



Stockage des Eaux Usées Traitées en vue de leur réutilisation

Etat de l'art

Rapport final

Claire EME (Irstea)
Pascal MOLLE (Irstea)

Décembre 2013

Document élaboré dans le cadre des ateliers EPNAC :



En partenariat avec :



- **AUTEURS**

Claire EME, Ingénieure d'études (Irstea), claire.eme@irstea.fr

Pascal MOLLE, Ingénieur de recherche (Irstea), pascal.molle@irstea.fr

- **CORRESPONDANTS**

Onema : Céline LACOUR, Chargée de mission sur l'Eau et les aménagements urbains, celine.lacour@onema.fr

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

Agence de l'Eau RMC : Céline LAGARRIGUE, Ingénieur au Département des Interventions et des Actions de Bassin Substances dangereuses et collectivités, Procédés épuratoires, Celine.LAGARRIGUE@eaurmc.fr

Droits d'usage : Accès libre

Niveau géographique : National

Couverture géographique : France

STOCKAGE DES EAUX USEES TRAITEES

- RESUME**

L'ouvrage de stockage pour permettre la Réutilisation des Eaux Usées Traitées facilite la gestion de tels projets. Cette étude s'intéresse à l'unité de stockage dans les projets de REUT et notamment leur impact sur la qualité des Eaux Usées Traitées (EUT).

Sont différenciés les ouvrages de stockage opérationnels qui permettent la régulation journalière des volumes produits pour faciliter leur usage en irrigation, des ouvrages saisonniers qui offrent un moyen de réponse à la demande saisonnière en irrigation.

Pour une gestion opérationnelle des volumes, les réservoirs seront assimilés à des citernes pour les ouvrages fermés ou à des bassins pour un stockage de surface. Leurs faibles temps de séjour, de 1 à 2 jours, ne permettent pas l'affinage du traitement. En théorie, ces bassins ne sont pas sujets au développement algal en raison des cycles fréquents de vidange et recharge. Dans la réalité, les bassins ne sont pas vidangés intégralement afin d'éviter le colmatage des ouvrages en aval. De fait, un contrôle de la qualité par le maintien de teneurs en désinfectant dans les réservoirs va permettre de limiter le développement de conditions anaérobies pour les réservoirs fermés et le développement algal pour les réservoirs ouverts. Des techniques de recirculation, injection d'air ou de brassage peuvent être également utilisées.

Pour une gestion saisonnière des EUT, il existe deux grands types de réservoirs : les réservoirs confinés par stockage dans l'aquifère et les réservoirs de surface (bassin, lac ou retenues). Les longs temps de séjour des EUT dans ces ouvrages permettent un affinage de la qualité. Les techniques de stockage souterraines ne sont que brièvement décrites. Pour les techniques de surface, différents modes de gestion sont proposés en fonction des objectifs de qualité à atteindre. Pour des objectifs très stricts de qualité (teneurs en coliformes inférieures à 200 UFC/100 mL), des modules complémentaires de filtration-désinfection seront nécessaires en sortie de réservoir. Pour des objectifs de qualité plus souples, le réservoir peut permettre d'améliorer la qualité microbiologique des EUT et garantir l'atteinte de la qualité requise dans le respect des dimensionnements préconisés et des agencements proposés.

- MOTS CLES**

Réutilisation des Eaux Usées Traitées, REUT ; recyclage des eaux usées traitées, Eaux usées traitées, stockage, réservoir, bassins de stockage

RECLAIMED WASTEWATER STORAGE

- ABSTRACT**

To address the problem of water scarcity, projects dealing with the reuse of treated waste water (REUSE) are developed across the world. Arid countries facing regular water shortages are the pioneers in REUSE projects. Historically, REUSE projects had begun with the recycling of wastewater into fields for crops irrigation and with the treatment of wastewater by using soil infiltration.

Since then, the identification of health risks related to the pathogens transfer from wastewater to crops and then to human through food, leads to a better hazard management in the project. Even if health risks are known since almost fifty years, some countries still practice irrigation by raw wastewater.

REUSE projects include wastewater treatment efficiencies, disinfection, reclaimed water distribution system, pump stations and storage. A water quality control must be managed from wastewater treatment devices to use points into fields to agricultural reuse projects. Different aspects should be considered in REUSE projects in order to deliver conform reclaimed water corresponding to the different possible uses.

Treated wastewater is produced daily from wastewater treatment plants (WWTP) whereas water demand for crops irrigation is mainly seasonal. The regulation of treated wastewater volumes requires the implantation of storage facilities between WWTP and the use point. Various storage facilities have been described from operational storage to regulate daily flows to seasonal reservoirs to manage monthly or annual volumes. In order to deliver suitable treated wastewater to the use point, specific management is required depending of the quality objectives and the environmental conditions of the location.

Operational storage includes closed facilities and ponds. Due to a low resident time, those units require residual chlorine to prevent anaerobic conditions and control development and algal bloom. Other techniques like artificial aeration, mixing are presented to prevent quality degradation.

Seasonal storage includes aquifer recharge or storage into large and deep surface reservoirs. Aquifer recharge is briefly described whereas surface storage is detailed. Seasonal surface storage requires fine management and design depending mainly on environmental conditions, storage characteristics, operational mode, inlet and outlet quality and requirements.

- KEY WORDS**

REUSE, recycled wastewater, treated wastewater, reclaimed wastewater, storage, reservoir, basin, stabilization reservoir, seasonal storage

• SYNTHÈSE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

CONTEXTE GENERAL

Face aux pressions croissantes sur la ressource en eau, les projets de Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) dans le secteur agricole se développent et proposent une alternative aux prélèvements traditionnels dans le milieu en recyclant les Eaux Usées Traitées (EUT) en sortie de Station de Traitement des Eaux Usées (STEU).

Associés à ces projets, des équipements annexes sont nécessaires pour assurer la distribution en quantité mais aussi en qualité des EUT aux irrigants. Pour réguler les débits d'EUT produits quotidiennement par la STEU et les adapter à la demande, des réservoirs de stockage d'EUT peuvent être nécessaires et font ainsi partie intégrante des projets de REUT. Ces réservoirs peuvent influencer la qualité des EUT entre la sortie de la STEU et le point d'usage. Leur impact sur la qualité des EUT est mal connu.

Cette problématique questionne la **sphère scientifique** : le stockage des eaux usées traitées engage le concours de plusieurs domaines : techniques de stockage d'eau de pluie, souterraine ou potable, assainissement, limnologie, agronomie, microbiologie....

Par ailleurs, la régulation des rejets de STEU a un impact sur le milieu récepteur tant en qualité qu'en quantité. Ces changements sont à prendre en compte dans les projets de REUT dans un contexte de **gestion intégrée de la ressource en eau**.

Au **niveau réglementaire** national, la REUT est encadrée en France par *l'Arrêté du 2 août 2010*, actuellement en révision. Le stockage n'est que très partiellement pris en compte par ce texte. La réglementation devrait-elle considérer avec plus d'intention ces ouvrages ? De quelle manière ?

Les objectifs de cette étude sont :

- de dresser un répertoire des techniques de stockage actuellement développées,
- d'identifier les enjeux auxquels sont soumis ces ouvrages,
- d'appréhender l'évolution de la qualité des EUT au cours de l'étape de stockage,
- de proposer des outils pour faciliter les choix techniques pour des projets de REUT.

Cette étude répond à une demande des services de l'Etat via la convention de recherche Onema/Irstea : action 50 : Performances des systèmes d'assainissement collectifs pour préparer l'évolution du cadre réglementaire relatif à la REUT.

METHODES

Pour encadrer la thématique du stockage des EUT, ont été considérées différentes sources d'informations :

- littérature internationale (ouvrages),
- articles scientifiques,

- réglementation (OMS, US EPA, Europe et Etat français),
- rapports nationaux (Anses, Afsset, Afssa, livrables Onema, Irstea,...).

En parallèle, les SATESE des départements français ont été consultés pour recenser les installations et/ou projets de REUT sur le territoire national.

L'enjeu majoritaire de cette étude est de transposer les acquis des pays ayant une expérience dans la REUT, pays le plus souvent soumis à des stress hydriques importants dont le contexte, les enjeux et le cadrage réglementaire sont différents du contexte français.

PRINCIPAUX ACQUIS TRANSFERABLES

Les réservoirs de stockage permettent de réguler les EUT en sortie de station de traitement pour répondre aux besoins en irrigation. Ils peuvent également offrir un moyen de contrôle des rejets dans le milieu récepteur (notamment dans le cas de la présence de zones sensibles ou de zones de baignade).

On distingue 4 familles de stockage des EUT :

- Les réservoirs saisonniers à surface libre,
- Les réservoirs saisonniers confinés,
- Les réservoirs opérationnels à surface libre,
- Les réservoirs opérationnels fermés.

Le stockage saisonnier implique des longs temps de séjour dans les réservoirs et permet une régulation intersaisonnière de larges volumes d'EUT. Les réservoirs opérationnels permettent une régulation journalière des EUT produites et offrent un outil de contrôle de la qualité des EUT plus fin.

Les réservoirs saisonniers à surface libre sont principalement des équivalents de lacs, retenues considérés comme hypertrophiques par la présence de nutriments et/ou matière organique en excès par rapport aux concentrations naturelles. Pour limiter le phénomène d'évaporation et d'augmentation de la salinité des EUT, ces réservoirs ont généralement une profondeur importante comprise entre 3 et 8 mètres en moyenne. Ils sont soumis à des effets saisonniers et souvent stratifiés. Les longs temps de séjour de ces unités permettent l'affinage du traitement bactériologique. Selon l'agencement des réservoirs et leur mode de gestion, un abattement de 5 unités log peut être atteint. Dans le cas de projets soumis à des contraintes réglementaires strictes sur le plan sanitaire, il peut être nécessaire de procéder à des traitements de désinfection supplémentaires. Avec des contraintes moins strictes (qui dépendent des usages), les réservoirs saisonniers à surface libre permettent d'atteindre les niveaux de qualité requis mais nécessitent de respecter des règles de dimensionnement et de gestion.

Les réservoirs saisonniers confinés impliquent le stockage des EUT dans les aquifères communément connu sous le nom de « recharge d'aquifère ». Deux techniques sont possibles soit par injection directe soit par infiltration-percolation et requièrent des conditions hydrogéologiques spécifiques. Seuls des renvois bibliographiques sont proposés dans ce rapport.

Le stockage opérationnel à surface libre par l'intermédiaire de bassins se distingue des réservoirs saisonniers à surface libre par des temps de séjour très courts de l'ordre de 2 à 3 jours. Ces faibles temps de séjour ne permettent pas en théorie l'implantation ou le développement algal. Mais certains retours d'expériences témoignent de problèmes associés à la gestion des odeurs et des algues sur ces systèmes. Si le dimensionnement préconisé et les recommandations d'exploitation sont respectés, une gestion de ces unités sans recours à des techniques d'aération, brassage ou désinfection est possible. Mais l'atteinte des objectifs de qualité les plus stricts (2,2 UFC/100mL pour les coliformes fécaux et 2NTU pour la turbidité pour le cas des Etats-Unis et Chypre par exemple) n'est pas envisageable. Des risques de contaminations fécales par la présence d'oiseaux sur ces bassins sont identifiés. Dans ce cas, notamment pour l'arrosage des golfs, des unités complémentaires de filtration-désinfection peuvent être requises.

Le stockage opérationnel fermé en citerne ou réservoirs permet le stockage des EUT à l'abri de la lumière. Des risques de développement de conditions anaérobies et donc d'odeurs sont identifiés et peuvent nécessiter la mise en place d'aérateurs, brasseurs et désinfectant selon les températures et temps de séjour. Ils permettent cependant d'éviter le développement algal et les risques de contaminations fécales.

La problématique du stockage des EUT est complexe. Cette étude permet d'identifier les contraintes techniques associées à chaque type de stockage. Elle ne prétend pas répondre à la problématique de stockage dans sa globalité, ni d'émettre des règles de dimensionnement mais offre des pistes de recherche pour approfondir cette thématique.

L'enquête Irstea-SATESE a montré que des réservoirs de stockage des EUT sont actuellement en opération sur le territoire français. 30% des réservoirs renseignés présentent des développements algaux et du colmatage en aval, 35% présentent des difficultés dans l'atteinte des objectifs microbiologiques et 10% des problèmes de rupture de bache d'étanchéité. Ces résultats montrent l'enjeu d'émettre des bases de dimensionnement et d'exploitation de ces ouvrages. Malheureusement, seules de rares données de suivi nous ont été transmises et n'ont pas permis une extrapolation des données. Des suivis sur site sont préconisés ainsi que la collecte des données de suivi.

Dans une perspective de développement de ces outils de stockage, de nombreuses problématiques peuvent être associées et notamment la gestion des ouvrages en aval (réseau de distribution et matériel d'irrigation). Un équilibre entre l'adaptation de ce matériel et les objectifs de traitement doit être recherché. Par ailleurs, d'autres problématiques émergentes sont à considérer : le développement de cyanobactéries avec la libération possible d'endotoxines, la valorisation des algues, le risque de développement de moustiques....

Mais l'ensemble de ces questionnements doivent incontestablement s'inscrire dans une logique économique. Un large panel d'outils techniques est disponible pour le traitement des eaux usées, la désinfection, l'aération ou encore la filtration. Le choix entre tous ces outils doit répondre aux objectifs de rentabilité en intégrant les investissements et les coûts d'exploitation de ces systèmes, les retombées économiques de l'irrigation agricole et/ou du contrôle du rejet. En complément de ces considérations, il paraît important d'intégrer le bénéfice du non-rejet sur le milieu récepteur tout comme le risque de dégradation des parcelles agricoles en cas de défaillance des systèmes. Face à ces multiples facteurs d'influence sur les choix techniques, l'ACV peut constituer un outil d'aide à la décision important.

