

Les effluents des stations d'épuration : comment les rendre aptes à une seconde vie

Pierre Corsin et Patricia Le Strat, GLS

Les effluents des stations d'épuration subissant des traitements complémentaires influencent le petit cycle de l'eau du fait de leur recyclage vers différents usages, ce qui soulage d'autant les ressources traditionnelles. D'où l'importance des techniques de traitement tertiaire et de finition, qui doivent s'inscrire de plus en plus dans les programmes de gestion durable des ressources en eau.



ABSTRACT

Wastewater treatment plant effluent: how to make them ready for a second life

Effluents from Wastewater Treatment Plants undergoing a complementary treatment influences the little water cycle owing to the fact that their recycling towards various uses relieves the traditional water resources. Whence the importance of the tertiary and polishing treatments, which must more and more included into water resources durable management programs.

Les eaux épurées d'origine urbaine sont classiquement rejetées dans le milieu naturel, principalement dans les cours d'eau, et la mer pour les zones côtières.

Le niveau de qualité atteint pour les eaux épurées, surtout depuis l'avènement des techniques membranaires, doit permettre d'étendre leur réutilisation, moyennant des traitements complémentaires à adopter en fonction des usages envisagés.

La réutilisation des eaux usées s'inscrit dans des programmes de préservation des res-

sources d'eau douce, directement ou indirectement, c'est-à-dire :

- dans le premier cas, les eaux épurées se substituent directement à l'eau de la ressource, par exemple pour les besoins de l'irrigation ;
- dans le deuxième cas, elles sont réinjectées dans l'aquifère, moyennant un traitement plus poussé que dans le premier cas, pour être réutilisées indirectement pour la production d'eau potable notamment.

Le recyclage des eaux épurées influence donc le petit cycle de l'eau, en limitant plus

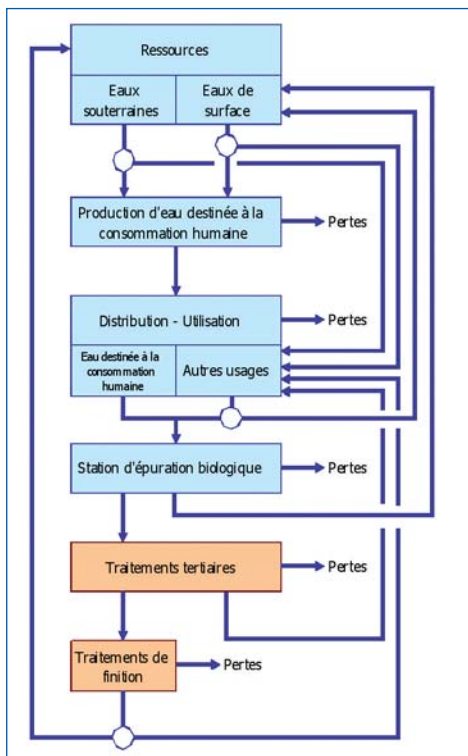


Figure 1: Petit cycle de l'eau incluant les traitements tertiaires et de finition des effluents épurés.

ou moins les rejets dans le milieu naturel (figure 1).

Rappel des modes d'épuration des eaux usées urbaines

Les figures 2 et 3 présentent les schémas simplifiés des filières "eau" classiques et celles utilisant des bioréacteurs à membranes pour l'épuration des eaux usées urbaines.

Caractéristiques des eaux épurées biologiquement

La pollution résiduelle en sortie du clarificateur secondaire est essentiellement constituée par:

- o une pollution particulière, sous forme de floccs ayant échappé à la clarification;
- o une pollution dissoute composée de:
 - sels minéraux dissous n'ayant pas été complètement traités dans la filière biologique: composés azotés, phosphates, autres sels minéraux contenus dans l'influent s'ils n'ont pas été précipités en cours de traitement, sels provenant de certains traitements (déphosphatation chimique),
 - composés organiques dissous, essentiellement non biodégradables.
- o une pollution microbiolo-

gique, présentant un caractère plus ou moins pathogène, constituée par des virus, des bactéries et des parasites (*Giardia*, *Cryptosporidium*, œufs d'*helminthes*). Le tableau 1 donne la concentration en micro-organismes d'une eau épurée biologiquement.

