



Livrable D2.6

Etat de l'art sur les technologies de traitement de l'eau pour le recyclage et la réutilisation

Version **v0.0**
Du 25 juillet 2019

Water-Pinch

Functionality
Indicators



Water Footprint
& LCA

Auteurs :

Céline Garnier, APT

Claire Fargues, APT

Marie-Laure Lameloise, APT

Wafa Guiga, APT

Brice Bourbon, Actalia



Etat de l'art sur les technologies de traitement de l'eau pour le recyclage et la réutilisation

Céline Garnier¹, Wafa Guiga¹, Brice Bourbon², Marie-Laure Lameloise¹, Claire Fargues¹

1. *AgroParisTech et Inra, UMR 1145 Ingénierie Procédés Aliments, Massy, France*

2. *ACTALIA, Pôle Environnement, Surgères, France*

Etat du rapport :

Le présent document technique correspond au livrable D2.6 du projet MINIMEAU.

Sommaire

1	Glossaire et acronymes.....	5
1.1	Glossaire.....	5
1.2	Acronymes	5
2	Introduction	7
3	Les effluents à traiter : effluents générés dans les usines agroalimentaires	9
3.1	Introduction.....	9
3.2	Les industries laitières	13
3.2.1	Origine des eaux usées	13
3.2.2	Qualité des eaux usées	13
3.2.3	Cas particulier des eaux issues du lait.....	15
3.3	Les industries des huiles et graisses.....	17
3.3.1	Origine des eaux usées	17
3.3.2	Qualité des eaux usées	17
3.4	Les industries des fruits et légumes	19

3.4.1	Origine des eaux usées	19
3.4.2	Qualité des eaux usées	20
3.5	Les industries de la boisson.....	23
3.5.1	Les industries vinicoles.....	23
3.5.2	Les brasseries	24
3.5.3	Les industries des boissons sucrées.....	26
4	Les besoins en eau	28
5	Les technologies de traitement de l'eau pour le recyclage et la réutilisation	31
5.1	Focus sur les technologies de traitement envisageables pour produire une eau de qualité « eau potable »	31
5.1.1	Rappel des réglementations sur l'eau potable	31
5.1.2	Les technologies de traitement envisageables.....	31
5.2	Principe des procédés physico-chimique de traitement de l'eau.....	35
5.2.1	Dégrillage	35
5.2.2	Coagulation et floculation.....	35
5.2.3	Décantation.....	36
5.2.4	Flottation à Air Dissous	37
5.2.5	Filtration sur média filtrant.....	37
5.2.6	Filtration membranaire.....	38
5.2.7	Adsorption.....	46
5.2.8	L'échange d'ions.....	46
5.2.9	La distillation	47
5.2.10	La mise à l'équilibre calco-carbonique.....	47
5.3	Principe des procédés de désinfection	48
5.3.1	Désinfection physique	48
5.3.2	Désinfection chimique.....	50
5.3.3	Techniques de désinfection émergentes.....	54
6	Exemples de recyclage ou de réutilisation des effluents de l'industrie agroalimentaire dans l'usine de production	55
6.1	L'industrie laitière.....	55
6.1.1	Solutions de recyclage ou de réutilisation identifiées par l'Union européenne	55
6.1.2	Le cas de la plus grande industrie laitière en Inde.....	56
6.1.3	Cas particulier des eaux usées faiblement chargées	57

6.1.4	Cas particulier des eaux usées fortement chargées et sans produit chimique	61
6.1.5	Focus sur le traitement par OD	63
6.2	Les industries des huiles et graisses	65
6.2.1	Solutions de recyclage ou de réutilisation identifiées par l'Union européenne	65
6.2.2	Les prétraitements	66
6.2.3	Traitements membranaires	68
6.2.4	Focus sur le traitement d'OD	69
6.3	Les industries des fruits et légumes	70
6.3.1	Solutions de recyclage ou de réutilisation identifiées par l'Union européenne	70
6.3.2	Le cas des jeunes pousses de salade	71
6.3.3	Désinfection des eaux de lavage	72
6.3.4	Décantation des eaux de lavage	74
6.3.5	Filtration sur sable des eaux usées	74
6.3.6	Filtration membranaire	75
6.4	Les industries de la boisson	75
6.4.1	Solutions de recyclage ou de réutilisation identifiées par l'Union européenne	75
6.4.2	Cas particulier des eaux de lavage des bouteilles	77
6.4.3	Cas particulier des eaux usées des industries viticoles	79
6.4.4	Cas particulier des eaux usées des brasseries	79
7	Exemples de recyclage ou de réutilisation des effluents de l'industrie agroalimentaire après traitement en station d'épuration	82
8	Synthèse des traitements envisageables	84
8.1	Les industries laitières	84
8.2	Les industries des huiles et graisses	84
8.3	Les industries des fruits et légumes	85
8.4	Les industries des boissons	85
9	Conclusion	86
10	Références	87

1 Glossaire et acronymes

1.1 Glossaire

(Source : Codex Alimentarius, 2001)

Eau récupérée (reclaimed water en anglais) : eau qui à l'origine est un élément constituant d'un aliment et qui, après son extraction du même aliment au cours d'une étape de transformation, pourra être réutilisée au cours d'une opération de production alimentaire.

Eau recyclée (recycled water en anglais) : eau, à l'exception de l'eau utilisée pour la première fois ou de l'eau récupérée, qui est obtenue à partir d'une opération de production alimentaire.

Eau réutilisée (reused water en anglais) : eau récupérée au cours d'une étape de transformation, y compris à partir du composé alimentaire lui-même et qui après son retraitement, si nécessaire, sera réutilisée au cours de la même opération de production alimentaire, ou d'une opération de production antérieure ou ultérieure. L'eau réutilisée englobe l'eau redistribuée, l'eau recyclée et l'eau récupérée, telles que décrites ci-dessus.

Opération de fabrication d'aliments : Toute opération destinée à nettoyer, trier, traiter ou emballer un produit alimentaire ou son (ses) ingrédient(s), y compris le nettoyage de l'équipement et des installations.

Retraitement (reconditioning, regeneration en anglais) : traitement de l'eau qui est destinée à être réutilisée, de manière à réduire ou éliminer les contaminants microbiologiques, chimiques et physiques pour la rendre propre à l'usage qui lui est réservé.

La distinction entre les termes recyclage et recirculation n'est pas toujours effective. Il peut y avoir une confusion entre les deux.

1.2 Acronymes

AGV : Acides Gras Volatils

AR : Attributable Risk

BRM : Bio-Réacteurs à Membranes

CIT : Carbone Inorganique Total

COD : Carbone Organique Dissous

COP : Carbone Organique Particulaire

COT : Carbone Organique Total

CPT : Composés Phénoliques Totaux

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DM : Distillation Membranaire

ED : ElectroDialyse
FAD : Flottateur à Air Dissous
FAU : Formazine Attenuation Unit
FFAD : Filtration et Flottateur à Air Dissous
FNU : Formazin Nephelometric Unit
LP : Lumière Pulsée
MES : Matières En Suspension
MF : MicroFiltration
MM : Masse Molaire
MO : Matières Organiques
ND : non disponible
NEP: Nettoyage En Place
NF : NanoFiltration
NGL : Azote (N) Global (en France)
Ntot : azote (N) Total (NGL en France)
NTK : azote (N) Total Kjeldahl
OD : Osmose Directe
OI : Osmose Inverse
OIBP : Osmose Inverse Basse Pression
Ptot : Phosphore Total
QMRA : Quantitative Microbial Risk Assessment
SDT: Solides Dissous Totaux
SLD : Sous la Limite Détectable
ST : Solides Totaux
TH : Titre Hydrotimétrique
UE : Union Européenne
UF : UltraFiltration
UFC : Unité Formant Colonie
UHT : Ultra-Haute Température
US : UltraSon
UV : UltraViolet

2 Introduction

En raison du changement climatique, de la croissance démographique et du développement économique, de graves pénuries d'eau sont prévues, à partir de 2025, en Afrique du Nord, au Moyen-Orient, au Pakistan, en Inde et dans le nord de la Chine (Asano, Burton, Leverenz, Tsuchihashi, & Tchobanoglous, 2007; Meneses, Stratton, & Flores, 2017). C'est pour cette raison que l'un des objectifs de l'UNESCO est de réduire de 20% la quantité d'eau utilisée par les industries et ceci afin de garantir la durabilité de la ressource (Zandaryaa, 2014). En conséquence, de plus en plus d'industries essaient de réduire leur consommation.

La réduction des consommations d'eau a déjà fait l'objet d'études dans différents secteurs industriels et dans plusieurs pays. Par exemple, le projet E4water s'est intéressé à la réduction des consommations d'eau dans les industries chimiques européennes ("Integrated water management in the chemical industry (E4Water)," 2016). Des projets de réutilisation et de recyclage de l'eau dans l'industrie agroalimentaire ont été lancés à Singapour, en Australie, en Israël, en Chine, en Floride et en Californie (Meneses et al., 2017).

L'industrie agroalimentaire nécessite un apport important en eau et notamment en eau potable. Elle l'utilise pour des opérations de traitement, de nettoyage et de lavage, pour les chaudières, les circuits de refroidissement et pour des opérations de réfrigération. L'eau est également utilisée pour lutter contre les incendies sur l'usine (Casani, Rouhany, & Knochel, 2005; Valta, Moustakas, Sotiropoulos, Malamis, & Haralambous, 2016).

Aux Pays-Bas, par exemple, la consommation d'eau dans l'industrie agroalimentaire représentait en 1996 environ 10% de la consommation d'eau tous types d'industries confondus, soit environ 247 millions de m³. L'industrie agroalimentaire y est ainsi la troisième consommatrice d'eau dans cet État, derrière les industries chimiques (environ 50%) et de raffinage (30%) (Casani et al., 2005). Un autre exemple est donné par Amul Dairy, la plus grande industrie laitière indienne. Cette industrie qui a une capacité maximale de 4,5 millions de litres de lait par jour, consomme 1 600 m³ d'eau par jour (Tiwari, Behera, & Srinivasan, 2016).

La minimisation de la consommation d'eau passe par plusieurs étapes (Klemes, Smith, & Kim, 2008; Lens, Hulshoff Pol, Wilderer, & Asano, 2002; Meneses et al., 2017). La première étape consiste à réduire les fuites ainsi que la consommation d'eau à chaque étape du procédé de transformation, en réduisant par exemple les temps de nettoyage. La deuxième étape consiste à identifier les opportunités de recyclage et le besoin de reconditionnement. Enfin, la dernière étape consiste à étudier, le cas échéant, un traitement de l'eau sur la boucle de recirculation.

Plusieurs boucles de recyclage de l'eau peuvent être envisagées. Ces boucles peuvent être à l'échelle d'une région ou à celle d'une opération unitaire d'une industrie. En Australie, une boucle de recyclage d'eau a été réalisée en 2009 à l'échelle de la région de Brisbane (Apostolidis, Hertle, & Young, 2011). Les eaux traitées par 3 stations d'épuration urbaine sont collectées et traitées par MF, OI, oxydation et désinfection, puis réutilisées au niveau des centrales électriques pour une utilisation non précisée, pour des applications industrielles et en stockage principal d'adduction d'eau potable. En Autriche, une boucle de recyclage à l'échelle d'une usine a été réalisée : les eaux usées de la brasserie Lion Nathan National Foods sont traitées avec un réacteur biologique anaérobie, FAD, FFAD, MF, OI, UV puis désinfectées avec du dioxyde de chlore, afin d'être

réutilisées sur site pour des applications d'eau sans contact avec l'aliment (Apostolidis et al., 2011). Un dernier exemple, à l'échelle de l'opération unitaire, est le recyclage de l'eau dans les unités de NEP mis en place dans diverses industries. L'eau de la dernière étape du NEP y est recyclée à la première étape (European, 2018a).

Le présent document a pour objectif de présenter les possibilités de traitement pour le recyclage et la réutilisation des eaux dans l'industrie agroalimentaire, à l'échelle de l'opération unitaire ou de l'usine. Sont prises en compte toutes les eaux usées issues de la chaîne de fabrication (hors les eaux des sanitaires).

Ce document résume aussi certains exemples de pratiques de recyclage et de réutilisation dans 495 usines agroalimentaires européennes figurant dans un guide réalisé par la Commission européenne et portant sur les Meilleures Techniques Disponibles (MTD) utilisées dans l'industrie agroalimentaire (« Best Available Techniques (BAT) Reference Document in the Food, Drink and Milk Industries », European Commission, 2018).

3 Les effluents à traiter : effluents générés dans les usines agroalimentaires

3.1 Introduction

Les principaux secteurs de l'industrie agroalimentaire sont l'industrie laitière, l'industrie des huiles et des graisses, l'industrie des fruits, des légumes et des produits agricoles, l'industrie des boissons, l'industrie des produits de la mer, l'industrie de la viande, l'industrie du sucre et des édulcorants, l'industrie du pain et des gâteaux et l'industrie des graisses animales (Klemes et al., 2008). Chaque industrie a des utilisations spécifiques de l'eau en fonction des caractéristiques des matières premières et des procédés de transformation choisis. Le tableau 1 donne des exemples pour les industries des boissons, des légumes et des produits laitiers.

Tableau 1: Utilisations spécifiques de l'eau en fonction des matières premières (Klemes et al., 2008)

Activité utilisant de l'eau	Industrie de la boisson	Industrie des légumes	Industrie laitière
Introduction d'eau dans le produit	60 %	0 %	0 %
Nettoyage des installations	25 %	15 %	49 %
Tours de refroidissement	2 %	5 %	6 %
Procédé de traitement	8 %	78 %	42 %
Autres utilisation	5 %	2 %	3 %

Ces proportions sont indicatives et peuvent varier d'une usine à une autre. Par exemple, pour l'industrie Amul Dairy, en Inde, la proportion d'eau utilisée pour le nettoyage des installations de l'usine est de 77% au lieu de 49%. Cette différence peut s'expliquer par l'importante capacité de production de la laiterie : 4,5 million de litres par jour (Tiwari et al., 2016).

Dans son guide, la Commission européenne a indiqué les consommations d'eau des industries agroalimentaires en Europe pour chaque type de produit (tableau 2 , (European, 2018a)). Pour une analyse et une comparaison pertinente des données, il est important de savoir si la consommation d'eau est mesurée par rapport aux matières premières ou par rapport aux produits. Par exemple, dans l'industrie du lait en poudre, la quasi-totalité de l'eau présente dans le lait est éliminée, de sorte que le poids du produit fini, le lait en poudre, est bien inférieur à celui de la matière première, le lait brut.

On constate que pour chaque filière, les consommations (et donc les rejets) sont très variables, pouvant aller du simple à fois 5 voire jusqu'à fois 30. Parmi les industries les plus consommatrices, on retrouve notamment celles produisant du lait ou des fruits et légumes.

L'eau est soit mélangée et introduite dans le produit (cas de l'industrie de la boisson) ou soit envoyée, après utilisation, vers une station d'épuration. De l'eau peut aussi être extraite du

produit et envoyée vers la station d'épuration. Le tableau 2, issu du guide européen, indique les rejets spécifiques d'eaux usées dans certaines industries agroalimentaires européennes (European, 2018a). D'autres données (Klemes et al., 2008; Muro, Riera, & Diaz, 2012; Ölmez, 2013) viennent corroborer, compléter voire infirmer ces données. Une étude usine par usine est donc recommandée pour déterminer la qualité et la quantité des eaux usées réellement rejetées (voir livrable D 2.3).

Tableau 2: Consommation d'eau dans certaines industries agroalimentaires et niveaux de performances environnementales indicatifs pour des rejets spécifiques d'eaux usées (European, 2018a)

Type d'industrie agroalimentaire	Produit	Unité	Consommation spécifique d'eau	Rejet spécifique d'eau usée (moyenne annuelle)
Industrie laitière	Lait	m ³ /tonne de matières premières	0.33-12.61 (en Europe)	0.2-7.8
	Fromage	m ³ /tonne de matières premières	0.24-4.9 (en Europe)	0.75-3.25
	Lait en poudre	m ³ /tonne de matières premières	0.50-4.27 (en Europe)	1.00-3.25
Industrie des graisses et huiles	Graines oléagineuses et huiles végétales	m ³ /tonne d'huile produite	0.2-4.5	0.15-1.9
	Huile d'olive	m ³ /tonne d'huile d'olive	2.16-10.29 (3 installations)	0.33-8
Industries des fruits, des légumes et des produits agricoles	Pommes de terre	m ³ /tonne de produits	10	4.0-6.0 (à l'exclusion des flocons et de la poudre de pomme de terre)
	Tomates	m ³ /tonne de produits	2.5-9	8.0-10.0 (à l'exclusion de la poudre de tomate et avec recyclage)
	Fruits et légumes	m ³ /tonne de produits	0.5-15	0-35
	Betteraves à sucre	m ³ /tonne de betterave	0-0.9	0.5-1.0

Type d'industrie agroalimentaire	Produit	Unité	Consommation spécifique d'eau	Rejet spécifique d'eau usée (moyenne annuelle)
	Boissons gazeuses, nectar et jus	m ³ /hl de produits	0-0.3 (maximum à 5.1)	0.08-0.20
Industrie de la boisson	Bières	m ³ /hl de produits	0.2-0.6 (maximum à 3)	0.15-0.50
Autres industries	Nourriture pour animaux de compagnie	m ³ / tonne de produits	2.64-4.88	1.3-2.4

Pour l'industrie laitière, les consommations d'eau ont été étudiées en détail par Wojdalski et al. (Wojdalski et al., 2013). Les auteurs soulignent que la consommation d'eau varie d'un pays à l'autre et en fonction de la technologie mise en place. Par exemple, la consommation d'eau dans des sites produisant à la fois du lait en poudre, du fromage et / ou des boissons lactées, est comprise entre 0,69 et 1,90 litre d'eau par litre de lait transformé dans le cas du Danemark, contre 4,60 à 6,30 litres d'eau par litre de lait transformé dans le cas de la Norvège.

Concernant les rejets, chaque industrie a des effluents spécifiques : certains proviennent du nettoyage et du transport des aliments, d'autres des opérations de nettoyage des équipements ou des sols. Certaines industries telles que l'industrie laitière peuvent fonctionner de manière continue, tandis que d'autres peuvent fonctionner de manière saisonnière, telles que l'industrie des fruits et légumes ou l'industrie de la betterave à sucre (European, 2018a). Aussi, celles-ci peuvent être en arrêt pendant une partie de l'année et générer des quantités et des qualités d'eau très variables au cours de l'année.

Il est donc primordial de disposer de la quantité et de la qualité détaillée de l'eau à traiter tout au long de l'année et, en cas de réutilisation ou de recyclage, de connaître la qualité de l'eau attendue pour chaque opération unitaire.

Pour caractériser la qualité d'une eau usée, plusieurs paramètres globaux sont habituellement utilisés : MES, matières organiques et en particulier DCO et DBO, SDT, turbidité, nutriments tels que l'azote et le phosphore, matières inorganiques telles que calcium, sodium et sulfate, agents pathogènes tels que bactéries, protozoaires, helminthes et virus, oligo-éléments et micropolluants prioritaires tels que pesticides, produits pharmaceutiques, agents hormonalement actifs et résidus de produits de soins personnels, mais également couleur, odeur, température, transmittance et conductivité (Asano et al., 2007). En général, les eaux usées issues des industries agroalimentaires ont un taux élevé de DCO et de DBO (European, 2018a).

En revanche, pour caractériser la qualité d'une eau potable, une analyse plus fine est demandée par la réglementation. Seuls quelques paramètres globaux cités ci-dessus tels que la couleur, la conductivité, l'odeur, l'oxydabilité, la turbidité et le COT sont utilisés. Mais la caractérisation est complétée par des analyses précises de molécules telles que le bromate, le cuivre, les nitrates, l'aluminium ou le fer. Ainsi, si l'on a besoin de produire de l'eau potable à partir d'eau recyclée, la qualité des eaux usées doit être étudiée plus finement (Edition, 2011).

Sont indiquées dans les paragraphes suivants les principales origines et qualités des eaux usées rencontrées dans les différentes filières. Quelques exemples sont donnés à titre indicatif mais ne permettent pas de généraliser à l'ensemble d'une filière ou même d'un type d'industrie dans la filière.

3.2 Les industries laitières

3.2.1 Origine des eaux usées

Les effluents des industries laitières ont été très étudiés. Ils proviennent principalement des opérations de nettoyage. En effet, l'opération de NEP est une importante utilisatrice d'eau. En Europe, elle représente 50% des utilisations en eau du secteur de la transformation laitière (European, 2018a). D'autres opérations et procédés sur les sites de transformation génèrent également des eaux usées industrielles et notamment les traitements thermiques : refroidissement, pasteurisation, procédés UHT (ultra-haute température) et production de vapeur (Suàrez & Riera, 2015).

Enfin, certaines usines disposant de procédés de concentration et/ou spécialisées dans la production de poudres produisent une eau directement extraite du lait et qui apparaît également comme un effluent à traiter. Ce cas particulier est abordé dans le paragraphe 3.2.3.

3.2.2 Qualité des eaux usées

Les effluents provenant des usines laitières sont en premier lieu riches en matière organique. Cette importante charge résulte de la présence de résidus de matières premières laitières, de graisses, ou encore de sucres tels que le lactose. Les effluents laitiers contiennent également des matières en suspension, des composés azotés, du phosphore, des éléments minéraux (sodium, chlorure, magnésium, potassium) et des produits de nettoyage tels que des détergents et des désinfectants (Balannec, Vourch, Rabiller-Baudry, & Chaufer, 2005; Galvão, 2018; Klemes et al., 2008; Suàrez & Riera, 2015).

Selon les types de production (fromages, poudres, desserts lactés,...) et les pratiques de gestion de l'eau mises en place sur les sites, la composition des effluents est amenée à grandement varier (tableau 3).

Tableau 3 : Caractéristiques des effluents bruts (en mg/L) (Source : AELB, 2010)

Type de transformation	MES	DCO	DBO ₅	Azote réduit	Azote organique	Phosphore
Lait de consommation, yaourts et desserts lactés	330 - 5100	530 - 14 000	330 - 8100	30 - 210	0 - 160	10 - 80
Poudre	80 - 210	470 - 1100	290 - 590	10 - 110	X	10 - 40
Fromage	20 - 1900	220 - 7400	140 - 5000	10 - 240	0 - 90	0 - 190
Multi-activités	260 - 1100	1100 - 5000	540 - 3100	20 - 120	0 - 130	20 - 60

Au niveau européen, des informations sur les caractéristiques des effluents laitiers sont également compilées dans la version de 2006 du document sur les Meilleures Techniques Disponibles (Tableau 4).

Tableau 4 : Niveaux de pollution des eaux usées de laiterie (European, 2018a)

Paramètre	Unité	Niveaux de pollution
MES	mg/l	135 - 8500
DCO	mg/l	500 - 4500
DBO ₅	mg/l	450 - 4790
NGL	mg/l	15 - 180
Ptot	mg/l	20 - 250
N-NH ₄	mg/l	10 - 100
Graisses	mg/l	35 - 500
Protéines	mg/l	210 - 560
Na ⁺	mg/l	60 - 807
Cl ⁻	mg/l	48 - 469 (jusqu'à 2000)
Température	°C	12 - 40

Enfin, il est à noter que la valeur du pH des effluents de laiterie oscille souvent entre 8 et 9.

En ce qui concerne les volumes d'eaux usées industrielles produites au niveau des usines, ceux-ci sont également dépendants des pratiques sur site, du tonnage et du type de production (tableau 5). Les différences observées entre les diverses activités concernant le ratio moyen volume d'effluents / volume d'équivalent-lait entrant s'expliquent également par le différentiel qui existe au niveau des besoins en eau des sites. Un site fromager utilise plus d'eau que des sites multi-activités et des sites producteurs de poudres ce qui amène à une génération d'effluents plus importante.

Tableau 5 : Ratio moyen volume d'effluents produits/volume d'équivalent-lait entrant pour chaque principale catégorie de sites (projet AQUAREL, 2018)

Activité(s) principale(s)	Nombre de sites	Ratio moyen volume d'effluents produits/volume d'équivalent-lait entrant
Fromage	20	2,33
Multi-activités	9	1,51
Poudres	5	1,41

3.2.3 Cas particulier des eaux issues du lait¹

Les eaux issues du lait sont des eaux qui sont produites sur les usines laitières effectuant de la concentration de matières laitières et/ou produisant des poudres. Cette appellation désigne deux types d'eaux extraites de la matière première :

- les perméats d'osmose inverse obtenus lors de la concentration du lait ou de co-produits (sérum, babeurre)
- les condensats d'évaporation obtenus lors de l'évapo-concentration du lait ou de ces mêmes co-produits

En comparaison avec les autres effluents produits par un site de transformation laitière, les eaux issues du lait présentent une charge organique plus faible. Leur composition dépend cependant du produit et de l'étape unitaire dont elles sont issues.

Les eaux issues du lait existantes sous forme de condensats issus de la fabrication de poudre de lait et de poudre de sérum présentent des caractéristiques physico-chimiques similaires. Leur pH oscille entre 5 et 8,5 et leur conductivité varie entre quelques unités à quelques centaines de microsiemens par centimètre. Leur pollution organique (DCO, DBO₅ et COT) est également variable, allant de quelques unités à quelques centaines de milligrammes par litre. Les perméats de lactosérum doux qui constituent un autre type d'eaux issues du lait, présentent une conductivité un peu plus élevée et contiennent un peu plus d'éléments organiques que les condensats. Les perméats de lactosérum acide sont, quant à eux, les eaux issues du lait les plus concentrées en pollution organique et les plus minéralisées (Tableau 6) en raison de la teneur plus importante en calcium du produit initial.

Tableau 6 : Composition de différentes eaux issues du lait

	Nature des eaux issues du lait					
	Perméat de lactosérum acide	Perméat de lactosérum doux	Condensat (évapo-concentration du lait)			Condensat (évapo-concentration du lactosérum)
pH	4,5 – 5,0	5,0 – 6,0	5,0 – 8,0	4,1 – 8,5	4,1 – 8,5	5,0 – 8,0
Conductivité (µS/cm)	5000 - 8000	200 – 500	5 - 50	6 - 190	6 - 190	20 - 150
DCO (mgO₂/L)	6000 - 10000	100 - 400	20 - 100	2 - 720	5 - 45	50 - 300
COT (mg/L)	ND	ND	ND	0,6 - 190	1,6 - 10	ND
DBO₅ (mgO₂/L)	3000 - 6000	50 - 200	5 - 70	ND	ND	30 - 200
Lactose (%)	0,02 – 0,2	trace	trace	ND	ND	trace
Acide lactique (%)	0,02 – 0,05	0,01 – 0,02	trace	ND	ND	trace
Ca (mg/L)	ND	ND	ND	0,4 -1,5	0,4 - 1	ND
Température (°C)	ND	ND	ND	45 - 55	ND	ND

¹ Les eaux issues du lait sont également appelées "eaux de vache".