POUR EN SAVOIR PLUS

De nombreux ouvrages sont cités dans ce document, distribués en fonction des thématiques.

Sur la base Irstea de Lyon, seul le document « Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées traitées (REUT) » (Boutin *et al.*, 2009) aborde la problématique de la REUT.

L'équipe d'Irstea d'Aix en Provence travaille spécifiquement sur la problématique de colmatage du réseau de distribution et asperseurs dans le cadre de la REUT (UMR GEAU- Plateau Lermi AIX).

SOMMAIRE

Introduction.....	10
1. Le stockage d'Eaux Usées Traitées	12
1.1. Définitions	12
1.1.1. Notion de stockage	12
1.1.2. Typologie.....	13
1.2. Intérêts du stockage des EUT pour la valorisation agricole	14
1.2.1. Favoriser le recyclage des EUT : régulation des volumes	14
1.2.2. Protéger le milieu : contrôle des rejets et maintien de la qualité.....	14
1.3. Types de réservoirs	15
1.3.1. Les réservoirs saisonniers.....	16
1.3.2. Les réservoirs opérationnels	17
1.4. Principaux mécanismes présents dans les réservoirs	17
1.4.1. Principales réactions dans les réservoirs	17
1.4.2. Effet saisonnier.....	20
2. Objectifs de dimensionnement et variabilité des réservoirs.....	23
2.1. Considérations quantitatives : gérer les volumes	23
2.1.1. Satisfaire la demande	23
2.1.2. Hydraulique du réservoir	24
2.1.3. Ordres de grandeur	25
2.2. Considérations qualitatives : aspects réglementaires	26
2.2.1. Contraintes réglementaires pour l'irrigation agricole et espaces verts .	26
2.2.2. Cas de la France.....	29
2.3. Les réservoirs de stockage : variabilité du milieu	31
2.3.1. Evaluation de la qualité des EUT en entrée de stockage	31
2.3.2. Variabilité du milieu et potentiel de désinfection.....	32
2.3.3. Pratiques actuelles en France : enquête Irstea-SATESE 2011	33
3. Les réservoirs saisonniers à surface libre.....	37
3.1. Caractéristiques des réservoirs saisonniers ouverts	37
3.1.1. Historique et développement.....	37
3.1.2. Agencement des réservoirs	38
3.1.3. Dimensionnement et évolution.....	39
3.2. Hydraulique des réservoirs saisonniers ouverts.....	39
3.2.1. Les réservoirs de stockage à alimentation continue.....	39
3.2.2. Affinage de la qualité par séquençage de l'alimentation	39
3.3. Modélisation	39
3.3.1. Modèles simples.....	39
3.3.2. Modèles numériques.....	39
3.3.3. Développement.....	39
3.4. Conclusions	39
4. Les réservoirs opérationnels : une réserve de régulation.....	39
4.1. Les réservoirs opérationnels à surface libre	39
4.1.1. Contrôle de la qualité	39
4.1.2. Gestion des réservoirs opérationnels.....	39
4.2. Réservoirs opérationnels fermés : les citernes	39
4.2.1. Cinétique et stabilisation des EUT	39
4.2.2. Entretien et maintenance.....	39

4.3. Conclusions	39
5. Perspectives de recherches.....	39
6. Conclusion.....	39
Glossaire	39
Sigles & Abréviations.....	39
Bibliographie.....	39
Table des illustrations.....	39
Annexes.....	39
Annexe 1 : Contexte de la réutilisation d'EUT en Europe (source Aquarec).....	39
Annexe 2 : Types d'usage associés aux niveaux de qualité définis par l'Arrêté du 2 août 2010 pour la REUT.....	39
Annexe 3 : Traitement tertiaire : Techniques de filtration	39
Annexe 4 : Enquête Irstea-SATESE 2011	39

Introduction

L'augmentation des usages et prélèvements de la ressource en eau conjuguée aux effets du changement climatique amplifient les risques de pénuries en eau. De nouvelles alternatives sont considérées : collecte des eaux de pluie, recyclage des eaux usées, désalinisation, ...

Pour le cas de recyclage des eaux usées traitées (EUT), cette pratique fut traditionnellement associée à l'agriculture par le potentiel fertilisant des eaux usées et les besoins importants en eau de ce secteur. Initialement par épandage d'eaux usées brutes dans les champs, la valorisation agricole des EUT est actuellement encadrée pour limiter le risque sanitaire associé à cet usage.

Comme tout projet de distribution d'une ressource, le recyclage des EUT est concerné par l'ensemble des équipements associés au transport, au stockage et à la distribution en vue d'assurer la qualité requise au point d'usage. Ces équipements représentent des investissements importants à considérer dans les objectifs économiques des projets.

La notion de stockage est un concept où l'on considère un volume dans un contenant avec des limites finies (cuve, citerne, bassin). Une vision plus récente du stockage permet de considérer le contenant comme un élément dynamique. Ainsi, le rejet d'EUT dans un cours d'eau peut être une forme de stockage temporaire des EUT dans les eaux de surface avant le prélèvement plus en aval d'eau pour l'irrigation. Cette distinction ne fait pas l'objet de ce rapport, mais dans une démarche de Gestion Intégrée de la Ressource en Eau (GIRE), on assiste à un changement progressif de référentiel vis à vis de nos schémas conceptuels traditionnels ; notamment dans les pays les plus déficitaires en eau.

L'expérience internationale témoigne en grande partie de projets de valorisation agricole des EUT dans des contextes faisant face à des pénuries en eau. Ces régions sont plus sensibles à l'impact des rejets dans les milieux de surface et la demande en eau d'irrigation plus importante. Dans les régions où la ressource en eau est abondante, le recyclage des EUT s'inscrit dans un contexte de protection des milieux sensibles au rejet et de valorisation des nutriments présents dans les EUT. Cependant même pour ces régions, des restrictions saisonnières peuvent être mises en place pour faire face à l'augmentation des prélèvements dans le milieu et à l'impact des rejets lors des périodes d'étiage des cours d'eau.

Les premières expériences de stockage des EUT ont été conduites dans les années 70 en Israël avec la mise en place de large réservoirs à surface libre. Ces unités de stockage, implantées en majorité en aval de lagune de traitement, sont estimées à plus de 200 sur le territoire israélien représentant un taux de recyclage des EUT de plus 65% en 2000 (E. Friedler, 2001; Juanicó and Dor, 1999). Suite à ces expériences, de nombreux réservoirs de stockage des EUT ont été construits dans le pourtour méditerranéen, aux Etats-Unis et en Australie.

L'objet de cette étude est de considérer la problématique du stockage des EUT en vue de leur valorisation en agriculture et espaces verts.

Dans ce contexte, les réservoirs de stockage doivent ainsi répondre à deux objectifs principaux :

- **QUANTITATIF** en assurant la disponibilité des EUT en volume face à la demande en irrigation,
- **QUALITATIF** en assurant la qualité des EUT face aux contraintes de qualité liées à l'usage.

Un des enjeux de ce travail est de déterminer la capacité des ouvrages de stockage à maintenir sinon à améliorer la qualité des EUT tout en garantissant leur disponibilité en volume pour une valorisation

effective en aval. Le risque principal de ces ouvrages est de détériorer la qualité des effluents traités avant leur réutilisation.

La collaboration de différents domaines de recherche est nécessaire pour appréhender ce sujet : l'épuration des eaux usées, la microbiologie, les techniques de stockage traditionnelles et l'agronomie. Cette multidisciplinarité implique l'intégration de différents paramètres pour caractériser la qualité de l'eau : paramètres utilisés en épuration vs paramètres utilisés pour l'alimentation en eau potable (AEP) et paramètres agronomiques.

Dans un premier temps, seront présentés les réservoirs de stockage, leur intérêt et les différentes formes de stockage utilisées pour la REUT agricole. Puis une brève présentation des contraintes de qualité est proposée et va permettre l'évaluation de la qualité des EUT en entrée de réservoir.

Dans un second temps, seront détaillées l'ensemble des techniques de stockage des EUT qu'elles soient de surface pour différents temps de séjour ou à l'abri de la lumière. Chacun de ces modes de stockage répond à des contraintes spécifiques ; leur dimensionnement est principalement basé sur les retours de terrain. Pourtant face aux pressions portées sur la REUT, des garanties d'atteinte des objectifs sanitaires sont nécessaires mais de nombreuses interrogations restent en suspens et seront énumérées en conclusion.

Pour faciliter la lecture de ce rapport, le terme d'EUT utilisé ci-après désigne exclusivement les Eaux Usées Traitées **d'origine domestique**.

1. Le stockage d'Eaux Usées Traitées

1.1. Définitions

1.1.1. Notion de stockage

Les programmes de Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) s'attachent à valoriser les Eaux Usées Traitées (EUT) en sortie de station d'épuration et intègrent la mise en place d'équipements spécifiques :

- un traitement adapté aux objectifs de qualité pour le recyclage des EUT,
- un réseau de distribution des EUT,
- des stations de pompage si nécessaire,
- des ouvrages de stockage si nécessaire,
- des unités intermédiaires et complémentaires de filtration ou désinfection si nécessaire.

En l'absence d'unité de stockage, on parle de **réutilisation directe** des EUT (Figure 1). Un de ces inconvénients est l'absence de bassin tampon pour réguler les volumes des EUT à valoriser notamment en cas de dysfonctionnements du procédé d'épuration en amont. Le volume d'EUT disponible sera au maximum égal au volume d'EUT produit quotidiennement par la station de traitement. Dans le cas de projets de réutilisation agricole des EUT, une régulation journalière voire saisonnière des flux d'EUT produites est nécessaire.

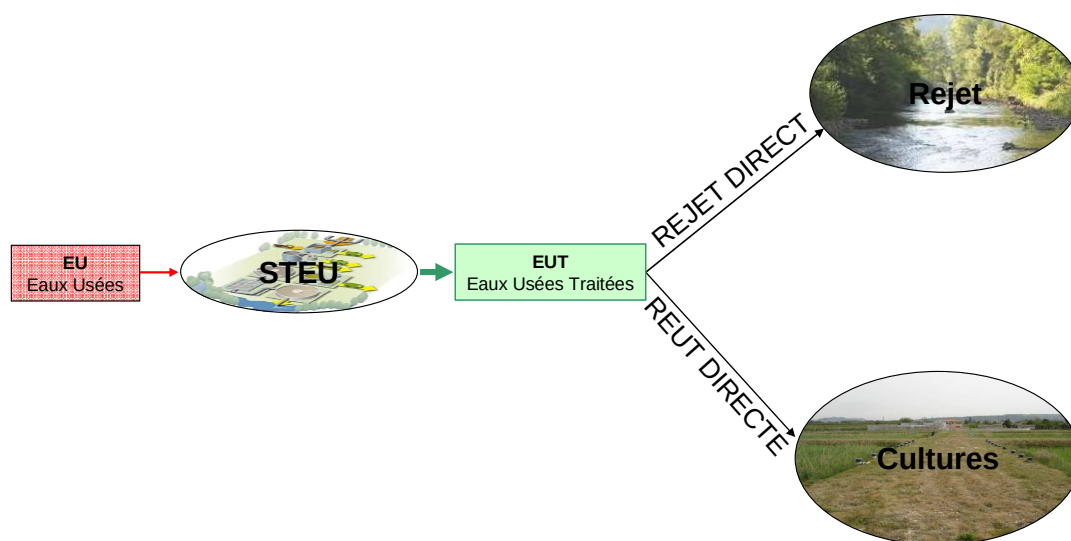


Figure 1 : REUT sans ouvrage de stockage, schéma de principe

La mise en place d'une ou plusieurs unités de stockage des EUT permet la régulation du volume et de la qualité des EUT en sortie de STEU, la **réutilisation des EUT** est dite **indirecte** (Figure 2). La présence de l'unité de stockage offre un moyen de contrôle du volume rejeté et doit permettre :

- une gestion **quantitative** de la ressource,
- le maintien de la **qualité** des EUT,
- d'assurer une viabilité **économique** du projet.

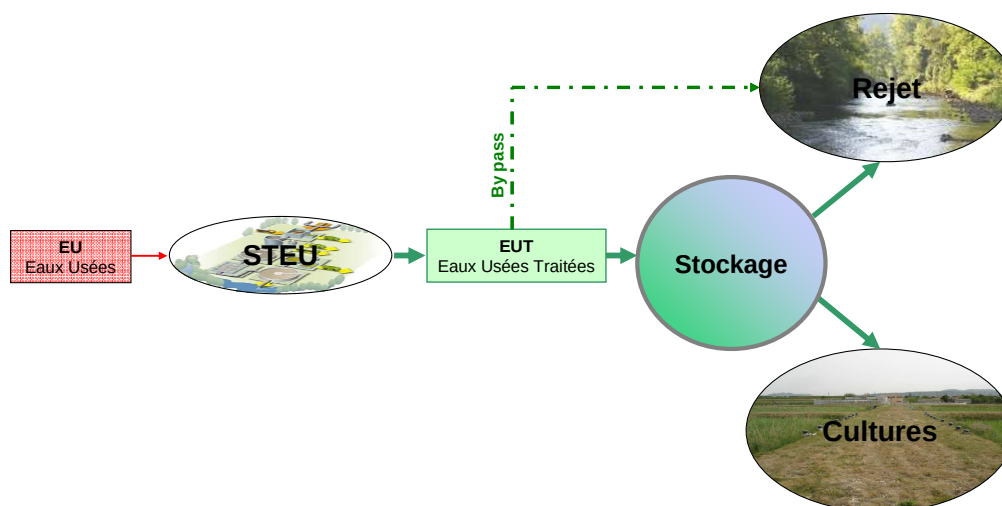


Figure 2 : REUT avec ouvrage de stockage, schéma de principe

Les réservoirs de stockage peuvent ou non, être intégrés dans le périmètre de la station de traitement. Dans le cas où le réservoir est indépendant de la station, ce dernier nécessitera un équipement de contrôle de l'accès par des protections, les effluents stockés n'étant pas conformes à un accès public (risque de baignade ou de pêche notamment).