Rappel des normes de rejet

La directive européenne n° 91/271/CEE du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux résiduaires urbaines, transposée en droit français par l'arrêté du 22 décembre 1994, fixe des niveaux de rejet différenciés en fonction du milieu récepteur, et

Tableau 1: Concentrations en micro-organismes dans les eaux épurées

Micro-organismes	Concentration (en nombre par L)
Virus	0 à 5·10 ³
Bactéries:	
- coliformes totaux	10 ⁴ à 10 ⁸
- streptocoques fécaux	10 ² à 10 ⁶
Parasites:	
- <i>Giardia</i>	10 ² à 10 ⁸
- <i>Cryptosporidium</i>	0 à 10 ²
- Œufs d' <i>helminthes</i>	0 à 10 ¹

mique que bactériologique, comme l'indique le tableau 3.

Volume d'eau épurée pouvant être récupéré

Le volume d'eaux usées rejeté par habitant

Tableau 2: Norme de rejet - Directive européenne N° 91/271/CEE du 21 mai 1991

	Capacité en EH	Paramètre	Concentration maximale	Rendement minimum
Zone normale	2.000 – 10.000	DBO ₅ (1)	25 mg·L ⁻¹	70 %
	> 10.000		25 mg·L ⁻¹	80 %
	Toutes	DCO (1)	125 mg·L ⁻¹	75 %
	Toutes		MES (1)	35 mg·L ⁻¹
Zone sensible	10.000 – 100.000	NGL (2)	15 mg·L ⁻¹	70 %
	> 100.000		10 mg·L ⁻¹	70 %
	10.000 – 100.000	PT (2)	2 mg·L ⁻¹	80 %
	> 100.000		1 mg·L ⁻¹	80 %

1. À respecter sur échantillon moyen journalier
2. À respecter en moyenne annuelle, en complément des exigences définies en zone normale

résumés dans le tableau 2.

L'utilisation de bioréacteurs à membranes permet d'obtenir une eau épurée de meilleure qualité que celle exigée par la réglementation, tant au plan physico-chi-

et par jour varie en fonction de l'importance de la population raccordée. Le tableau 4 donne des estimations valables pour la France.

Les valeurs indiquées dans le tableau 4 sont

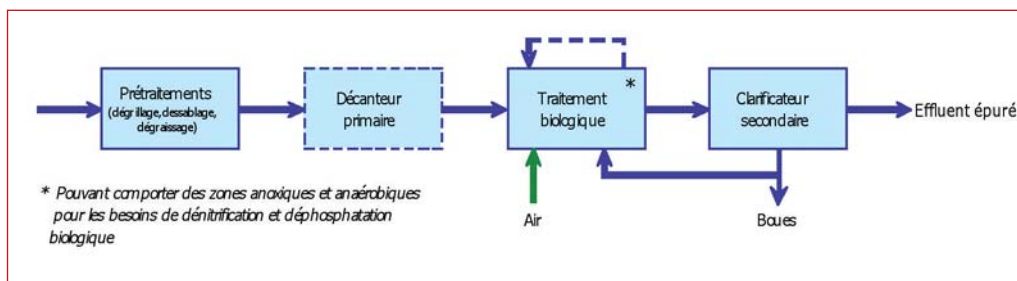


Figure 2: Filière "eau" classique.

