence technique, Éditions LE MONITEUR, 2010.

Articles scientifiques :

ANDRADE, L., H., MOTTA, G. E. and AMARAL, M. C. S., *Treatment of dairy wastewater with a membrane bioreactor*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2013, Vol. 30, n°04, p. 759-770.

BALANNEC, B., VOURCH, M., RABILLER-BAUDRY, M. and CHAUFER, B., *Comparative study of different nanofiltration and reverse osmosis membranes for dairy effluent treatment by dead-end filtration*, Separation and Purification Technology, 2005, 42, p. 195-200.

BAZRAFSHAN, E., MOEIN, H., MOSTAFAPOUR, F. K. and NAKHAIE, S., *Application of Electrocoagulation Process for Dairy Wastewater Treatment*, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Chemistry, 2013, Vol. 2013, p. 8.

BENNANI, C. F., OUSJI, B. and ENNIGROU, D. J., *Reclamation of dairy wastewater using ultrafiltration process*, Desalination and Water Treatment, 2014, p. 1-7.

CARVALHO, F., PRAZERES, A. R. and RIVAS, J., *Cheese whey wastewater: Characterization and treatment*, Science of the total environment, 2013, 445-446, p. 385-396.

DEGHANI, M., REZAEI, M., SHAMSEDINI, N., MALEKNIA, H. and JAVAHERI, M., R., *The Effects of Temperature on the Performance of Anaerobic Sequencing Batch Reactor in the Treatment of Synthetic Dairy Wastewater*, Jundishapur J Health Sci., 2014.

FARIZOGLU, B. and UZUNER, S., *The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system*, Biochemical Engineering Journal, 2011, 57, p. 46-54.



GÜRTEKIN, E., *Sequencing Batch Reactor in Industrial Wastewater Treatment: A Review*, ISEM2014 Adiyaman, 2014.

KARADAG, D., OZKAYA, B. and CAKMAKCI, M., *A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater*, Process Biochemistry, 2015, 50, p. 262-271.

KAVITHA, R. V., KUMAR, S., SURESH, R. and KRISHNAMURTHY, V., *Performance evaluation and biological treatment of dairy waste water plant by upflow anaerobic sludge blanket reactor*, International Journal of Chemical & Petrochemical Technology (IJCPT), 2013, Vol. 3, p. 9-20.

KOYUNCU, I., TURAN, M., TOPACIK, D. and ATES, A., *Application of low pressure nanofiltration membranes for the recovery and reuse of dairy industry effluents*, Water Science and Technology, 2000, 41, 1, p. 213-221.

KULKARNI, S. J., and GOSWAMI, A. K., *Applications and Advancements in Treatment of Waste Water by Membrane Technology – A Review*, International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 2014.

KUSHWAHA, J. P., SRIVASTAVA, V. C. and MALL, I. D., *An Overview of Various Technologies for the Treatment of Dairy Wastewaters*, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2011, 51, p. 442-452.

LOLOEI, M., ALIDADI, H., NEKONAM, G. and KOR, Y., *Study of the coagulation process in wastewater treatment for dairy industries*, International Journal of Environmental Health Engineering, 2013, Vol. 2, Issue 5.

LUO, J., CAO, W., DING, L., ZHU, Z., WAN, Y. and JAFFRIN, M. Y., *Treatment of dairy effluent by shear-enhanced membrane filtration: The role of foulants*, Separation and Purification Technology, 2012, 96, p. 194-203.

MACEDO, A., DUARTE, E. and CARVALHO, F., *Application of the sequence ultra/nanofiltration for the valorization and reduction of the environmental impact of ovine cheese whey*, 20th ADPR Congress, 2014, p. 587-591.

MARTÍN-RILO, S., COIMBRA, R. N., MARTÍN-VILLACORTA, J. and OTERO, M., *Treatment of dairy industry wastewater by oxygen injection : performance and outlay parameters from the full scale implementation*, Journal of Cleaner Production, 2015, 86, p. 15-23.

MOLETTA, R. et TORRIJOS, M., *Traitement des effluents de la filière laitière*, Techniques de l'ingénieur, traité Génie des procédés, 1999.

OKTAV AKDEMIR, E. and OZER, A., *Pretreatment of Cheese Whey Effluent Using a Microfiltration Process: A Statistical Design Approach*, Ekoloji, 2013, 22, p. 21-27.

SARKAR, B., CHAKRABARTI, P. P., VIJAYKUMAR, A. and KALE, V., *Dairy wastewater treatment – possibility of reuse*, Desalination, 2006, 195, p. 141-152.



SREEKANTH, D., POOJA, K., SETA, Y., HIMABINDU, V. and REDDY P. M., *Bioremediation of dairy wastewater using microalgae for the production of biodiesel*, International Journal of Science, Engineering and Advanced Technology, 2014, Vol. 2, Issue 11.

TORRES-SÁNCHEZ, A. L., LÓPEZ-CERVERA, S. J., DE LA ROSA, C., MALDONADO-VEGA, M., MALDONADO-SANTOYO, M. and PERALTA-HERNÁNDEZ, J. M., *Electrocoagulation Process Coupled with Advanced Oxidation Techniques to Treatment of Dairy Industry Wastewater*, International Journal of Electrochemical Science, 2014, 9, p. 6103 – 6112.

TRIANATAYLLOS, I. T., TEKERLEKOPOULOU, A. G., AKRATOS, C. S., PAVLOU, S. and VAYENAS, D. V., *Aerobic biological treatment of second cheese whey in suspended and attached growth reactors*, Society of Chemical Industry, 2014.

YOGESH, M. D., *Physicochemical treatment of dairy plant wastewater using ferrous sulphate and ferric chloride coagulants*, International Journal of Basic and Applied Chemical Sciences, 2013, Vol. 3, p. 9-14.

Thèses :

CASTILLO de CAMPINS, S., *Étude d'un procédé compact de traitement biologique aérobie d'effluents laitiers : Microbiologie et Biocatalyse industrielles* : Toulouse : 2005 ; 818.

RODRÍGUEZ SUSAN, M. S., *Étude d'un bioréacteur anaérobie à membranes immergées pour le traitement des eaux résiduaires* : Génie des procédés et de l'environnement : Toulouse : 2005.

Réglementation :

Classification des déchets figurant à l'annexe II de l'article R. 541-8 du Code de l'environnement, dispositions issues du décret n°2002-540 du 18 avril 2002, abrogé et codifié dans le Code de l'environnement par le décret du 12 octobre 2007.

MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR, MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE, MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT, MINISTÈRE DE LA FONCTION PUBLIQUE, DE LA RÉFORME DE L'ÉTAT ET DE LA DÉCENTRALISATION. Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.