1.1.2. Typologie

Selon la taille, le rôle de ces bassins, mais aussi selon les auteurs, les réservoirs de stockage des EUT sont appelés **citerne**, **bassin**, **lagune** ou **réservoir**.

Les réservoirs de stockage des EUT en vue d'une réutilisation en agriculture sont présentés dans la littérature sous différents termes :

- réservoir de stabilisation (*stabilization reservoir*),
- lagune de stockage (*storage lagoons*),
- réservoir opérationnel pour l'irrigation (*operationnal irrigation reservoir*),
- réservoir de stockage saisonnier (*seasonnal storage*),
- réservoir à rejet contrôlé (*controlled discharge pond*),
- réservoir hypertrophique (*hypertreuphic reservoir*),
- réservoir agricole (*agricultural reservoir* ou *farm pond*),
- réservoir de stockage profond (*deep effluent storage reservoir*),
- bassin hypertrophique (*hypertrophic reservoir*).

Ces unités peuvent également permettre un stockage mixte des EUT et Eaux Pluviales (EP) ou eaux de forage.

1.2. Intérêts du stockage des EUT pour la valorisation agricole

Le stockage des EUT a deux intérêts principaux (Figure 3) :

- le **RECYCLAGE** par régulation des volumes d'EUT produits pour les adapter aux besoins des cultures,
- la **PROTECTION** par un contrôle des rejets vers le milieu récepteur et par contrôle de la qualité des EUT avant leur application sur les sols cultivés.

La combinaison de ces deux objectifs est courante et permet de favoriser l'intégration de ces projets.

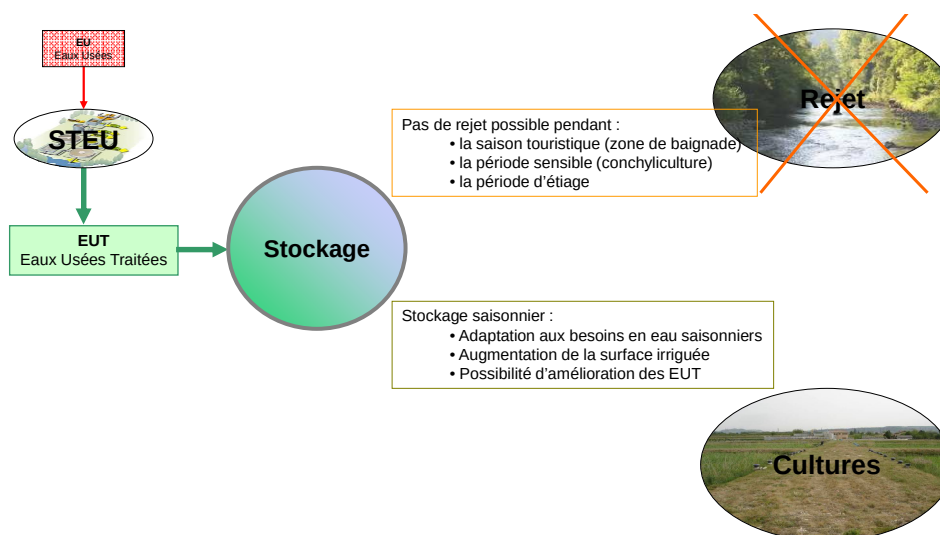


Figure 3 : Intérêts du stockage des EUT

1.2.1. Favoriser le recyclage des EUT : régulation des volumes

Dans la majorité des projets de REUT, le stockage des EUT permet une gestion plus souple des effluents traités en vue d'optimiser leur réutilisation :

- en assurant une réserve tampon pour compenser les écarts entre production et consommation,
- en constituant une réserve intersaisonnière,
- en permettant la gestion de la pression dans le réseau de distribution.

Dans le cas d'une valorisation agricole où les volumes d'EUT produits quotidiennement ne sont pas suffisants pour répondre à la demande en irrigation, le réservoir de stockage permet majoritairement une **régulation saisonnière** de ces volumes au bénéfice des irrigants.

Indirectement, le recyclage des EUT permet une préservation des ressources traditionnelles (eaux souterraines, eaux de surface) en limitant les prélèvements sur le milieu.

1.2.2. Protéger le milieu : contrôle des rejets et maintien de la qualité

La limitation temporaire ou régulière du rejet de la STEU a pour effet de diminuer le débit des cours d'eau. Selon les situations locales, cet effet pourra être bénéfique en limitant l'impact des EUT sur la qualité du **milieu récepteur** ou négatif en limitant l'effet de recharge du milieu récepteur. Une prise en

compte du débit minimal du cours d'eau considéré est ainsi nécessaire pour évaluer la faisabilité d'un projet de REUT.

Les exemples ci-dessous illustrent l'intérêt du réservoir de stockage d'EUT pour la protection du milieu récepteur et des activités associées :

- **les zones de baignade** : stockage des EUT pendant la saison estivale pour protéger les zones de baignade de contaminations éventuelles. A la fin de la saison touristique, les EUT sont rejetées dans le milieu après un stockage de plusieurs mois qui peut permettre d'affiner son traitement ou une valorisation agricole ;
- **les zones sensibles** : stockage des EUT pendant la période d'étiage du cours d'eau. Les EUT, après stockage, sont rejetées dans le milieu lors des périodes de crues dont l'effet de dilution contribuera à limiter l'impact du rejet ou sont valorisées en agriculture ;
- **les situations exceptionnelles** : rivières gelées, inondations, catastrophes naturelles... L'ouvrage de stockage permet une régulation temporaire des effluents en faveur du milieu récepteur ;
- **cas de défaillance du système de traitement** : le stockage permet un lissage de la qualité des EUT par dilution en cas de dysfonctionnement de la station de traitement en amont.

1.3. Types de réservoirs

De quelques dizaines de mètres cube, pour le stockage tampon d'effluents d'une petite installation, à plus de quelques millions de mètres cube, pour les plus grands réservoirs, la REUT est un mode d'approvisionnement en eau non négligeable. Les techniques de stockage sont distinguées en deux grandes familles (Figure 4) :

- les réservoirs opérationnels à faible temps de séjour (horaire ou journalier),
- les réservoirs intersaisonniers pour un stockage long (journalier, mensuel ou annuel).

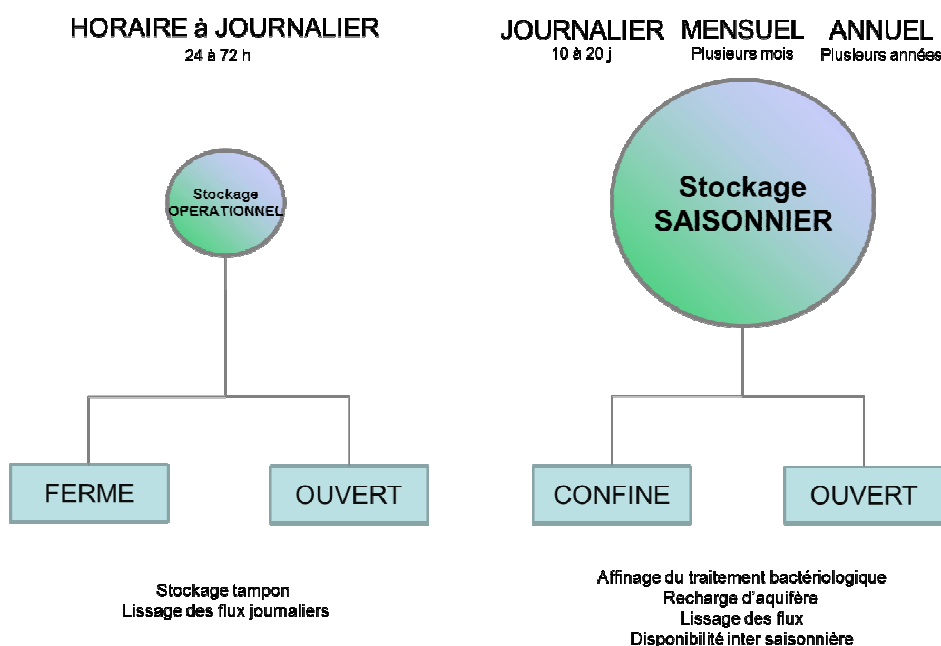


Figure 4 : Type de réservoirs selon leur temps de séjour

1.3.1. Les réservoirs saisonniers

Pour répondre à des besoins saisonniers, une régulation mensuelle voire annuelle des volumes d'EUT est nécessaire. Pour les régions véritablement déficitaires en ressource en eau, le stockage intersaisonnier est incontournable. Il permet la collecte des EUT en période hivernale, pour les recycler lors de la saison d'irrigation, le plus souvent en été. Le volume du stockage est alors équivalent à plusieurs mois de consommation.

Il existe deux formes principales de stockage saisonnier des EUT :

- les réservoirs de surface,
- la recharge de nappe.

Le choix entre ces deux techniques dépend du contexte hydrogéologique de la zone considérée, de la qualité du traitement en amont et du volume à stocker. La recharge de nappe exige un contexte hydrogéologique particulier (absence de prélèvement pour l'eau potable, présence d'un aquifère exploitable, ...). En revanche, l'installation d'un réservoir de surface est moins contraignante mais demande une disponibilité foncière importante.

Les réservoirs saisonniers de surface sont les plus utilisés pour le stockage des EUT et seront détaillés dans ce rapport.

La recharge d'aquifère intègre des techniques spécifiques de gestion des eaux souterraines et ne concerne pas que les EUT mais aussi les eaux pluviales, eaux de rivière voire hydrocarbures.... Cette technique ne sera pas développée dans ce rapport mais quelques références bibliographiques clés sont citées ci-après pour approfondir ce sujet.

La recharge d'aquifère s'effectue soit par voie directe (injection par pompes) ou soit par voie indirecte (bassins d'infiltration) selon la nature du terrain considéré (Figure 5). Ces deux techniques permettent de limiter les pertes en eau par évaporation dans les bassins de stockage de surface et sont aussi un outil de lutte contre les phénomènes d'intrusion d'eaux marines/saumâtres dans les aquifères d'eau douce (biseau salé).



Figure 5 : Réservoirs saisonniers confinés

A gauche : Station d'injection des EUT dans l'aquifère d'Aldinga en Australie (<http://www.apci.com.au>)

A droite : Zones d'infiltration percolation des EUT pour la recharge d'aquifère à Shafdan en Israël (<http://www.sswm.info>)

Ces techniques sont souvent développées dans les pays faisant face à des pénuries chroniques et saisonnières de la ressource en eau (Etats Unis, Australie, Maghreb, Chypre, Israël, ...). Face au coût de la désalinisation et à la diminution des ressources souterraines, l'utilisation d'EUT prend une part importante dans la gestion intégrée de l'eau au Moyen Orient. En France, les projets de recharge d'aquifère par des EUT sont actuellement soumis à autorisation (article R 214.1 du Code de l'Environnement, alinéa 2.3.2.0.).

Pour plus d'informations, de nombreux articles scientifiques ou ouvrages sont parus sur cette thématique. Pour le cas français, le rapport du projet REGAL en partenariat avec le BRGM et l'Onema en France (Casanova et al., 2008; Pettenati, 2007; Wuilleumier and Seguin, 2008) dresse un état des lieux de ces techniques.

Des références de certains articles scientifiques en lien avec la problématique de recharge d'aquifère à l'international ont été listées (liste non exhaustive) :

- Aux Etats-Unis : (American Water Works Association, 2009; Bloetscher, 2012; U.S. Environmental Protection Agency, 2004, 2012) ;
- En Israël : (Idelovitch et al., 2003) et Jordanie (Al-Assa'd and Abdulla, 2010) et Emirats Arabes (Maliva et al., 2006; Maliva et al., 2011; Missimer et al., 2012) ;
- En Europe : (Hochstrat et al., 2010; Levantesi et al., 2010; Ortuño et al., 2012; Page et al., 2010; Teijon et al., 2010; Van Houtte and Verbauwheide, 2012) ;
- Publications récentes : (Ayuso-Gabella et al., 2011; Hoppe-Jones et al., 2012; Li et al., 2013; X. Zhang et al., 2012; X. Zhang et al., 2011).

1.3.2. Les réservoirs opérationnels

En complément de réservoirs saisonniers ou pour la gestion des EUT de petites installations, des unités de stockage dites opérationnelles peuvent être nécessaires. Elles offrent une possibilité de gestion du réseau de distribution des EUT en permettant une régulation horaire ou journalière des EUT (qualité et/ou quantité). Certaines pratiques culturelles privilégient l'irrigation nocturne, période où la production d'EUT en sortie de station est la plus faible. Dans ce cas, le stockage à l'échelle journalière par réservoirs opérationnels est nécessaire. Le volume de ces unités varie en fonction des besoins en irrigation et peut correspondre à l'équivalent de 24 heures à quelques jours de consommation. Cette réserve permet également de faire face aux risques d'interruption de l'approvisionnement ou aux pannes des systèmes de traitement.

Le stockage opérationnel fermé concerne les citernes ou cuves fermées et permet une gestion sans influence algale du réservoir en limitant l'exposition des EUT à la lumière. La capacité de stockage de ces unités est cependant limitée. Pour un stockage de volumes plus importants, des réservoirs opérationnels à surface libre (étang, lac, retenue) sont envisageables. Pour ces unités, un risque de dégradation de la qualité des EUT est présent par concentration des éléments dissous, en réponse à l'évaporation, et/ou par développement algal et contaminations microbiennes. Le rapport surface/volume des bassins est ainsi considéré pour limiter ces effets.

1.4. Principaux mécanismes présents dans les réservoirs

Les réservoirs de stockage des EUT peuvent accueillir un large spectre de réactions physico-chimiques et biologiques. Pour faciliter la compréhension, le dimensionnement et les modalités de gestion de ces ouvrages, une présentation des principales réactions et leur variabilité saisonnière est proposée.