Sources	a	a	a	b	c	a
----------------	---	---	---	---	---	---

ND : données non disponibles a : (Wojdalski et al., 2013) b : (Chmiel, Mavrov, & Belieres, 2000) c : (Mavrov & Belieres, 2000)

Pour les condensats, l'étendue de la plage de valeurs des paramètres de pollution organique s'explique par le fait que les eaux issues du lait deviennent de plus en plus chargées au fur et à mesure qu'elles sont produites dans les évaporateurs à multiples effets. Une partie de la vapeur issue du premier effet sert à chauffer le produit contenu dans le second et l'autre partie est condensée. Cette opération se répète d'effet en effet et conduit à l'obtention d'eaux issues du lait plus chargées en même temps que le produit se concentre.

D'autres études qui portaient plus particulièrement sur les eaux issues du lait obtenues lors de la fabrication de produits laitiers en poudre, ont montré que leur composition variait également selon le type de matière première utilisée. Des analyses plus détaillées ont mis en évidence la présence de matières azotées (azote organique et ammoniacal (NTK)) et de composés organiques (éthanol, acétone et acétoïne) dans les condensats obtenus (Tableau 7).

Tableau 7 : Composition d'eaux issues du lait produites lors de l'évapo-concentration pour la fabrication de poudres (Vourch, Balannec, Chaufer, & Dorange, 2008)

Paramètre	Unités	Produits à l'origine des condensats				
		Lait écrémé (échantillon 1)	Lait écrémé (échantillon 2)	Lait entier (échantillon 1)	Lait entier (échantillon 2)	Lactosérum
Conductivité	μS/cm	4	18	9	15	101
MES	mg/L	3	< 2	2	3	3
NTK	mg/L	0,3	2,1	1,5	1,8	7,2
DCO	mgO ₂ /L	< 15	24	< 15	40	30
COT	mg/L	0,7	3,7	1,3	3,3	11
Lactose	mg/L	< 3	< 3	< 3	< 3	9,9
Lactate	mg/L	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Ethanol	μg/L	130	4430	< 50	760	2190
Acétone	μg/L	< 50	240	< 50	1650	525
Acétoïne	μg/L	120	120	1120	160	700

Le projet AQUAREL, mené de 2015 à 2018 et durant lequel des analyses physico-chimiques ont été menées, a permis de mettre en évidence des résultats similaires à ceux rencontrés dans la littérature (Tableau 8).

Tableau 8 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux issues du lait non traitées (projet AQUAREL, 2018)

Paramètre	Unités	Produit à l'origine des condensats	
		Lait et produits apparentés (perméat de lait, recette avec du lait)	Sérum
pH terrain	unité pH	Moy : 6,6 [Min ; Max] : [5,5 ; 8,1]	7,4 [5,5 ; 9,1]

Température terrain	°C	49,0 [31,2 ; 59,8]	41,3 [18,7 ; 60,5]
Conductivité	µS/cm	9,8 [4,0 ; 21]	22,8 [6,00 ; 33,0]
MES	mg/L	<2 (limite de détection)	<2 (limite de détection)
NTK	mg/L	0,74 [<0,50 ; 1,7]	3,1 [<2 ; 5,2]
DCO	mgO ₂ /L	25,3 [5,80 ; 63,0]	56,5 [17,0 ; 98,0]
DBO₅	mgO ₂ /L	12,2 [2,10 ; 37,0]	25,5 [1,3 ; 80]
COT	mg/L	9,9 [4,2 ; 23]	14,4 [5,20 ; 27,0]
NH₄	mg/L	0,50 [0,21 ; 0,77]	2,9 [0,38 ; 5,3]
ClO₃⁻	µg/L	<12,5 (limite de détection)	<12,5 (limite de détection)
ClO₂⁻	µg/L	292 [85,0 ; 410]	330 [220 ; 530]

Les eaux issues du lait sont en partie réutilisées sur site. Elles peuvent servir à approvisionner les chaudières, nettoyer l'extérieur des camions de collecte, pré-rincer les lignes de production et préparer les solutions de nettoyage. Cependant, leur volume peut être conséquent sur certains sites et il n'est parfois pas possible pour les exploitants de tout valoriser. Une partie de ces eaux est donc dirigée vers la station d'épuration.

3.3 Les industries des huiles et graisses

3.3.1 Origine des eaux usées

Dans l'industrie des huiles végétales, les eaux usées proviennent principalement des étapes de dégommage ou démulcination (élimination des mucilages : glycérides liés à l'acide phosphorique et à une base azotée), de neutralisation (élimination de l'acidité organique des graines) et de désodorisation ainsi que des purges des chaudières et des opérations de lavage des déshuileurs (Azbar & Yonar, 2004).

3.3.2 Qualité des eaux usées

Les eaux usées issues des industries des huiles et des graisses ont des concentrations élevées en DCO, DBO, SDT, huiles essentielles, huiles et graisses, sulfates, sulfures, azote (sous forme organique ou ammoniacale dépendant de l'huile) et phosphates. Elles contiennent également du phénol, des métaux lourds, des catalyseurs (nature non précisée) issus du procédé d'hydrogénation et des pesticides (Azbar & Yonar, 2004; Klemes et al., 2008; Pandey, Sanyal, Chattopadhyay, & Kaul, 2003).

Trois exemples de caractérisation des eaux usées en provenance des industries des huiles végétales sont donnés dans le tableau 9. Comme ces exemples proviennent de régions différentes,

des différences dans les procédés de fabrication des huiles végétales peuvent être à l'origine des différences importantes constatées. Ce point reste néanmoins à vérifier.

Tableau 9: Exemples de caractérisation des eaux usées en provenance des industries des huiles végétales

Paramètre	Unité	Valeur		
		Premier exemple (Azbar & Yonar, 2004)	Deuxième exemple (Pandey et al., 2003)	Synthèse de l'UE (European, 2018a)
		Turquie	Inde	Union européenne
DCO	mg.l ⁻¹	13 750 - 15 000	29 120	14-5 561
DCO soluble	mg.l ⁻¹	6 500 – 7 000	ND	ND
DBO ₅	mg.l ⁻¹	4 300 – 4 700	ND	5-1 800
SDT	mg.l ⁻¹	ND	7 600	ND
MES	mg.l ⁻¹	3 800 – 4 130	ND	0.02-300
Huiles et graisses	mg.l ⁻¹	3 600 – 3 900	7 782	ND
COT	mg.l ⁻¹	ND	ND	310-970
NTK	mg.l ⁻¹	636-738	ND	ND
Couleur	-	ND	Jaunâtre	ND
Température	°C	ND	35	ND
pH	-	6.3-7.2	1.9	ND
N-NH ₄	mg.l ⁻¹	ND	ND	1.3-82
Ptot	mg.l ⁻¹	61-63	ND	0.03-2 655
PO ₄ ³⁻	mg.l ⁻¹	ND	57.4	ND
Ntot	mg.l ⁻¹	ND	ND	2.2-110
S ²⁻	mg.l ⁻¹	ND	8.4	ND
SO ₄ ²⁻	mg.l ⁻¹	ND	2.0	ND
Cl ⁻	mg.l ⁻¹	ND	ND	480-763
Pb	mg.l ⁻¹	ND	0.02	ND
Cd	mg.l ⁻¹	ND	0.03	ND
Zn	mg.l ⁻¹	ND	1.2	ND
Mn	mg.l ⁻¹	ND	0.04	ND
Ni	mg.l ⁻¹	ND	0.25	ND
Fe	mg.l ⁻¹	ND	1.4	ND
Cu	mg.l ⁻¹	ND	0.03	ND

Le tableau 10 donne un exemple de la qualité des eaux usées provenant de l'industrie des huiles végétales, issues des chaudières et des systèmes de refroidissement.

Tableau 10: Exemple de la qualité des eaux usées provenant de l'industrie des huiles végétales et issues des chaudières et des systèmes de refroidissement (Pandey et al., 2003)

Paramètre	Unité	Eaux usées					
		Chaudière		Refroidissement			
		Intervalle	Moyenne	Condenseur		Cuve	
Intervalle	Moyenne			Intervalle	Moyenne		
Température	°C	58-68	62	40-46	44	30-36	32
Conductivité	mS/cm	0.36-0.4	0.38	0.38-0.44	0.42	0.48-0.52	0.51
pH	-	7.3-7.5	ND	7.2-7.4	ND	7.2-7.3	ND
Alcalinité totale en CaCO ₃	mg.l ⁻¹	240-290	270	230-260	250	210-260	230
SDT	mg.l ⁻¹	298-332	318	310-366	342	394-430	400
MES	mg.l ⁻¹	28-44	38	96-194	148	64-176	124
N-NH ₄	mg.l ⁻¹	SLD	SLD	0.5-1.9	1.3	0.6-2.0	1.4
NTK	mg.l ⁻¹	SLD	SLD	3.6-4.8	4.1	2.8-3.8	3.2
NO ₃ ⁻	mg.l ⁻¹	1.7-3.0	2.3	12-18	16	14-21	18
Cl ⁻	mg.l ⁻¹	6-10	7	22-32	28	17-22	18
SO ₄ ²⁻	mg.l ⁻¹	1.0-1.9	1.4	2.9-5.2	3.6	7.2-11.4	9.5
PO ₄ ³⁻	mg.l ⁻¹	7.0-11.5	9.6	0.1-0.6	0.3	0.2-0.4	0.3
DCO	mg.l ⁻¹	4.2-8.4	6.0	300-430	350	418-506	470
DBO ₅ (20°C)	mg.l ⁻¹	<2	<2	125-170	145	165-210	185
Na ⁺	mg.l ⁻¹	3.2-5.6	4.2	8.9-11.5	10.4	12.8-16.9	14.9
K ⁺	mg.l ⁻¹	0.1-0.5	0.3	1.4-2.6	2.2	1.7-2.6	2.1
Huiles et graisses	mg.l ⁻¹	SLD	SLD	22-30	27	42-56	46
Fe	mg.l ⁻¹	1.25-4.05	2.5	1.2-2.4	1.5	0.8-1.6	1.2
Zn	mg.l ⁻¹	0.06-0.1	0.08	0.003-0.008	0.006	0.012-0.021	0.016
Cu	mg.l ⁻¹	SLD	SLD	0.009-0.012	0.010	0.011-0.016	0.014
Mn	mg.l ⁻¹	0.10-0.14	0.11	0.08-0.10	0.08	0.06-0.12	0.09

3.4 Les industries des fruits et légumes

3.4.1 Origine des eaux usées

Dans l'industrie des fruits et légumes, la production est saisonnière et régulée par la production agricole. Environ 70% des eaux usées provient des opérations de lavage et de nettoyage, telles que l'élimination de la terre des légumes non pelés, le nettoyage des surfaces ou encore le nettoyage, le rinçage et le refroidissement des légumes traités (Lehto, Sipila, Alakukku, & Kymalainen, 2014; Millan-Sango, Allende, Spiteri, Van Impe, & Valdramidis, 2017).

Le tableau 11 donne un exemple concernant la répartition des utilisations d'eau dans une installation type de production de salade fraîche.

Tableau 11: Répartition des utilisations d'eau dans une installation type de production de salade fraîche (Manzocco et al., 2015)

Activité utilisant de l'eau	Pourcentage d'eau utilisée par activité
Premier lavage	18%
Lavage des salades	53%
Rinçage des salades	17%
Usages domestiques	7%
Pré-nettoyage du plan et de l'équipement	2%
Décapage au jet du plan et de l'équipement	1%
Rinçage du plan et de l'équipement	2%

3.4.2 Qualité des eaux usées

Dans l'industrie des fruits et légumes, les eaux usées contiennent une grande quantité de MES (terre), de sucres et d'amidons, mais également des sels, des acides et des pesticides (Klemes et al., 2008).

Les eaux de lavage des légume-racines (carotte, céleri, navet, patate douce, pomme de terre, radis, etc...) contiennent des matières organiques (DCO, DBO, COT), des spores et du mycélium de champignons, des bactéries telles que *E. coli*, des sels, des résidus de produits chimiques, des nitrates et du phosphore. Les résidus chimiques qui peuvent être identifiés sont entre autres le chlorpyrifos, la prométryne, le linuron, l'endosulfan-alpha et le sulfate d'endosulfan (Mebalds & Hamilton, 2002).

Deux exemples de caractérisation des eaux usées issues des industries des fruits et légumes sont donnés dans le tableau 12.

Tableau 12: Exemples de caractérisation des eaux usées issues des industries des fruits et légumes

Paramètre	Unité	Valeur	
		Première exemple (Gomez-Lopez, Lannoo, Gil, & Allende, 2014)	Synthèse de l'UE (European, 2018a)
Nature des eaux usées	-	Lavage des épinards frais	Général
DCO	mg.l ⁻¹	512-518	18-5 402
DBO ₅	mg.l ⁻¹	130-176	1.98-5 054
COT	mg.l ⁻¹	ND	40
MES	mg.l ⁻¹	ND	4.98-1 132
N-NH ₄	mg.l ⁻¹	ND	0.06-4.83
Ptot	mg.l ⁻¹	ND	0.32-22.27
Ntot	mg.l ⁻¹	ND	1.4-105
Turbidité	NTU	ND	ND

Paramètre	Unité	Valeur	
		Première exemple (Gomez-Lopez, Lannoo, Gil, & Allende, 2014)	Synthèse de l'UE (European, 2018a)
pH	-	8.22-8.34	ND
Alcalinité en CaCO ₃	mg.l ⁻¹	206-210	ND
Chlorophylle totale	mg.l ⁻¹	5.47-5.75	ND
Chlorophylle a	mg.l ⁻¹	3.82-4.26	ND
Chlorophylle b	mg.l ⁻¹	1.21-1.93	ND
Teneur en germes aérobies	logUFC.ml ⁻¹	5.17-5.59	ND
Cl ⁻	mg.l ⁻¹	44.75-46.45	ND
NO ₂ ⁻	mg.l ⁻¹	SLD	ND
Br ⁻	mg.l ⁻¹	SLD	ND
NO ₃ ⁻	mg.l ⁻¹	23.4-30.4	ND
PO ₄ ³⁻	mg.l ⁻¹	30.92-32.48	ND
SO ₄ ²⁻	mg.l ⁻¹	96.92-102.14	ND
Ca ²⁺	mg.l ⁻¹	3.47-4.85	ND
K ⁺	mg.l ⁻¹	89.37-94.53	ND
Na ⁺	mg.l ⁻¹	52.93-55.59	ND
S ²⁻	mg.l ⁻¹	15.4-16.3	ND

Une caractérisation détaillée des eaux de lavage des carottes est donnée dans le document "Quality wash water for carrots and other vegetables: insurance for clean food and minimising environmental impact" (Mebalds & Hamilton, 2002). En outre, des exemples de caractérisation des eaux usées issues d'unités de production de carottes, de pommes de terre et de salade sont présentés dans le tableau 13.

Lors de l'étape de lavage, qui est la plus génératrice d'eau (voir tableau 11), l'effluent produit est chargé. En France, il est de pratique courante d'utiliser l'eau de lavage en circuit semi-fermé (recyclage partiel et fuite permanente d'effluents) où l'eau se concentre au fur et à mesure en DCO, Turbidité, bactéries mésophiles, coliformes, *Listeria spp.*, *E. coli*, levures et moisissures (Selma, Allende, Lopez-Galvez, Conesa, & Gil, 2008). En revanche, ce sont les étapes dites « de process » tels que le pelage ou la coupe qui génèrent 90% de la charge organique des eaux usées (Lehto et al., 2014).

Tableau 13: Exemples de caractérisation des eaux usées issues d'unités de production de carottes, de pommes de terre et de salade (Lehto et al., 2014)

Paramètre	Unité	Eau de lavage des carottes et des pommes de terre		Eaux usées de pelage des carottes et des pommes de terre		Eaux usées de la transformation de la laitue	
		Moyenne	Intervalle	Moyenne	Intervalle	Moyenne	Intervalle

ST	g.l ⁻¹	10.0	4.6-18.9	2.4	1.3-4.3	0.05	0.04-0.07
DBO ₇ *	g.l ⁻¹	1.1	0.4-1.7	14.3	6.3-24.0	0.50	0.46-0.54
DCO	g.l ⁻¹	5.2	4.4-5.9	22.3	9.0-39.0	0.7	0.6-0.8
Ptot	mg.l ⁻¹	16	13-19	46	30-58	3.0	3.0
NTot	mg.l ⁻¹	77	68-92	220	120-360	13	12-13
<i>E. coli</i>	Log UFC (100 ml) ⁻¹	3.5	3.1-3.7	ND	<2.7-3.6	3.2	2.9-3.5
Bactéries coliformes	Log UFC (100 ml) ⁻¹	5.9	4.9-6.5	5.4	4.5-6.4	6.5	6.0-7.0
Coliformes fécaux	Log UFC (100 ml) ⁻¹	3.9	2.3-5.5	4.3	3.8-5.4	6.8	6.8
Entérocoques	Log UFC (100 ml) ⁻¹	2.6	1.9-3.4	2.8	2.0-3.6	3.2	3.2
<i>Y. enterocolitica</i>	-	Déecté	Déecté	Déecté	Déecté	Non déecté	Non déecté

(* DBO sur 7 jours au lieu de 5)

En complément, le tableau 14 liste les microorganismes pathogènes que l'on peut rencontrer dans les industries de production de légumes. On mesure donc l'importance des phases de désinfection dans le cas de ces industries.

Tableau 14: Liste des microorganismes pathogènes rencontrés dans les industries de production de légumes (Sinha, Hui, Evranuz, Siddiq, & Ahmed, 2011)

Microorganismes pathogènes	Origine
<i>Clostridium botulinum</i>	Chou râpé, courgette coupée en cubes, oignons émincés
<i>Salmonella sp.</i>	Tomates hachées ou tranchées, germes de soja
<i>Shigella spp.</i>	Laitue coupée, oignons verts, chou râpé, persil haché
<i>Escherichia coli</i> O157:H7	Laitue, pousse, mélange de légumes, coriandre et céleri
<i>Listeria monocytogenes</i>	Salade de chou, asperges, brocoli, courge musquée, salade de chou, et chou-fleur, Salades de légumes toutes prêtes
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Germes de haricot mungo, carottes râpées, laitue
<i>Campylobacter jejuni</i>	Salade, laitue
<i>Cryptosporidium spp.</i>	Laitue, oignons
<i>Cyclospora spp.</i>	Laitue
<i>Hepatitis A</i>	Laitue, tomates en dés, oignons verts

Microorganismes pathogènes	Origine
Norwalk/Norwalk-likevirus	Salade de chou, salade verte

3.5 Les industries de la boisson

Les paragraphes suivants donnent les origines et les qualités des eaux usées issues des industries vinicoles, des brasseries et des industries des boissons gazeuses.

3.5.1 Les industries vinicoles

3.5.1.1 Origine des eaux usées

Dans l'industrie vinicole, la production est saisonnière. 50 à 80% des eaux usées sont produites pendant 2 mois et 2 périodes : vendanges et vinification. Les eaux usées proviennent principalement de tout type d'opérations de lavage ou de refroidissement (Buelow, Steenwerth, Silva, & Parikh, 2015; Ioannou, Li Puma, & Fatta-Kassinou, 2015; Klemes et al., 2008).

3.5.1.2 Qualité des eaux usées

La qualité des eaux usées dépend de la nature du vin produit (rouge, blanc, rosé, mousseux, etc.) mais aussi de l'industrie vinicole (Ioannou et al., 2015; Klemes et al., 2008).

Les eaux usées contiennent principalement des matières organiques dont la composition est assez détaillée. Des valeurs moyennes de concentration et la répartition de ces matières sont données dans le tableau 15. A noter que pendant la période des vendanges, la quantité d'éthanol est moins importante et les eaux usées contiennent principalement des sucres (Klemes et al., 2008).

Tableau 15: Composition moyenne et répartition de la DCO dans une eau usée d'une industrie vinicole (Klemes et al., 2008)

Paramètre	Unité	Valeur moyenne	% DCO
pH	-	5.0	ND
MES	mg.L ⁻¹	3 300	ND
DCO brute	mgO ₂ .L ⁻¹	14 600	ND
DCO dissoute	mgO ₂ .L ⁻¹	12 700	100%
Ethanol	mg.L ⁻¹	4 900	80.3%
Glucose et fructose	mg.L ⁻¹	870	7.3%
Glycérol	mg.L ⁻¹	320	3.1%
Acide tartrique	mg.L ⁻¹	1 260	5.3%
Acide malique	mg.L ⁻¹	70	0.4%
Acide lactique	mg.L ⁻¹	160	1.2%
Acide acétique	mg.L ⁻¹	300	2.6%

Elles contiennent aussi des composés phénoliques, de l'azote, du phosphore et des sels tels que le potassium et le sodium. Ioannou et al. ont fait une synthèse des concentrations minimum, moyenne et maximum pour plusieurs paramètres (Cf. tableau 16). Une très forte disparité est constatée. Etant donné que le jus de raisin est acide et que les nettoyants sont alcalins, le pH des eaux usées peut varier de manière importante au cours du temps d'un pH acide à un pH basique. Enfin, les effluents sont, en général, biodégradables (Buelow et al., 2015; Ioannou et al., 2015).

Tableau 16: Exemples de caractérisation des eaux usées des usines vinicoles

Paramètre	Unité	Valeur		
		Premier exemple (Buelow et al., 2015)		Deuxième exemple (Ioannou et al., 2015)
		Intervalle	Intervalle	Moyenne
DCO	mg.L ⁻¹	ND	320-49 105	11 886
DBO ₅	mg.L ⁻¹	ND	203-22 418	6 570
COT	mg.L ⁻¹	ND	41-7 363	1 876
pH	-	3-11	2.5-12.9	5.3
Conductivité	mS.cm ⁻¹	0.8-3.1	1.1-5.6	3.46
ST	mg.L ⁻¹	ND	748-18 332	8 660
Teneur totale en solides non volatils	mg.L ⁻¹	ND	661-12 385	5 625
MES	mg.L ⁻¹	ND	66-8 600	1 700
NTot	mg.L ⁻¹	0-142	10-415	118
Ptot	mg.L ⁻¹	3-188	2.1-280	53
CPT	mg.L ⁻¹	ND	0.51-1 450	205

Une caractérisation des eaux usées de 18 usines vinicoles localisées en Californie a été réalisée pendant 20 mois par Buelow et al. (Cf. tableau 16). Cette caractérisation met en évidence une variation saisonnière des effluents.

3.5.2 Les brasseries

La bière est la cinquième boisson après le thé, les boissons gazeuses, le lait et le café (Fillaudeau, Blanpain-Avet, & Daufin, 2006).

3.5.2.1 Origine des eaux usées

Dans les brasseries, les eaux usées contiennent principalement de la bière (périmée ou gaspillée) et des eaux de lavage et en particulier des eaux de lavage des bouteilles et des fûts (Klemes et al., 2008).

Le lavage des bouteilles génère une grande quantité d'eaux usées, mais faiblement concentrées en matière organique. A l'inverse, la fermentation et la filtration produisent une faible quantité d'eaux usées (environ 3% du volume total) mais très concentrées en matière organique (97% de la DBO₅) (Simate et al., 2011).

3.5.2.2 Qualité des eaux usées

Les eaux usées ont une DCO et une DBO₅ élevées. Cela est dû à la présence de glucides, de protéines et de matières organiques (sucres, amidon, éthanol, acides gras volatils, etc.).

La température des eaux usées est en moyenne comprise entre 25 °C et 38 °C mais des températures supérieures à 38 °C peuvent aussi être mesurées (Goldammer, 2008; Klemes et al., 2008). Le tableau 17 donne des exemples de caractérisation des eaux usées de brasseries.

Tableau 17: Exemples de caractérisation des eaux usées de brasseries

Paramètre	Unité	Valeur			
		(Bloor, Anderson, & Willey, 1995)	(Rogener, Mavrov, & Chmiel, 2003)	(European, 2018a)	(Rao et al., 2007)
Référence	-				
Nature des effluents	-	Bière perdue (exemple)	Ensemble des eaux usées (exemple)	Ensemble des eaux usées (synthèse de l'UE)	Ensemble des eaux usées (exemple)
Température	°C	ND	ND	ND	18-40
Conductivité	mS.cm ⁻¹	ND	1 700 -3 300	ND	ND
pH	-	ND	6.5-9.8	ND	3-12
DCO	mg.l ⁻¹	60 000 -80 000	200-520	16-5 779	2 000 -6 000
DBO ₅	mg.l ⁻¹	ND	ND	3.33-4 000	1 200 -3 600
Ratio DBO ₅ /DCO	-	0.6-0.8	ND	ND	1.667
ST	mg.l ⁻¹	ND	ND	ND	5 100 -8 750
MES	mg.l ⁻¹	300	ND	1.58-1 095	2 901 -3 000
SDT		ND	ND	ND	2,02-5 940
Turbidité	FNU	ND	22-82	ND	ND
COT	mg.l ⁻¹	ND	30-140	50-911	ND
Ptot	mg.l ⁻¹	ND	ND	0.7-89	ND
Phosphates calculé comme PO ₄	mg.l ⁻¹	ND	ND	ND	10-50
NTot	mg.l ⁻¹	67	ND	1.5-81.5	ND
NTK	mg.l ⁻¹	ND	ND	ND	25-80
N-NH ₄	mg.l ⁻¹	ND	ND	0.03-48.7	ND
AGV	mg.l ⁻¹	ND	ND	ND	1 000 -2 500
Cl ⁻	mg.l ⁻¹	ND	115-370	60.49	ND
SO ₄ ²⁻	mg.l ⁻¹	ND	40-120	ND	ND

Paramètre	Unité	Valeur			
Ca ²⁺	mg.l ⁻¹	ND	23-37	ND	ND
Mg ²⁺	mg.l ⁻¹	ND	5.2-8.5	ND	ND
Al ³⁺	mg.l ⁻¹	ND	1.1-5.6	ND	ND
F ⁻	mg.l ⁻¹	ND	0.5-2.2	ND	ND
K ⁺	mg.l ⁻¹	46	ND	ND	ND
Na ⁺	mg.l ⁻¹	ND	370-550	ND	ND

3.5.3 Les industries des boissons sucrées

Dans l'industrie des boissons sucrées non alcoolisées, les eaux usées proviennent principalement du lavage des bouteilles et du lavage des équipements (tableau 18). Elles contiennent principalement des glucides tels que le sucre (principalement le saccharose), des pectines, des arômes et des additifs colorants (Hsine, Benhammou, & Pons, 2005).