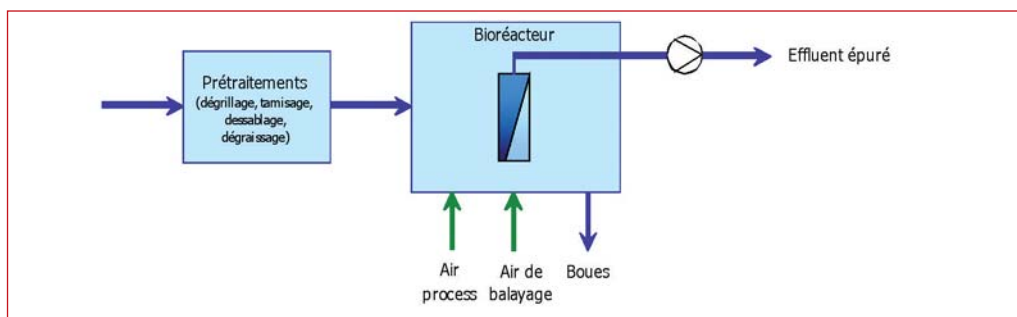


Figure 3: Filière "eau" avec bioréacteur à membranes.

Tableau 3 : Caractéristiques des eaux épurées en sortie d'un bioréacteur à membranes

Paramètre	Rendement	Concentration attendue sur 24h
DBO ₅	99,0 %	10 mg·L ⁻¹
DCO	97,0 %	50 mg·L ⁻¹
MES	99,9 %	2 mg·L ⁻¹
Coliformes totaux	Abattement ≥ 5 log	< 500 U/100 ml
Coliformes fécaux		< 100 U/100 ml

susceptibles de variations importantes en fonction des activités industrielles, du type de réseau (séparatif ou unitaire) et de son état (eaux parasitaires), et de l'apport ou non de produits de curage.

Inventaire des possibilités de réutilisation des eaux épurées

Les eaux épurées peuvent être réutilisées pour des usages :

- agricoles (irrigation) ;
- industriels (circuits de refroidissement, lavages) ;
- collectifs (lavages des voiries et des véhicules municipaux, arrosage des plantations, des parcs et des terrains de sports, alimentation des réseaux incendie).

Ces possibilités de réutilisation des eaux épurées ont déjà trouvé des applications en France, et peuvent donc être envisagées dans tous nouveaux projets. D'autres usages ont été développés de par le monde, qui pourront être envisagés à plus ou moins long terme en France, en fonction de l'évolution des règles sanitaires et des politiques à mener pour économiser l'eau et préserver durablement les ressources d'eau douce.

On peut citer :

- l'alimentation des réserves d'eau (retenues) pour la production d'eau potable ;
- la recharge des aquifères ;
- la construction de barrières hydrauliques souterraines pour empêcher, en zones côtières, l'intrusion d'eau de mer dans des aquifères surexploités.

La recharge maîtrisée des aquifères est une alternative économique, écologique et complémentaire aux retenues et transferts d'eau.

Normes relatives à la réutilisation des eaux résiduaires urbaines

Les eaux résiduaires urbaines (ERU) sont principalement réutilisées pour des besoins d'irrigation et d'arrosage. Pour cela, elles doivent satisfaire à des normes promulguées par certaines organisations dans différents pays. Il est à noter que les pays européens n'ont pas légiféré dans ce domaine. On peut

Tableau 4 : Importances des rejets d'eaux résiduaires urbaines par temps sec, en fonction de la taille de l'agglomération

Type	Rejet moyen (L·j ⁻¹ ·h ⁻¹)
Agglomérations rurales	< 150
Petites villes (3.000 à 20.000 hab.)	200
Grandes agglomérations	300

donc, pour la réutilisation des ERU s'inspirer des quelques normes récapitulées dans le tableau 5.

Par contre l'Union Européenne a développé un programme de 3 ans, intitulé AQUAREC, portant sur les problématiques de réutilisation des eaux usées. Ce programme a débuté en mars 2003.

Les eaux d'irrigation doivent de plus satisfaire à certaines conditions du point de vue de leur composition chimique afin de ne pas contribuer à la modification de la structure des sols et des caractéristiques des aquifères.

Ainsi un apport important :

- de sodium peut rendre l'eau épurée inapte à l'irrigation pour certains sols, ou exiger des traitements complémentaires plus sophistiqués, comme la déminéralisation partielle par osmose inverse ;
- de nitrates peut contaminer par infiltration l'aquifère, à moins que le procédé d'épuration n'ait fait appel à une nitrification – dénitrification.