1.4.1. Principales réactions dans les réservoirs

Dégradation des composés carbonés (DBO₅ et DCO)

Les EUT contiennent des composés organiques carbonés et d'autres substances oxydables qui peuvent être dissoutes ou particulaires, facilement biodégradables ou réfractaires. La teneur de ces composés est mesurée par des indicateurs de demande en oxygène (DBO₅ et DCO les plus courants). La demande en oxygène des EUT varie de manière importante selon la qualité du traitement en amont.

Ces composés peuvent être dégradés par voie aérobie ou anaérobie. Le type de décomposition est déterminé par l'équilibre entre le flux de matière organique en entrée du système et la capacité de réoxygénation du milieu.

Les bactéries aérobies hétérotrophes sont responsables de la dégradation aérobie de composés organiques solubles. La dégradation anaérobie des composés carbonés, plus lente, est effectuée en plusieurs étapes (hydrolyse, acidogénèse et fermentation, acétogénèse, méthanogénèse). Ces réactions de dégradation sont à l'origine de la production de gaz carbonique et méthane. La réaction de méthanogénèse est la réaction la plus sensible aux variations de conditions environnementales (anaérobie stricte, développement optimum pour des pH compris entre 7 et 8, redox $< -0,24E_0$, V) et la plus lente.

Abattement des matières en suspension

L'abattement des matières en suspension et des composés adsorbés (matière organique, composés azotés, phosphorés, métaux, ...) s'effectue par sédimentation et agrégation-sédimentation. Selon l'abondance, la vitesse des particules et le temps de séjour des EUT dans les réservoirs, le taux de sédimentation varie et peut se calculer, en conditions stables, par la loi de Stoke.

Pour les réservoirs ouverts au contact de la lumière et du vent, l'abattement des matières en suspension peut être nul voir négatif : le développement de phytoplancton (algues) ou zooplancton peut être une source de production de sédiments. En complément, des phénomènes de remise en suspension des sédiments en fond de bassin sont courants (vent, destratification, courants, pompage, ...).

Dégradation des composés azotés

L'azote peut exister sous de nombreuses formes (azote organique, ammonium, nitrite, nitrate, diazote) appartenant à un cycle complexe qui dépend en grande partie des conditions redox du milieu. Les principales réactions sont présentées ci-dessous, leur contribution dans les réservoirs de stockage est variable.

Minéralisation (ammonification) : processus de conversion de l'azote organique en azote inorganique. L'azote inorganique formé est l'ammonium (NH_4/NH_3). Cette réaction peut se produire en conditions aérobie ou anaérobie. Le taux de minéralisation est plus élevé dans les zones oxygénées et dépend de la température, pH, C/N, des nutriments disponibles. La gamme de pH optimale pour la minéralisation est comprise entre 6.5 et 8.5.

Hydrolyse et volatilisation : en solution, l'azote ammoniacal (NH_{3aq}) s'hydrolyse rapidement en ion ammonium (NH_4^+). L'azote ammoniacal est en équilibre physico-chimique entre la forme aqueuse et la forme gazeuse. Le transfert de la forme aqueuse vers l'espèce gazeuse s'appelle la volatilisation. La volatilisation de l'ammoniac s'effectue en conditions de pH supérieur à 8. Ces conditions sont présentes en surface de réservoir, l'activité photosynthétique étant responsable de l'augmentation du pH par assimilation du CO_2 .

Nitrification : processus d'oxydation de l'ammonium en nitrates composé de deux réactions principales : l'oxydation ammoniacale (**nitritation**) et l'oxydation aérobie des nitrites (**nitratation**). La réaction de nitritation est l'oxydation de l'ammonium en nitrites par des Protéobactéries dont *Nitrosomonas*, *Nitrospira* et *Nitrosococcus*. Les bactéries aérobies capable d'oxyder les nitrites intègrent le genre *Nitrobacter* et *Nitrospira* et nécessitent des conditions aérobies. Pour des teneurs inférieures à 0,5 mg/L d'oxygène dissous, l'oxydation des nitrites est inhibée.

Oxydation anaérobie de l'ammonium (Anammox®) : les bactéries Anammox® appartiennent au phylum des Planctomycètes, (ordre Planctomycétales). Ces bactéries sont capables d'oxyder l'ammonium à partir de nitrites et carbonates pour donner du diazote. Cette réaction demande plus d'énergie que l'oxydation de l'ammonium classique par nitritation. Les bactéries Anammox® ont la

particularité de se développer très lentement (temps de doublement d'environ 11 jours contre moins d'1 jour pour les Protéobactéries) et sont très sensibles à l'oxygène.

Dénitrification : processus de réduction des composés azotés oxydés (nitrites et nitrates) en azote gazeux (N_2 et N_2O). La dénitrification peut être réalisée par de nombreuses bactéries et certains champignons. Le processus de dénitrification nécessite une source de carbone importante (ration C:N 5:1).

Dégradation des composés phosphorés

Le phosphore, très souvent le facteur limitant dans les eaux de surface, est en excès dans la plupart des EUT. Sous forme dissoute ou particulaire, organique ou minérale, les formes phosphorées sont stockées en fond de bassin après sédimentation des précipités, agrégats phosphorés ou à la mort des micro-organismes par sédimentation du phosphore organique. En cas de présence de conditions anaérobies en fond de bassin ou de brassage, un risque de relargage du phosphore présent dans les sédiments est à considérer.

Stockage des métaux lourds

Les métaux lourds sont sensibles aux réactions de précipitations et à l'activité biologique. La variation du pH affecte l'équilibre de ces composés et réactions. Peu d'études traitent de ce sujet dans les réservoirs de stockage des EUT (Eran Friedler and Juanico, 1996; Juanico *et al.*, 1995b; Maynard *et al.*, 1999). De plus, face à la diversité des propriétés des différents métaux, aucune règle généralisée sur le comportement des composés métalliques dans les réservoirs ne peut être émise.

Dégradation des pathogènes

Les EUT en l'absence de désinfection, peuvent contenir des organismes pathogènes qui résistent aux chaînes de traitement préalables : bactéries, virus, protozoaire et helminthes. Les mécanismes de dégradation des pathogènes impliquent une série d'interactions physico-chimiques et biologiques relativement complexe qui se produit dans les écosystèmes naturels. Les principaux mécanismes de dégradation des micro-organismes sont (Xu *et al.*, 2002) :

- l'altération de l'ADN par les UV du rayonnement solaire,
- la photo-oxydation provoquée par les dérivés de l'oxygène après absorption de la lumière par les composés humiques,
- la prédation,
- le manque de nutriments ou composés carbonés,
- la sédimentation et adsorption-sédimentation,
- les toxines algales.

Pour les réservoirs à surface libre, un risque de contamination des EUT stockées par les oiseaux et mammifères. Le potentiel de désinfection des réservoirs est le processus le plus étudié des réservoirs de stockage (Abreu-Acosta and Vera, 2011; Brissaud *et al.*, 2003a; Cirelli *et al.*, 2009; Liran *et al.*, 1994; Mara, 2000; Maynard *et al.*, 1999; Xu *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2001).

Développement algal

En présence de nutriments, les réservoirs à surface libre sont sujet au développement algal qui peut induire une augmentation de la matière organique dans le bassin contribuant à l'augmentation des concentrations en DBO_5 , DCO et MES. Pour des climats tempérés, cet effet saisonnier s'établit très souvent en début de printemps. Le risque principal est le colmatage du réseau de distribution en aval du réservoir (développement de biofilms, particules) ou du réseau d'irrigation (Juanico *et al.*, 1995a; Teltsch *et al.*, 1991; Thayanukul *et al.*, 2013; Weinrich *et al.*, 2010). Une implantation judicieuse du

pompage peut limiter ce risque. Une filtration complémentaire en aval du réservoir peut être nécessaire.

Sédiments en fond de bassin

Les processus de sédimentation présents dans les réservoirs de stockage suggèrent la présence de boues en fond de bassin. Les longs temps de séjour de ces unités couplés au phénomène de stratification du réservoir favorisent la minéralisation de ces boues. Les retours d'expériences de terrain et de modélisation indiquent que la hauteur de sédiments en fond de bassin n'est pas supérieure à 30 cm y compris pour les réservoirs les plus chargés (Avnimelech and Wodka, 1988; E. Friedler *et al.*, 2003; Juanicó and Milstein, 2004). Il faut cependant être vigilant sur la possibilité de relargage de certains composés des sédiments lors des changements de conditions d'oxygénation et de pH ou de mélange par destratification saisonnière ou brassage.

1.4.2. Effet saisonnier

Les dégradations biologiques et équilibres physico-chimiques dans les réservoirs sont sensibles au changement saisonnier. Les réservoirs à surface libre sont plus sensibles à ces changements. Un des effets principaux des variations saisonnières du climat sur les réservoirs profonds est la stratification thermique et le développement algal.

Stratification thermique et effet saisonnier

La stratification thermique est un phénomène lié en partie à l'effet des températures sur la densité de l'eau : les eaux froides étant plus denses que les eaux chaudes. Ce processus, couplé à l'action du vent, a un effet direct sur les mélanges, le cycle des nutriments et la teneur en oxygène dissous des réservoirs profonds.

Le compartiment supérieur plus chaud est appelé l'**épilimnion**. Sous l'épilimnion, on trouve la **thermocline**, une étroite épaisseur où la température chute rapidement. L'**hypolimnion** est le compartiment inférieur du réservoir sous la thermocline, généralement plus froid et sans lumière (Figure 6). Bien que l'épilimnion et l'hypolimnion tendent à être chacun bien mélangé, la différence de densité entre ces deux compartiments inhibe les transferts entre ces deux niveaux.

Au printemps et durant l'été, le compartiment supérieur du réservoir, l'épilimnion, bien mélangé se réchauffe favorisant l'établissement de la stratification. En surface, on peut assister à un bloom algal entraînant des phénomènes d'anoxie nocturne. Les sulfures produits dans la zone anaérobie inférieure sont alors oxydés dans la zone aérobie de surface. A l'automne, les effluents de surface sont plus frais, et donc plus denses, et tendent à céder à l'effet de gravité favorisant les mélanges entre les deux compartiments : on assiste à une destratification du réservoir. Elle s'accompagne souvent d'un bloom algal lié en partie à la plus grande disponibilité de substances nutritives provenant du fond. A la fin de l'automne ou début de l'hiver, avec la durée d'éclairement réduite et les températures plus basses, une disparition plus ou moins brutale des algues peut intervenir ; elle peut entraîner une anaérobiose de la totalité du bassin et donc l'apparition d'odeurs. En complément, à l'automne et l'hiver, l'action du vent réduit la stratification thermique du réservoir pour atteindre des conditions isothermes dans l'hiver.

L'expérience italienne témoigne d'une stratification présente de fin mai jusqu'à la fin de l'irrigation (fin août) pour un réservoir profond de 7,5 mètres. Des taux supérieurs à 25 mg/L d'oxygène dissous sont mesurés jusqu'à une profondeur de 3 mètres. En 120 jours de stockage, il est constaté un abattement de 4 à 5 unités log des coliformes fécaux (Cirelli *et al.*, 2008).

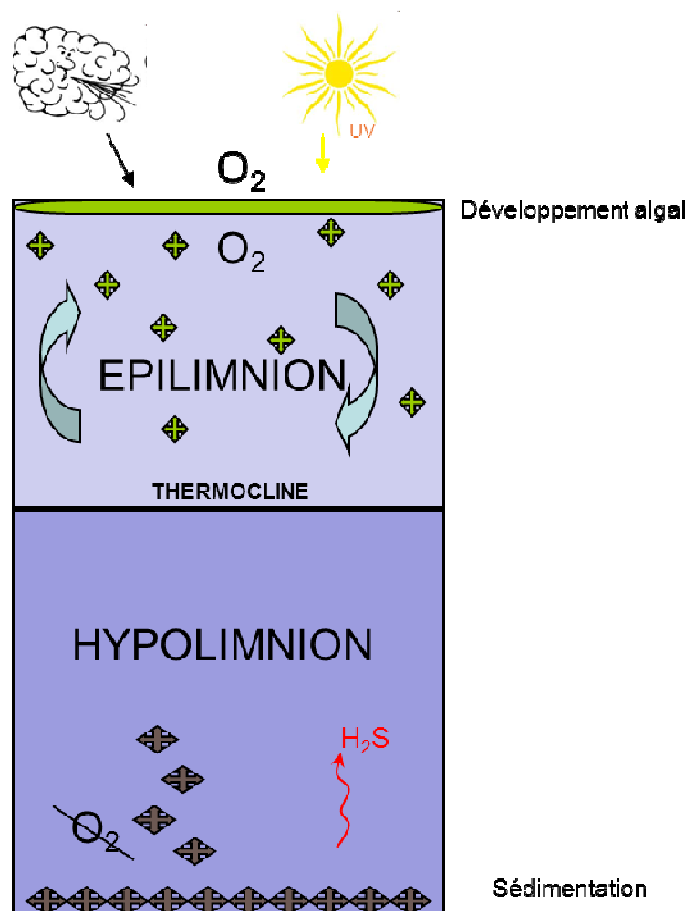


Figure 6 : Schéma du phénomène de stratification

Stratification thermique et qualité des EUT dans le réservoir

La stratification thermique produit ainsi une différence de qualité des effluents entre les compartiments du bassin. En surface, au sein de l'épilimnion, la présence de nutriments et de matière organique tend à stimuler la croissance des micro-organismes et algues photosynthétiques. Les relations entre les algues photosynthétiques et les bactéries aérobies sont étroites : les bactéries utilisent l'oxygène produit par les algues pour oxyder la matière organique nécessaire à leur développement. En parallèle, les algues bénéficient du gaz carbonique libéré par la respiration bactérienne et des nutriments et composés carbonés présents dans le milieu (Abeliovich, 1982). Ce mécanisme connu des milieux hypertrophiques ou eutrophiques est responsable d'un ensemble de réactions en chaîne dont l'augmentation du pH par l'activité photosynthétique ($\text{pH} > 10$) favorisant la désinfection, la diminution de la lumière par le développement massif des algues (bloom algal), l'augmentation des teneurs en oxygène dissous. On peut observer une variation journalière de la teneur en oxygène dissous (alternance des réactions de photosynthèse le jour et de respiration la nuit). Le transfert des composés minéraux et organiques vers le comportement bactérien et algal provoque l'augmentation de la turbidité et des concentrations en DCO, DBO_5 et MES.