Tableau 18: Répartition des utilisations d'eau dans l'industrie des boissons sucrées non alcoolisées (Hsine et al., 2005)

Activité utilisant de l'eau	Pourcentage d'eau utilisée par activité
Lavage des bouteilles	62%
Lavage et rinçage des équipements	21%
Lavage des filtres	10%
Régénération de l'adoucisseur et du décarbonateur	7%

Le tableau 19 résume la qualité des eaux usées (paramètres globaux) habituellement rencontrée en Europe dans ce type d'industrie.

Tableau 19: Exemples de caractérisation des eaux usées issues des industries de production de boissons non alcoolisées (gazeuses et plates), de nectar et de jus (European, 2018a)

Paramètre	Unité	Synthèse de l'Union européenne (European, 2018a)
DCO	mg.l ⁻¹	6-3 322
DBO ₅	mg.l ⁻¹	4-1 437
COT	mg.l ⁻¹	9-1 094
MES	mg.l ⁻¹	0.05-88
N-NH ₄	mg.l ⁻¹	0.1-0.7
PTot	mg.l ⁻¹	0.4-30
Ntot	mg.l ⁻¹	1.3-11.7

E. Ait Hsine et al. (2005) indiquent également les contributions en MES, DBO et DCO pour différentes sources d'eaux usées (tableau 20).

Tableau 20: Contribution en MES, DBO5 et DCO pour différentes sources d'eaux usées issues des industries des boissons sucrées (Hsine et al., 2005)

Activité utilisant de l'eau	MES (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DCO (mg/L)
Lavage des bouteilles	150,0	1 300,0	2 600,0
Lavage et rinçage des équipements de sirop finaux	200,0	1 200,0	2 400,0
Lavage et rinçage des équipements de remplissage	150,0	1 400,0	2 800,0
Lavage et rinçage des équipements de filtration du sirop	300,0	1 800,0	3 900,0
Lavage des filtres à charbon actif	150,0	500,0	1 200,0
Lavage des filtres à sable	151,1	300,0	600,0
Régénération des adoucisseurs	150,0	600,0	1 200,0
Régénération des décarbonateurs	150,7	700,0	1 400,0
Lavage des équipements de sirop simple	1 500,0	1 600,0	3 200,0
Lavage des équipements de stockage du sirop	1 000,0	1 200,0	2 400,0

4 Les besoins en eau

Dans l'industrie alimentaire, l'eau a différents usages. Elle est utilisée pour des opérations de nettoyage, des échanges thermiques, l'approvisionnement d'utilités et également comme ingrédient. Compte-tenu des règles d'hygiène à respecter pour produire une denrée alimentaire saine pour le consommateur, l'eau utilisée dans ce secteur est principalement de l'eau qui respecte les critères de potabilité. A titre d'exemple, l'eau utilisée par les industries alimentaires de l'Union Européenne est constituée à 75% d'eau potable (Valta et al., 2016).

Il convient pour l'exploitant d'une usine agroalimentaire d'utiliser de l'eau potable dès lors que celle-ci se retrouve en contact avec la denrée alimentaire (par exemple l'eau ingrédient ou l'eau de rinçage des lignes de production) ou qu'elle présente un risque de contact avec la denrée (eau contenue dans certains échangeurs thermiques). L'eau doit alors respecter les critères de potabilité définis dans la réglementation européenne et sa transcription en droit national. Dans ce cas, le traitement à mettre en place est assez similaire à celui d'une station de production d'eau potable.

Cependant, la qualité d'eau à respecter dépendant en premier lieu de l'usage auquel est destiné celle-ci, il n'est pas nécessaire d'utiliser exclusivement de l'eau potable au niveau des usines. Ainsi, certaines utilités telles que les chaudières peuvent être alimentées avec des eaux dont la qualité permet avant tout le bon fonctionnement de l'installation. Dans une publication de 2013, Riera et al. ont compilé des critères de qualité à respecter selon des usages visés (tableau 21). En ce qui concerne l'eau nécessaire aux utilités telles que les chaudières, celles-ci doivent avoir des teneurs en minéraux faibles afin de ne pas encrasser les installations et les endommager. Des recommandations sur les qualités d'eau requises pour alimenter ces équipements sont disponibles dans la littérature comme celles émanant de l'association américaine des fabricants de chaudières (US EPA, 2012) (tableau 22).

Sur le sol américain, d'autres critères sont retenus pour permettre la réutilisation de l'eau usée traitée à des fins industrielles et notamment au niveau des tours de refroidissement (Asano et al., 2007) (tableau 23).

Les traitements sont à adapter en fonction de la qualité d'eau à produire.

*Tableau 21 : Qualités d'eau requises selon les usages (Riera, Suárez, & Muro, 2013)**

Paramètre	Unité	Eau de chaudière	Eau échange thermique	Eau de nettoyage	Process	Autres usages
pH	-	7-10	6,9-9,0	6,5-9,0	6,5-9,5	6-9
Conductivité (25°C)	µS/cm	<40	1000	<200	2500 (20°C)	/
DCO	mgO ₂ /L	<10	75	/	<5	43
COT	mgO ₂ /L	<4	14	<4	<4	16
DBO ₅	mgO ₂ /L	1-50	25	/	/	30
Ca ²⁺	mg/L	<0,4	240	<1	<400	/

Paramètre	Unité	Eau de chaudière	Eau échange thermique	Eau de nettoyage	Process	Autres usages
MES	mg/L	0,5-10	100	35	/	<20
Turbidité	NTU	/	50	/	<5	<10
Nombre de colonies	n/mL	/	/	<100	<100	/
<i>E. coli</i>	n/100mL	/	/	Non détecté	Non détecté	<200
Bactéries coliformes	n/100mL	/	/	Non détecté	Non détecté	<200

* Certaines spécifications proviennent de la législation espagnole et de l'agence de protection de l'environnement américaine (US EPA)

Tableau 22 : Qualités d'eau recommandées pour une utilisation en chaudières (US EPA, 2012)

Drum operating pressure (psig)	Unity	0-300	301-450	451-600	601-750	751-900	901-1000	1001-1500	1501-2000	OTSG*
Steam										
TDS max	ppm	0,2-1,0	0,2-1,0	0,2-1,0	0,1-0,5	0,1-5,0	0,1-5,0	0,1	0,1	0,05
Boiler water										
TDS max	ppm	700-3500	600-3000	500-2500	200-1000	150-750	125-625	100	50	0,05
Alkalinity max	ppm	350	300	250	200	150	100	n/a	n/a	n/a
TSS max	ppm	15	10	8	3	2	1	1	n/a	n/a
Conductivity max	µS/cm	1100-5400	900-4600	800-3800	300-1500	200-1200	200-1000	150	80	0,15-0,25
Silica max	ppm SiO ₂	150	90	40	30	20	8	2	1	0,02
Feed water (condensate and makeup, after deareator)										
Dissolved oxygen	ppm O ₂	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	n/a
Total iron	ppm Fe	0,1	0,05	0,03	0,025	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Total copper	ppm Cu	0,05	0,025	0,02	0,02	0,015	0,01	0,01	0,01	0,002
Total hardness	ppm CaCO ₃	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,05	ND	ND	ND
pH (25°C)		8,3-10	8,3-10	8,3-10	8,3-10	8,3-10	8,8-9,6	8,8-9,6	8,8-9,6	n/a
Nonvolatile TOC	ppm C	1	1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	ND
Oily matter	ppm	1	1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	ND

*OTSG : Once Through Steam Generation

Tableau 23 : Valeurs recommandées pour la réutilisation d'eaux usées traitées dans le domaine industriel (alimentaire ou autre) (Asano et al., 2007)

Paramètre	Unités	Once-through cooling	Recirculating cooling towers	Autres usages
pH		6-9	6-9	A adapter en fonction de l'usage
DBO	mg/L	≤ 30	≤ 30	
MES	mg/L	≤ 30	≤ 30	
Coliformes fécaux	n/100mL	≤ 200	≤ 200	
Cl ₂ résiduel	mg/L	≥ 1	≥ 1	

5 Les technologies de traitement de l'eau pour le recyclage et la réutilisation

5.1 Focus sur les technologies de traitement envisageables pour produire une eau de qualité « eau potable »

Comme l'eau utilisée par les industries alimentaires de l'Union Européenne est constituée à 75% d'eau potable (Valta et al., 2016), un focus est réalisé sur les technologies utilisées en France pour produire de l'eau potable. En France, la réglementation impose d'utiliser soit de l'eau de surface ou soit de l'eau issue d'un forage.

5.1.1 Rappel des réglementations sur l'eau potable

La réglementation concernant la qualité de l'eau potable varie d'un pays à l'autre. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a établi des lignes directrices pour la qualité de l'eau potable (Edition, 2011).

En Europe, la directive sur l'eau potable est la directive 98/83 du 3 novembre 1998. Elle est consolidée par la directive 2015/1787 du 6 octobre 2015. Chaque pays de la Communauté européenne a ensuite traduit, au niveau national, cette directive en texte de loi qui peut imposer une qualité d'eau potable plus restrictive. En France, il s'agit de l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine (Cf livrable D22).

5.1.2 Les technologies de traitement envisageables

La nature des procédés dépend de la qualité de l'eau à recycler et des concentrations en polluants.

En France, le document «La production d'eau potable et les filières de traitement» résume les procédés habituellement rencontrés pour éliminer plusieurs polluants identifiés (Legube, 2015). Le tableau 24 résume les technologies possibles et à envisager en priorité.

A noter cependant que les performances de traitement dépendront de la concentration et de la nature de chaque paramètre listé dans la réglementation eau potable. Par exemple, pour le COT, le traitement sera différent selon la nature des matières organiques (dissoutes ou particulières). En connaissant les polluants à traiter et leur concentration, il est possible d'étudier chaque cas en détail et de définir un schéma de procédés.

Certains des procédés listés sont décrits dans le paragraphe 5.2.

Tableau 24: Exemples de technologies envisageables pour éliminer différents polluants présents dans l'eau à traiter avant recyclage (Legube, 2015)

Polluants	Origines	Technologies envisageables										
		Filtre biologique	Coagulation / floculation / décantation	Filtration sur média filtrant	Adsorption	Filtration membranaire	Echange d'ions	Distillation	Chloration	Ozonation	Autres	
Ammonium	Sous-produit de dégradation de la matière organique	X (nitrification)								X (au break point)		
COT ou oxydation au permanganate de potassium	Matière organique		X		X (sur charbon actif)	X (MF, UF, NF ou OI)						
Chlorates	Herbicide Réactifs utilisés pour la désinfection Sous-produits de désinfection					X (OI)						
Chlorites	Réactifs utilisés pour la désinfection Sous-produits de désinfection				X (réduction en chlorates)	X (OI)				X (réduction en chlorates)		
Chlorure	Salage					X (OI ou ED)	X	X				
Chlorure de vinyle	Contenant ou canalisations en PVC				X (sur charbon actif)						X (suivi d'une adsorption sur charbon actif)	
Couleur	Matière organique		X	X (avec ou sans coagulation)	X (sur charbon actif)	X (MF, UF, NF ou OI)					X	
Cuivre	Traitements algicides et fongicides Corrosion		X		X (alumine activée, dioxyde de manganèse)							Pré-reminéralisation (CO ₂ + soude ou chaux) Ou décarbonatation par la chaux ou par la soude
1,2-dichloroethane	Fumigant pour les céréales				X (sur charbon actif)							
Dureté Ca ²⁺ et Mg ²⁺	Lait, eau					X (ED, NF ou OI)	X					Electrolyse

Polluants	Origines	Technologies envisageables									
		Filtre biologique	Coagulation / flocculation / décantation	Filtration sur média filtrant	Adsorption	Filtration membranaire	Echange d'ions	Distillation	Chloration	Ozonation	Autres
Fer	Corrosion chimique ou bactérienne		X (après oxydation chimique ou biologique)	X (après oxydation chimique ou biologique)							Oxydation catalytique sur filtre
Fluorures	Engrais		X	X (avec coagulation)	X (alumine activée, hydroxy ou chloro-apatite, hydroxyde de fer)		X				Décarbonatation à la chaux
Nitrates	Engrais Conservateurs	X(dénitrification) ou BRM				X (ED ou NF)	X				
Nitrites	Conservateurs								X (oxydation en nitrates)	X (oxydation en nitrates)	
Odeur et saveur	Matière organique (TOC)				X (sur charbon actif)					X (suivi d'une adsorption sur charbon actif)	Elimination du COT
Perchlorates	Pesticides, amendements dans de nombreux produits alimentaires (produits laitiers, fruits et légumes) Procédés Industriels	X (réduction en chlorures)				X (NF ou OI)	X				
Pesticides	Insecticides, herbicides, fongicides		X (partiel)		X (sur charbon actif)	X (NF)				X (suivi d'une adsorption sur charbon actif)	
Sélénium : ions sélérites	Colorant				X (sur alumine activée, hydroxyde de fer)						X coagulation avec du fer ferrique ou décarbonatation de la chaux
Sélénium : ions séléniates	Colorant					X (NF)	X (résines anioniques)				

Polluants	Origines	Technologies envisageables									
		Filtre biologique	Coagulation / flocculation / décantation	Filtration sur média filtrant	Adsorption	Filtration membranaire	Echange d'ions	Distillation	Chloration	Ozonation	Autres
Sodium	Additifs					X (OI)		X			
Sulfates	Additifs					X (NF)	X				
Turbidité	MES		X (décantation ou flottation)	X (avec ou sans coagulation)		X (MF ou UF)					

5.2 Principe des procédés physico-chimique de traitement de l'eau

Cette partie décrit de manière succincte les technologies physico-chimiques de traitement utilisable pour le recyclage et la réutilisation de l'eau.

5.2.1 Dégrillage

Le dégrillage est utilisé pour éliminer les matières solides les plus grosses de l'eau et pour protéger le reste du procédé. Dans ce procédé, les eaux usées traversent une grille avec un entrefer connu et les matières sont retenues sur la grille qui est nettoyée régulièrement.

5.2.2 Coagulation et floculation

Ce procédé vise à éliminer de l'eau les colloïdes, les matières organiques naturelles et d'autres polluants organiques et inorganiques solubles. Dans le procédé de coagulation et de floculation, les particules fines et les colloïdes à l'origine de la turbidité sont agglomérés en particules plus grosses capables de décanter plus facilement (Parsons & Jefferson, 2006).

La première étape, la coagulation (voir figure 1), consiste à neutraliser la charge de surface négative des colloïdes et des particules fines. Pour cela on utilise des coagulants minéraux (sels de cations multivalents) ou organiques. Les cations les plus utilisés sont l'aluminium et l'ion ferrique, commercialisés sous forme de solutions de sulfate d'aluminium, chlorure ferrique ou chlorure de polyaluminium. Ils agissent en diminuant le potentiel de répulsion électrostatique entre les particules ce qui permet leur agglomération. Leur action est optimale pour une gamme de pH donnée.

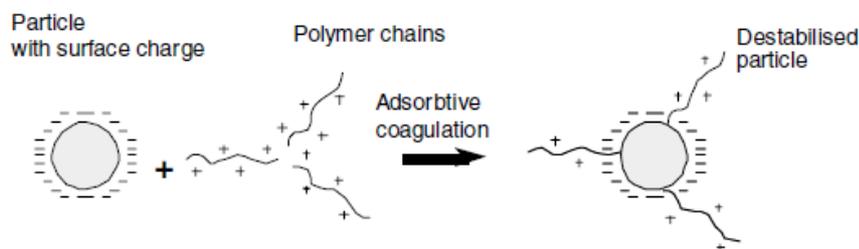


Figure 1: Principe de la coagulation : cas d'un chlorure de polyaluminium (Lens et al., 2002)

La deuxième étape, la floculation, vise à rapprocher les colloïdes pour former des floccs par ajout d'un floculant (voir figure 2). Ce floculant est un polymère organique ou minéral, composé de longues macromolécules possédant des charges électriques ou des groupements ionisables, qui s'adsorbent à la surface des micro-floccs et permettent de les relier. Parmi les polymères organiques, il en existe des naturels (alginates, amidons) et de synthèse (Anioniques : copolymères acrylamide – acide acrylique ; Neutres : polyacrylamides ; Cationiques (MADAM, ADAM)).

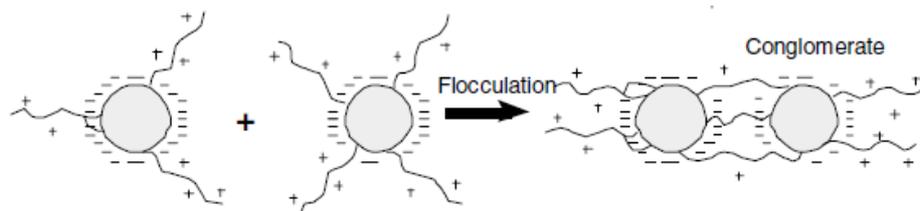


Figure 2: Principe de la flocculation: cas d'un chlorure de polyaluminium (Lens et al., 2002)

Le choix des coagulants et flocculants, peut être réalisé par jar-tests (voir figure 3). Ces tests permettent également de déterminer les dosages et pH optimaux de même que les temps de contact (Parsons & Jefferson, 2006).

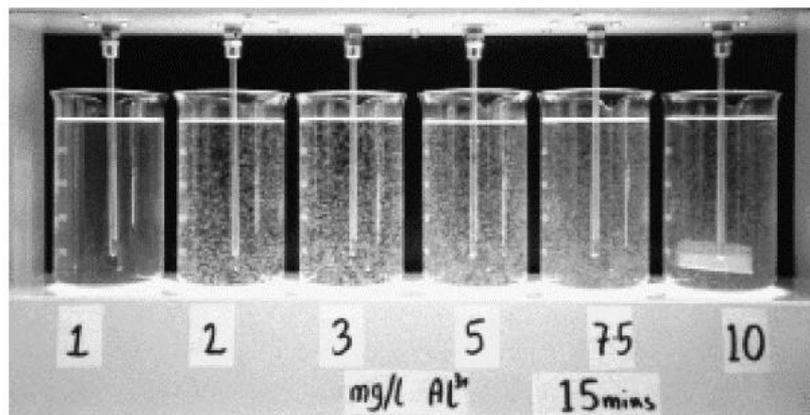


Figure 3: Exemple de jar-test (Parsons & Jefferson, 2006)

Les étapes de coagulation et de flocculation peuvent être suivies d'étapes de décantation, de flottation à l'air dissous ou de filtration afin de séparer les floccs de l'eau.

5.2.3 Décantation

Dans un décanteur, les floccs sont séparés de l'eau par gravité. Plusieurs technologies existent : des décanteurs à flux horizontal (décanteur couloir) ou vertical (décanteur cylindro-cônique), et des décanteurs lamellaires, équipés de pack lamellaire ou alvéolaires. En fonction du type de décanteur, l'efficacité d'élimination de la turbidité varie de 90% à 99% (Parsons & Jefferson, 2006). Pour un type de matières solides donné, décantant à une certaine vitesse, l'efficacité de la rétention dépend de la vitesse ascensionnelle du fluide, directement liée à la surface au sol du décanteur ou de sa surface développée dans le cas du décanteur lamellaire. Un schéma de décanteur type est présenté figure 4.

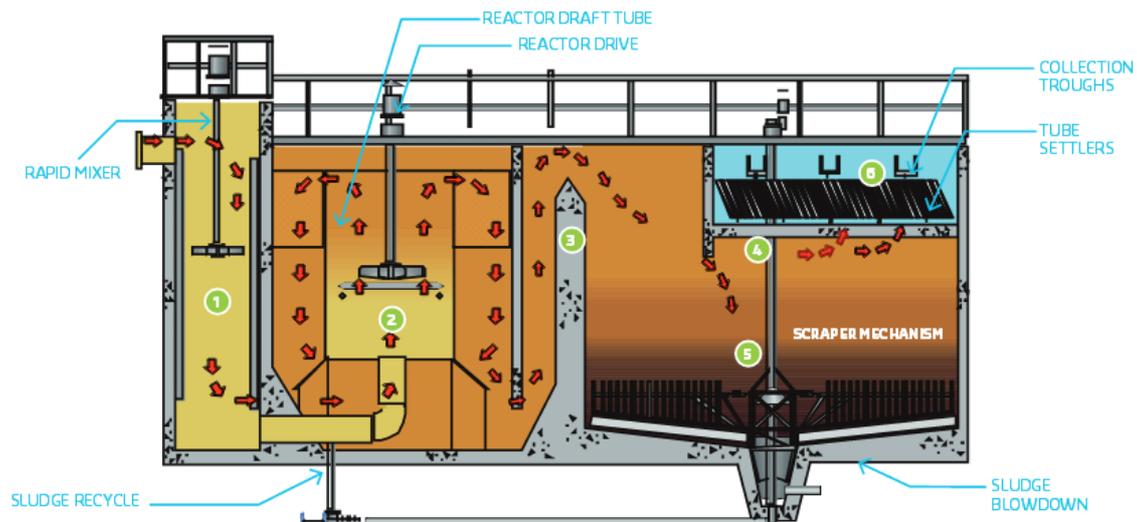


Figure 4: Schéma type d'une unité de coagulation, floculation et décantation (Degrémont)

5.2.4 Flottation à Air Dissous

Dans un FAD, les particules ou les floccs ne sont pas séparés de l'eau par gravité, mais par flottation par injection d'air puis raclées à l'aide d'un écremeur de surface. Le principe de fonctionnement du FAD est illustré à la figure 5. Ce procédé est généralement sélectionné lorsque la densité des particules ou des floccs à éliminer est inférieure à celle de l'eau, voire supérieure mais très proche de celle-ci. C'est le cas, par exemple, lorsqu'il y a de l'huile dans l'eau. L'air est injecté soit directement par des diffuseurs au bas du FAD, soit dissous sous pression dans une fraction d'eau traitée, réinjectée au fond du flottateur et dont la détente provoque la formation de très fines bulles (eau blanche). Les rendements d'élimination de la turbidité et de la matière organique sont généralement supérieurs à 90% (Parsons & Jefferson, 2006).

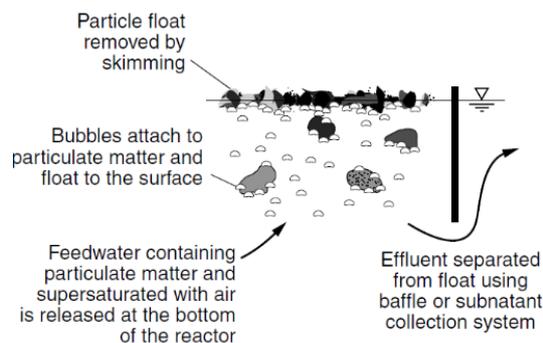


Figure 5: Principe de fonctionnement d'une Flottation à Air Dissous (Asano et al., 2007)

5.2.5 Filtration sur média filtrant

Dans un filtre, les particules ou les floccs sont séparés de l'eau par filtration sur une ou plusieurs couches de médias filtrants. Les filtres peuvent être gravitaires (à pression atmosphérique) ou sous pression. Les médias filtrants habituellement utilisés sont le sable et l'antracite. Le

diamètre du média dépend de son application et est généralement compris entre 0,5 et 2,5 mm. La hauteur totale du média est généralement autour de 1 m et comprise entre 0,6 et 3 m (Parsons & Jefferson, 2006). Comme le montre la figure 6, un filtre typique est composé, de haut en bas, d'un média filtrant, d'une couche de gravier et d'un plancher filtrant.

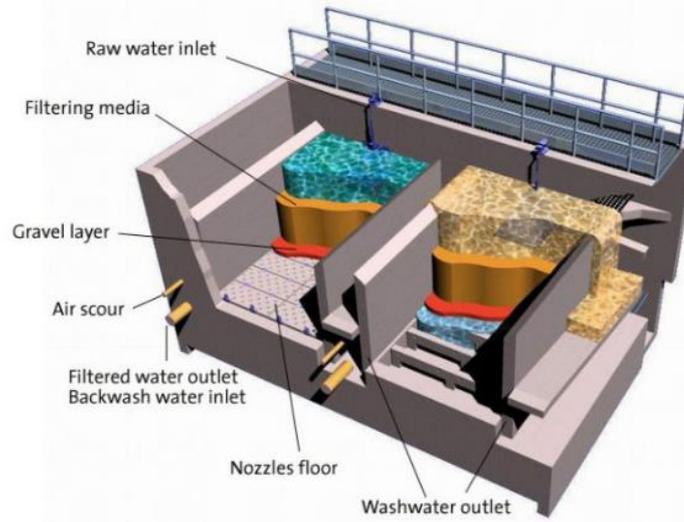


Figure 6: Schéma type d'une filtration sur média filtrant (Veolia)

Le plancher filtrant est conçu pour laisser passer l'eau lors de la filtration et pour laisser passer l'air ou l'eau lors des opérations de lavage à contre-courant. L'accumulation des particules et des floccs provoque en effet une augmentation de la perte de charge sur le filtre. Ce lavage a comme fonction d'éliminer ces particules. Un système de contrôle du débit est mis en œuvre si l'on souhaite maintenir un débit constant (Parsons & Jefferson, 2006).

5.2.6 Filtration membranaire

Une membrane est une fine couche de matériau de perméabilité sélective. Les membranes perméables à l'eau peuvent permettre de séparer les polluants de l'eau sous l'effet d'une force motrice : la pression transmembranaire pour les procédés baro-membranaires et la différence de potentiel électrique pour l'électrodialyse, par exemple (Berland & Juery, 2002). Le tableau 25 indique la force motrice applicable à chaque procédé. Les membranes sont caractérisées par leur seuil de coupure ou leur perméabilité ; dans le cas des procédés baro-membranaires, les seuils sont décroissants dans l'ordre MicroFiltration (MF), l'UltraFiltration (UF), la NanoFiltration (NF) et Osmose Inverse (OI).