Traitements à envisager sur les eaux épurées biologiquement

La réutilisation directe des eaux épurées

biologiquement ne peut donc être envisagée sans leur faire subir un ou plusieurs traitements complémentaires afin de limiter au maximum les risques sanitaires au niveau :

- des produits cultivés ;
- de la qualité de l'air aspiré, car les eaux d'irrigation ou d'arrosage peuvent être utilisées en aspersion, ce qui provoque la formation d'aérosols porteurs de germes.

Ces traitements ont aussi pour objectif de protéger les stockages et les réseaux de distribution contre le développement d'une biomasse et le colmatage. Ils font appel essentiellement à des procédés de filtration et de désinfection, complétés ou non par des processus biologiques. Le choix de la filière à adopter dépend, en plus des qualités requises pour la réutilisation de l'eau, des caractéristiques de l'eau épurée. Ainsi des eaux épurées issues d'un bioréacteur à membranes, ne nécessiteront qu'une désinfection complémentaire de sécurité.

Procédés de filtration

La filtration simple a pour but essentiel de diminuer la concentration en matières en suspension (MES). Il s'agit de filtration à travers des matériaux granuleux, comme le

Tableau 5 : Normes relatives à la réutilisation des eaux issues des rejets urbains

Organismes	Irrigation de légumes à consommer crus, arrosage de terrains de sports, golfs	Arrosage de prairies pâturées, parcs	Cultures industrielles, de céréales
OMS (brochure 778)	CF ≤ 1.000 dans 100 mL		Pas de recommandation sauf si groupe exposé, dans ce cas OH ≤ 1 L
État de Californie (USA)	OH ≤ 1 ≥ L CT ≤ 2,2 dans 100 mL Turbidité < 2 NTU Abattement virus > 5 log	OH ≤ 1 L CT ≤ 23 dans 100 mL	CF.0 CF ≤ 200 dans 100 mL
Environnemental Protection Agency (EPA/625/R-92/004)	CF ≤ 1 dans 100 mL NT ≤ 2 mg·L ⁻¹ Cl ₂ ≥ 1 mg·L ⁻¹	CF ≤ 200 dans 100 mL Cl ₂ ≥ 1 mg·L ⁻¹ DBO ₅ ≤ 30 mg·L ⁻¹ MES ≥ 30 mg·L ⁻¹	Cl ₂ ≥ 1 mg·L ⁻¹ DBO ₅ ≥ 30 mg·L ⁻¹
Israël	DBO ₅ ≤ 15 mg·L ⁻¹ MES ≤ 15 mg·L ⁻¹ CT ≤ 2,8 dans 100 mg·L ⁻¹	DBO ₅ ≤ 60 mg·L ⁻¹ MES ≤ 50 mg·L ⁻¹	DBO ₅ ≤ 35 mg·L ⁻¹ MES ≤ 30 mg·L ⁻¹ CT ≤ 250 dans 100 mg·L ⁻¹

CT: coliformes totaux
CF: coliformes fécaux

OH: œufs d'helminthes
NT: azote total

sable et l'antracite mis en œuvre dans des filtres fonctionnant gravitairement ou sous-pression, remplis d'un ou plusieurs média (filtres bi-couches anthracite et sable). Ils permettent également d'abattre une partie de la pollution carbonée rattachée ou non aux particules.

Il peut être associé à la filtration simple un processus biologique. Dans ce cas on parle de filtration biologique faisant appel à des médias granuleux et poreux, comme l'argile expansée, sur laquelle se développe une biomasse qui permet d'améliorer la filtration et l'abattement de la matière organique. Pour le développement bactérien un apport d'oxygène est obligatoire.

Le tableau 6 compare les rendements d'abattement des filtrations simple et biologique. Les valeurs maximums d'abattement sont obtenues dans les conditions suivantes :

- vitesse de filtration: 10 m·h⁻¹
- profondeur du lit: 1,5 m
- taille effective du sable: 1,35 mm
- température de l'eau: 15 °C environ
- oxygène: saturation

Tableau 6 : Comparatif des abattements entre filtration simple et filtration biologique		
Paramètre	Abattement (%)	
	Filtration simple	Filtration biologique
MES	50 à 60	50 à 80
DBO ₅	30 à 40	40 à 60
DCO	20 à 30	30 à 40

L'élimination des œufs d'helminthes par filtration est très efficace du fait de la taille de ces parasites (20 à 140 µm), alors que l'efficacité de la désinfection au chlore est moindre.