Plus le réservoir est profond, plus la surface oxygénée par l'activité photosynthétique sera réduite : la charge organique appliquée à ces ouvrages sera plus faible pour maintenir les conditions aérobies.

En dehors de la zone la plus superficielle, la source principale d'oxygène (hors aération mécanique) est limitée à l'oxygène dissous des effluents « frais » dont la teneur est dépendante du système de traitement en amont. Dans les zones intermédiaires ou en conditions de brassage de la colonne d'eau, des conditions anoxiques peuvent être présentes favorisant la réduction des nitrates par dénitrification. L'établissement de conditions anoxiques puis anaérobies en fond de bassin dans l'hypolimnion, peut

être rapide, la consommation en oxygène par les micro-organismes étant importante en présence de nutriments. Plus le temps de résidence des effluents est long et l'entrée d'effluents frais est faible, plus le risque de développement de conditions anaérobies dans le réservoir est important. Les conditions anaérobies sont à l'origine de la production d'hydroxyde sulfureux, composé toxique, principal responsable des odeurs nuisibles en surface. De plus, si les teneurs en oxygène dissous deviennent trop faibles en fond de bassin, on assistera à un relargage du fer, manganèse et phosphore, adsorbés sur les sédiments.

L'équilibre acido-basique des EUT représenté par le pH est également affecté par les réactions biologiques au sein du réservoir. L'activité photosynthétique de l'épilimnion provoque une augmentation du pH des effluents, tandis que l'activité respiratoire limitée de l'hypolimnion tend à diminuer le pH des effluents.

Développement algal :

En présence de nutriments, les réservoirs à surface libre sont sujet au développement algal qui peut induire une augmentation de la matière organique dans le bassin contribuant à l'augmentation des concentrations en DBO₅, DCO et MES. Pour des climats tempérés, cet effet saisonnier s'établit très souvent en début de printemps. Le risque principal est le colmatage du réseau de distribution en aval du réservoir (développement de biofilms, particules) ou du réseau d'irrigation (Juanico *et al.*, 1995a; Teltsch *et al.*, 1991; Thayanukul *et al.*, 2013; Weinrich *et al.*, 2010). Une implantation judicieuse du pompage peut limiter ce risque. Une filtration complémentaire en aval du réservoir peut être nécessaire.

Climat et cinétique de dégradation

Les fortes températures combinées à un rayonnement solaire important catalysent les dégradations des pathogènes et favorisent les réactions biologiques.

Climat et bilan hydrique

Les conditions climatiques influencent le taux d'évaporation des réservoirs. Pour des taux d'évaporation importants, la salinité des EUT augmentera et le temps de séjour des EUT sera également affecté.

2. Objectifs de dimensionnement et variabilité des réservoirs

Le dimensionnement des réservoirs de stockage des EUT implique la connaissance :

- des besoins en eau d'irrigation (qualité requise, volume, calendrier annuel, horaire d'application),
- des EUT (volume produit, qualité, variations annuelles).

Parmi ces données, seront distinguées les informations quantitatives et qualitatives nécessaires au dimensionnement du réservoir.

2.1. Considérations quantitatives : gérer les volumes

2.1.1. Satisfaire la demande

Dans le cas d'une valorisation agricole d'EUT, la demande en eau d'irrigation doit être précisément déterminée pour faciliter le dimensionnement du réservoir. Elle peut être continue dans l'année ou saisonnière (Figure 7) et dépend de nombreux facteurs :

- le type de culture (coefficient cultural, besoin en eau, profondeur racinaire, ...),
- les caractéristiques de la région considérée (ETP, précipitations, sol, ...),
- le calendrier d'irrigation (période d'irrigation, taux d'irrigation, fréquence, type, ...),
- la surface irriguée.

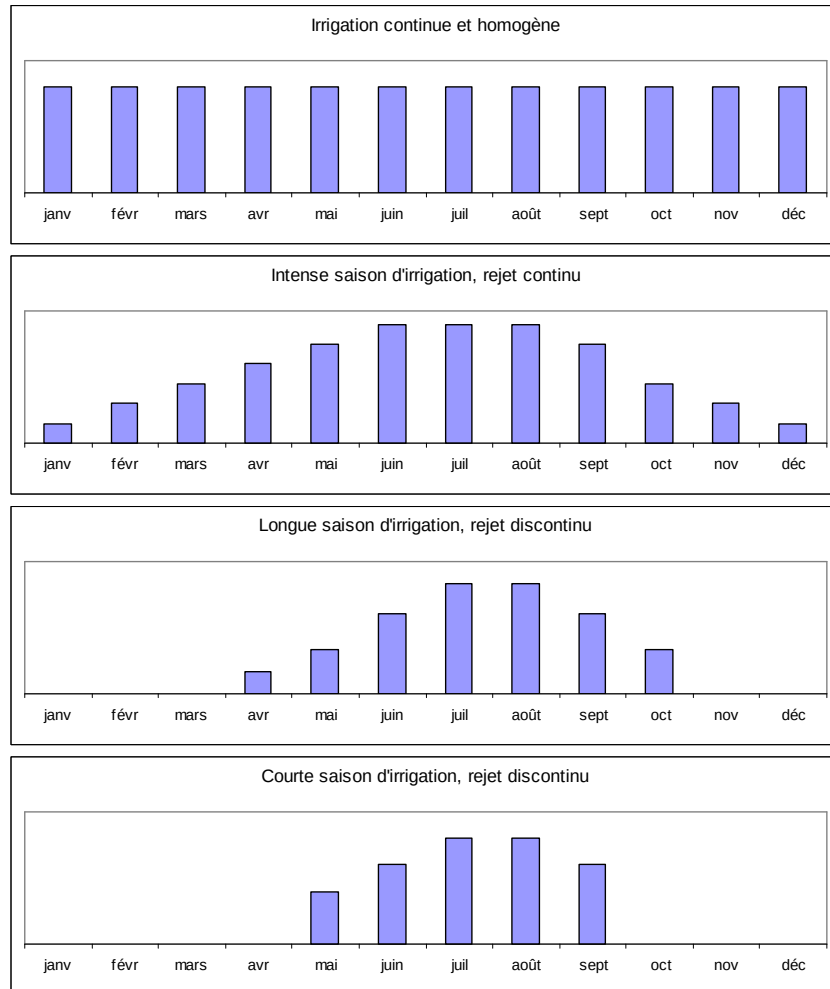


Figure 7 : Variabilité des saisons d'irrigation

Les volumes produits par la station de traitement sont considérés comme relativement constants dans l'année même si l'impact des précipitations sur les volumes traités en station peut être important (selon la surface du bassin collecté, le type de réseau, les intrusions d'eaux claires parasites).

En fonction de la taille de la station et du taux de recyclage (100% en cas d'absence de rejet), les volumes disponibles pour une valorisation peuvent être considérables. Ils dépendront des besoins de la zone considérée (objectifs de non rejet pendant une période déterminée, besoins en irrigation).

2.1.2. Hydraulique du réservoir

Les formes de prélèvements traditionnelles qu'elles soient de surface ou souterraine par forage, permettent le « stockage naturel » au point de prélèvement. Lors des besoins en irrigation, seuls le pompage et le transport sont nécessaires. Pour le cas des EUT, la production d'EUT étant continue, leur disponibilité est limitée au volume produit quotidiennement. Pour une demande supérieure au volume produit localement, l'ouvrage de stockage peut devenir nécessaire à la gestion de l'irrigation.

Les débits d'alimentation du réservoir comme le débit de pompage pour irrigation peuvent être variables dans l'année (Figure 7). On parlera de **régime transitoire**, en comparaison au lagunage naturel qui a un régime hydraulique permanent (volume d'effluents en entrée de lagune quasi

équivalent au volume de sortie). Les mécanismes mis en jeu et leur modélisation diffèrent entre ces deux procédés.

Dans un réservoir à régime permanent (cas du lagunage naturel), le calcul du temps de séjour moyen des effluents intègre le mélange parfait des effluents dans l'ouvrage et se calcule à partir du volume moyen et le débit moyen d'effluents dans le réservoir.

Ce calcul n'est pas applicable au réservoir à régime transitoire ; le débit en entrée et sortie, le volume stocké, le temps de résidence des EUT et le niveau d'effluents dans le réservoir étant variables. Selon le profil du bassin, les variations de niveau du réservoir peuvent affecter la surface du réservoir. Ainsi, une approche adaptée au régime transitoire est indispensable pour la modélisation de ces systèmes (cf. § 3.3).

2.1.3. Ordres de grandeur

A titre d'exemple, la Figure 8 illustre les capacités théoriques de production d'EUT par taille de station en considérant le taux de recyclage des EUT. Ces volumes stockés peuvent être largement supérieurs notamment en période hivernale avec l'intrusion d'eaux claires parasites (ECP) ou d'eaux pluviales dans le réseau de collecte. Le débit par temps de pluie (TP) est généralement considéré comme équivalent à 3 fois le débit par temps sec (TS) ; les ECP sont étudiées au cas par cas.

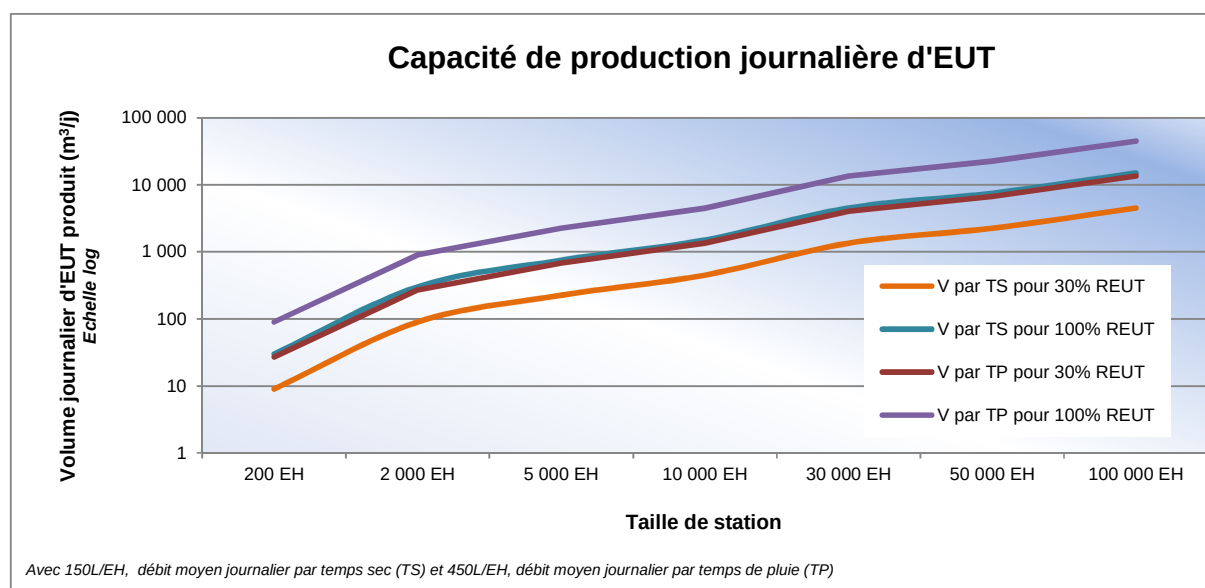


Figure 8 : Capacité de production journalière d'EUT des stations

On peut ainsi considérer la capacité de production de référence d'EUT des stations (sans prise en compte des ECP) équivalente à :

- 0,15 m³/j/EH par temps sec,
- 0,45 m³/j/EH par temps de pluie.

A titre d'exemple, la consommation moyenne en eau d'irrigation d'un golf 9 trous varie de 25 à 80 m³/ha/j en moyenne en France. Le besoin de production d'EUT moyen sera compris entre l'équivalent de 167 à 533 EH/ha irrigué en temps sec sans stockage.

Pour une culture de maïs dans le sud de la France nécessitant entre 30 à 100 m³/ha/j en moyenne, le besoin de production moyen en EUT sera entre l'équivalent de 200 à 667 EH/ha sans stockage. L'ouvrage de stockage peut ainsi permettre d'augmenter cette capacité de production journalière.

Ces valeurs de référence ne sont citées qu'à titre informatif. Dans la réalité, un historique des débits d'EUT produits de la station considérée intégrant les débits maximum journaliers va permettre le dimensionnement du réservoir. Cet historique devra également intégrer les eaux pluviales en se basant sur une simulation du réseau avec une chronique de temps pluie suffisamment longue pour être prise comme référence (typiquement 4 ans).

2.2.Considérations qualitatives : aspects réglementaires

La qualité des EUT varie de manière importante selon la qualité du traitement en amont. Pour définir la qualité des EUT, il est ainsi proposé de se baser le minimum réglementaire requis par les réglementations internationales au point d'usage et de les comparer.

Dès lors, l'adaptation des techniques du traitement en amont peut être nécessaire ainsi que des traitements complémentaires en sortie de stockage pour maintenir la qualité des EUT jusqu'au point d'usage. Des by-pass des EUT sont requis en vue d'assurer :

- le rejet dans le milieu récepteur en cas de défaillance du système de REUT ;
- la recirculation des EUT en amont de la station en cas de dégradation de la qualité au long des ouvrages de stockage et distribution.