Tableau 25: Force motrice de chaque type de membrane (Berland & Juery, 2002; Galvão, 2018)

Type de membrane	Force motrice
MicroFiltration (MF)	Gradient de pression (< 2 bar)
UltraFiltration (UF)	Gradient de pression (1-10 bar)

Type de membrane	Force motrice
NanoFiltration (NF)	Gradient de pression (5-35 bar)
Osmose Inverse (OI)	Gradient de pression (15-150 bar)
Osmose Directe (OD)	Pression osmotique ou potentiel chimique
Distillation Membranaire (DM)	Différence de température
ElectroDialyse (ED)	Potentiel électrique

Les membranes de MF et UF sont microporeuses alors que les membranes d’OI et OD sont considérées comme denses, les membranes de NF pouvant appartenir à l’une ou l’autre de ces catégories en fonction de leur seuil de coupure. Les mécanismes de transfert sont alors différents (voir figure 7). Pour les membranes microporeuses, les molécules sont séparées par effet tamis, tandis que dans le cas des membranes denses, les molécules sont séparées par différences de solubilité et de mobilité dans le matériau membranaire de surface.

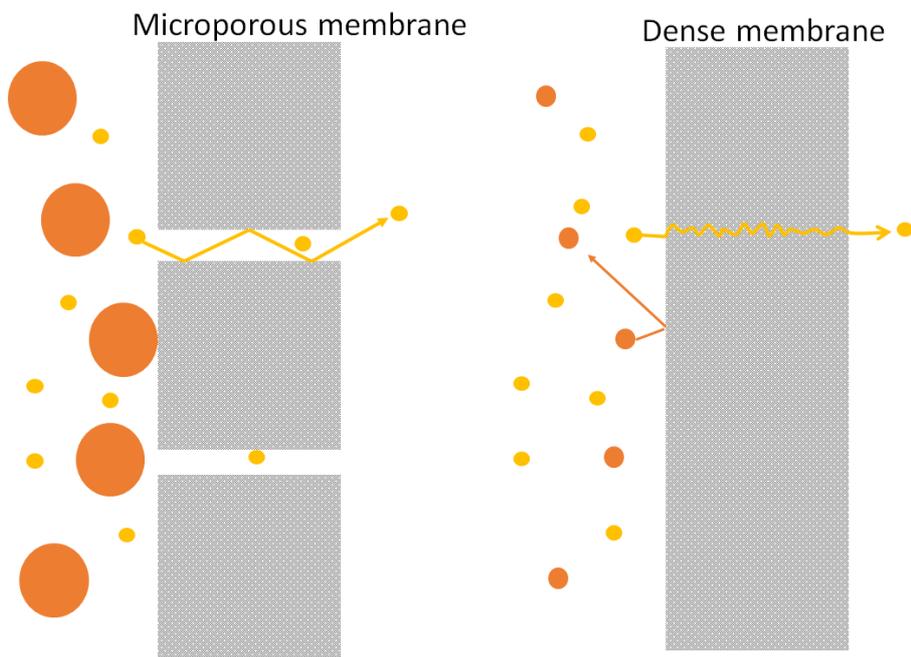


Figure 7: Transport moléculaire à travers des membranes microporeuses et denses

En fonction du type de membrane, les « particules » ou composés séparés ne sont pas les mêmes (voir figure 8 et tableau 14).

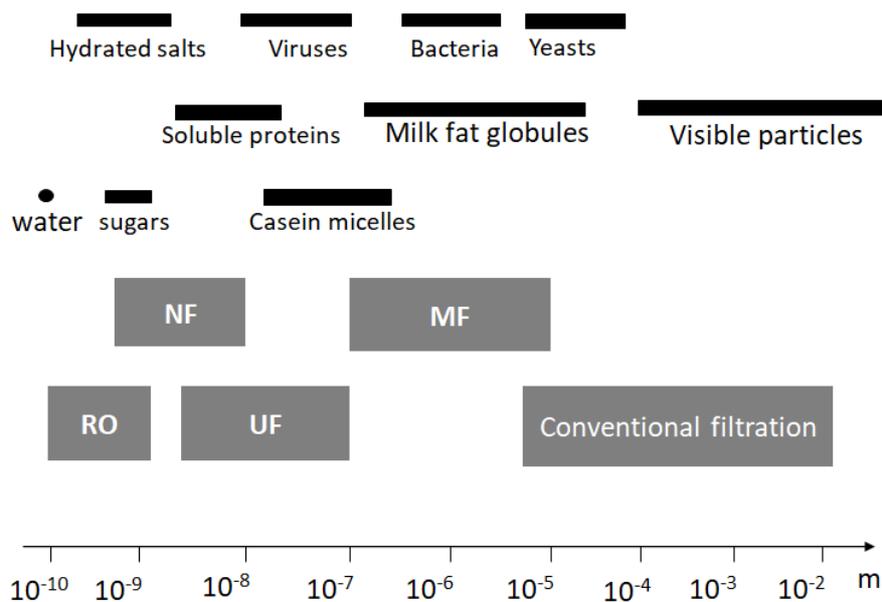


Figure 8: Taille des différents solutés comparée au diamètre des pores

Tableau 26: Composés retenus en fonction du type de membrane (Berland & Juery, 2002; Muro et al., 2012)

Type de membrane	Composés retenus
MicroFiltration (MF)	Les bactéries, les graisses, les huiles, les colloïdes, les microparticules organiques, les sables, les MES, la turbidité, <i>Cryptosporidium</i> et <i>Giardia</i>
UltraFiltration (UF)	Tous les composés retenus avec la MF plus les protéines, les huiles de pigments, les sucres, les microparticules organiques et les virus
NanoFiltration (NF)	Tous les composés retenus avec l'UF plus les pigments, les sulfates, les cations divalents, les anions divalents, le lactose, le saccharose, le chlorure de sodium et les pesticides
Osmose Inverse (OI)	Tous les composés retenus avec la NF plus les sels monovalents dont le chlorure de sodium en particulier et de nombreuses espèces organiques de MM supérieure à 150 g/mol

Comme les sels sont retenus à plus de 95-98% sur les membranes d'OI, celles-ci sont classiquement utilisées pour le dessalement de l'eau de mer.

Comme indiqué dans le tableau 27, les matériaux membranaires varient en fonction du type de membrane. Ils peuvent être minéraux ou organiques, hydrophobes ou hydrophiles.

Tableau 27: Matériaux membranaires en fonction du type de membrane (minérale ou organique) (Cath, Childress, & Elimelech, 2006; Galvão, 2018; Lawson & Lloyd, 1996; Scott & Hughes, 2012)

Type de membrane	Matériaux de membrane
MicroFiltration (MF)	Céramique ou Carbone (m) Polypropylène (PP) (o)
UltraFiltration (UF)	Céramique (m) Acétate de cellulose Polysulfone (PSU) Polyéthersulfone (PES) Polyvinylpyrrolidone (PVP) Polyacrylonitrile (PAN) Polyfluorure de vinylidène (PVDF)
NanoFiltration (NF)	Polyamide aromatique Poly-(piperazine-amide)
Osmose Inverse (OI)	Polyamide aromatique (PA)
Osmose Directe (OD)	Tous matériaux denses, non poreux et avec une perméabilité sélective
Distillation Membranaire (DM)	Polypropylène (PP) Polytétrafluoroéthylène (PTFE) Polyvinylidène fluoride (PVDF)
ElectroDialyse (ED)	Copolymère à base de divinylbenzène et de: Polystyrène (PS) Polytétrafluoroéthylène (PTFE) Poly(sulphonyl)fluoride vinyl éther

On trouve plusieurs géométries de membranes : les membranes planes, spiralées, tubulaires et en fibres creuses (Muro et al., 2012). La comparaison entre les différentes géométries de membrane est indiquée dans le tableau 28.

Tableau 28: Comparaison entre différentes géométries de membrane (Daufin, René, & Aimar, 1998)

	Géométrie			
	Plan	Spirale	Tubulaire	Fibres creuses
Membranes	Organiques en formats rectangulaires ou en disques	Organiques	Organiques : monotubulaires Minérales : monotubulaires ou multicanaux	Organiques avec la couche séparatrice ou « peau » à l'intérieur ou à l'extérieur
Surface filtrante par module industriel	Jusqu'à 100 m ²	Jusqu'à 30 m ²	Jusqu'à 25 m ²	Jusqu'à 74 m ²
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité du système modulaire - Echange standard par plaque - Faible consommation d'énergie - Accès aux membranes - Performance (flux) - Plaques réutilisables 	<ul style="list-style-type: none"> - Compacité - Faible volume mort - Faible consommation d'énergie - Prix 	<p><u>En général :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Faible colmatage - Facilité de nettoyage - Echange standard par tube - Traitement de produits visqueux facile <p><u>Membranes minérales :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie - Tenue mécanique - Thermostabilité - Résistance aux lavages chimiques - Stérilisation à la vapeur 	<ul style="list-style-type: none"> - Compacité - Faible volume mort - Faible consommation d'énergie - Tenue mécanique - Prix
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Faible résistance thermique des matières plastiques - Colmatage - Prix 	<ul style="list-style-type: none"> - Performance (flux) - Echange standard par module - Traitement de produits visqueux difficile - Faible résistance thermique des matières plastiques - Perte de charge élevée - Zones mortes - Colmatage - Nettoyage difficile - Accès aux membranes - Membranes collées - Télescopage de la membrane 	<p><u>En général :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Volume mort important - Consommation d'énergie - Prix <p><u>Membranes organiques :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Faible résistance thermique des matières plastiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement de produits visqueux difficile - Echange standard par module - Faible résistance thermique des matières plastiques - Colmatage

5.2.6.1 Focus sur l'Osmose Inverse (OI)

La figure 9 présente le principe de fonctionnement de l'OD et de l'OI.

Sans pression, un phénomène d'OD se produit : l'eau passe à travers la membrane de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée jusqu'à atteindre un équilibre de concentrations des deux côtés de la membrane, c'est-à-dire l'équilibre osmotique.

Le phénomène peut être inversé en appliquant une pression du côté le plus concentré de la membrane : c'est l'OI. En appliquant cette pression, l'eau traverse la membrane de la solution la plus concentrée vers la solution la moins concentrée. L'annulation du phénomène d'OD se produit quand la pression appliquée égale la différence de pression osmotique ($\Delta\pi$) entre les deux compartiments. Pour que le phénomène d'OI se produise, la pression appliquée doit être supérieure à cette $\Delta\pi$. En général, une pression de service comprise entre 30 et 100 bars est nécessaire (Scott & Hughes, 2012). La pression osmotique d'une solution peu concentrée peut être calculée par la loi de Van't Hoff :

$$\Pi = iCRT \text{ (Pa)}$$

Avec i = nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte
 C = concentration du soluté (mol/m^3)
 R = constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J}/(\text{mol.K})$)

Ce procédé est de plus en plus utilisé pour « affiner » le traitement d'effluents industriels car comparativement à d'autres procédés (type échange d'ions ou adsorption) il est relativement robuste, flexible et « vert ». Cependant, il nécessite une étape préalable de filtration membranaire (MF, UF, NF ou OI) assurant l'absence de microparticules, très dommageable à son fonctionnement. Des nettoyages cycliques sont également indispensables pour limiter le colmatage des membranes.

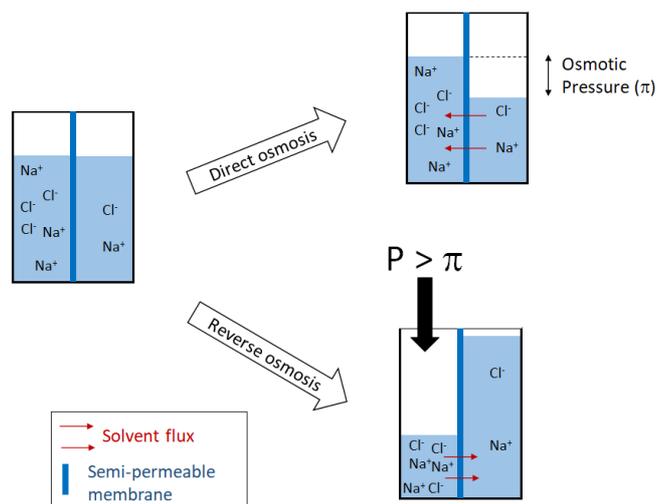


Figure 9: Principe de fonctionnement de l'osmose inverse et de l'osmose directe

5.2.6.2 Focus sur l'Osmose Directe (OD)

Le procédé d'OD (ou FO : Forward Osmosis) combiné à un procédé de dessalement tel que l'OI (ou Reverse Osmosis : RO) peut être utilisé pour produire de l'eau pure à partir d'eaux usées (Lu, Qin, Yuan, Abu-Reesh, & He, 2015).

Sur l'exemple de la figure 10, une membrane d'OD sépare les eaux usées à concentrer d'une solution saline. La concentration en sels de la solution saline est choisie de manière à produire une pression osmotique suffisante pour permettre à l'eau de traverser la membrane dans le sens : eau usée vers solution saline. La membrane d'OD est choisie pour être non perméable aux polluants présents dans l'eau usée. La solution saline diluée est ensuite concentrée par un procédé de dessalement (OI, DM, etc.). L'eau récupérée peut être réutilisée.

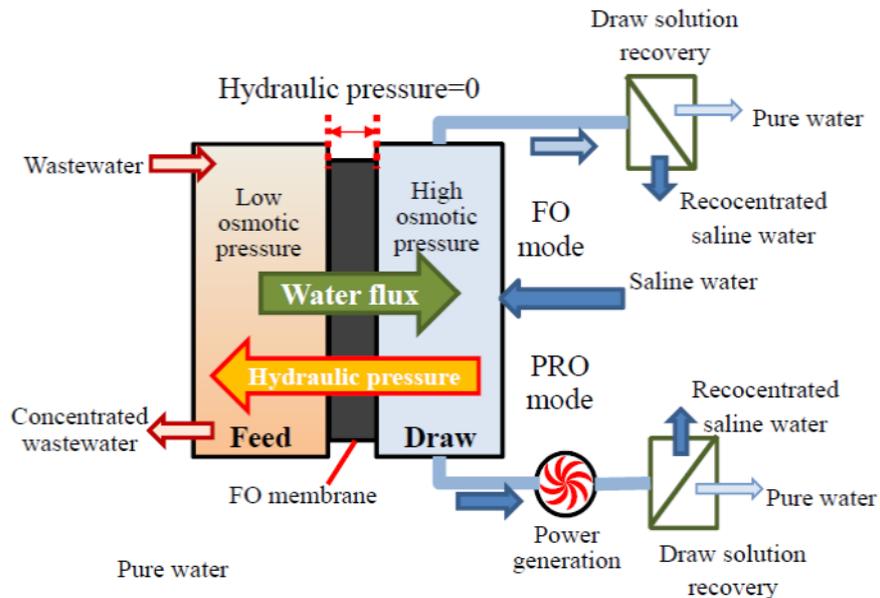


Figure 10: Principe de fonctionnement de l'osmose directe (Lu et al., 2015)

5.2.6.3 Focus sur la Distillation Membranaire (DM)

La DM permet de combiner deux procédés : le procédé de distillation et un procédé membranaire.

La figure 11 décrit le principe de fonctionnement de la DM. Dans ce procédé, une membrane hydrophobe est utilisée pour assurer l'imperméabilité aux liquides. Seuls les gaz, et en particulier la vapeur d'eau, peuvent traverser la membrane poreuse. La différence de pressions partielles de vapeur d'eau entre les deux côtés de la membrane provoque le transfert de la vapeur d'eau à travers la membrane. Afin de produire cette différence de pressions partielles, la solution à traiter (côté alimentation) est chauffée (Scott & Hughes, 2012).

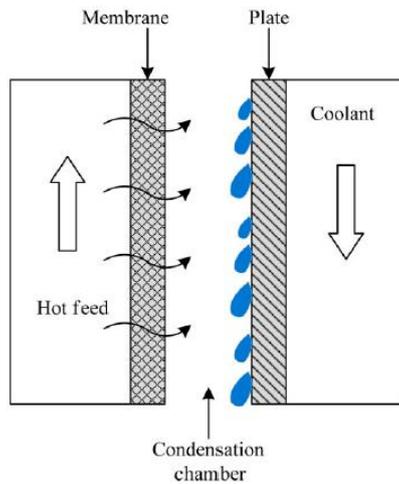


Figure 11: Principe de fonctionnement de la Distillation Membranaire (Charcosset, 2009)

5.2.6.4 Focus sur l'ElectroDialyse (ED)

Dans le procédé d'ED conventionnelle, les membranes sélectives homopolaires cationiques et anioniques sont installées en alternance (voir figure 12). Un potentiel électrique est appliqué, ce qui entraîne une mobilité des ions : les cations cherchent à atteindre la cathode et traversent la membrane cationique (qui porte des charges négatives) alors que les anions sont attirés par l'anode et traversent les membranes anioniques (qui portent des charges positives). Une fois dans le compartiment « concentrat », ils sont repoussés sur cette route par les membranes sélectives de même signe qu'eux comme le montre la figure 12. Les eaux usées introduites en entrée de l'ED vont alors alternativement se concentrer dans les compartiments concentrat, et se diluer dans les compartiments diluats (Scott & Hughes, 2012). Le diluat récolté est donc épuré des différents sels.

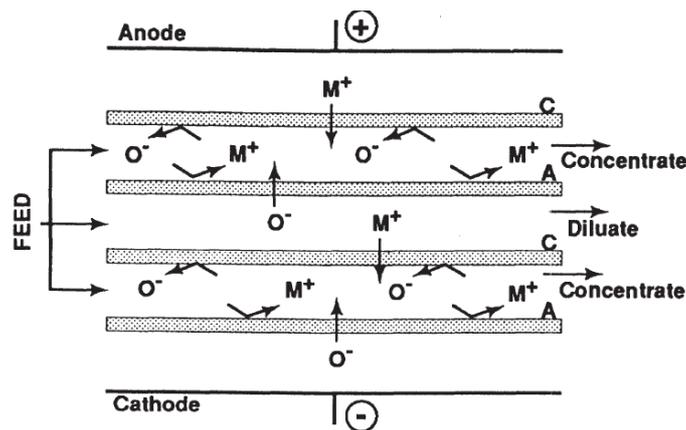


Figure 12: Principe de fonctionnement de l'électrodialyse (Scott & Hughes, 2012)

5.2.7 Adsorption

L'adsorption est un phénomène dans lequel les atomes, les ions et les molécules sont fixés à la surface d'un matériau par des interactions physico-chimiques de type électrostatiques ou entre molécules neutres (forces de Van der Waals) ; ils sont ainsi retenus sur ces supports et séparés des eaux usées.

Les matériaux les plus utilisés en épuration sont les charbons actifs en poudre ou en grains. Il existe également des supports à base de polymères synthétisés ou d'alumine activée. Les charbons actifs sont des particules poreuses à surface spécifique très élevée, activées par processus chimiques ou thermiques. Les molécules s'y trouvent non seulement adsorbées, mais aussi piégées physiquement dans la porosité. Ils sont largement utilisés pour éliminer les pesticides, le goût et les odeurs de l'eau, tandis que l'alumine activée est utilisée pour éliminer l'arsenic et le fluorure (Parsons & Jefferson, 2006).

Les procédés d'adsorption peuvent être réalisés par ajout du support dans un réacteur (par exemple en décantation), où il est recyclé jusqu'à un certain point, puis renouvelé par apport régulier d'une fraction de CAP frais ; mais on peut aussi utiliser des filtres à CAG. Dans ce cas, le dimensionnement du filtre répond généralement à une durée de vie imposée, au terme de laquelle le charbon doit être renouvelé entièrement, ou régénéré par pyrolyse (pour ceux issus d'activation thermique).

5.2.8 L'échange d'ions

L'échange d'ions est un procédé physico-chimique utilisé pour substituer, séparer ou éliminer certains ions d'une solution. Ce procédé consiste à échanger les cations ou les anions présents dans la solution par ceux qui sont initialement fixés sur la résine dite échangeuse d'ions. Il peut être utilisé pour déminéraliser une eau, ou pour fixer des molécules organiques ionisées (acides organiques par exemple).

Dans l'exemple de la figure 13, le cation B^+ est échangé avec le cation A^+ .

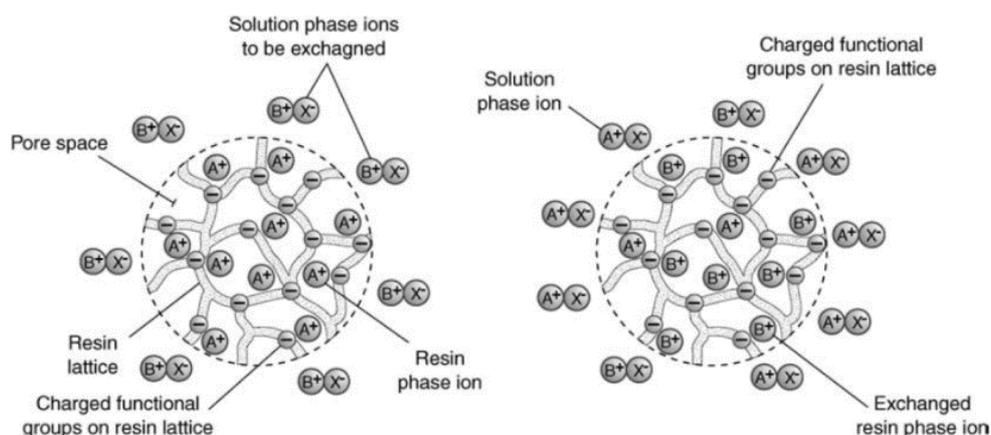


Figure 13: Principe de fonctionnement d'une résine échangeuse de fer - exemple d'une résine échangeuse de cations (Asano et al., 2007)

La résine peut être cationique ou anionique afin d'échanger soit des cations ou soit des anions. Elle est mise dans une colonne au travers de laquelle la solution à traiter doit percoler à un débit laissant le temps aux équilibres d'échange de se faire.

Le processus est cyclique puisqu'une fois saturée, les polluants ou les ions « percent » de la colonne. La résine doit alors être régénérée à l'aide d'un solvant ou d'une solution permettant un décrochage rapide des espèces fixées (solution d'acide, de base ou saline concentrée), générant un éluât concentré en ces espèces. Une phase de rinçage doit alors être réalisée afin de revenir à l'état de conditionnement initial de la résine, permettant à un nouveau cycle de traitement (dépollution ou déminéralisation) de se faire.

5.2.9 La distillation

La distillation permet la séparation de molécules dont les températures d'ébullition sont différentes. Elle consiste à chauffer une solution et à récupérer au même moment (fonctionnement discontinu) ou au même endroit (fonctionnement en continu) les différentes molécules d'une solution.

Dans le traitement de l'eau, afin de limiter la consommation d'énergie, la distillation peut être sélectionnée lorsque les molécules à éliminer ont une température d'ébullition inférieure à celle de l'eau.

5.2.10 La mise à l'équilibre calco-carbonique

L'équilibre calco-carbonique correspond à un équilibre « idéal » entre sa teneur en ions durs (Ca^{2+} en particulier) et celle en ions hydrogencarbonates (HCO_3^-). La présence de ces deux espèces, équilibrée sous la forme dissoute $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ correspond à un certain pH (dit d'équilibre ou de saturation) et assure à l'eau de n'être ni entartrante, ni agressive pour les canalisations. La dureté de l'eau (ou Titre Hydrotimétrique, TH) est utilisée pour mesurer les concentrations en calcium et magnésium présents dans l'eau. Si la valeur de la dureté est faible, l'eau est considérée comme douce et des phénomènes de corrosion par le CO_2 dissous peuvent apparaître. Dans le cas contraire, elle est considérée comme dure et des phénomènes d'entartrage par dépôt de CaCO_3 peuvent être constatés si le pH est trop basique. Il est donc important d'avoir une eau à l'équilibre calco-carbonique.

Pour savoir si une eau est à l'équilibre, il existe des méthodes graphiques (méthode Hallopeau & Dubin) ou des logiciels de calcul : Equil ou Equilwin disponible sur le site internet <http://pravarini.free.fr> ou LPLwin disponible sur le site internet <https://www.cifec.fr/lplwin/nouveautes/lplwin>.

La mise à l'équilibre calco-carbonique peut être réalisée par différentes techniques telles que l'élimination du gaz carbonique par aération ou encore l'ajout de réactif (CO_2 , H_2SO_4 ou au contraire chaux, soude, carbonate de sodium, calcaire etc...). Chaque procédé de mise à l'équilibre est étudié au cas par cas.

5.3 Principe des procédés de désinfection

La désinfection consiste à éliminer de l'eau les différents micro-organismes (bactéries, spores, protozoaires) et agents infectieux (virus) qui peuvent y être présents et en particulier les pathogènes de manière à assurer la salubrité de la ressource. De ce fait, l'étape de désinfection revêt un caractère obligatoire dès lors qu'il s'agit de produire une eau de qualité dite potable. Elle peut cependant être utilisée pour d'autres eaux de manière à éviter le colmatage biologique des canalisations industrielles dans lesquelles celles-ci circulent ou à protéger la santé des personnes travaillant aux alentours des installations (ex : l'eau d'appoint des tours aéro-réfrigérantes). Dans ces derniers cas, nous pouvons également parler de traitement biocide plutôt que de désinfection.

Deux grands types de désinfection existent suivant les procédés utilisés : la désinfection physique et la désinfection chimique. Il existe également une distinction entre effet bactéricide (élimination des microorganismes) et rémanent (blocage à moyen terme du développement des micro-organismes).

5.3.1 Désinfection physique

5.3.1.1 Filtration membranaire

La filtration membranaire peut contribuer à abaisser la charge microbienne contenue dans une eau. Selon la sélectivité de la membrane, des micro-organismes et agents infectieux de différentes tailles peuvent être retenus dans le rétentat (tableau 29). Il est à noter que de par sa nature, l'osmose inverse représente la barrière physique la plus importante. Cependant, cette technique n'est pas prioritairement utilisée dans un but de désinfection.

Le procédé d'UF a l'agrément du Ministère de la santé en tant que procédé de désinfection depuis 1992. L'arrêté du 22 juin 2012, pris en application de l'article R.1321-50 (I et II) du CSP, définit les conditions de mise en œuvre des modules de filtration membranaire et des membranes, disposant d'une attestation de conformité sanitaire.

Les membranes ad hoc ont un seuil de coupure $\leq 200\,000$ Daltons, et doivent aboutir à des abattements de bactéries, *Giardia* et/ou de *Cryptosporidium*, et virus, supérieurs à 4 log pour chaque groupe (sous réserve que soit mis en œuvre un protocole de contrôle de l'intégrité de la membrane à une fréquence suffisante, tel que défini par le responsable de la mise sur le marché dans la notice d'utilisation ; Annexe 6 de l'arrêté).

Cette technique n'a pas d'effet rémanent.