La filtration sur média granuleux peut être remplacée par un tamisage (pouvoir de coupure de l'ordre de 40 µm) permettant de retenir la plus grande partie des floes ayant échappé à la clarification secondaire. Cette technique peut être avantageusement associée à une désinfection par rayonnement UV car elle permet d'améliorer la transmittance, et donc l'efficacité du traitement.

Procédés de désinfection

Les procédés de désinfection peuvent être classés en quatre familles :

- la désinfection chimique ;

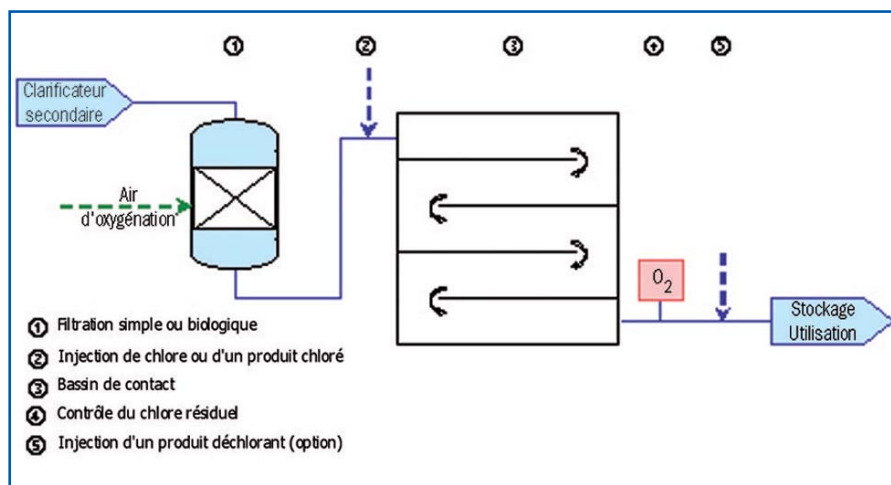


Figure 4 : Schéma de procédé d'une désinfection par injection de chlore ou d'un produit chloré.

- la désinfection physique ;
- la désinfection par lagunage de finition ;
- la désinfection par infiltration-percolation de finition.

Désinfection chimique

La désinfection chimique fait principalement appel à une injection de chlore gazeux ou d'un produit chloré (hypochlorites de sodium ou de calcium).

Il peut être fait également appel au dioxyde de chlore, qui a pour principal avantage de ne pas former de chloramines peu efficaces dans le cycle de la désinfection, comme c'est le cas du chlore qui agit sur l'ammoniaque (NH₄). Il est donc recommandé d'utiliser ce produit, fabriqué in situ, dans le cas de filières d'épuration biologique ne comportant pas d'étape de nitrification-dénitrification.

La chloration est mise en œuvre, pour être efficace, après une filtration. Il doit être ménagé un temps de contact entre le chlore et l'eau, contact se faisant dans un bassin judicieusement chicané pour obtenir un flux piston. À la sortie du bassin il doit subsister un résiduel de chlore qui peut être neutralisé par injection de bisulfite de sodium (NaHSO₃) ou de sulfite (SO₂), en fonction des exigences de l'application envisagée pour l'eau.

Tableau 7 : Dose de chlore à appliquer sur un effluent épuré	
Traitement amont	Dose de chlore à appliquer mg·L ⁻¹
Physico-chimique	3 à 10
Boues activées faible charge	2 à 10
Boues activées + filtration	2 à 5

Le tableau 7 donne les doses de chlore à appliquer en fonction des caractéristiques de la filière amont et après un temps de

contact de 30 minutes afin d'abattre de 3 log le nombre de coliformes totaux.