Pour définir la qualité des EUT requise en sortie de station et au point d'usage, on considérera les contraintes réglementaires internationales de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), européennes et françaises. L'ensemble de ces réglementations intègrent la définition de classes de qualité en fonction des usages.

2.2.1. Contraintes réglementaires pour l'irrigation agricole et espaces verts

Au niveau international, des prescriptions techniques et études de l'OMS encadre la REUT. Ces recommandations sont émises dans le but de constituer une base informative pour favoriser la mise en place de réglementations nationales.

Après une première édition en 1973, rééditée en 1989, une dernière version en 2006 propose une mise à jour des publications précédentes déclinée en quatre volumes « *Directives pour l'utilisation des eaux usées, excréta et eaux ménagères* » :

- Volume 1 : Aspects réglementaires et politiques
- Volume 2 : La réutilisation des eaux usées en agriculture
- Volume 3 : Réutilisation des eaux usées et excréta en aquaculture
- Volume 4 : Réutilisation des excréta et eaux ménagère en agriculture

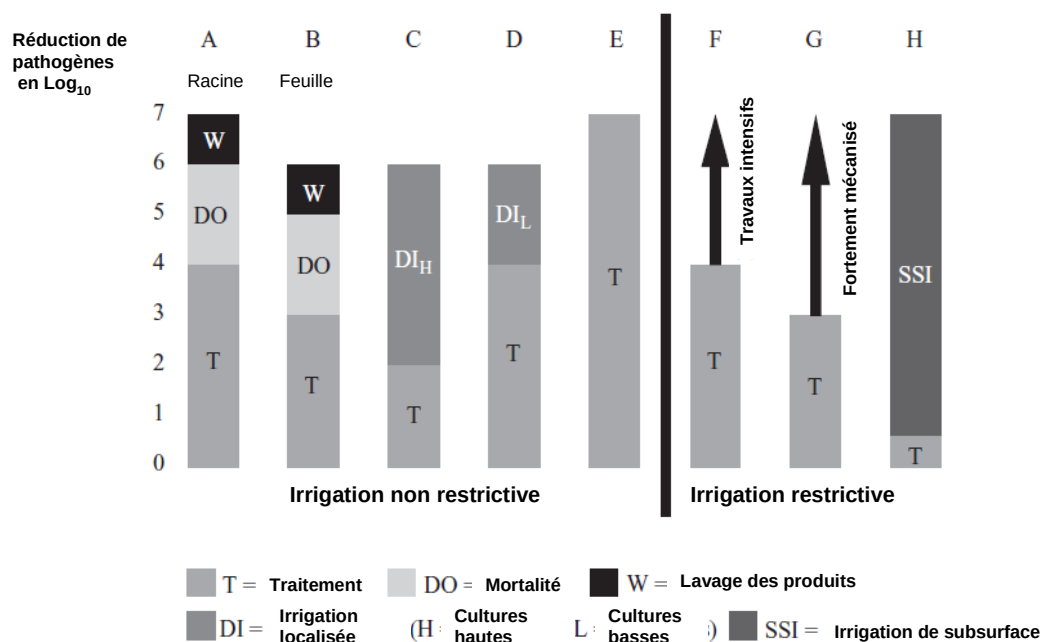
Dans cette démarche, l'OMS distingue deux catégories de REUT en agriculture :

- La REUT par irrigation de cultures avec restriction d'usage (cultures fourragères, industrielles, forestières) qui implique majoritairement la sécurité des ouvriers agricoles ;
- La REUT par irrigation de cultures sans restriction d'usage (cultures destinées à la consommation humaine) qui implique particulièrement la sécurité des consommateurs.

La doctrine développée par l'OMS s'intéresse à **quantifier le risque sanitaire associé aux pathogènes principalement**. Pour l'irrigation sans restriction d'usage (classe A à E dans la Figure 9), l'abattement des pathogènes au cours du traitement mais aussi de l'irrigation (en surface ou souterraine) et lors du lavage des aliments produits est considéré. Pour chacune de ces étapes, des études sont produites pour quantifier leur effet sur les pathogènes. En résultent, des objectifs de traitement minimums. Pour l'irrigation avec restriction d'usage (classe F, G et H dans la Figure 9), seuls les effets du traitement et éventuellement de l'épandage souterrain sont considérés. Les détails de chacune des classes sont présentés dans le Tableau 1.

Si seul l'abattement des pathogènes par le traitement des eaux usées est pris en compte (sans intégrer l'effet de l'irrigation, du lavage, ...), une réduction de 6 à 7 log de pathogènes est exigée avec comme valeur seuil $10^1 E. Coli / 100\text{mL}$ et 1 œuf d'helminthes/L au point d'usage.

Les objectifs sanitaires totaux (traitement, irrigation et usage) s'expriment en DALY (Disability Adjusted Life Years ou Année de Vie Corrigée de l'Incapacité). Les DALY, initialement appliqués à l'eau potable, représentent les risques microbiologique, chimique et radiologique d'une pratique. Pour la REUT en agriculture, l'objectif est une réduction de **10^{-6} DALY par personne et par an** décliné en contraintes de réduction des pathogènes, *E. Coli* et œufs d'helminthes par classe de cultures.



OMS 2006

Figure 9 : Exemples d'options pour atteindre la réduction de 10^{-6} DALY par personne par an

Tableau 1 : Recommandations pour atteindre l'objectif de réduction de 10^6 DALY par personne par an (source : OMS, 2006)

Type d'irrigation	Option	Réduction des pathogènes par traitement [unité $\log_{10}$]	Valeur-seuil [E. coli/100mL]	Réduction des œufs d'helminthes	Notes
Sans restriction	A	4	$\leq 10^3$	≤ 1 /L	Légumes racine
	B	3	$\leq 10^4$	≤ 1 /L	Légume feuille
	C	2	$\leq 10^5$	-	Irrigation localisée Cultures hautes
	D	4	$\leq 10^3$	≤ 1 /L	Irrigation localisée Cultures basses
	E	6 -7	≤ 10 ou ≤ 1	≤ 1 /L	Traitement seul pris en compte (Irrigation d'espaces verts, golf, voiries, ...) A adapter selon prescriptions locales
Avec restriction	F	4	$\leq 10^4$	≤ 1 /L	Agriculture manuelle
	G	3	$\leq 10^5$	≤ 1 /L	Agriculture mécanisée
	H	0,5	$\leq 10^6$	≤ 1 /L	Epandage souterrain après fosse septique

Dans les recommandations de l'OMS, le stockage des EUT n'est pas directement pris en compte. En revanche, les objectifs de qualité sous-entendent un maintien de la qualité des EUT au travers des ouvrages de stockage et du réseau de distribution (Tableau 1).

Au niveau européen, il n'existe pas de cadrage réglementaire ou prescriptions techniques directes pour l'utilisation d'EUT. En revanche, de nombreuses directives actuellement en vigueur sont concernées par la REUT en vue de valorisation agricole : Directive Boues d'épuration CE/86/278, Directive Nitrates CE/91/676, Directive Eaux souterraines CE/80/68, Directive Eau potable CE/98/83. Dans l'attente d'une réglementation européenne, certains Etats Membres ont déjà adopté des lois provisoires standards (cas de Chypre), nationales (exemple France, Grèce), régionales (exemple Espagne) ou normes techniques (cas de l'Italie, Portugal). On observe une forte variabilité des objectifs de traitement selon les pays.

Deux modèles de réglementation sont majoritairement pris en compte : les recommandations de l'OMS (1989-2006) et la réglementation californienne (1979). Pour une pratique agricole non restrictive (toutes cultures), les recommandations de l'OMS ont tendance à autoriser l'application d'EUT dont la qualité microbiologique doit être au maximum de 1000 CF/100 mL tandis que pour le même usage la réglementation californienne préconise un maximum de 2,2 CT/100 mL. Cette différence va impliquer des adaptations importantes dans le choix des techniques de traitement.

En parallèle, de nombreuses études et groupes de recherches s'organisent actuellement entre les Etats Membres de l'Union Européenne, les pays partenaires comme Mediterrean-EU Water Initiative (MED-EUWI), au sein de la Commission Européenne et d'autres groupes d'intérêts (AQUAREC, IWA, MED REUNET, MEDAWARE, ...).

2.2.2. Cas de la France

En France, l'utilisation d'EUT pour l'irrigation est mentionnée par :

- l'article R211-23 du code de l'environnement : « Les eaux usées peuvent, après épuration, être utilisées à des fins agronomiques ou agricoles, par arrosage ou par irrigation, sous réserve que leurs caractéristiques et leurs modalités d'emploi soient compatibles avec les exigences de protection de la santé publique et de l'environnement » ;
- l'article 10 de l'arrêté du 22 juin 2007 : « Dans le cas où le rejet des effluents traités dans les eaux superficielles n'est pas possible, les effluents traités peuvent être soit éliminés par infiltration dans le sol, si le sol est apte à ce mode d'élimination, soit réutilisés pour l'arrosage des espaces verts ou l'irrigation des cultures, conformément aux dispositions définies par arrêté du ministre chargé de la santé et du ministre chargé de l'environnement »
- l'arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts.

La réglementation actuelle fixe, par [l'Arrêté du 2 août 2010](#), les prescriptions relatives à l'utilisation des EUT pour l'irrigation agricole mais aussi des espaces verts selon des contraintes d'usage, de distance et de terrain en fonction de 4 niveaux de qualité sanitaire des EUT (A, B, C, D) (Tableau 2). Les types d'usage associés à ces classes de qualité sont présentés en annexe.

Tableau 2 : Niveaux de qualité sanitaire des EUT (extrait de l'arrêté du 2 août 2010)

	unité	Niveau de qualité sanitaire des EUT			
		A	B	C	D
DCO	mg/l	< 60	conforme rejet EUT pour exutoire de STEU hors période d'irrigation		
MES	mg/l	< 15			
Entérocoques fécaux	log	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Phages ARN f-spé	log	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Spoires de bactéries anaérobies sulfato réductrices	log	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Fréquence d'analyse	-	1/an	1/an	1/an	1/an
E. coli	UFC/100 ml	≤ 250	≤ 10 000	≤ 100 000	≤ 100 000
Fréquence d'analyse	-	1/semaine	1/15j	1/mois	1/mois
Boues	-	Suivi des paramètres des tableaux 1a et 1b de l'Annexe 1 de l'arrêté du 8 janvier 1998			
Fréquence d'analyse	-	4/an min.*	4/an min.*	4/an min.*	4/an min.*

* hors lagunage, soumis à une analyse par an dans la lagune finale

Ce texte concerne les ouvrages d'assainissement (ANC et AC) traitant une charge brute de pollution organique supérieure à 1,2 kg DBO₅ par jour (20 EH). Il définit les règles de mise en œuvre et de surveillance des opérations de REUT au travers d'un programme d'irrigation et d'un programme de surveillance des EUT et des sols.

Au-delà des contraintes de rejet de la STEU, des exigences complémentaires sont obligatoires et définies comme suit (liste non exhaustive) :

- conformité des boues de la STEU ;
- conformité des sols avant irrigation par EUT ;
- restriction pour les STEU traitant des sous-produits d'origine animale ;
- proximité de périmètre de protection de captage d'eau potable ...

Les contraintes de qualité et de suivi varient selon deux types d'irrigation :

- l'irrigation sans aspersion,
- l'irrigation par aspersion.

Cas de l'irrigation sans aspersion

Pour la partie « suivi spécifique » pour la REUT, les abattements requis sont calculés entre l'entrée et la sortie de la station et les mesures physico-chimiques sont conduites en sortie de station.

Un suivi de *E. coli* au point d'usage est prévu pendant la saison d'irrigation à raison de 1 fois par semaine pour la classe A, tous les 15 jours pour la classe B et 1 fois par mois pour les classes C et D. Ce suivi implique une conservation du taux de désinfection lors des étapes de stockage et de distribution en cas de désinfection en sortie de station ou la mise en place d'unités de désinfection complémentaires en aval de la station (techniques de filtration comparées en annexe : chloration, traitement UV, ozonation, filtration ou irradiation issues de Boutin *et al.* (2009)) (Figure 10).

Aucune contrainte technique n'est directement mentionnée pour le stockage des EUT, il est seulement souligné que « les conditions de stockage des eaux usées traitées ne doivent pas favoriser le développement de vecteurs ou d'agents pathogènes ».

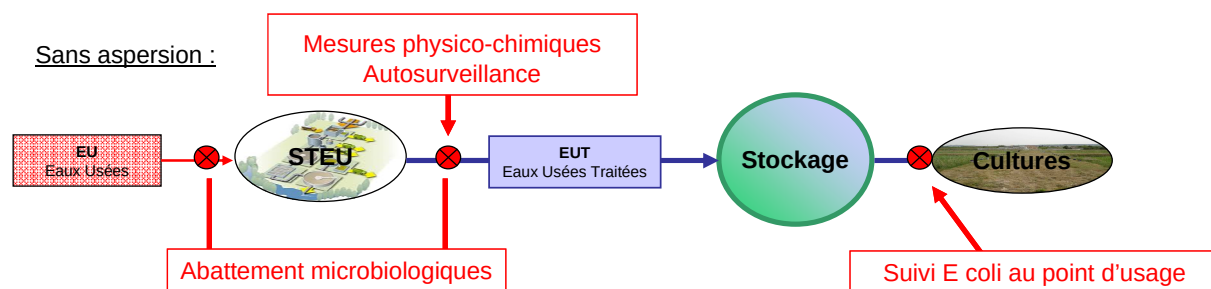


Figure 10 : Illustration des points de contrôle pour la validation des projets de REUT sans aspersion dans le cadre de l'Arrêté du 2 août 2010

Cas de l'irrigation avec aspersion

Pour l'irrigation par aspersion, les préconisations relatives à la REUT par irrigation sans aspersion doivent être respectées et complétées par une autorisation à titre expérimental par arrêté préfectoral et avis favorable de l'ANSES. Ce dossier implique la mise en place d'un suivi complémentaire au dossier initial de 6 mois pour validation du projet de l'entrée/sortie de la STEU, de la **sortie de la bêche de stockage** et de la sortie des asperseurs (points de prélèvements figurés en jaune sur la Figure 11) :

- analyses physico-chimiques quotidiennes des paramètres MES, DBO₅, DCO, COT, COD, turbidité, NTK, NH₄, NO₂, NO₃, PT ;
- analyses microbiologiques hebdomadaires : *E. coli*, entérocoques fécaux, spores de bactéries sulfato-réductrices, bactériophages ARN-f spécifiques, *Legionella* ssp, *Legionella pneumophila*, amibes, *Cryptosporidium* et *Giardia*.