Tableau 29 : Micro-organismes et agents infectieux retenus en fonction des membranes de filtration (EPA, 2012)

Type de filtration membranaire	Taille nominale des pores (μm)	Micro-organismes et agents infectieux retenus
Microfiltration	0,05	Protozoaires, oocystes et cystes, certaines bactéries et virus

Type de filtration membranaire	Taille nominale des pores (µm)	Micro-organismes et agents infectieux retenus
Ultrafiltration	0,002-0,05	La plupart des bactéries et certains virus
Nanofiltration	<0,002	Virus

5.3.1.2 Désinfection aux ultraviolets

Contrairement aux méthodes chimiques qui détruisent les cellules bactériennes, la désinfection aux ultraviolets est une technique qui désactive les micro-organismes et agents infectieux. Les rayons ultraviolets utilisés sont des UV-C dont la longueur d'onde est d'environ 254 nm. Les rayonnements émis provoquent des perturbations dans l'ADN des micro-organismes et conduisent à la mise en place de liaisons anormales. Ces derniers perdent ainsi leur capacité à se reproduire.

La dose UV (exprimée en mJ/cm²) à appliquer est déterminée de la manière suivante :

$$D = I \times t$$

Avec :

D : dose en mJ/cm²

I : intensité du rayonnement en W/cm²

t : temps en s

Cette dose varie en fonction des micro-organismes visés et de l'abattement souhaité (tableau 30).

Tableau 30 : Dose absolue (en mJ/cm²) nécessaire pour différents abattements de micro-organismes (Asano et al., 2007)

Micro-organismes	Abattement			
	1 log	2 log	3 log	4 log
Bactéries		30-60	60-80	80-100
Virus		30-40	50-70	70-90
Protozoaires	5-10	10-20	20-30	

La dose est également souvent rapportée à celle utilisée pour désactiver *Escherichia coli* (bactérie de référence) (tableau 31).

Tableau 31 : Dose UV relative à appliquer pour éliminer certains micro-organismes (Asano et al., 2007)

Micro-organismes	Dosage relatif par rapport au dosage appliqué sur les coliformes totaux*
<i>Escherichia coli</i>	1,0
Coliformes fécaux	0,9-1,0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1,5-1,8
Virus de l'hépatite A	3,5-4,5

Micro-organismes	Dosage relatif par rapport au dosage appliqué sur les coliformes totaux*
Oocystes de <i>Cryptosporidium parvum</i>	0,1-0,3
Kystes de <i>Giardia lamblia</i>	0,1-0,2

*Doses relatives établies en prenant uniquement en compte des micro-organismes seuls en suspension

Le traitement ultraviolet s'effectue dans des réacteurs contenant une ou plusieurs lampes basse ou moyenne pression autour desquelles l'eau à traiter circule. Une gaine de quartz entoure chaque lampe afin d'assurer leur protection. Comme indiqué précédemment, le traitement par des lampes UV moyenne pression est désormais autorisé au niveau français. Leur utilisation doit cependant faire l'objet d'une dérogation car ces lampes sont capables de transformer les ions nitrates en ions nitrites qui sont des composés dangereux pour la santé.

Les principaux avantages du traitement par ultraviolet sont sa rapidité d'action (quelques secondes) et l'absence de recours à des produits chimiques ce qui empêche la formation de sous-produits de désinfection indésirables. En revanche, c'est une technique de désinfection dont les effets ne perdurent pas dans le temps (technique non rémanente).

5.3.1.3 Autres techniques physiques

Une désinfection peut également être réalisée lors d'opérations de coagulation-floculation suivies d'une clarification ainsi que lors d'une filtration sur média (sable,...). Cependant, ces techniques ne suffisent pas à atteindre des abattements élevés. L'élimination des micro-organismes lors de ces opérations constitue principalement un effet collatéral du traitement mis en œuvre et servant initialement à retenir les particules en suspension (Moles, 2007).

A l'issue de ces techniques physiques, il peut être parfois appliqué une étape de chloration supplémentaire afin de préserver la qualité de l'eau traitée (voir paragraphe suivant).

5.3.2 Désinfection chimique

5.3.2.1 Chloration

La chloration est une technique de désinfection répandue. Elle consiste à ajouter dans l'eau à traiter une dose de composés chlorés afin de provoquer la destruction des cellules bactériennes présentes dans le milieu. Son principal avantage par rapport aux autres techniques de désinfection est d'assurer une élimination des micro-organismes sur le long terme en raison de son caractère rémanent (présence persistante du chlore qui empêche le développement des microorganismes restant).

Selon le pH de l'eau, l'élément chlore peut être présent sous différentes formes : Cl_2 , HOCl et ClO^- . Ces deux dernières formes représentent le « chlore libre ». L'acide hypochloreux (HOCl) est la forme la plus active et elle est notamment présente lorsque le pH de l'eau se situe entre 4 et 7, avec un $\text{pH}_{\text{optimum}}$ entre 4 et 5,6.

En ce qui concerne l'eau potable, il est recommandé que celle-ci parte dans le réseau avec une teneur résiduelle de 0,1 à 0,2 mg l^{-1} de chlore libre.

Plusieurs types de produits chlorés peuvent être utilisés pour la désinfection : l'eau de Javel (NaClO), le chlore gazeux (Cl₂) et le dioxyde de chlore (ClO₂). La dénomination d' « eau chlorée » est utilisée pour une eau à laquelle on a ajouté soit de l'eau de Javel (donnant ClO⁻) soit du Cl₂ (donnant lieu à HOCl et ClO⁻).

L'efficacité d'une désinfection à l'aide de composés chlorés (cela est également applicable à l'ozone) est dépendante du temps de contact de l'eau à traiter avec ces produits. Cette efficacité est caractérisée par le paramètre Ct qui se calcule de la manière suivante :

$$Ct = C_{\text{chlore}} \times t$$

Avec :

Ct en mg.L⁻¹.min

C_{chlore} : concentration en chlore résiduel en mg.L⁻¹

t : temps de de contact en min

Selon le produit chloré utilisé, une valeur de Ct est préconisée pour chaque micro-organisme. Plus le Ct est faible, plus le désinfectant utilisé est efficace.

4.4.2.1. Désinfection à l'eau de Javel

L'eau de Javel (NaClO) a un pouvoir bactéricide et virucide important. En revanche, son efficacité peut apparaître limitée pour éliminer les protozoaires (Asano et al., 2007). Le produit peut être généré sur site mais il est également possible pour les industriels de l'acheter et de le stocker dans des cuves adaptées.

La mise en œuvre de cette technique de désinfection reste plutôt simple. Cependant, elle nécessite un suivi régulier car le degré chlorométrique de l'eau de Javel baisse au fur et à mesure du temps. Afin de conserver une quantité de chlore actif constante et d'éviter également la formation de chlorates, il peut être nécessaire de renouveler le stock d'eau de javel régulièrement.

De plus, l'ajout d'eau de Javel contribue à augmenter le pH de l'eau ce qui ne favorise pas la présence de l'acide hypochloreux.

4.4.2.1.b Désinfection au chlore gazeux

Le chlore gazeux est le plus efficace, mais son exploitation requiert diverses précautions parmi lesquelles l'aménagement d'un local spécial, l'installation de systèmes de neutralisation des vapeurs et la formation du personnel destiné à exploiter le procédé.

Il est stocké dans des bouteilles et sa distribution est assurée par un chloromètre qui permet de réguler le débit de chlore à apporter pour assurer la désinfection de l'eau. Cette régulation permet ainsi de ne pas sur-doser le produit ce qui apporte des garanties concernant la faible formation de chlorates. De plus, le chlore gazeux abaisse le pH de l'eau ce qui favorise l'action de l'acide hypochloreux.. Par contre, il peut réagir avec des matières organiques contenues dans l'eau et

former des sous-produits organochlorés indésirables ou toxiques : les trihalométhanes (THM, cancérogènes) par réaction avec des matières organiques résiduelles, et des chloramines, au goût désagréable, par réaction avec l'ammoniac. Il faut dépasser une dose de 8 à 10 ppm de Cl/ppm NH_4^+ (point critique) pour éviter les chloramines et transformer NH_4^+ en N_2 .

En ce qui concerne l'efficacité germicide du chlore, ce dernier se révèle en premier lieu utile pour éliminer les bactéries (le paramètre Ct est faible). Son action sur les virus est plus modérée et il devient peu intéressant de l'utiliser pour éliminer des kystes de protozoaires (tableau 32).

Tableau 32 : Ct absolu (en mg.min/L) nécessaire pour différents abattements de micro-organismes à l'aide de chlore gazeux (Asano et al., 2007)

Micro-organismes	Abattement			
	1 log	2 log	3 log	4 log
Bactéries	0,1-0,2	0,4-0,6	3-4	8-10
Virus		1-4	8-16	20-40
Protozoaires	30-40	60-70	90-110	

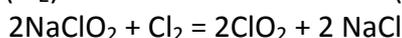
4.4.2.1. Désinfection au dioxyde de chlore

Le dioxyde de chlore est un produit qui ne peut pas être stocké. Il doit donc être produit sur le site où il est utilisé. La production de dioxyde de chlore peut être réalisée à l'aide de deux réactions :

- réaction entre de l'acide chlorhydrique (HCl) et du chlorite de sodium (NaClO_2)



- réaction entre du dichlore (Cl_2) et du chlorite de sodium (NaClO_2)



Cependant, le rendement des réactions n'atteint pas 100%. Il y a donc un risque de largage de chlorites (toxiques) dans l'eau traitée si les conditions optimales de fabrication ne sont pas réunies.

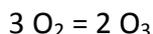
Le dioxyde de chlore apparaît être un désinfectant plus efficace que le chlore pour éliminer certaines bactéries, virus, kystes et oocystes (tableau 33). Il ne forme pas de chloramines avec l'ammoniac.

Tableau 33 : Ct absolu (en mg.min/L) nécessaire pour différents abattements de micro-organismes à l'aide de dioxyde de chlore (Asano et al., 2007)

Micro-organismes	Abattement			
	1 log	2 log	3 log	4 log
Bactéries	2-4	8-10	20-30	50-70
Virus		4-6	10-14	20-30
Protozoaires	7-9	14-16	20-25	

5.3.2.2 Ozonation

L'ozone (O₃) est un puissant oxydant produit à partir de la réaction de trois molécules de dioxygène :



Instable, ce gaz doit être produit sur son site d'utilisation. De l'air ou de l'oxygène très sec est envoyé entre deux électrodes alimentées électriquement. La décharge électrique (6000 à 18 000 V) rentre au contact du gaz et les molécules d'oxygène sont transformées en molécules d'ozone (Moles, 2007). L'étape de désinfection proprement dite s'effectue dans des tours de contact au sein desquelles l'eau à traiter circule à contre-courant de l'air ozoné.

L'ozone est un désinfectant plus efficace que le chlore pour éliminer les virus et certains protozoaires (tableau 34). Il permet également d'éliminer la DCO résiduelle ou de casser les macro-molécules organiques, par oxydation. Cependant, comme la désinfection aux ultraviolets, ce traitement n'est pas rémanent. De plus, il s'agit d'un procédé coûteux en investissement et en énergie. Son utilisation est également à proscrire lorsque les eaux à traiter sont chargées en ions bromures. En effet, il y a un risque de formation de bromates suspectés d'avoir un effet cancérigène (Moles, 2007).

Tableau 34 : Ct absolu (en mg.min/L) nécessaire pour différents abattements de micro-organismes à l'aide d'ozone (Asano et al., 2007)

Micro-organismes	Abattement			
	1 log	2 log	3 log	4 log
Bactéries		3-4		
Virus		0,4-0,6	0,7-0,9	0,9-1,0
Protozoaires	0,4-0,6	0,9-1,2	1,4-1,6	

5.3.2.3 Chloramination

La chloramination est une technique de désinfection utilisée dans certains pays anglo-saxons. Elle n'est pas autorisée pour la production d'eau potable en France. En revanche, elle peut être utilisée pour certaines applications telles que la désinfection de l'eau des tours aéro-réfrigérantes.

Celle-ci repose sur le pouvoir désinfectant des chloramines qui sont formées lors de l'ajout de chlore dans l'eau à traiter. En effet, lorsque la quantité de produit chloré ajoutée est faible, le chlore réagit en priorité avec les ions ammonium pour former des chloramines qui possèdent un effet bactéricide et rémanent plus long que les autres formes de chlore. Cependant, leur efficacité vis-à-vis des pathogènes est moindre par rapport aux composés chlorés. C'est la raison pour laquelle elles doivent être présentes en grande quantité pour garantir une bonne désinfection (Moles, 2007).

Leur utilisation en eau potable est interdite en France. Ces molécules sont suspectées d'avoir des effets néfastes sur la santé. Elle peut cependant être possible pour notamment traiter des eaux de tours aéro-réfrigérantes. En guise d'exemple, une société a développé une solution reposant sur la

génération de monochloramine inorganique pour traiter les eaux de process et les eaux de refroidissement.

5.3.3 Techniques de désinfection émergentes

De nouvelles techniques de désinfection font également l'objet de recherches scientifiques. C'est le cas des ultrasons (US) qui ont la capacité de créer des phénomènes de cavitation dans l'eau pouvant notamment déboucher sur la génération d'ondes de choc et induire des effets thermiques néfastes envers les micro-organismes. Un des inconvénients de cette technologie est sa durée d'application pour assurer l'inactivation de certains pathogènes. Une étude a notamment montré qu'une réduction de 5 log du pathogène *E. coli* O157:H7 pouvait être atteinte uniquement au bout de 60 minutes (Manzocco et al., 2015) C'est pour réduire cette durée que les ultrasons sont parfois couplés avec un procédé UV ou de l'ozonation.

La lumière pulsée est une technique de désinfection physique également étudiée. Cette technologie consiste en l'utilisation de lampes au xénon capables d'émettre des radiations allant de l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge. Les rayons infrarouges ont la particularité de renforcer les effets des rayons UV sur les micro-organismes par des effets photo-thermiques et photo-physiques. Néanmoins, d'un point de vue économique, cette technologie reste encore rédhitoire pour le domaine industriel (Manzocco et al., 2015).

Enfin, d'autres travaux s'intéressent au couplage des techniques de désinfection. Les couplages US + UV et US + O₃ ont été abordés précédemment mais d'autres combinaisons existent également : UV + O₃ et H₂O₂ + UV (Manzocco et al., 2015). Cette dernière combinaison est notamment testée pour traiter les micropolluants. Du dioxyde de titane peut y être ajouté dans le but de catalyser la réaction de photo-oxydation.

6 Exemples de recyclage ou de réutilisation des effluents de l'industrie agroalimentaire dans l'usine de production

Des exemples de recyclage ou de réutilisation ont été recherchés dans la littérature et classés par type d'industrie.

Des exemples d'application industrielle ont été identifiés par l'Union européenne (European, 2018a) et sont présentés en début de chaque paragraphe. Les autres exemples présentent des procédés testés à l'échelle du laboratoire ou de l'installation pilote et font l'objet d'une publication scientifique. Pour chaque solution, l'origine des eaux usées à recycler et l'utilisation des eaux traitées puis recyclées sont indiquées. Le procédé de traitement identifié est présenté. Par contre, les prétraitements et les post-traitements ne sont pas systématiquement décrits. Ils doivent néanmoins être prévus pour chaque solution de recyclage.

6.1 L'industrie laitière

6.1.1 Solutions de recyclage ou de réutilisation identifiées par l'Union européenne

Le tableau 35 présente des cas de recyclage et de réutilisation identifiés par la Commission européenne dans l'industrie laitière (European, 2018a). Parmi les situations présentées, on trouve des exemples de réutilisation d'eau de refroidissement et d'eau de lavage ainsi que des cas de recyclage des condensats nécessitant un traitement par membrane (OI ou UF + OI).

Tableau 35: Exemples de recyclage ou de réutilisation identifiés par l'Union européenne pour les industries laitières (European, 2018a).

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation
Finlande	Réutilisation	Eau de refroidissement	Eau de refroidissement
Finlande (plusieurs cas) / Allemagne	Réutilisation	Eau de rinçage d'un NEP	Eau de pré-lavage du même NEP
Danemark (plusieurs cas) / Finlande	Recyclage (ND) De l'UV est utilisé dans une industrie danoise	Perméats de lactosérum (perméats d'OI)	Non indiqué
Danemark / Irlande	Recyclage après OI	Condensats produits lors des opérations d'évaporation ou de séchage	Non indiqué

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation
Italie	Recyclage (ND)	Condensats de vapeur haute pression	Eau de chaudière
Italie	Recyclage après traitement biologique + UF + OI	Eaux usées	Non indiqué
Suède	Réutilisation après stockage	Eau de refroidissement	Eau pour le NEP
Royaume-Uni	Recyclage après OI	Condensats d'évaporation de lactosérum	Eau pour le NEP, le rinçage, la chaudière, les tours de refroidissement, etc.
Royaume-Uni	Recyclage après traitement biologique + UF + OI + UV + chlore	Eaux usées	Eau de process
Royaume-Uni	Recyclage après membrane polisher	Perméats de lactosérum (perméats d'OI)	Eau pour le NEP et la chaudière

En complément et d'une manière générale, pour le secteur laitier, le guide de la Commission européenne pointe qu'il est possible de recycler les eaux traitées par procédé membranaire et plus particulièrement par couplage UF + OI (European, 2018a).

6.1.2 Le cas de la plus grande industrie laitière en Inde

Des simulations et des expériences ont été réalisées sur la plus grande industrie laitière d'Inde, l'industrie Amul (Tiwari et al., 2016). Ces études recommandent de mettre en place des NEP automatiques (ou Cleaning in Place, CIP) avec réutilisation de l'eau du rinçage final pour le prélavage en tête de NEP.

Deux solutions de recyclage sont identifiées. La première consiste à recycler les eaux usées de ghee (beurre clarifié indien) après un traitement par coagulation (type non indiqué) et adsorption (type non indiqué). La seconde consiste à recycler les eaux de refroidissement après un traitement par filtration membranaire (en particulier OI) et pour la même utilisation (voir figure 14).

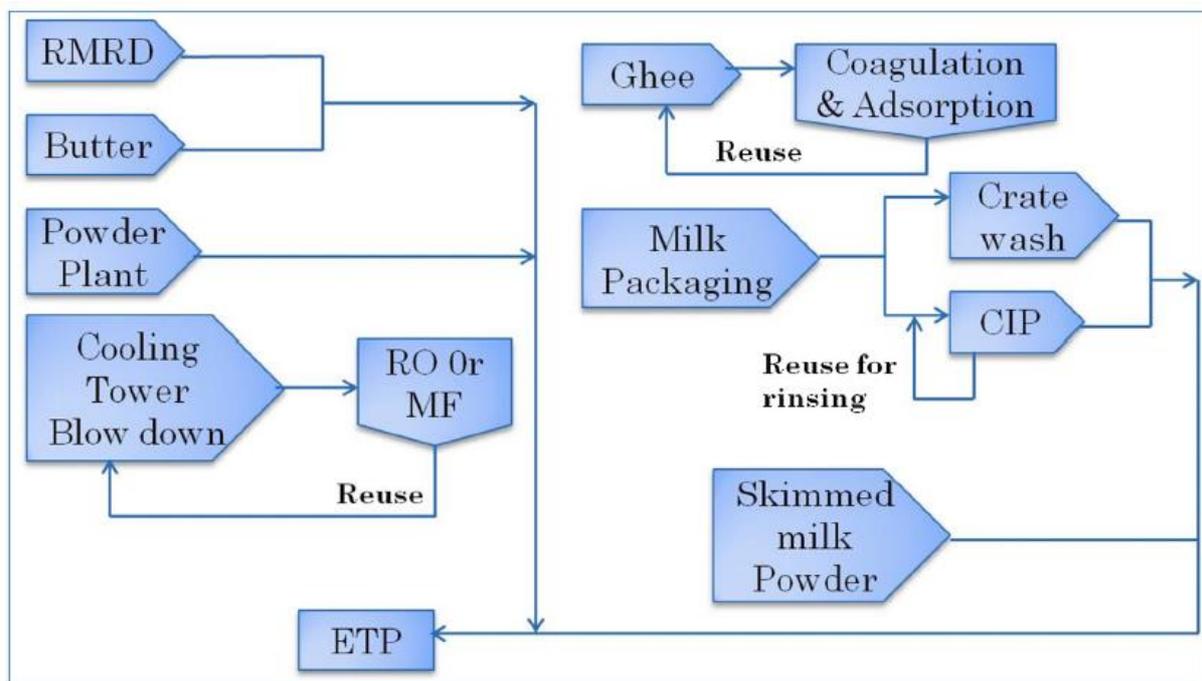


Figure 14: Solutions de réutilisation et de recyclage identifiées sur l'industrie laitière Amul (Tiwari et al., 2016)

6.1.3 Cas particulier des eaux usées faiblement chargées

6.1.3.1 Sélection des procédés

Comme le lait contient environ 88% d'eau, des études ont été menées pour identifier les technologies de traitement envisageables pour recycler ou réutiliser les eaux issues de cette matière première (perméats ou condensats ; voir paragraphe 3.2.3). A l'exception du perméat de lactosérum acide, ces eaux sont plus faiblement chargées que les autres effluents produits par le secteur laitier (voir tableau 6, tableau 7 et tableau 8).

Le tableau 36 récapitule plusieurs exemples de recyclage des condensats d'évaporation. Les procédés classiquement utilisés pour les traiter sont les procédés de séparation membranaire (Balannec et al., 2005) suivis d'une désinfection. Les eaux traitées sont ensuite utilisées lors d'opérations de lavage, de rinçage, dans les utilités telles que les chaudières ou en tant qu'eaux de process.

Tableau 36: Exemples de recyclage des condensats d'évaporation

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation	Références
Royaume-Uni	Recyclage après OI et désinfection par dioxyde de chlore	Condensat d'évaporateurs	En remplacement de l'eau potable	(ASUOE, 2012)

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation	Références
Australie	Recyclage après désinfection chimique	Condensat de haute qualité des évaporateurs	La plupart des applications de l'usine	(Baskaran, Palmowski, Watson, & Iwa Programme, 2003)
Australie	Réutilisation	Condensat d'évaporateurs	Processus de lavage	(Baskaran et al., 2003)
Australie	Réutilisation	Condensat de haute qualité des évaporateurs	Nombreuses applications dans toute l'usine	(Baskaran et al., 2003)
Australie	Recyclage après OI	Condensat d'évaporateurs	ND	(Baskaran et al., 2003)
Australie	Réutilisation	Condensat d'évaporateurs	ND	(Baskaran et al., 2003)
Australie	Recyclage après OI	Condensat de haute qualité des évaporateurs	Toutes les applications de l'usine	(Baskaran et al., 2003)
Belgique	Recyclage après biopROtector® + UF	Condensat d'évaporateurs	Eau de process	(AQUARAMA, 2014)
Belgique	Recyclage après biopROtector® +UF + OI et désinfection UV	Condensat d'évaporateurs	Eau de chaudière et eau de process de haute qualité (utilisée en rinçage)	(AQUARAMA, 2014)
Allemagne	Recyclage après NF + NF	Condensat d'évaporateurs	Eau de chaudière	(Chmiel et al., 2000)

Dans le cadre d'un traitement des condensats d'évaporation pour produire de l'eau de qualité potable, l'osmose inverse est couramment utilisée. Elle est précédée par de l'ultrafiltration ou de la nanofiltration et est suivie par une étape de désinfection (généralement UV ou chlore). Un post-traitement du type filtration sur charbon actif peut également être appliqué de même que certains pré-traitements brevetés.

Dans le cadre d'un traitement de ces condensats pour produire de l'eau de chaudière, des solutions identiques sont utilisées. La filière NF + NF a également été mise en évidence.

Le traitement thermique par injection directe de vapeur dans le produit lors de la fabrication de lait UHT conduit également à la génération de condensats. En effet, après un court moment de contact avec le produit à traiter, la vapeur est extraite et condensée avant d'être évacuée. L'eau obtenue est cependant chargée de divers composés suite à son contact avec la matière première. Plusieurs études ont porté sur le traitement de ces condensats pour envisager leur recyclage. Elles sont récapitulées dans le tableau 37.

Tableau 37 : Exemples de recyclage des condensats produits lors du traitement UHT

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation	Références
Espagne	Recyclage après OI + filtre à charbon actif	Condensat d'UHT	Eau de chaudière (un post-traitement pour hausser le pH est cependant nécessaire)	(Suàrez, Fidalgo, & Riera, 2014)
Espagne	Recyclage après OI	Condensat d'UHT	Eau de chaudière (pour quelques condensats seulement)	(Suàrez & Riera, 2015)
Espagne	Recyclage après NF	Condensat d'UHT	Eau pour le chauffage de certaines installations	(Riera et al., 2013)

Pour ces effluents, la filtration membranaire de type NF ou OI permet d'éliminer le lactose présent dans le condensat qui ne l'est pas par MF ou UF (voir tableau 26). De plus, deux étapes de traitement successives doivent être appliquées car une seule étape de NF ou une seule d'OI sans post-traitement sur charbon actif ne suffisent pas toujours pour produire une eau de qualité eau de chaudière.

Les expérimentations menées montrent que le traitement de ces condensats issus du procédé UHT s'avère complexe. Les procédés utilisés permettent au mieux d'atteindre une qualité adaptée pour l'eau de chaudière. Certains de ces condensats, en raison de leur composition initiale, ne sont pas aptes à être réutilisés malgré leur traitement.

6.1.3.2 Performances des procédés

Le tableau 38 donne des exemples de taux de rétention pouvant être obtenus avec les traitements suivants : UF + OI, NF + NF et OI. De meilleures performances sont obtenues avec UF + OI puis avec OI seule.

Tableau 38: Exemples de taux de rétention par UF + OI, NF + NF et OI seule pour des eaux usées faiblement chargées

Paramètre	Taux de rétention par NF + NF	Taux de rétention par OI
Référence	(Mavrov & Belieres,	(Suàrez & Riera, 2015)

Paramètre	Taux de rétention par NF + NF	Taux de rétention par OI
	2000)	
Conductivité	Minimum 66.7%	97.3%
NH ₃	ND	ND
NO ₃ ⁻	ND	ND
NO ₂ ⁻	ND	ND
COT	Minimum 37.5%	ND
DCO	Minimum 80%	92.6%
Ca ²⁺	SLD	ND
Taux de conversion, Y	Première NF : 70 à 83% Seconde NF : 94%	90%

Selon la conduite des installations dans le secteur de la production de lait UHT et les étages d'extraction des condensats d'évaporation dans le secteur de la concentration des matières laitières, ces effluents ne présentent pas des qualités similaires. Il est donc recommandé de les trier au mieux avant leur traitement.. Par ailleurs, comme le stockage du condensat affecte la qualité du perméat produit (tableau 39), il est recommandé d'éviter le stockage avant traitement (Balannec et al., 2005; Riera et al., 2013; Vourch, Balannec, Chaufer, & Dorange, 2005).