Parmi les procédés de désinfection chimique il faut également citer :

- l'ozonation, qui a en particulier une capacité d'inactivation des virus très importante. L'ozonation est également plus efficace que la chloration et les UV pour l'inactivation des protozoaires. Pour des effluents secondaires une ozonation à 7-10 mgO₃·L⁻¹ permet d'éliminer 3 à 4 log de coliformes totaux, fécaux ou streptocoques après un temps de contact de 2 minutes. Pour une élimination complète des doses plus importantes, de 40 à 50 mgO₃·L⁻¹, doivent être appliquées, pour par exemple atteindre les exigences californiennes.

- la désinfection par injection de produits à base d'acide peracétique (formulation: 15 % d'acide acétique – 23 % de peroxyde d'oxygène – 15 % d'acide peracétique – 47 % d'eau). Au cours et en fin de traitement l'acide peracétique se décompose en acide acétique et en oxygène, tandis que le peroxyde d'oxygène se décompose en eau et oxygène. Le seul résidu est donc l'acide acétique qui est non toxique et facilement biodégradable, contrairement au chlore dont le résiduel et les sous-produits d'oxydation (THM notamment) sont dangereux pour l'environnement. Pour un dosage de 2 mg d'acide peracétique par litre en traitement tertiaire et un temps de contact inférieur à une heure, le taux d'abattement des coliformes fécaux est de l'ordre de 2 log. Ce procédé peut être associé à une désinfection UV pour parachever le traitement lorsque l'effluent épuré n'a pas été filtré au préalable.

Désinfection physique

Il s'agit de la désinfection par rayonnement ultraviolet basse ou moyenne pression mise en œuvre dans des appareils fonctionnant sous-pression ou dans des canaux à écoule-

ment libre pour les débits importants. Le rayonnement UV à moyenne pression permet de réduire d'un facteur 10 à 20 le nombre de lampes à installer par rapport aux lampes basse pression.

Ce procédé a pour avantages de ne pas utiliser de produits chimiques et de nécessiter un temps de contact très court, mais a pour inconvénient de ne pas avoir d'action rémanente.

Comme pour le chlore, son efficacité dépend de la qualité des eaux épurées biologiquement et des traitements complémentaires tendant à améliorer la transmittance, comme l'indique le tableau 8.

Une dose de traitement de 30 à 45 mJ·cm⁻² est suffisante pour atteindre les abattements annoncés dans le tableau 8. Par contre la destruction totale des micro-organismes exige des doses plus importantes, de l'ordre de 140 mJ·cm⁻².

Lagunes de finition

Une lagune de finition permet, en plus d'un abattement de la DBO₅ (abattement de 50 % environ en 48 heures), et d'un pouvoir de nitrification, de réduire de 3 à 4 unités logarithmiques la concentration bactérienne exprimée en germes-test (coliformes fécaux) pour un temps de séjour de 30 jours environ et pour une température de l'eau de 15 à 20 °C.

Infiltration percolation de finition

L'infiltration percolation utilisée sur des effluents épurés biologiquement est un procédé rustique de désinfection faisant appel à des bassins d'infiltration constitués de sable, rapporté ou non, de différentes granulométries. Les différents bassins sont alimentés alternativement par bâchées. Ils agissent, en

Tableau 8 : Abattement des coliformes fécaux par rayonnement UV en fonction des caractéristiques de l'eau à traiter

Transmittance T (%)	MES (mg·L ⁻¹)	Coliformes fécaux	
		Abattement (log)	Valeur absolue pour 100 ml
35 < T < 45	< 45	2	> 2.000
T > 45	< 30	3	100 à 200
T > 55	< 5	4 à 5	< 100

milieu aérobie du fait du mode discontinu d'alimentation, en tant que filtre et en tant que réacteur biologique.

La charge hydraulique appliquée à chaque bassin peut varier de 0,3 à 0,5 m par jour. L'épaisseur du média est de l'ordre de 3 m.

Les bassins d'infiltration percolation trouvent une application lorsqu'il peut être utilisé le matériau du sol naturel. C'est donc dans des zones côtières ou alluvionnaires

ces zones sablonneuses les quantités de matériaux rapportés seraient trop importantes, rendant peu économique le procédé.