Ces préconisations impliquent un maintien total de la qualité des EUT lors du stockage tant en physico-chimie qu'en microbiologie ou induit la mise en place d'étapes de traitement complémentaires.

Le dossier de demande d'autorisation prévoit également la description des ouvrages de stockage des EUT (matériel, localisation, enterré ou non, temps de séjour).

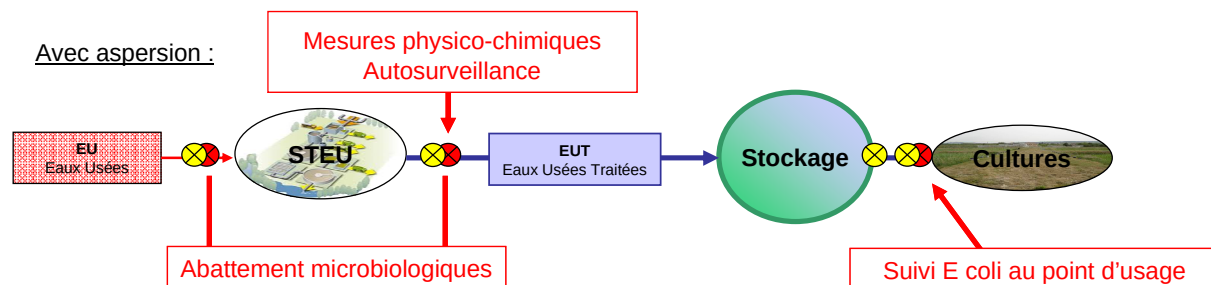


Figure 11 : Illustration des points de contrôle pour la validation des projets de REUT avec aspersion dans le cadre de l'Arrêté du 2 août 2010 (en jaune les points de contrôle spécifiques à l'irrigation par aspersion)

Les contraintes réglementaires associées à l'irrigation par aspersion représentent aujourd'hui un réel frein à tout projet de REUT par aspersion. Une révision du présent arrêté est actuellement en cours. Actuellement, aucun retour des installations ne permet le diagnostic de l'ouvrage de stockage.

Au niveau international, européen et national, aucune exigence n'est directement préconisée pour l'unité de stockage des EUT. Cependant, le suivi de la qualité des EUT en sortie de STEU et au point d'usage, induit indirectement une stabilité sinon une amélioration de la qualité des effluents lors du stockage.

2.3. Les réservoirs de stockage : variabilité du milieu

2.3.1. Evaluation de la qualité des EUT en entrée de stockage

L'évaluation de la qualité des EUT en entrée du réservoir de stockage est complexe face à la variabilité des contraintes réglementaires et du fait des procédés de traitement installés en amont du stockage. L'estimation de la qualité des EUT est basée sur la qualité requise réglementairement en fonction des cultures irriguées en aval.

La réglementation française prévoit l'atteinte des objectifs de qualité pour la REUT en sortie de station de traitement excepté pour le suivi d'*E. coli* effectué au point d'usage. Pour le cas de l'aspersion, des suivis complémentaires sont prévus en sortie du réservoir et au point d'usage.

Pour le rejet de station en France, les contraintes de qualité intègrent les paramètres DCO, DBO₅ et MES et plus spécifiquement les nutriments (azote, phosphore) et pathogènes si le milieu récepteur est classé sensible ou en zone spécifique. Pour les classes B, C et D de l'Arrêté de 2 août 2010, seules des contraintes microbiologiques sont exigées en complément des objectifs de rejet. Dans ce cas, la désinfection des EUT doit être considérée. Pour la classe A, des contraintes de qualité complémentaires sont exigées pour la DCO, MES et désinfection. Une adaptation du système de traitement peut être nécessaire.

Pour d'autres pays, la qualité des EUT en vue de leur réutilisation est requise au point d'utilisation uniquement ; ce qui suggère l'intégration de l'effet du stockage dans le traitement. La combinaison de procédés de traitement et stockage est ainsi possible.

D'autres modèles différencient la station de traitement des EUT de la station de recyclage : la station de recyclage peut, à partir d'eaux usées brutes du réseau de collecte, effectuer un traitement physique par « sédimentation, coagulation, filtration » complété d'une désinfection pour la REUT pour les classes de qualité les plus souples et ce, indépendamment de la station de traitement (cas des Etats-Unis).

Plus largement, aucune contrainte de traitement des nutriments n'est spécifiée pour la REUT en agriculture, le recyclage des nutriments étant un des objectifs de ces projets : **les EUT sont ainsi considérées comme spécifiquement chargées en nutriments.**

Dans le cas du traitement des nutriments par des procédés traditionnels, la charge en nutriments des EUT en sortie de station (tous procédés confondus y compris avec traitement de l'azote et du phosphore) reste supérieure aux concentrations des milieux aquatiques équilibrés (0,1 mg PT/L et 4,5 mg NT /L Le Pimpec (2012)). Seul un traitement par filtration membranaire poussée (nanofiltration et/ou osmose inverse) peut garantir des teneurs en nutriments proche du milieu naturel. Ces procédés sont plus souvent utilisés pour une valorisation des EUT en industrie, zones récréatives ou recharge de nappe et génèrent des coûts de construction et de maintenance non adaptés pour l'usage agricole (Verrecht *et al.*, 2012).

Le rejet dans le milieu naturel des EUT a pour but de diluer ces fortes concentrations. Dans le cas du stockage d'EUT, on parlera ainsi de **milieu hypertrophique**.

Plusieurs voies sont ainsi à considérer pour la gestion des unités de stockage des EUT :

- une gestion des ouvrages de distribution et stockage des EUT en présence de nutriments ;
- un stockage mixte d'EUT et eaux douces pour diluer ces fortes charges ;
- la mise en place de techniques de traitement plus performantes mais aussi plus coûteuses (type membrane, osmose inverse, ...) pour limiter au maximum la charge en nutriments dans les ouvrages de REUT.

2.3.2. Variabilité du milieu et potentiel de désinfection

Par analogie, on peut considérer les techniques de stockage à surface libre des EUT comme proches des techniques de stockage des eaux de surface (eaux de rivière, lacs, ou eaux pluviales). La différence majeure entre ces réservoirs (eaux potable, pluviales ou de rivière) et les réservoirs d'EUT est la qualité des eaux stockées :

- En aval du lagunage, pour le modèle combiné de lagune de maturation – réservoir de stockage, les EUT en entrée de réservoir seront plus chargées en matières organiques, nutriments et pathogènes ;
- En aval de traitements « classiques » **sans traitement tertiaire** : les EUT stockées seront considérées comme spécifiquement chargées en matières organiques et nutriments (teneurs variables selon la qualité du traitement en amont) et présentant des concentrations variables en pathogènes ;
- En aval de traitements « classiques » **avec désinfection** : les EUT stockées seront considérées comme spécifiquement chargées en matières organiques et nutriments (teneurs variables selon la qualité du traitement en amont) et conformes microbiologiquement ;
- En aval de traitements intensifs poussés (membranaire et osmose inverse) : la qualité des EUT stockées sera proche de la qualité d'eaux de surface (lacs ou rivières) ou potable exempte de pathogènes.

Ainsi, le terme de réservoir de stockage des EUT balaye un large spectre de qualité d'EUT en entrée de bassin (Figure 12). Pour appréhender l'évolution de la qualité des EUT dans ces unités, une brève présentation des réactions principales caractéristiques de ces milieux est présentée dans le chapitre 1.4.

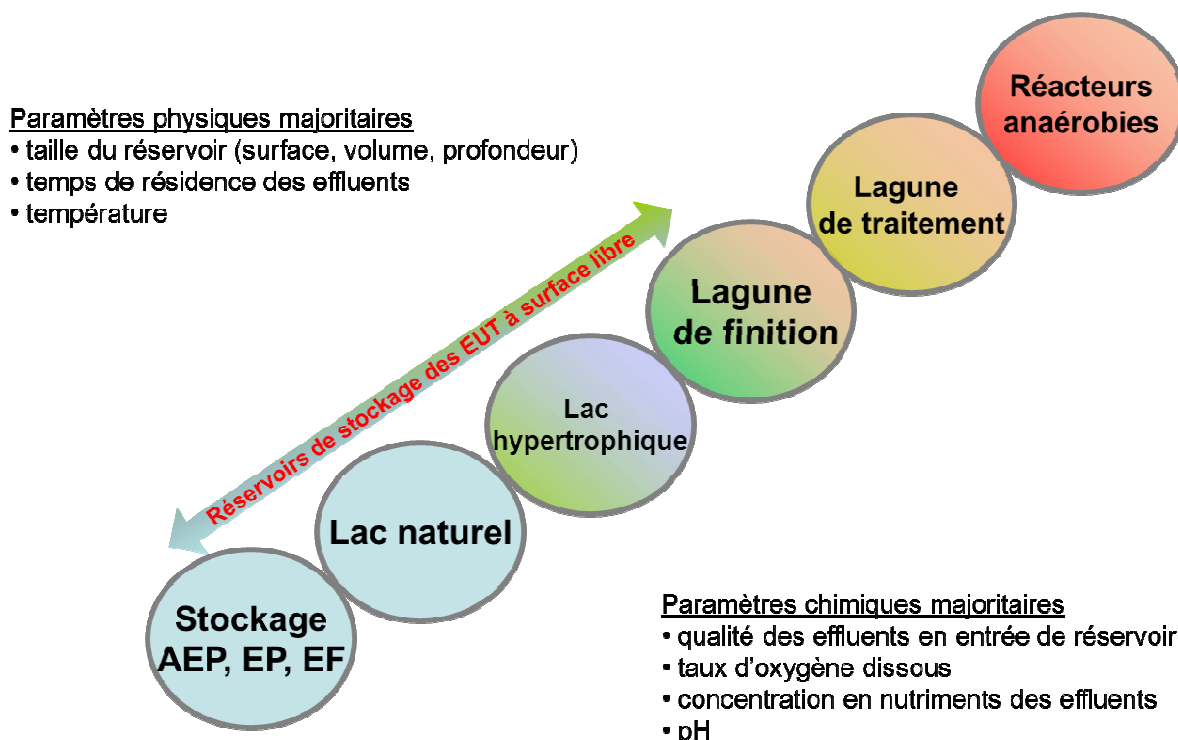


Figure 12 : Variabilité de la qualité des EUT à stocker dans les réservoirs saisonniers à surface libre
Avec AEP : Alimentation en Eau Potable, EP : Eaux Pluviales, EF : Eaux de Forage

2.3.3. Pratiques actuelles en France : enquête Irstea-SATESE 2011

Une enquête auprès des SATESE a été lancée pendant l'été 2011, pour compléter les recensements existants (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, 2012). 295 mails de consultation ont été envoyés aux services SATESE. 1 Sur 33 réponses, 13 SATESE témoignent de l'absence de réservoirs de stockage dans leur territoire et 20 questionnaires ont été complétés (présentés en détail en annexe).

Les résultats montrent que :

- 95% des réservoirs renseignés sont à surface libre pour 1% en béton.
- 10% sont des réservoirs opérationnels (voir la partie 4).
- Les profondeurs des réservoirs renseignés varient de 1 à 6 mètres.
- Les volumes stockés varient de 585 m³ (réservoir opérationnel) à 71 000 m³ (réservoir saisonnier).

Parmi les objectifs du stockage :

- 75% concerne une valorisation agricole
- 25% concerne l'irrigation de golfs et espaces verts
- 30% concerne une combinaison d'objectifs de limitation du rejet et irrigation.

Les types de traitement en amont sont répartis comme suit (Figure 13) :

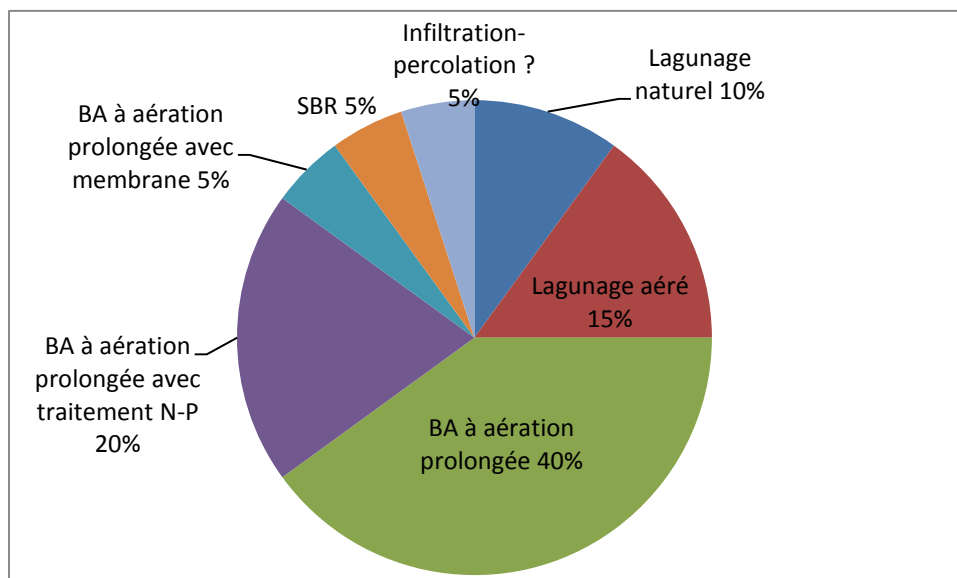


Figure 13 : Type de procédés en amont des réservoirs de stockage (enquête Irstea-SATESE 2011)

Pour 45% des projets, le réservoir de stockage permet la désinfection des EUT (Figure 14).