6.1.3.3 Choix d'un prétraitement et d'un post-traitement

Le tableau 39 indique les prétraitements et les post-traitements utilisés pour traiter les condensats produits par l'industrie laitière.

D'une manière générale, une étape de MF est utilisée. Un traitement par UV peut également être réalisé en amont des membranes pour limiter leur encrassement (Mavrov & Belieres, 2000).

Bien que le traitement par membrane (UF avec un faible diamètre de pores, NF ou OI) assure une désinfection, un post-traitement de type chloration ou UV est généralement prévu. Par ailleurs et lorsqu'une filtration sur charbon actif est présente, un ajustement du pH est envisagé en fin de traitement.

Tableau 39: Exemples de prétraitement et de post-traitement utilisés pour traiter les condensats produits par l'industrie laitière

Type de condensats	Type de procédé	Prétraitement	Post-traitement	Référence
Condensats d'évaporation	NF + NF	2 étages de filtres à cartouche (MF) et désinfection UV	Désinfection UV	(Chmiel et al., 2000; Mavrov & Belieres, 2000; Mavrov, Chmiel, & Belieres, 2001)

Type de condensats	Type de procédé	Prétraitement	Post-traitement	Référence
Condensats d'UHT	OI + charbon actif	Préfiltres (MF)	Ajustement de pH (7-10)	(Suàrez et al., 2014)
Condensats d'UHT	OI	Refroidissement jusqu'à 50°C	ND	(Suàrez & Riera, 2015)
Condensats d'UHT	NF	Préfiltres (MF) et refroidissement à 30°C	ND	(Riera et al., 2013)

6.1.4 Cas particulier des eaux usées fortement chargées et sans produit chimique

6.1.4.1 Sélection des procédés

Les traitements par NF ou OI ont été testés sur des eaux usées fortement chargées et ne contenant pas de produits chimiques (voir tableau 40). Les prétraitements ne sont pas indiqués dans ce tableau.

Tableau 40: Exemples de traitement des eaux usées fortement chargées par filtration membranaire type NF et OI

Pays	Traitement	Eaux usées			Utilisation	Références
		Origine	DCO gO ₂ /L	Graisse g/L		
Ukraine	NF	Lait écrémé Lait entier	ND	0.06-0.07 4.10-4.30	Traitement insuffisant pour un recyclage	(Kyrychuk, Zmievskii, & Myronchuk, 2014)
Ukraine	OI	Lait écrémé Lait entier	ND	0.06-0.07 4.10-4.30	Lavage des sols et des véhicules	(Kyrychuk et al., 2014)
France	NF	1/3 de lait écrémé dilué	36	ND	Traitement insuffisant pour un recyclage	(Balannec et al., 2005)
France	OI	1/3 de lait écrémé dilué	36	ND	Traitement insuffisant pour un recyclage	(Balannec et al., 2005)
France	NF + OI	Solutions modèles à base de lait (écrémé, entier ou en poudre) ou de lactosérum	7.6-9	0.2-1.5	Eau de nettoyage, de chauffage, de refroidissement ou de chaudière	(Vourch et al., 2005)

Pays	Traitement	Eaux usées			Utilisation	Références
		Origine	DCO gO ₂ /L	Graisse g/L		
France	OI + OI	Solutions modèles à base de lait (écrémé, entier ou en poudre) ou de lactosérum	7.6-9	0.2-1.5	Eau de nettoyage, de chauffage, de refroidissement ou de chaudière Eau pouvant exceptionnellement être en contact avec l'aliment	(Vourch et al., 2005)

Le traitement des eaux usées fortement chargées par NF seule ou OI seule ne permet pas de produire une eau de qualité suffisante à son recyclage. Un traitement combiné NF + OI ou OI + OI est nécessaire (Balannec et al., 2005). Lorsqu'on compare les deux procédés, on constate que OI + OI permet de produire une eau de meilleure qualité que NF + OI avec une valeur de COT qui répond au critère de l'eau potable, c'est-à-dire inférieur à 2 mg/L (Vourch et al., 2005).

6.1.4.2 Performance des procédés

Le tableau 41 présente la qualité d'eau produite après un traitement des eaux usées fortement chargées par NF ou OI. On constate, bien évidemment, que l'OI permet de produire une eau de meilleure qualité.

Tableau 41: Exemples de taux de rétention par NF et OI des eaux usées fortement chargées (Balannec et al., 2005; Kyrchuk et al., 2014)

Paramètre	Taux de rétention par NF	Taux de rétention par OI
Graisses	100%	100%
Protéines	100%	100%
Lactose	Lait écrémé : 97% Lait entier : 95%	99.9%
Sels minéraux totaux	62-63%	98-99%
Ca ²⁺	99.0-99.9%	99.8-99.9%
Mg ²⁺	97.4-99.4%	99.6-100%
Na ⁺	49-84%	96.4-97.5%
K ⁺	58-80%	96.1-98.2%
Cl ⁻	Peut-être négatif	93.8-97.6
Phosphate	92-4-93.0%	99.6-100%
Citrate	93.8-97.6%	100%

6.1.4.3 Impact du stockage des effluents

Le tableau 42 donne un exemple d'impact d'un stockage de 24h à 25°C d'eaux usées fortement chargées (= DCO à 8,2 gO₂.L⁻¹) sur la qualité du perméat de NF (Vourch et al., 2005). Dans cet exemple, le lactose présent dans l'eau usée se dégrade en même temps que l'acidification de l'effluent. Des molécules plus petites comme l'éthanol et le lactate sont produites. Ces dernières traversent plus facilement la membrane de NF.

Tableau 42: Exemple d'impact du stockage des eaux usées fortement chargées sur la qualité du perméat de NF (Vourch et al., 2005)

Paramètre	Unité	Perméat de NF sans stockage	Perméat de NF avec stockage 24h à 25°C
COT	mg.L ⁻¹	42	184
DCO	mgO ₂ .L ⁻¹	87	640
Conductivité	µS.cm ⁻¹	637	715
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	158	94
K ⁺	mg.L ⁻¹	105	144
Na ⁺	mg.L ⁻¹	32	33
Ca ²⁺	mg.L ⁻¹	3.2	5.5
Mg ²⁺	mg.L ⁻¹	<1	<1
PO ₄ ³⁻	mg.L ⁻¹	16	31

6.1.5 Focus sur le traitement par OD

L'OD peut être utilisée pour le traitement du lactosérum mais aussi pour le traitement des eaux usées (Cath et al., 2006). Plusieurs recherches récentes ont, par ailleurs, été menées pour étudier la combinaison de la réutilisation des eaux usées et du dessalement de l'eau de mer (Blandin, Verliefde, Comas, Rodriguez-Roda, & Le-Clech, 2016; Teusner, Blandin, & Le-Clech, 2017; Volpin et al., 2018). La figure 15 illustre ce principe. Les eaux usées sont concentrées par OD à l'aide de l'eau de mer. L'eau de mer alors diluée par l'eau extraite des eaux usées a ainsi une pression osmotique plus faible facilitant ainsi son dessalement par OI.

SCENARIO C: HYBRID FO-RO (Supply = 150 m³ d⁻¹)

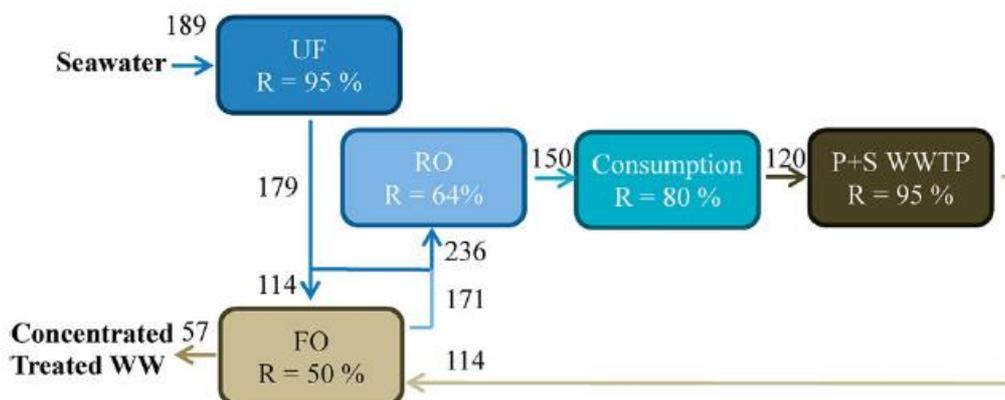


Figure 15: Principe de la combinaison de la réutilisation des eaux usées et du dessalement de l'eau de mer (Teusner et al., 2017)

6.1.5.1 Traitement du lactosérum

Le procédé OD + DM a été testé pour produire, à partir du lactosérum, de la poudre de lactosérum et de l'eau ayant une qualité suffisante pour sa réutilisation dans la production de fromage (niveau de production non indiqué). Par ailleurs, et, comme le montre le tableau 43, le traitement OD + DM permet, par rapport au traitement UF + OI classiquement utilisé pour produire du lactosérum en poudre, d'augmenter la récupération d'eau qui passe de 30 à 67% (Aydiner et al., 2014).

Tableau 43: Qualité et quantité de l'eau récupérée après traitement du lactosérum par UF + OI, OD + DM, DM (PVDF) + OI et DM(PP) + OI (Aydiner et al., 2014)

Paramètre	Unité	Traitement par UF + OI	Traitement par OD + DM	Traitement par DM (PVDF) + OI	Traitement par DM (PP) + OI
Taux de conversion	%	29.81	67.31	65.58	67.61
DCO	mg.L ⁻¹	66.13	42.96	17.20	3.36
NTK	mg.L ⁻¹	0.92	0.84	0.34	0.07
Ntot	mg.L ⁻¹	1.15	1.01	0.38	0.09
Ptot	mg.L ⁻¹	0.42	0.33	0.13	0.03

6.1.5.2 Traitement des eaux usées

Le procédé OD + DM a été testé pour produire, à partir des eaux usées d'une laiterie (lieu de prélèvement non indiqué), une eau de qualité suffisante pour sa réutilisation urbaine de l'eau (Song, Xie, Chen, & Liu, 2018).

On constate dans le tableau 44 que l'eau traitée produite est de qualité suffisante. Néanmoins, l'encrassement de la membrane d'OD peut être important (Maltos et al., 2018). Ainsi, des études

complémentaires sur les phénomènes d'encrassement restent à mener. Des études seraient aussi à mener pour s'assurer que les taux de récupération d'eau sont significatifs.

Tableau 44: Exemple de performance du traitement par OD + DM dans l'industrie laitière (Aydiner et al., 2014)

Paramètre	Unité	Eau d'entrée	Eau traitée	Réglementation eau potable de l'Union européenne
pH	-	4,75-5,17	7,2	6,5-9,5
Conductivité	µS/cm	7 890 -9 640	45,0	2 500 à 20°C
Cl ⁻	mg.l ⁻¹	1 250 -1 355	12,0	250
DCO soluble	mg.l ⁻¹	59 280 -63 034	ND	ND
DCO	mg.l ⁻¹	ND	38,0	ND
N-NH ₄	mg.l ⁻¹	101-113	ND	0,50
N-NO ₂	mg.l ⁻¹	0,12-0,13	0,00	0,50
N-NO ₃	mg.l ⁻¹	119-149	0,03	50
NTK	mg.l ⁻¹	1 159 -1 325	18,2	ND
Ntot	mg.l ⁻¹	1 308 -1 445	18,2	ND
P-PO ₄	mg.l ⁻¹	363-385	0,00	ND
Ptot	mg.l ⁻¹	455-483	0,00	ND

6.2 Les industries des huiles et graisses

6.2.1 Solutions de recyclage ou de réutilisation identifiées par l'Union européenne

La Commission européenne a identifié un cas en Allemagne de recyclage de condensats issus des générateurs de vapeur en tant qu'eau de process (European, 2018a). Un cas de recyclage a été identifié en Italie pour produire de l'eau de nettoyage ou de refroidissement. Un autre cas en Allemagne de recyclage des eaux pour produire de l'eau de process est indiqué. Le tableau 45 résume les cas de recyclage identifiés par l'Union européenne dans l'industrie des huiles et des graisses (European, 2018a).

Tableau 45: Exemples de recyclage ou de réutilisation identifiés par l'Union européenne pour les industries des huiles et des graisses (European, 2018a).

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation
Allemagne	Recyclage après un usage énergétique	Condensat du générateur vapeur	Eaux de process

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation
Italie	Recyclage (ND)	Mélange d'eaux usées	Eaux de nettoyage ou de refroidissement
Allemagne	Recyclage après évaporation	Mélange d'eaux usées	Eaux de process

6.2.2 Les prétraitements

6.2.2.1 La FAD avec ou sans ajout de produits chimiques

Azbar et al. indiquent qu'environ 50% de la quantité de DCO peut être facilement éliminée avec un traitement chimique et qu'une corrélation existe entre la concentration en DCO et la concentration en huiles et en graisses. Ce sont les raisons pour lesquelles ils ont testé les performances de la FAD avec et sans ajout de produits chimiques sur deux usines en Turquie produisant des huiles végétales. Les performances sont résumées dans le tableau 46 (Azbar & Yonar, 2004).

Tableau 46: Exemples de performances de la FAD sur des eaux usées d'industrie de production d'huiles végétales avec et sans ajout de produits chimiques (Azbar & Yonar, 2004)

Paramètre	Unité	Qualité de l'effluent à traiter	Taux de rétention			Qualité de l'effluent après traitement par FAD et produits chimiques
			FAD	Produits chimiques (après FAD)	FAD et produits chimiques	
DCO	mg.l ⁻¹	13 750 -15 000	53,3%	92,3%	95,6-96,4%	540-600
DBO ₅	mg.l ⁻¹	4 300 -4 700	53,2%	84,1%	90,7-92,6%	350-400
MES	mg.l ⁻¹	3 800 -3 963	84,4%	75,8%	96,2-97,6%	90-150
Huiles et graisses	mg.l ⁻¹	3 635 -3 963	94,6%	53,3%	97,5-98,1%	70-100
NTK	mg.l ⁻¹	686-738	46,2%	84,9%	91,9-93,4%	45-60
Ptot	mg.l ⁻¹	61-63	44,4%	71,4%	52,5-84,1%	10-29

Les résultats montrent que les concentrations après un traitement par FAD avec ou sans ajout de produits chimiques (voir tableau 46) sont trop élevées pour permettre une réutilisation de l'eau.

Cependant, cette technologie peut être envisagée comme prétraitement afin d'assurer un premier abattement des polluants présents. En effet, des taux de rétention de plus de 90% sur la DCO, la DBO₅, les MES, le NTK et les huiles et des graisses sont observés. (voir tableau 46).

Par ailleurs, Azbar et al. ont étudié l'impact du point d'injection des produits chimiques (avant ou après la FAD) sur les performances de traitement et recommandent l'injection de produits chimiques avant le FAD (Azbar & Yonar, 2004).

6.2.2.2 La centrifugation avec ou sans traitement par UF

Les prétraitements par centrifugation et par UF ont été testés sur les eaux usées d'industrie de production d'huile d'olive (Coskun, Yildirim, Balcik, Demir, & Debik, 2013). Les performances sont indiquées dans le tableau 47.

Tableau 47: Exemples de performances de la centrifugation sur des eaux usées d'industrie de production d'huiles olives avec ou sans traitement par UF (Coskun et al., 2013)

Paramètre	Unité	Qualité de l'effluent à traiter	Taux de rétention		Qualité de l'effluent après centrifugation et traitement UF
			Centrifugation	Centrifugation + UF	
Conductivité	mS.cm ⁻¹	8.2 +/- 0.1	3,7%	4,9%	7.8 +/- 0.1
DCO	g.L ⁻¹	54.8 +/- 1.8	16,2%	50,7%	27.0 +/- 0.8
MES	g.L ⁻¹	10.0 +/- 0.9	56,0%	97,0%	0.30 +/- 0.01
Turbidité	FAU	7 300 +/- 640	67,3%	99,5%	<40

La mise en place d'une étape d'UF après la centrifugation permet d'augmenter de manière significative les performances de traitement.

La combinaison des deux procédés permet une réduction importante des MES et de la turbidité. En revanche, la diminution de la DCO est faible (50,7%) et la concentration après traitement reste élevée (27 g.L⁻¹).

Par ailleurs, en comparant le tableau 46 et le tableau 47, il semble que les performances de ce traitement sont plus faibles que par FAD avec ajout de produits chimiques. Cependant, et comme les performances ont été établies sur des eaux usées différentes, il est difficile de conclure sans études complémentaires.

6.2.2.3 La MF à très basse pression transmembranaire

La MF à très basse pression transmembranaire (0,1-1 bar) peut être une solution comme prétraitement. Elle a l'avantage d'éviter l'ajout de produits chimiques.

Ses performances de traitement ont été établies sur des eaux usées acides issues du procédé de fabrication d'huiles végétales. Elles sont indiquées dans le tableau 48. (Decloux et al., 2007).

Tableau 48: Exemple de performances de la MF à très basse pression transmembranaire sur des eaux usées acides issues du procédé de fabrication d'huiles végétales (Decloux et al., 2007)

Paramètre	Qualité de l'effluent à traiter	Taux de rétention
MES	7-12 g.L ⁻¹	91%
Graisse	2-4 g.L ⁻¹	96%
DCO	10-30 gO ₂ .L ⁻¹	60%

De plus, Decloux et al. (2007) indiquent que le rétentat produit par MF peut être facilement séparé en deux phases. La phase supérieure est principalement composée de matières grasses alors que la phase inférieure présente une qualité similaire à celle du perméat. Il peut donc être envisagé de mélanger la phase inférieure avec le perméat pour augmenter le taux de récupération d'eau.

En comparant les taux de rétention, on constate que les performances de la MF à très basse pression transmembranaire semblent meilleures que celles de la FAD sans produits chimiques, mais inférieures à celles de la FAD avec produits chimiques.

6.2.3 Traitements membranaires

6.2.3.1 Sélection des procédés

Coskun et al. (2013) indiquent qu'il existe peu d'études sur le traitement par membrane des eaux usées issues des industries des huiles et des graisses, mais que ce nombre augmente. Néanmoins, ce type de traitement (de MF à OI) peut être une technologie prometteuse pour la production d'eau potable à partir de ces eaux usées (Muro et al., 2012).

Le tableau 49 donne des exemples de traitement membranaire des eaux usées issues de l'industrie des huiles et des graisses. Les prétraitements ne sont pas indiqués dans ce tableau.

Tableau 49: Exemples de traitement des eaux usées issues de l'industrie des huiles et des graisses

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation	Références
Turquie	Traitement par OI - sans recyclage	Production d'huile d'olive en trois phases	ND	(Coskun et al., 2013)
Inde	Traitement par OI - sans recyclage	Eaux usées d'huile végétale	Rejet	(Sridhar, Kale, & Khan, 2002)
Malaisie	Recyclage après UF + OI	Eaux usées d'huile de palme	Plusieurs applications sur l'usine	(Azmi, Yunus, Baharuddin, & Dom, 2013)

Le traitement UF + OI a été testé sur des eaux usées issues d’usine de fabrication d’huile de palme. Les résultats montrent qu’il est possible de recycler les eaux traitées pour des applications diverses sur l’usine (Azmi et al., 2013).

L’OI a été testé sur les eaux usées issues d’usines de fabrication d’huile d’olive et d’usines de fabrication d’huile végétale. Dans les deux cas, la réutilisation n’a pas été envisagée (Coskun et al., 2013); (Azmi et al., 2013).

6.2.3.2 Performance des procédés

Des exemples de performances de l’UF, de l’UF + l’OI et de l’OI sur des eaux usées issues d’usines de production d’huile sont donnés dans le tableau 50. Il a été montré qu’avec l’OI, plus la conductivité, les SDT et la DBO₅ sont élevées, plus les taux de rétention sont faibles (Sridhar et al., 2002).

Tableau 50: Exemples de performances de l’UF, de l’UF + l’OI et de l’OI sur des eaux usées issues d’usines de production d’huile

Paramètre	Taux de rétention par UF	Taux de rétention par UF + OI	Taux de rétention par OI	Taux de rétention par OI
Référence	(Azmi et al., 2013)	(Azmi et al., 2013)	(Coskun et al., 2013)	(Sridhar et al., 2002)
Nature des eaux usées	Production d’huile de palme	Production d’huile de palme	Production d’huile d’olive	Production d’huile végétale
Turbidité	99.9%	99.9%	ND	ND
MES	91.1%	96.5%	ND	ND
SDT	ND	ND	ND	99.4%
DBO ₅	ND	98.9%	ND	ND
Conductivité	ND	ND	95.6-96.2%	ND
DCO	ND	ND	97.5%	98.2%

6.2.4 Focus sur le traitement d’OD

L’OD a été testé sur des eaux usées issues de l’industrie de production d’huile d’olive avec comme objectif d’atteindre le Zéro Rejet Liquide. Il s’avère être une solution pertinente (Gebreyohannes et al., 2015).

Plusieurs prétraitements ont été testés en amont du procédé d’OD : la préfiltration (35 µm puis 15 µm), la MF (0,4 µm) et la MF + le BRM. La mise en place d’un prétraitement de MF ou de MF + BRM permet d’obtenir des densités de flux en OD environ 30% plus élevées que la préfiltration (Gebreyohannes et al., 2015).

Contrairement aux autres types de membrane (MF ou UF), l’encrassement de la membrane est réversible en OD. L’encrassement irréversible constaté sur les autres types de membrane est

causé par la pression hydraulique (ou transmembranaire), absente en OD (Gebreyohannes et al., 2015).

Le traitement permet une réduction du volume d'effluent de 71% et une décoloration complète (Gebreyohannes et al., 2015). Le tableau 51 résume les performances du traitement par OD. La concentration en ions magnésium augmente de manière importante car le procédé de récupération des eaux nécessite la mise en place d'une solution intermédiaire concentrée en magnésium

Tableau 51: Exemple de performance du traitement par OD sur des eaux usées provenant d'une usine de production d'huile d'olive (Gebreyohannes et al., 2015)

Paramètre	Unité	Concentration des eaux usées après une pré-filtration suivie d'une MF	Concentration du perméat d'OD
Ca ²⁺	mg.l ⁻¹	48	SLD
Mg ²⁺	mg.l ⁻¹	30	30 800
K ⁺	mg.l ⁻¹	390	SLD
Mn ²⁺	mg.l ⁻¹	2	SLD
Cu ²⁺	mg.l ⁻¹	7	4.5
Zn ²⁺	mg.l ⁻¹	1.5	SLD
COT	mg.l ⁻¹	3 800	130
CIT	mg.l ⁻¹	190	1,6
CPT	mg.l ⁻¹	550	13

6.3 Les industries des fruits et légumes

6.3.1 Solutions de recyclage ou de réutilisation identifiées par l'Union européenne

La Commission européenne a identifié trois cas de réutilisation ou de recyclage (European, 2018a). Une solution de recyclage avec traitement par UF + OI a été mise en évidence. Le tableau 52 résume les cas identifiés dans l'industrie des fruits et légumes.

Tableau 52: Exemples de recyclage ou de réutilisation identifiés par l'Union européenne pour les industries des fruits et légumes (European, 2018a)

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation
France	Réutilisation	Eaux de refroidissement	Identique
Belgique	Recyclage (ND)	Eaux usées	Eaux de lavage ou de refroidissement

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation
Belgique	Recyclage après UF + OI	Eaux usées	Non indiqué

De plus, la Commission européenne (European, 2018a) a identifié dans son guide, plusieurs possibilités de réutilisation de l'eau. Un exemple est la réutilisation de l'eau issue des étapes de blanchiment pour le nettoyage préliminaire des tunnels de congélation.

6.3.2 Le cas des jeunes pousses de salade

Dans l'industrie des fruits et légumes frais, il est possible d'économiser jusqu'à 90% d'eau en recyclant toute l'eau utilisée par les étapes de lavage (Manzocco et al., 2015).

Un schéma de recyclage a été proposé par Manzocco et al. pour l'industrie de conditionnement de jeunes pousses de salade (voir figure 16). Le procédé est assez similaire à celui d'une usine de lavage des légumes racines (carottes, pommes de terre, navets...) L'eau potable (du robinet) est utilisée pour l'étape de rinçage final. Une partie des eaux usées provenant de cette étape de rinçage est envoyée en tant qu'apport d'eau dans l'étape de lavage et une autre partie est envoyée pour le nettoyage des installations et des équipements. Les eaux usées de l'étape de lavage sont envoyées comme apport d'eau dans l'étape de pré-lavage. Elles circulent ou se chargent donc à « contre-courant » du produit qui se nettoie. Enfin, les eaux usées les plus chargées provenant du pré-lavage sont ensuite envoyées vers une unité de traitement d'eau afin d'être épurées puis recyclées pour les besoins domestiques qui ne nécessitent pas d'eau potable (dégivrage, toilettes, etc...), le nettoyage des installations et des équipements, mais aussi comme source d'eau supplémentaire lors du rinçage.