Filières de traitement tertiaire à adopter en fonction de l'utilisation de l'eau traitée

Le tableau 9 donne les filières de traitement tertiaire à adopter en fonction de l'utilisation en arrosage ou en irrigation.

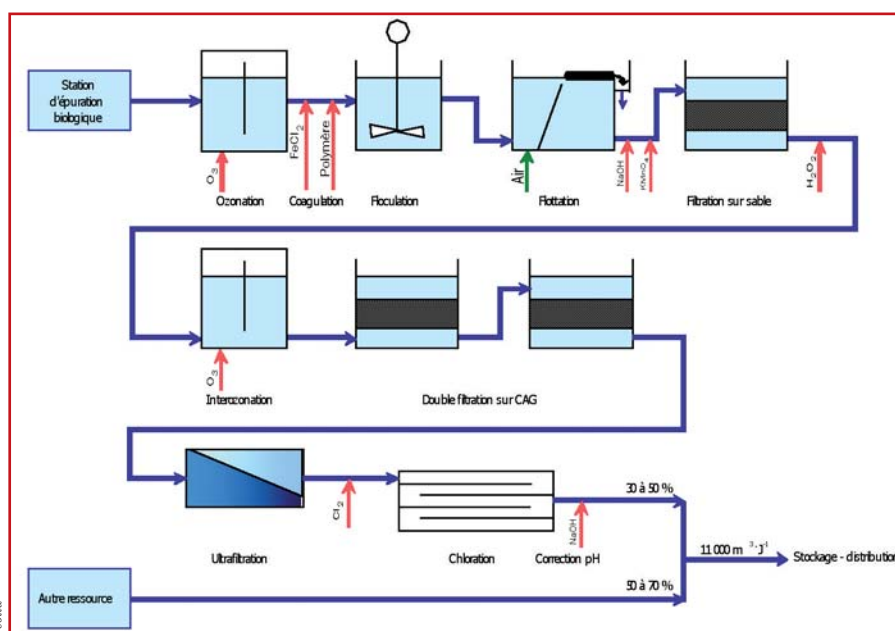


Figure 5 : Filière de traitement des eaux épurées pour une utilisation directe pour la consommation humaine - Usine de Windhoek (Namibie) - Mise en service industrielle en 2002.

que la désinfection finale par infiltration-percolation est intéressante, car en dehors de

Traitements de finition

Pour des applications autres que celles envisagées précédemment (irrigation, arrosage, lavages de voirie et de véhicules) et qui concernent essentiellement la recharge partielle d'aquifères, les traitements à envisager doivent conduire à la production d'une eau ayant des qualités physico-chimiques et bactériologiques proches de celles exigées pour l'eau potable.

L'utilisation directe en tant qu'eau potable d'eaux ayant subi des traitements de finition poussés ne peut être envisagée pour des raisons psychologiques évidentes et pour des raisons sécuritaires du fait du temps imparti à réagir après un dysfonctionnement constaté des installations.

Tableau 9 : Filière de traitement tertiaire en fonction de l'utilisation de l'eau traitée

Utilisation	Traitement			
	Filtration simple ou biologique	Désinfection chimique ou physique	Lagunage de finition	Infiltration percolation
Irrigation de légumes à consommer crus				
Arrosage de terrains de sport, golfs	X	X	-	-
Arrosage de prairie pâturée, parcs	X	X	X	X
Cultures industrielles	-	X	X	X

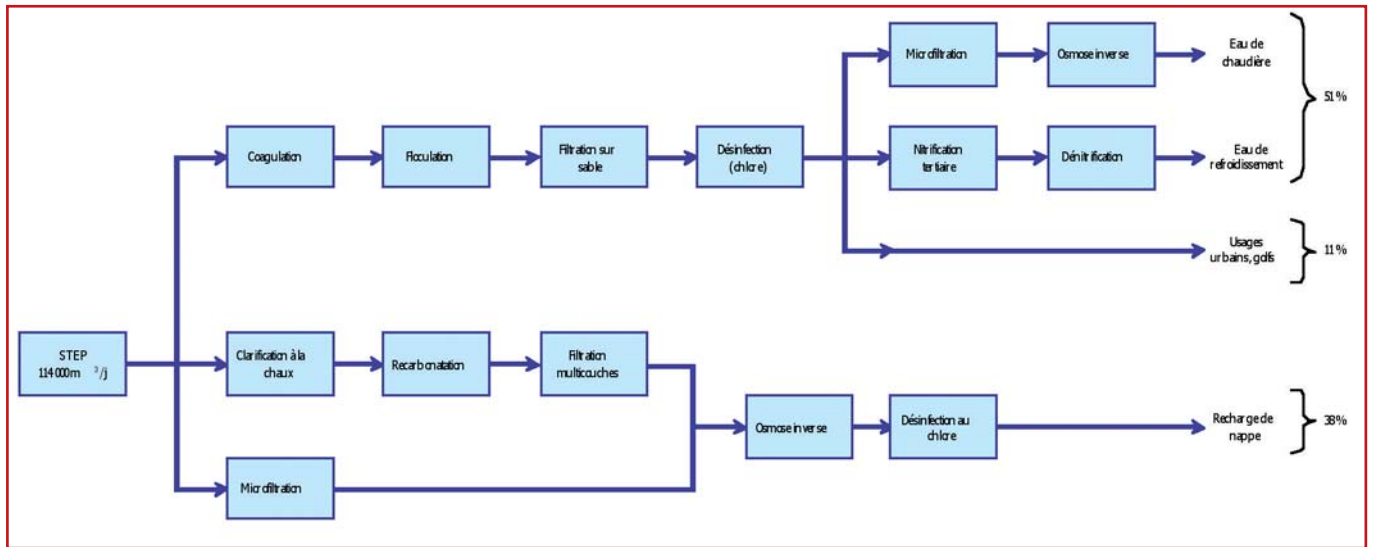


Figure 6 : Filières de traitement de l'usine de West-Basin (Californie).

La seule utilisation directe connue est la nouvelle usine de Windhoed en Namibie, mise en service en 2002. La figure 5 présente la filière retenue.

Après traitement de finition l'introduction des eaux dans les aquifères, où elles séjournent durant de longues périodes (un an et plus), autorise leur réutilisation indirecte. On peut ainsi s'affranchir des deux inconvénients cités ci-dessus.

Les traitements de finition font appel aux

processus unitaires définis dans le tableau 10 après une épuration biologique.

Du fait de la complexité des filières de traitement de finition, conduisant à des coûts élevés tant en investissements qu'en exploitation, la réutilisation des eaux épurées pour la recharge partielle d'aquifères destinés à fournir de l'eau potable ne peut être envisagée que dans des zones arides ou manquant d'eau de façon chronique, comme c'est le cas de la Californie.

À ce sujet il est intéressant de citer le cas de l'usine de réutilisation des eaux épurées biologiquement de West Basin en Californie qui utilise des traitements tertiaires et tous les procédés de finition déjà cités afin d'obtenir des eaux destinées à diverses utilisations (figure 6).

Conclusion

La maîtrise des traitements des effluents épurés, et en particulier celle des techniques membranaires, devrait permettre une évolution rapide de la réglementation afin d'étendre les possibilités de réutilisation des effluents des stations d'épuration.

La diversité des technologies et l'efficacité de chacune d'entre elles, permet également de concevoir des filières adaptées à chaque besoin spécifique dans le but d'atteindre le juste coût économique. ■

Tableau 10 : Traitements de finition

Clarification à la chaux	Déphosphatation – précipitation des métaux lourds – transformation du NH_4 en NH_3 – élimination des microorganismes (à pH 11 abattement de 5 à 6 log des coliformes totaux)
Recarbonatation (injection CO_2)	Correction du pH (↘)
Filtration biologique sur argile expansée	Nitrification partielle
Microfiltration sur membranes	Protection des membranes d'osmose inverse
Osmose inverse	Réduction de la minéralisation