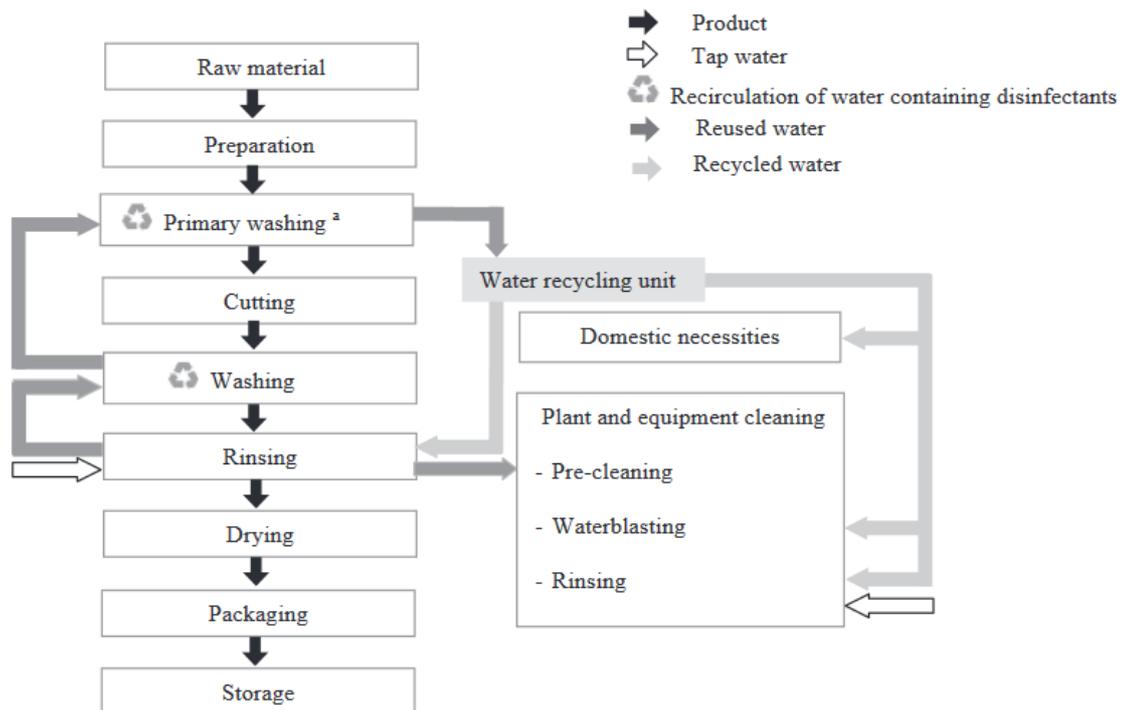


Figure 16: Solutions de réutilisation et de recyclage pour une industrie de conditionnement de jeunes pousses de salade (Manzocco et al., 2015)

Manzocco et al. ont établi que la désinfection des eaux usées issues des industries des fruits et légumes frais constituait une priorité (Manzocco et al., 2015) et doit être une étape du procédé de régénération (« water recycling unit » sur la figure 16).

6.3.3 Désinfection des eaux de lavage

Plusieurs traitements de désinfection sont actuellement utilisés et peuvent éventuellement être appliqués sur les eaux usées issues du lavage : agents chlorés, UV, LP, ozonation, US et les combinaisons UV + ozonation, UV + H₂O₂, UV + US, ozonation + US, H₂O₂ + UV / TiO₂, MF + UV et MF + UV / TiO₂ (Manzocco et al., 2015).

Pour être recyclées en tant qu'eau de lavage, une réduction de 5 log des bactéries pathogènes est généralement considérée comme un minimum à retenir dans le dimensionnement (Manzocco et al., 2015).

Dans la plupart des cas et à la condition que l'eau soit peu turbide, la désinfection au chlore peut être appliquée (Mebalds & Hamilton, 2002). Il est aussi possible de combiner un procédé de désinfection avec un procédé membranaire (de MF jusqu'à OI) (Manzocco et al., 2015).

Les performances de l'ozonation, des UV et de l'ozonation combinée aux UV ont été testées sur des eaux usées issues du lavage des oignons, des scaroles, des carottes et des épinards

fraîchement coupés. Les performances obtenues sur les eaux usées issues du lavage des oignons et des scaroles sont présentées dans le tableau 53 (Selma et al., 2008).

Tableau 53: Exemples de performances de l'ozonation, du traitement par UV et de la combinaison ozonation + UV sur des eaux usées issues du lavage des oignons et des scaroles (Selma et al., 2008)

Paramètre	Abattement par ozonation		Abattement par traitement aux UV		Abattement par ozonation + UV	
	Oignon	Scarole	Oignon	Scarole	Oignon	Scarole
Bactéries mésophiles	environ 2.6 log UFC.mL ⁻¹	environ 5 log UFC.mL ⁻¹	0.6 +/- 0.1 log UFC.mL ⁻¹	3.5 +/- 0.3 log UFC.mL ⁻¹	3.2 +/- 0.1 log UFC.mL ⁻¹	5.5 +/- 0.1 log UFC.mL ⁻¹
Coliformes	4.0 +/- 0.1 log UFC.mL ⁻¹	environ 4 log UFC.mL ⁻¹	2.4 +/- 0.1 log UFC.mL ⁻¹	3.9 log UFC.mL ⁻¹	5.0 +/- 0.3 log UFC.mL ⁻¹	4.2 log UFC.mL ⁻¹
Levures	SLD	ND	1 log UFC.mL ⁻¹	ND	SLD	ND
Moisissures	ND	1.5 log UFC.mL ⁻¹	ND	1	ND	1.5 log UFC.mL ⁻¹

Les performances varient en fonction de la nature des eaux de lavage et des valeurs de la turbidité et de la DCO (voir tableau 53 et tableau 54). Plus la turbidité et la DCO sont élevées, moins les procédés de désinfection sont performants.

Tableau 54: Valeurs de turbidité et de DCO (Selma et al., 2008)

Paramètre	Unité	Valeurs du paramètre sur des eaux usées issues du lavage des :			
		oignons	scaroles	carottes	épinards
Turbidité	NTU	67.1	1.2	2.1	13.7
DCO	mg.L ⁻¹	953.1	48.6	18.0	55.0

L'ozonation seule ou combinée aux UV est une solution utilisable pour le traitement des eaux usées issues du lavage des légumes. Si la DCO est faible, seul un traitement par UV peut suffire (Selma et al., 2008).

Les performances des traitements US, UV et US + UV ont été mesurées sur les eaux de lavage de laitues (Millan-Sango et al., 2017). Les résultats sont donnés dans le tableau 55.

Tableau 55: Exemples de performances des traitements US, UV et de la combinaison US + UV sur l'eau de lavage des laitues (Millan-Sango et al., 2017)

Paramètre	Abattement par traitement aux US	Abattement par traitement aux UV	Abattement par traitement US + UV
Bactéries	1.6 +/- 0.54 log UFC.mL ⁻¹	3.1 +/- 0.25 log UFC.mL ⁻¹	3.57 +/- 0.39 log UFC.mL ⁻¹

Paramètre	Abattement par traitement aux US	Abattement par traitement aux UV	Abattement par traitement US + UV
Couleur	41.84%	11%	43.31%
MES	Jusqu'à 27%	Inférieur à 10%	Jusqu'à 30%
DCO	52.90%	74.40%	79.34%

Le traitement combiné US + UV est le traitement le plus performant suivi par le traitement par US.

6.3.4 Décantation des eaux de lavage

Les performances du procédé de décantation sans ajout de produits chimiques ont été mesurées sur une eau de lavage de légumes-racines : carottes et pommes de terre de l'espèce *Solanum tuberosum* (Lehto et al., 2014). Elles sont indiquées dans le tableau 56.

Tableau 56: Exemple de performances du procédé de décantation sur une eau de lavage des légumes racine (Lehto et al., 2014)

Paramètre	Abattement
ST	60%
DBO ₇ (7 jours au lieu de 5)	27%
DCO	48% (5.2 à 2.7 g.L ⁻¹)
Ptot	43%
Ntot	63%

Avec l'ajout de produits chimiques (ferrisulfate, chlorure d'aluminium et sulfate de polyaluminium), il est possible d'améliorer de 20 à 25% l'abattement des matières organiques (Lehto et al., 2014).

Les valeurs de DCO après décantation restant élevées (5.2 à 2.7 g.L⁻¹), il n'est pas possible de mettre en place une étape de désinfection sans traitement complémentaire (voir 5.3).

6.3.5 Filtration sur sable des eaux usées

La filtration sur sable peut être une solution de traitement des eaux usées issues du procédé de conditionnement de carottes à la condition que la vitesse de filtration soit suffisamment faible pour permettre l'élimination des champignons pathogènes (Mebalds & Hamilton, 2002). Son efficacité pour produire une eau de qualité suffisante à son recyclage doit néanmoins être étudiée.

Pour cela, plusieurs conditions doivent être respectées à l'entrée du filtre à sable. La turbidité dans les eaux usées à traiter ne doit notamment pas être trop élevée (maximum 10 NFU). Si ce n'est pas le cas, un prétraitement doit être envisagé (Mebalds & Hamilton, 2002).

6.3.6 Filtration membranaire

6.3.6.1 Traitement par MF

Un traitement des eaux de lavage issues du conditionnement de légumes frais par MF immergée (0,2 µm, PVDF) a été testé sur une unité pilote installée sur un site industriel. Les résultats indiquent que les micro-organismes et les ST jusqu'à 100,0 mg.L⁻¹ sont éliminés. Cependant, les composés encore présents dans le perméat lui donnent une couleur verte. (Nelson, Singh, Toledo, & Singh, 2007)

6.3.6.2 Traitement par BRM

Le traitement par BRM des eaux usées issues de deux industries de conditionnement des fruits et légumes a été étudié dans la thèse d'Adam Moore (Moore, 2015).

Les rendements d'élimination (ou abattements) de plusieurs paramètres sont donnés dans le tableau 57. Après le traitement par BRM, la concentration en DCO reste trop élevée pour que l'eau puisse être directement réutilisée. Des traitements complémentaires, tels que la filtration sur charbon actif suivie d'une désinfection UV sont à envisager et ont été testés dans le cadre de l'étude. Le traitement sur charbon actif permet d'abaisser la valeur de la DCO dans l'intervalle 26 à 41 mg.L⁻¹, ce qui est acceptable pour l'étape de désinfection par UV et sa réutilisation pour le nettoyage et le rinçage d'une tour de refroidissement (Moore, 2015).

En revanche, pour produire une eau de qualité « eau potable », il est nécessaire de rajouter après traitement par BRM une étape d'OI suivie d'une étape de désinfection UV (Shannon et al., 2008).

Tableau 57: Exemple de performance du traitement par BRM d'eaux usées d'industries des fruits et légumes (Moore, 2015)

Paramètre	Abattement
DCO	97% jusqu'à 135 +/- 65 mg.L ⁻¹
DBO	99%
MES	90%
NTK	90%
Ptot	60%

6.4 Les industries de la boisson

6.4.1 Solutions de recyclage ou de réutilisation identifiées par l'Union européenne

La Commission européenne a identifié six cas de recyclage ou de réutilisation des eaux usées issues de l'industrie de la boisson (European, 2018a). Le tableau 58 indique les cas identifiés.

Dans l'industrie des boissons non alcoolisées, l'industrie des jus à base de concentrés et dans les brasseries, des cas ont été identifiés pour la réutilisation ou le recyclage des eaux de rinçage. Les eaux usées traitées sont utilisées comme eau de rinçage, dans les opérations de pasteurisation ou comme eau de refroidissement.

Dans une brasserie, l'eau de refroidissement est recyclée après un traitement électrochimique (pour éliminer les minéraux ou les ions métalliques) avec un retour sur investissement d'un an.

Enfin, une solution de recyclage des condensats après traitement par OI est installée dans une installation belge de production de jus de fruits et de boissons non alcoolisées.

Tableau 58: Exemples de recyclage ou de réutilisation identifiés par l'Union européenne pour les industries de la boisson (European, 2018a)

Pays	Type d'industrie	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation
France	Brasserie	Recyclage (ND)	Eau de rinçage	Pasteurisation
France	Boissons gazeuses et jus à base de concentré	Réutilisation	Eau de lavage	Eau de lavage pour la même opération ou une autre
France	Boissons gazeuses et jus à base de concentré	Recyclage (ND)	Eau de rinçage	Refroidissement
Belgique	Brasserie	Recyclage (ND)	Eau chaude du système de refroidissement	Opération de brassage
Espagne	Brasserie	Recyclage après traitement électrochimique	Eau de refroidissement	Même application
Belgique	Boissons gazeuses et jus à base de concentré	Recyclage après OI	Condensats d'évaporation ou de séchage	Non indiqué

D'une manière générale, la Commission européenne (European, 2018a) a identifié dans son guide trois possibilités de réutilisation des eaux issues de brasserie. Une première possibilité est la réutilisation de l'eau chaude issue du refroidissement du moût en tant qu'eau de process, eau de nettoyage, eau de rinçage des bouteilles ou eau de chauffage. D'autres possibilités sont la réutilisation des eaux usées issues du procédé de trempage (« mashing ») ou issues de la pasteurisation des bouteilles comme eau de refroidissement ou pour une même fonction.

6.4.2 Cas particulier des eaux de lavage des bouteilles

6.4.2.1 Sélection des procédés

Le tableau 59 donne des exemples de traitement des eaux de lavage des bouteilles en vue de leur recyclage.

Tableau 59: Exemples de traitement des eaux de lavage des bouteilles en vue de leur recyclage

Pays	Recyclage ou réutilisation	Origine des eaux usées	Utilisation	Références
Malaisie	Recyclage après UF ou OI	Lavage des bouteilles	Lavage des bouteilles	(Tay & Jeyaseelan, 1995)
Allemagne	Recyclage après NF + OIBP	Eau de lavage des bouteilles d'eau minérale	Eau potable	(Mavrov & Belieres, 2000)
Allemagne	Recyclage après NF + OIBP	Eau de lavage des bouteilles de limonade	Ne convient pas au recyclage	(Mavrov & Belieres, 2000)
Allemagne	Recyclage après OI	Eau de lavage des bouteilles	Eau potable	(Rogener et al., 2003)
Belgique	Recyclage après NF	Eau de rinçage des bouteilles (brasserie)	Ne convient pas au recyclage	(Braeken, Van der Bruggen, & Vandecasteele, 2004)

Dans certains cas, l'OI, précédée ou non d'une étape de NF permet de produire de l'eau potable à partir d'eau de lavage de bouteilles (Rogener et al., 2003) ; (Mavrov & Belieres, 2000) . Un exemple de ses performances dans ce cadre est donné dans le tableau 60. Par contre la NF seule ne peut pas produire une qualité d'eau suffisante pour être réutilisée (Braeken et al., 2004).

6.4.2.2 Performances des procédés

Le tableau 60 donne un exemple de performance de l'OI sur des eaux usées issues du lavage de bouteilles.

Tableau 60: Exemple de performance de l'OI sur des eaux usées issues du lavage de bouteilles (Rogener et al., 2003)

Paramètre	Unité	Eau traitée	Taux de rétention
Conductivité	mS.cm-1	21-93	96-99 %
Turbidité	FNU	0.1	30-70%
pH	-	5.0-10.4	ND

Paramètre	Unité	Eau traitée	Taux de rétention
COT	mg.L ⁻¹	1.0-4.0	92-99%
DCO	mg.L ⁻¹	< 4-14	97-99%
Na ⁺	mg.L ⁻¹	3.4-5	98-99%
Ca ²⁺	mg.L ⁻¹	0.1-0.7	98-99%
Mg ²⁺	mg.L ⁻¹	0.01-0.2	97-99%
Al ³⁺	mg.L ⁻¹	<0.001-0.05	98-99%
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	0.3-4.3	96-98%
SO ₄ ²⁻	mg.L ⁻¹	<0.2-7.9	82-99%
F ⁻	mg.L ⁻¹	0.1	80-96%

6.4.2.3 Choix d'un prétraitement

Pour que le procédé de traitement membranaire des eaux usées issues du lavage des bouteilles soit rentable, il est nécessaire de mettre en place un prétraitement efficace (Rogener et al., 2003). Le tableau 61 donne des exemples de prétraitements utilisés. La filtration sur filtre à bande peut être utilisée pour éliminer le verre cassé, les parties d'étiquettes et les grosses impuretés (Mavrov & Belieres, 2000).

Tableau 61: Exemples de prétraitements et de post traitements utilisés dans le traitement des eaux de lavage des bouteilles

Type de procédé	Pré-traitement	Post-traitement	Référence
UF	Stockage et filtre à cartouche (30µm)	Aucun	(Tay & Jeyaseelan, 1995)
OI	Stockage et filtre à cartouche (30µm)	Aucun	(Tay & Jeyaseelan, 1995)
NF + OIBP	Filtre à bande, 2 filtres à cartouche et désinfection UV	Désinfection UV	(Mavrov & Belieres, 2000)
OI	Filtre à sable et à anthracite suivi de filtres à sacs filtrants	Désinfection UV	(Rogener et al., 2003)

Différents prétraitements ont été testés par Rogener et al. : la MF, l'UF, la filtration sur précouche, la floculation combinée avec une filtration sur filtre à bande, la filtration sur écran (filtre à cartouche), l'hydrocyclone, la filtration sur média filtrant (anthracite et sable) et la filtration sur filtre à bande. L'étude a montré que la combinaison d'un filtre bicouche sable et anthracite et d'une filtration sur sacs filtrants est la meilleure solution (Rogener et al., 2003).

6.4.2.4 Choix d'un post-traitement

Le tableau 61 donne des exemples de post-traitements utilisés sur des eaux usées issues du lavage des bouteilles. D'une manière générale, c'est la désinfection par UV qui est retenue.

6.4.2.5 Mise à l'équilibre de l'eau traitée

Par ailleurs, en plus du traitement de désinfection et afin d'éviter le dépôt de tartre sur les bouteilles, la dureté de l'eau utilisée lors de l'opération de rinçage doit être inférieure à 0,9 mmol.L⁻¹ Ca²⁺ (Klemes et al., 2008). D'une manière générale, l'équilibre calco-carbonique doit être vérifié pour chaque application.

6.4.3 Cas particulier des eaux usées des industries vinicoles

Un état de l'art sur les technologies de traitement des effluents générées par les industries vinicoles a été établi par Ioannou et al. mais sans objectif de recyclage (Ioannou et al., 2015).

Il met en évidence que la coagulation et la floculation peuvent être envisagée comme prétraitement et que l'effluent est très biodégradable.

6.4.4 Cas particulier des eaux usées des brasseries

Un état de l'art sur le traitement des eaux usées des brasseries en vue de leur réutilisation a été établi par Simate et al. (Simate et al., 2011).

Dans cet état de l'art, Simate et al. indiquent que toutes les eaux usées sont mélangées puis envoyées vers des « prétraitements ». Ils divisent ces « prétraitements » en 3 groupes : physiques, chimiques et biologiques (voir tableau 62). Les traitements biologiques interviennent à la fin de la chaîne de traitement (Simate et al., 2011).

Tableau 62: « Prétraitements » habituellement utilisés pour la réutilisation des eaux usées d'une brasserie (Simate et al., 2011)

Type de « prétraitement »	Exemples	Fonction
Physique	Dégrillage Broyage Décantation Flottation Filtration sur média filtrant	- Enlever les matières solides grossières

Type de « prétraitement »	Exemples	Fonction
Chimique	Précipitation Adsorption Désinfection Chloration Ajout de produits chimiques	- Eliminer les matières colloïdales et la couleur (coagulation et floculation) - Injection de CO ₂ pour neutraliser les effluents et diminuer le pH - Injection de H ₂ SO ₄ et HCl pour diminuer le pH (uniquement en l'absence de risque de corrosion et de limitation de la concentration de SO ₄ ²⁻ et Cl ⁻)
Biologique	Traitement par boues activées Lagunes aérées ou non aérées Filtre biologique Disque biologique Digestion anaérobie Elimination biologique des nutriments	- Eliminer les polluants organiques biodégradables - Eliminer la DCO et la DBO (80 à 90%)

Les procédés nécessaires au recyclage des eaux sont ensuite installés (voir tableau 63). L'oxydation/décomposition des MO par la technique par plasma non thermique « non-thermal quenched plasma », les BRM, les méthodes électrochimiques et les piles à combustible microbiennes sont des traitements potentiels qui nécessitent des études complémentaires afin de valider leur efficacité (Simate et al., 2011).

Dans les brasseries, aucune substance organique n'est autorisée dans les eaux utilisées ensuite dans le procédé. En effet, leur présence pourrait contribuer à la croissance bactérienne et dégrader la qualité de la bière (Klemes et al., 2008). Aussi, l'élimination de cette matière organique (en particulier la DCO) est un paramètre important à mesurer. Les performances d'élimination de la DCO sont données pour chaque procédé de traitement dans le tableau 63.

Tableau 63: Procédés de traitement des eaux usées de brasserie en vue de leur réutilisation (Simate et al., 2011)

Type de traitement	Fonction	Élimination prévue de la DCO
Filtration membranaire type NF ou OI	- Séparation des impuretés - Elimination des sels organiques - Adoucissement, élimination des sous-produits de désinfection y compris les matières organiques naturelles ou minérales (NF uniquement)	NF: 96% OI: 100%

Type de traitement	Fonction	Élimination prévue de la DCO
Technique par Plasma trempé non thermique	<ul style="list-style-type: none"> - Elimination des polluants organiques par oxydation - Neutralisation des effluents 	98%
BRM	<ul style="list-style-type: none"> - Séparation des impuretés 	96%
Traitements aérobie et anaérobie combinés	<ul style="list-style-type: none"> - Elimination de la DCO: 70-85% avec le traitement anaérobie et 98% avec les traitements aérobie et anoxique 	Total: 98%
Nanotubes de carbone (nanosorbants et nanofiltres)	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorption de polluants organiques et de polluants inorganiques tels que le fluorure - Absorbant des métaux lourds - Filtration des hydrocarbures lourds 	ND
Electrochimique	<ul style="list-style-type: none"> - Dégradation des polluants organiques bi-réfractaires 	97%
Piles à combustible microbiennes	<ul style="list-style-type: none"> - Production d'énergie - Elimination des matières organiques 	94%
Charbon et charbon actif	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorption de saveurs résiduelles, des odeurs, des sous-produits de désinfection, de la couleur des malts 	nd

L'OI (après prétraitement) est le seul traitement des eaux usées de brasseries qui permette le recyclage de l'eau quelle que soit l'application. Pour les autres traitements, des combinaisons de procédés sont nécessaires (Simate et al., 2011).

7 Exemples de recyclage ou de réutilisation des effluents de l'industrie agroalimentaire après traitement en station d'épuration

Aujourd'hui, les eaux usées produites dans la chaîne de fabrication d'une industrie agroalimentaire sont généralement toutes mélangées et envoyées vers une unique station de traitement des eaux usées qui est, dans la plupart des cas, une station de traitement biologique.

Les étapes de traitement habituellement rencontrées dans ces stations d'épuration sont tout d'abord un traitement primaire précédé, si nécessaire, d'un dégrillage, d'un deshuilage - dessablage, d'une étape de neutralisation et de stockage-restitution, suivi par le traitement secondaire (biologique) et pour finir par un traitement tertiaire (voir la figure 17 par exemple).

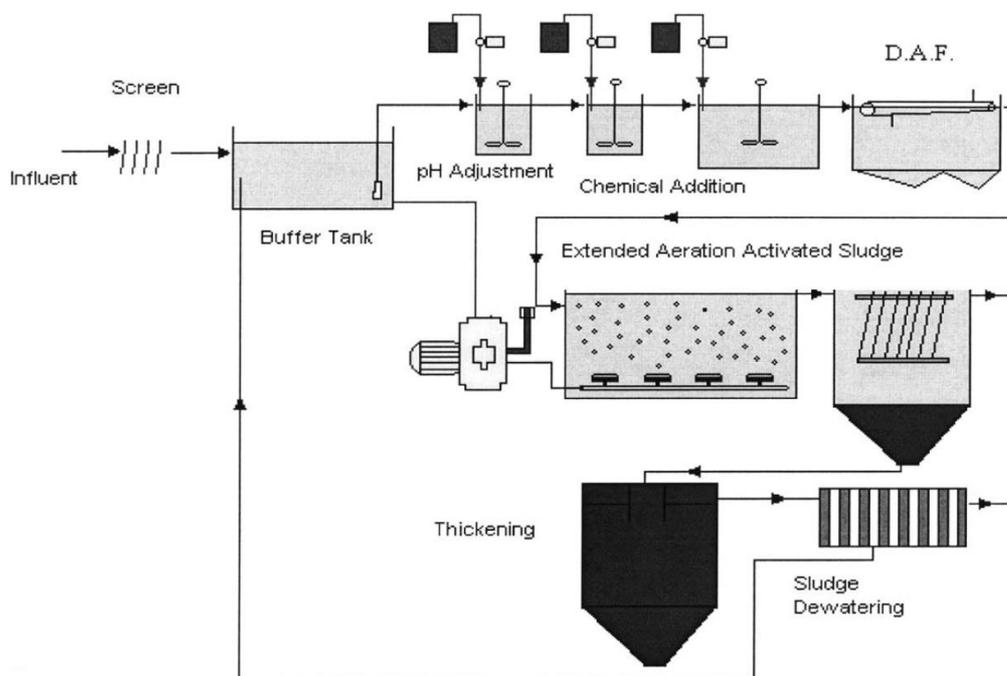


Figure 17: Schéma de la station d'épuration des eaux usées d'une industrie de raffinage d'huile végétale dans la ville de Bursa, Turquie (Azbar & Yonar, 2004)

Les qualités d'eau mesurées après la station d'épuration ne sont pas suffisantes pour une réutilisation directe de ces eaux. Des traitements supplémentaires sont nécessaires.

Ils peuvent consister en une combinaison de plusieurs procédés tels que la filtration sur sable ou sur charbon actif, la filtration membranaire (UF, NF et OI à basse ou haute pression) et la désinfection (Shaan, 2003). Dans le livre «Water reuse: issues, technologies and applications» (Asano et al., 2007), les technologies de traitement possibles sont organisées selon un arrangement hiérarchique (voir la figure 18). Les traitements supplémentaires dépendent des composants présents dans les eaux usées.

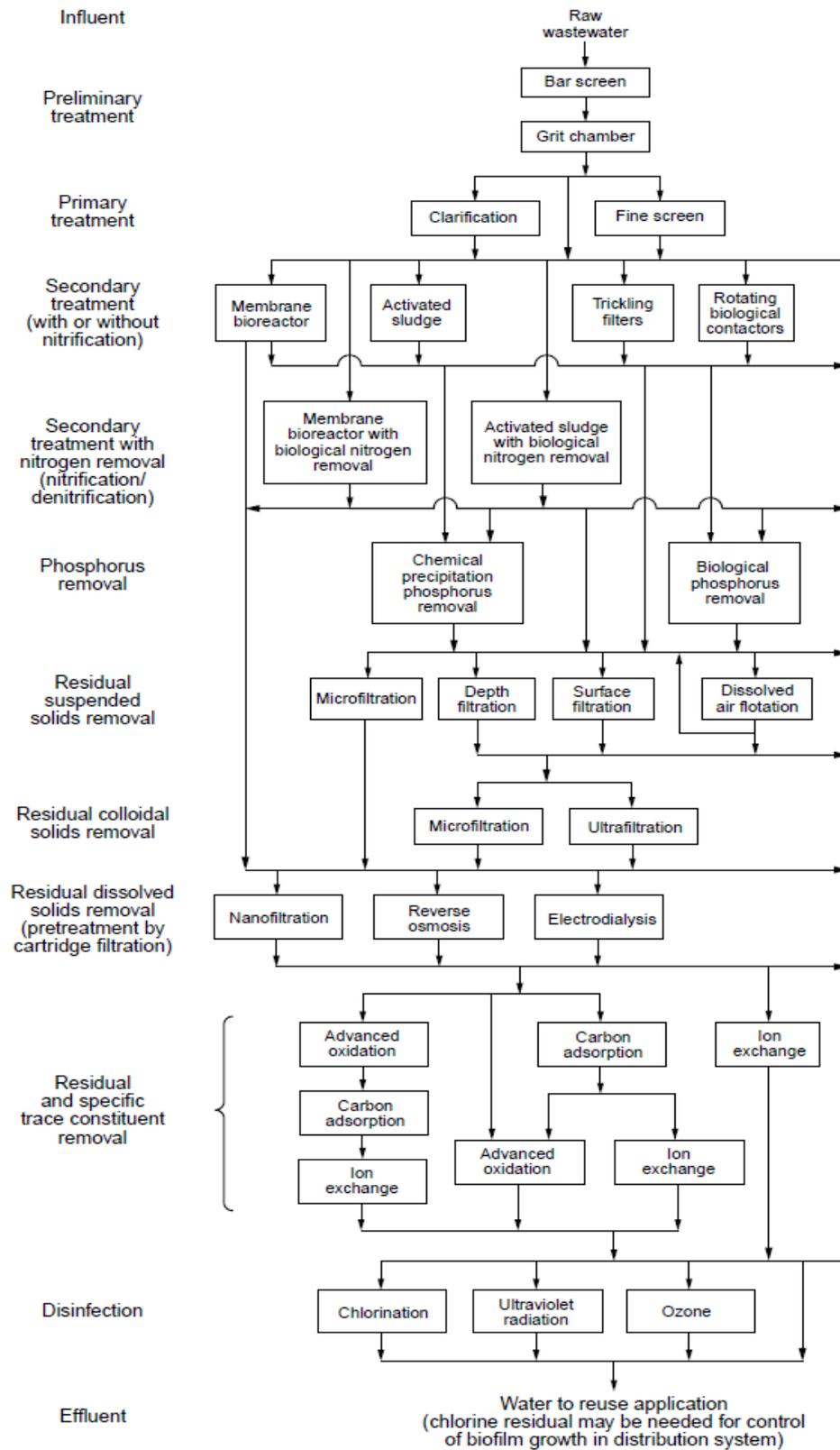


Figure 18: Disposition hiérarchique des technologies de traitement possibles (Asano et al., 2007)

8 Synthèse des traitements envisageables

8.1 Les industries laitières

On trouve dans la littérature scientifique de nombreuses données concernant le traitement des eaux usées de laiterie en vue de leur réutilisation, avec une forte proportion d'articles concernant le traitement par des procédés membranaires.

Le tableau 64 résume les traitements possibles de ces eaux usées en fonction de leur nature et de la qualité d'eau souhaitée. Les prétraitements et les post-traitements (notamment la désinfection) ne sont pas présentés. Ils doivent néanmoins être envisagés pour chaque solution de recyclage.

Tableau 64: Traitement possible des eaux usées de laiterie

Nature des eaux usées	Utilisation des eaux usées ou recyclées	Solution de traitement
Eau de refroidissement	Eau de refroidissement	Aucune
Eau de rinçage d'un NEP	Eau de pré-lavage d'un NEP	Aucune
Condensats ou eaux usées faiblement chargées	Eau potable ou eau de chaudière	UF + OI NF + OI OI + charbon actif NF + NF
Eaux usées fortement chargées (DCO < 10 g O ₂ /L)	Eaux de nettoyage, de chauffage, de refroidissement ou de chaudière	NF + OI OI + OI
Eaux usées fortement chargées (DCO < 10 g O ₂ /L)	Eau potable	OI + OI

D'une manière générale, si une eau contient du lactose, un traitement par NF est à prévoir au minimum.

L'OD, traitement en plein développement, peut constituer, s'il est combiné à la DM ou à l'OI, une autre solution pour le traitement des eaux usées en vue de leur réutilisation.

Par ailleurs et en raison de la dégradation des composants du lait, il est recommandé d'éviter le stockage des eaux usées et de les traiter en quelques heures (Balannec et al., 2005; Riera et al., 2013; Vourch et al., 2005).

8.2 Les industries des huiles et graisses

Plusieurs prétraitements ont été testés sur les eaux usées des industries des huiles et des graisses : la FAD combinée à un traitement chimique, la centrifugation combinée à l'UF ou encore

la MF à très basse pression transmembranaire. Ces prétraitements peuvent contribuer à une forte réduction des polluants, en particulier à la séparation des corps gras. Néanmoins, comme ils ont été testés sur différentes industries des huiles et des graisses (production d'huile végétale ou d'huile d'olive), il est difficile de comparer leur efficacité respective.

Il existe de plus en plus d'études sur les traitements par procédé membranaire des eaux usées des industries des huiles et des graisses, en vue de produire une eau recyclable et de qualité d'eau potable. Si l'UF combinée à l'OI, l'OI directe ou encore l'OD ont été testés, il existe, cependant, trop peu d'études pour conclure sur un choix de procédé à retenir.

8.3 Les industries des fruits et légumes

Environ 70% du volume des eaux usées issues des industries des fruits et légumes provient des opérations de lavage des végétaux et de nettoyage des équipements (Millan-Sango et al., 2017); (Lehto et al., 2014). Cependant, comme 90% de la charge organique totale des eaux usées provient des opérations de pelage et de transformation des fruits et légumes, il est recommandé de séparer les eaux provenant des opérations de lavage et de nettoyage (qui peuvent être très chargées en MES) de celles provenant des opérations de pelage et de transformation des fruits et légumes (Lehto et al., 2014).

Dans ces industries, on trouve peu de données disponibles dans la littérature sur les procédés de réduction de la charge organique de ces eaux. S'il a été identifié que les procédés de traitement membranaire (MF à OI) sont envisageables, ceux-ci restent à tester. Les procédés de désinfection ont été jugés primordiaux dans ce cadre et ont été testés sur les eaux de lavage des fruits et légumes. Leurs performances dépendent de la valeur de la DCO : Plus cette valeur est faible et plus les performances sont élevées. C'est pourquoi, il est important de la réduire, avant tout traitement

8.4 Les industries des boissons

Le lavage des bouteilles génère une grande quantité d'eaux usées, mais faiblement concentrées en MO. Il faut, au minimum, prévoir des traitements de type OI ou NF + OIBP pour produire de l'eau ayant une qualité suffisante pour être réutilisée.

La qualité de l'eau traitée par ces procédés dépend de l'origine des eaux de lavage des bouteilles (industrie des boissons gazeuses, des eaux minérales, des brasseries, du vin, etc.). Il est possible d'obtenir une eau de qualité eau potable si les eaux de lavage sont faiblement chargées (cas des eaux de lavage des bouteilles d'eau minérales par exemple).

Un état de l'art sur les technologies de traitement de l'eau pour le recyclage et la réutilisation des eaux usées issues des brasseries a été établi par Simate et al. A l'heure actuelle, toutes les eaux usées sont mélangées et envoyées vers une même station de traitement équipée d'un procédé de traitement biologique puis traitées en vue de leur recyclage avec la mise en place d'un traitement tertiaire (Simate et al., 2011).

Un état de l'art sur les technologies de traitement des effluents générées par les industries viticoles sans objectif de recyclage a été établi par Ioannou et al (Ioannou et al., 2015).

9 Conclusion

Il existe plusieurs procédés de traitement susceptibles de traiter les eaux usées des industries agroalimentaires en vue de leur recyclage. Ces procédés sont fonction de la qualité des eaux usées à traiter et de la qualité de l'eau nécessaire à leur recyclage. C'est pourquoi il est nécessaire d'avoir une bonne caractérisation des eaux usées à la fois d'un point de vue chimique mais aussi microbien et de connaître l'objectif de qualité de l'eau souhaité. Cet objectif de qualité de l'eau peut varier selon les pays et les réglementations. La réglementation impose, d'ailleurs, dans de nombreux pays, d'utiliser de l'eau potable lorsqu'il y a un contact avec un aliment. Elle interdit aussi, dans une grande majorité des cas, la réutilisation ou le recyclage d'eau pour toutes les applications sauf l'irrigation (voir le livrable D 2.2).

Lorsqu'une solution de réutilisation ou de recyclage est identifiée et qu'un traitement a été sélectionné, une analyse de risque doit être effectuée (Lens et al., 2002). Les impacts sur les matériaux et les aliments doivent être établis. Afin que la solution de recyclage puisse être validée par les autorités compétentes et notamment lorsqu'il peut y avoir un contact avec les aliments, une analyse de la qualité des eaux usées sur une période pouvant atteindre 1 an est recommandée en particulier pour les paramètres clés et pour les industries ayant une activité saisonnière. Des essais pilotes sur les effluents réels peuvent aussi être effectués afin d'estimer et de justifier la qualité obtenue après traitement. Des bilans matières et thermiques peuvent être réalisés avec ou sans recyclage via le logiciel ProsimPlus (Prosim, Labège, France) pour étudier et définir les qualités d'eau envisageables après chaque opération. Enfin, une analyse de risque sur la sécurité alimentaire doit être effectuée. Plusieurs méthodes existent : QMRA ou AR (Lens et al., 2002).

Afin d'aider les industries dans leur projet de recyclage, certains pays ont rédigé des guides sur la réutilisation de l'eau pour les industries agroalimentaires. Par exemple, en Australie, le document intitulé «water reuse guideline for food businesses in NSW considering reusing water» rédigé en mai 2008 (Authority, 2008) indique comment l'eau peut être réutilisée et comment démontrer que la réutilisation de l'eau ne présente aucun risque. En Europe, une proposition a été écrite en mai 2018 concernant les exigences minimales en matière de réutilisation de l'eau (European, 2018b).

10 Références

- Apostolidis, N., Hertle, C., & Young, R. (2011). Water Recycling in Australia. *Water*, 3(3), 869-881. doi:10.3390/w3030869
- AQUARAMA. (2014). "Friesland Campina Aalter met la barre plus haut pour affronter l'avenir.". In (pp. 68-69): AQUARAMA 65.
- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse : Issues, Technologies, and Applications: Issues, Technologies, and Applications*: McGraw-hill.
- ASUOE. (2012). *Étude sur l'utilisation optimale de l'eau dans l'industrie agroalimentaire. Study report*.
- Authority, NSW Food. (2008). *Water reuse guideline: For food businesses in NSW considering reusing water*: NSW Food Authority.
- Aydiner, C., Sen, U., Topcu, S., Ekinci, D., Altinay, A. D., Koseoglu-Imer, D. Y., & Keskinler, B. (2014). Techno-economic viability of innovative membrane systems in water and mass recovery from dairy wastewater. *Journal of Membrane Science*, 458, 66-75. doi:10.1016/j.memsci.2014.01.058
- Azbar, N., & Yonar, T. (2004). Comparative evaluation of a laboratory and full-scale treatment alternatives for the vegetable oil refining industry wastewater (VORW). *Process Biochemistry*, 39(7), 869-875. doi:10.1016/s0032-9592(03)00193-6
- Azmi, N. S., Yunos, K. F. M., Baharuddin, A. S., & Dom, Z. M. (2013). The Effect of Operating Parameters on Ultrafiltration and Reverse Osmosis of Palm Oil Mill Effluent for Reclamation and Reuse of Water. *Bioresources*, 8(1), 76-87.
- Balannec, B., Vourch, M., Rabiller-Baudry, M., & Chaufer, B. (2005). Comparative study of different nanofiltration and reverse osmosis membranes for dairy effluent treatment by dead-end filtration. *Separation and Purification Technology*, 42(2), 195-200. doi:10.1016/j.seppur.2004.07.013
- Baskaran, K., Palmowski, L. M., Watson, B. M., & Iwa Programme, Committee. (2003). Wastewater reuse and treatment options for the dairy industry. *3rd World Water Congress: Efficient Water Supply and Water Reuse*, 3(3), 85-91.
- Berland, JM, & Juery, C. (2002). Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. *Document technique FNDAE*(14), 1-71.
- Blandin, G., Verliefde, A. R. D., Comas, J., Rodriguez-Roda, I., & Le-Clech, P. (2016). Efficiently Combining Water Reuse and Desalination through Forward Osmosis-Reverse Osmosis (FO-RO) Hybrids: A Critical Review. *Membranes*, 6(3), 24. doi:10.3390/membranes6030037
- Bloor, J. C., Anderson, G. K., & Willey, A. R. (1995). HIGH-RATE AEROBIC TREATMENT OF BREWERY WASTE-WATER USING THE JET LOOP REACTOR. *Water Research*, 29(5), 1217-1223. doi:10.1016/0043-1354(94)00310-4

- Braeken, L., Van der Bruggen, B., & Vandecasteele, C. (2004). Regeneration of brewery waste water using nanofiltration. *Water Research*, 38(13), 3075-3082. doi:10.1016/j.watres..2004.03.028
- Buelow, M. C., Steenwerth, K., Silva, L. C. R., & Parikh, S. J. (2015). Characterization of Winery Wastewater for Reuse in California. *American Journal of Enology and Viticulture*, 66(3), 302-310. doi:10.5344/ajev.2015.14110
- Casani, S., Rouhany, M., & Knochel, S. (2005). A discussion paper on challenges and limitations to water reuse and hygiene in the food industry. *Water Research*, 39(6), 1134-1146. doi:10.1016/j.watres.2004.12.015
- Cath, T. Y., Childress, A. E., & Elimelech, M. (2006). Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*, 281(1-2), 70-87. doi:10.1016/j.memsci.2006.05.048
- Charcosset, C. (2009). A review of membrane processes and renewable energies for desalination. *Desalination*, 245(1-3), 214-231. doi:10.1016/j.desal.2008.06.020
- Chmiel, H., Mavrov, V., & Belieres, E. (2000). Reuse of vapour condensate from milk processing using nanofiltration. *Filtration & Separation*, 37(3), 24-27.
- Coskun, T., Yildirim, A., Balcik, C., Demir, N. M., & Debik, E. (2013). Performances of Reverse Osmosis Membranes for Treatment of Olive Mill Wastewater. *Clean-Soil Air Water*, 41(5), 463-468. doi:10.1002/clen.201200075
- Daufin, G., René, F., & Aimar, P. (1998). *Séparations par membrane dans les procedes de l'industrie alimentaire*: Lavoisier Tec & Doc.
- Decloux, M., Lameloise, M. L., Brocard, A., Bisson, E., Parmentier, M., & Spiraers, A. (2007). Treatment of acidic wastewater arising from the refining of vegetable oil by crossflow microfiltration at very low transmembrane pressure. *Process Biochemistry*, 42(4), 693-699. doi:10.1016/j.procbio.2006.10.013
- Edition, Fourth. (2011). Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle*, 38(4), 104-108.
- European, Commission. (2018a). *Best Available Technique (BAT) - Reference document in the food, drink and milk industries*.
- European, Commission. (2018b). *Proposal for a regulation of the European parliament and of the council on minimum requirements for water reuse*.
- Fillaudeau, L., Blanpain-Avet, P., & Daufin, G. (2006). Water, wastewater and waste management in brewing industries. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), 463-471. doi:10.1016/j.jclepro.2005.01.002
- Galvão, D. F. (2018). *Membrane Technology and Water Reuse in a Dairy Industry, Technological Approaches for Novel Applications in Dairy Processing*: IntechOpen, chapter 9.
- Gebreyohannes, A. Y., Curcio, E., Poerio, T., Mazzei, R., Di Profio, G., Drioli, E., & Giorno, L. (2015). Treatment of Olive Mill Wastewater by Forward Osmosis. *Separation and Purification Technology*, 147, 292-302. doi:10.1016/j.seppur.2015.04.021
- Goldammer, T. (2008). *The brewers' handbook, 2nd edition* (clifton Apex publishers Ed.).

- Gomez-Lopez, V. M., Lannoo, A. S., Gil, M. I., & Allende, A. (2014). Minimum free chlorine residual level required for the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and trihalomethane generation during dynamic washing of fresh-cut spinach. *Food Control*, *42*, 132-138. doi:10.1016/j.foodcont.2014.01.034
- Hsine, E. A., Benhammou, A., & Pons, M. N. (2005). Water resources management in soft drink industry-water use and wastewater generation. *Environmental Technology*, *26*(12), 1309-1316. doi:10.1080/09593332608618605
- Integrated water management in the chemical industry (E4Water). (2016). *Water Resources and Industry*, *14*, 1-2. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.05.002>
- Ioannou, L. A., Li Puma, G., & Fatta-Kassinos, D. (2015). Treatment of winery wastewater by physicochemical, biological and advanced processes: A review. *Journal of Hazardous Materials*, *286*, 343-368. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.12.043
- Klimes, J., Smith, R., & Kim, J. K. (2008). Handbook of water and energy management in food processing Preface. In J. Klimes, R. Smith, & J. K. Kim (Eds.), *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing* (pp. XXV-XXXVIII). Cambridge: Woodhead Publ Ltd.
- Kyrychuk, I., Zmievskii, Y., & Myronchuk, V. (2014). Treatment of dairy effluent model solutions by nanofiltration and reverse osmosis. *Ukrainian Food Journal*, *3*(2), 281-288.
- Lawson, K. W., & Lloyd, D. R. (1996). Membrane distillation .1. Module design and performance evaluation using vacuum membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, *120*(1), 111-121. doi:10.1016/0376-7388(96)00140-8
- Legube, B. (2015). *Production d'eau potable: Filières et procédés de traitement* (Dunod Ed.).
- Lehto, M., Sipila, I., Alakukku, L., & Kymalainen, H. R. (2014). Water consumption and wastewaters in fresh-cut vegetable production. *Agricultural and Food Science*, *23*(4), 246-256. doi:10.23986/afsci.41306
- Lens, P. N. L., Hulshoff Pol, L. W., Wilderer, P., & Asano, T. (2002). *Water Recycling and Resource Recovery in Industry : analysis, technologies and implementation*. London: IWA.
- Lu, Y. B., Qin, M., Yuan, H. Y., Abu-Reesh, I. M., & He, Z. (2015). When Bioelectrochemical Systems Meet Forward Osmosis: Accomplishing Wastewater Treatment and Reuse through Synergy. *Water*, *7*(1), 38-50. doi:10.3390/w7010038
- Maltos, R. A., Regnery, J., Almaraz, N., Fox, S., Schutter, M., Cath, T. J., . . . Cath, T. Y. (2018). Produced water impact on membrane integrity during extended pilot testing of forward osmosis - reverse osmosis treatment. *Desalination*, *440*, 99-110. doi:10.1016/j.desal.2018.02.029
- Manzocco, L., Ignat, A., Anese, M., Bot, F., Calligaris, S., Valoppi, F., & Nicoli, M. C. (2015). Efficient management of the water resource in the fresh-cut industry: Current status and perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, *46*(2), 286-294. doi:10.1016/j.tifs.2015.09.003
- Mavrov, V., & Belieres, E. (2000). Reduction of water consumption and wastewater quantities in the food industry by water recycling using membrane processes. *Desalination*, *131*(1-3), 75-86. doi:10.1016/S0011-9164(00)90008-0

- Mavrov, V., Chmiel, H., & Belieres, E. (2001). Spent process water desalination and organic removal by membranes for water reuse in the food industry. *Desalination*, 138(1-3), 65-74. doi:10.1016/s0011-9164(01)00246-6
- Mebalds, M., & Hamilton, A. (2002). Quality Wash-Water for Carrots and Other Vegetables. *Final Report for HAL Project. Horticultural Australia Ltd.*
- Meneses, Y. E., Stratton, J., & Flores, R. A. (2017). Water reconditioning and reuse in the food processing industry: Current situation and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 61, 72-79. doi:10.1016/j.tifs.2016.12.008
- Millan-Sango, D., Allende, A., Spiteri, D., Van Impe, J. F., & Valdramidis, V. P. (2017). Treatment of fresh produce water effluents by non-thermal technologies. *Journal of Food Engineering*, 199, 77-81. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.12.006
- Moore, A. (2015). *Potential of water reuse for high strength fruit and vegetable processor wastewater by membrane bioreactor (MBR)*. (Master of applied science in engineering), University of Guelph, Ontario, Canada,
- Muro, C., Riera, F., & Diaz, M. D. (2012). Membrane Separation Process in Wastewater Treatment of Food Industry. In B. Valdez (Ed.), *Food Industrial Processes - Methods and Equipment* (pp. 253-280). Rijeka: Intech Europe.
- Nelson, H., Singh, R., Toledo, R., & Singh, N. (2007). The use of a submerged microfiltration system for regeneration and reuse of wastewater in a fresh-cut vegetable operation. *Separation Science and Technology*, 42(11), 2473-2481. doi:10.1080/01496390701477147
- Pandey, R. A., Sanyal, P. B., Chattopadhyay, N., & Kaul, S. N. (2003). Treatment and reuse of wastes of a vegetable oil refinery. *Resources Conservation and Recycling*, 37(2), 101-117. doi:10.1016/s0921-3449(02)00071-x
- Parsons, S. A., & Jefferson, B. (2006). *Introduction to potable water treatment processes*: Blackwell publishing.
- Rao, A. G., Reddy, T. S. K., Prakash, S. S., Vanajakshi, J., Joseph, J., & Sarma, P. N. (2007). pH regulation of alkaline wastewater with carbon dioxide: A case study of treatment of brewery wastewater in UASB reactor coupled with absorber. *Bioresource Technology*, 98(11), 2131-2136. doi:10.1016/j.biortech.2006.08.011
- Riera, F. A., Suárez, A., & Muro, C. (2013). Nanofiltration of UHT flash cooler condensates from a dairy factory: Characterisation and water reuse potential. *Desalination*, 309, 52-63. doi:10.1016/j.desal.2012.09.016
- Rogener, F., Mavrov, V., & Chmiel, H. (2003). Treatment of Rinsing Water from Bottle Washing Machines by Membrane Filtration with the Objective of Reuse. *Engineering in Life Sciences*, 3(5), 218-225. doi:10.1002/elsc.200390031
- Scott, Keith, & Hughes, Ronald. (2012). *Industrial membrane separation technology*: Springer Science & Business Media.
- Selma, M. V., Allende, A., Lopez-Galvez, F., Conesa, M. A., & Gil, M. I. (2008). Disinfection potential of ozone, ultraviolet-C and their combination in wash water for the fresh-cut vegetable industry. *Food Microbiology*, 25(6), 809-814. doi:10.1016/j.fm.2008.04.005

- Shalan, H. F. (2003). Techno-Economic Assessment Of Biological Treatment And Water Reuse Of Effluent From The Food Industries AU - Defrawy, El. *International Journal of Environmental Studies*, 60(2), 111-122. doi:10.1080/00207230304741
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310. doi:10.1038/nature06599
- Simate, G. S., Cluett, J., Iyuke, S. E., Musapatika, E. T., Ndlovu, S., Walubita, L. F., & Alvarez, A. E. (2011). The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. *Desalination*, 273(2-3), 235-247. doi:10.1016/j.desal.2011.02.035
- Sinha, N. K., Hui, Y. H., Evranuz, E. O., Siddiq, M., & Ahmed, J. (2011). Handbook of Vegetables and Vegetable Processing Preface. In N. K. Sinha (Ed.), *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing* (pp. IX-IX). Oxford: Blackwell Science Publ.
- Song, H. W., Xie, F., Chen, W. W., & Liu, J. R. (2018). FO/MD hybrid system for real dairy wastewater recycling. *Environmental Technology*, 39(18), 2411-2421. doi:10.1080/09593330.2017.1377771
- Sridhar, S., Kale, A., & Khan, A. A. (2002). Reverse osmosis of edible vegetable oil industry effluent. *Journal of Membrane Science*, 205(1-2), 83-90. doi:10.1016/s0376-7388(02)00065-0
- Suàrez, A., Fidalgo, T., & Riera, F. A. (2014). Recovery of dairy industry wastewaters by reverse osmosis. Production of boiler water. *Separation and Purification Technology*, 133, 204-211. doi:10.1016/j.seppur.2014.06.041
- Suàrez, A., & Riera, F. A. (2015). Production of high-quality water by reverse osmosis of milk dairy condensates. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 1340-1349. doi:10.1016/j.jiec.2014.06.004
- Tay, J. H., & Jeyaseelan, S. (1995). MEMBRANE FILTRATION FOR REUSE OF WASTE-WATER FROM BEVERAGE INDUSTRY. *Resources Conservation and Recycling*, 15(1), 33-40. doi:10.1016/0921-3449(95)00012-8
- Teusner, A., Blandin, G., & Le-Clech, P. (2017). Augmenting water supply by combined desalination/water recycling methods: an economic assessment. *Environmental Technology*, 38(3), 257-265. doi:10.1080/09593330.2016.1189972
- Tiwari, S., Behera, C. R., & Srinivasan, B. (2016). Simulation and experimental studies to enhance water reuse and reclamation in India's largest dairy industry. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 605-616. doi:10.1016/j.jece.2015.12.001
- Valta, K., Moustakas, K., Sotiropoulos, A., Malamis, D., & Haralambous, K. J. (2016). Adaptation measures for the food and beverage industry to the impact of climate change on water availability. *Desalination and Water Treatment*, 57(5), 2336-2343. doi:10.1080/19443994.2015.1049407
- Volpin, F., Fons, E., Chekli, L., Kim, J. E., Jang, A., & Shon, H. K. (2018). Hybrid forward osmosis-reverse osmosis for wastewater reuse and seawater desalination: Understanding the optimal feed solution to minimise fouling. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 523-532. doi:10.1016/j.psep.2018.05.006

- Vourch, M., Balannec, B., Chaufer, B., & Dorange, G. (2005). Nanofiltration and reverse osmosis of model process waters from the dairy industry to produce water for reuse. *Desalination*, 172(3), 245-256. doi:10.1016/j.desal.2004.07.038
- Vourch, M., Balannec, B., Chaufer, B., & Dorange, G. (2008). Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse. *Desalination*, 219(1-3), 190-202. doi:10.1016/j.desal.2007.05.013
- Wojdalski, J., Drozd, B., Piechocki, J., Gaworski, M., Zander, Z., & Marjanowski, J. (2013). Determinants of water consumption in the dairy industry. *Polish Journal of Chemical Technology*, 15(2), 61-72. doi:10.2478/pjct-2013-0025
- Zandaryaa, Sarantuyaa. (2014). Water in the post-2015 development agenda and sustainable development goals. *International Hydrological Programme (IHP), UNESCO*.
- Ölmez, H. (2013). Minimizing water consumption in the fresh-cut processing industry. *Stewart Postharvest Review*, 9(1), Article 5. doi:10.2212/spr.2013.1.5