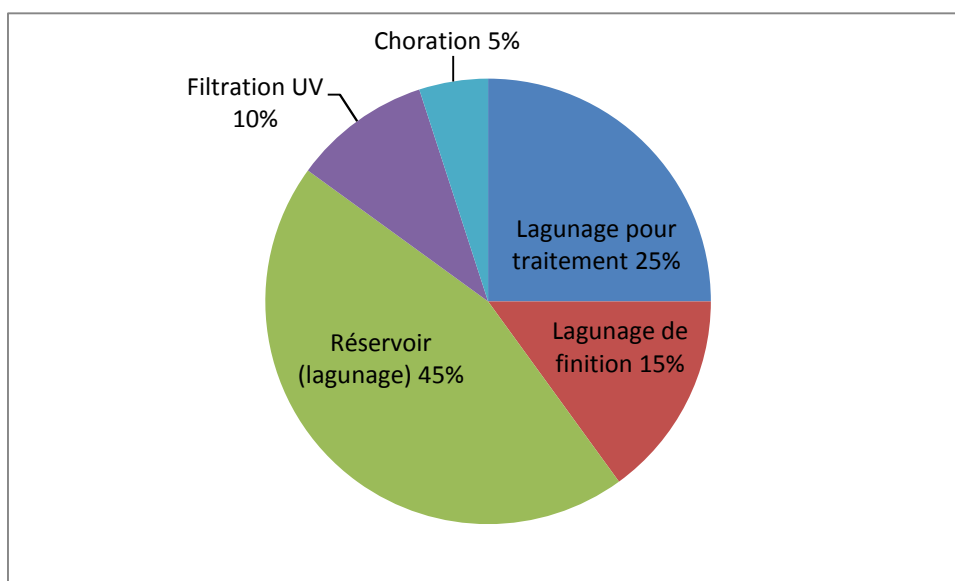


Figure 14 : Type de désinfection utilisées (enquête Irstea-SATESE 2011)

Sur 20 réservoirs renseignés, 9 présentent des problèmes d'exploitation dont :

- 6 avec des problèmes de développement algal et colmatage,
- 7 avec des problèmes de non atteinte de la qualité requise,
- 2 avec des problèmes de bâches d'étanchéité.

Les problèmes de développement algal ne sont pas directement dépendants de la profondeur des unités.

Les problèmes de qualité ne sont pas spécifiquement liés au réservoir mais au calcul des abattements requis pour l'utilisation des EUT. L'atteinte des abattements requis est difficile en cas de faible concentration en entrée de station.

A l'aide des données en ligne issues de la base de données BDERU du ministère en charge de l'environnement (<http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/>), il est constaté que 35% des réservoirs sont déclarés avec la station de traitement.

A partir des données satellites (Figure 15, Figure 16 et Figure 17), on constate que 75% de réservoirs renseignés dans l'enquête sont situés à proximité de la station de traitement.

Nous ne disposons pas de retours sur les suivis associés à ces unités y compris ceux imposés par législation.



Figure 15 : Image satellite de la station et réservoir de stockage associé de Thorigné (79) (extrait Google Earth)

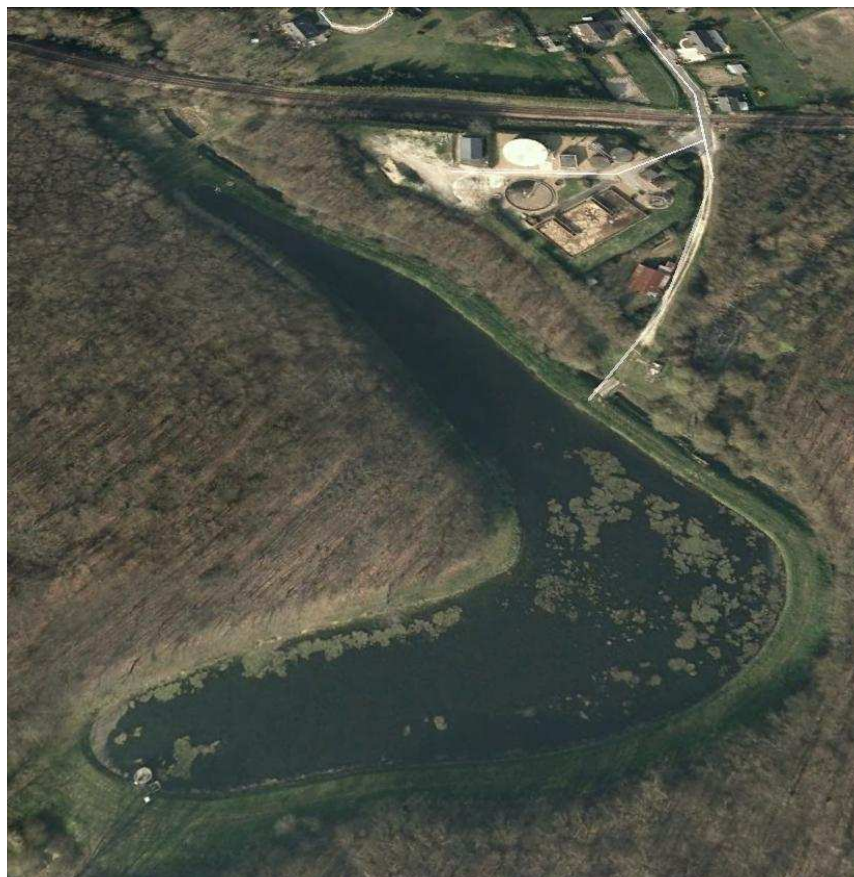


Figure 16 : Image satellite de la station et réservoir de stockage associé de Chambray-les-Tours "La Madeleine" (37) (extrait Google Earth)



Figure 17 : Image satellite de la station et réservoir de stockage associé de Bas Mauco (40) (extrait Google Earth)

3. Les réservoirs saisonniers à surface libre

3.1. Caractéristiques des réservoirs saisonniers ouverts

3.1.1. Historique et développement

Traditionnellement, l'usage de bassins de stockage de surface pour l'irrigation était largement répandue, ces derniers étant alimentés par des eaux usées, de surface ou pluviales. L'identification des risques sanitaires et environnementaux a conduit au développement de techniques de traitement et réglementations pour l'usage de ces bassins et le recyclage des eaux stockées.

Les premières expérimentations de REUT d'effluents traités se sont réalisées à partir de pompage dans les lagunes de maturation utilisées pour l'affinage du traitement dans le cas de l'utilisation de techniques de lagunage et dans les lagunes de finition utilisées pour le traitement tertiaire des EUT dans le cas de l'utilisation d'autres procédés. Ces expériences ont mis en évidence le risque de développement de courts circuits hydrauliques altérant la qualité des EUT et de fait le potentiel de valorisation des effluents (Abeliovich, 1982). Se sont ainsi développés des réservoirs de stockage profonds en aval des systèmes de traitement et des lagunes tertiaires (Dor *et al.*, 1987; Dor and Raber, 1990; Eran Friedler and Juanico, 1996; Juanico and Shelef, 1991; Shelef, 1991; Shelef *et al.*, 1987).

Les longs temps de séjour des EUT dans les réservoirs saisonniers favorisent la mise en place de dégradation et présentent un potentiel de traitement tertiaire par désinfection (Figure 18). Dès lors, en complément de l'objectif de gestion des volumes, il est admis que les réservoirs offrent un potentiel d'affinage du traitement. Des modèles de réservoirs de stockage combinés aux lagunes de maturation pour le lagunage ou combinés aux lagunes tertiaires pour les autres procédés de traitement sont ainsi développés (E. Friedler, 2001; Juanico, 1999; Juanico and Dor, 1999; Liran *et al.*, 1994; Mara, 2000; Mara and Pearson, 1999a, b). Ce nouveau schéma permet un gain foncier important et une limitation des investissements. Cependant, de nouveaux critères de dimensionnement ont dû être adaptés.

Rapidement, la dégradation de la qualité des EUT en fin de période d'irrigation, où le niveau du réservoir est le plus bas, a été identifiée. Le temps de séjour des EUT en fin de période n'est pas suffisant pour garantir la désinfection et les courts-circuits hydrauliques favorisés. En réponse, un séquençage de l'alimentation des réservoirs a été préconisé (période de remplissage, période de repos, période d'irrigation) (Barbagallo *et al.*, 2003b; Juanico and Shelef, 1994). Dans le cas d'un recyclage complet des EUT (0 rejet), plusieurs réservoirs en parallèle sont nécessaires.

Pour les zones les plus arides sujettes à une forte évaporation, l'augmentation de la profondeur des réservoirs de stockage pour l'affinage du traitement est privilégiée (profondeur entre 5 et 8 mètres et jusqu'à 20 mètres). Le potentiel de désinfection de ces unités dans ce contexte est catalysé par un fort rayonnement solaire associé à des températures élevées toute l'année. Pour les zones tempérées où le potentiel de désinfection est limité à une plus faible exposition solaire, la profondeur sera limitée (en moyenne 2 à 3 mètres) pour garantir l'atteinte des objectifs de traitement lors de la REUT.

Le problème majeur associé aux réservoirs saisonniers à surface libre est la variabilité du traitement microbiologique de ces unités. Ainsi, face à la variabilité des contextes climatiques, de la qualité des traitements en amont, de l'agencement des réservoirs et de leurs modalités d'exploitation, aucune règle de dimensionnement n'a pu être généralisée. Des efforts sont actuellement portés sur le développement de modèles numériques pour faciliter le développement de ces ouvrages dans les règles de l'art.



Figure 18 : Réservoirs saisonniers à surface libre

A gauche : Réservoir de stockage de surface des EUT de Forest Lake en Californie, Etats-Unis (<http://www.pbcsd.org>)

A droite : Réservoir de stockage de surface des EUT en Israël (<http://www.jnf.org>)

3.1.2. Agencement des réservoirs

Les réservoirs superficiels d'EUT comportent généralement des profondeurs allant de 1 à 23 mètres (Juanicó and Dor, 1999; Miller and Quinlan, 2003; Miller *et al.*, 2009).

Les profondeurs importantes favorisent la stratification du réservoir (§ 1.4.2) et provoquent des courts circuits hydrauliques (Brissaud *et al.*, 2003a; Kellner and Pires, 2002; Llorens *et al.*, 1992). Il est pourtant difficile d'évaluer la sensibilité d'un réservoir à stratifier car les paramètres influençant la stratification sont dépendants des conditions climatiques de la zone (vent et rayonnement), du mode de gestion des ouvrages (hydrauliques), de l'implantation des zones de pompage et de la qualité des EUT (développement algal). La stratification est plus fréquente en été pendant la saison d'irrigation mais peut être perturbée par les pompages pour l'irrigation.

Cette profondeur parfois importante des réservoirs vise à limiter l'emprise au sol et la perte en eau par évaporation et implique également une limitation de la surface réactionnelle aérobie (Figure 19). Pour les climats tempérés avec une disponibilité foncière, une limitation de la profondeur des réservoirs facilitera leur gestion.

Surface / Volume important

Forte capacité de traitement Forte emprise au sol
Forte charge organique Evaporation importante



Surface / Volume faible

Capacité de traitement limitée Faible emprise au sol
Faible charge organique Limitation de l'évaporation

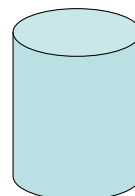


Figure 19 : Importance du ratio Surface/Volume

Les réservoirs de stockage à surface libre doivent être équipés d'une bâche étanche pour éviter l'infiltration des EUT dans le sol. L'agence pour la protection de l'environnement américaine (U.S. Environmental Protection Agency (2004)) oblige l'utilisation de bâches imperméables pour des sols à conductivités hydrauliques supérieures à 0,32 mm/j.

Le réservoir de stockage des EUT comporte en fond de bassin un volume considéré comme inactif d'environ 1 mètre, siège de dépôts et précipitations. Ce volume ne peut garantir une qualité d'effluent valorisable lors des pompages en fin de saison d'irrigation.

On considère le volume actif du réservoir, comme l'équilibre entre les gains de volume (entrée d'EUT et précipitations) et pertes de volumes (évaporation et fuites) (Figure 20). Certains réservoirs collectent des eaux de ruissèlement et/ou eaux pluviales en plus des EUT. Le dimensionnement du réservoir doit dans ce cas, considérer le débit maximum de ces apports pour éviter tout débordement lors d'années pluvieuses. Si seules les EUT alimentent le réservoir, le débit moyen des EUT est pris en compte pour le calcul du volume actif du réservoir.

La zone d'alimentation du réservoir (entrée) doit être la plus éloignée de la zone de pompage (sortie). En général, l'axe entrée-sortie du réservoir est perpendiculaire à la direction des vents dominants pour éviter tout court-circuit par la présence de courants en surface et contre-courants en profondeur.

Le développement algal en surface étant responsable de l'augmentation des concentrations en MES, DCO et turbidité, les pompages dans l'horizon superficiel seront limités pour prévenir des effets de colmatage du réseau de distribution aval et des asperseurs. Il est ainsi recommandé d'équiper les zones d'alimentation et pompage de flotteurs pour suivre les variations de niveau du réservoir. Les effluents sont injectés dans le réservoir dans l'hypolimnion pour favoriser l'équilibre en oxygène dissous dans le fond du réservoir et éviter tout phénomène de court-circuit hydraulique. Les effluents sont pompés préférentiellement à une profondeur de 1 mètre (hors zones turbides) où la qualité des EUT est plus acceptable (Juanicó and Dor, 1999).

Le phénomène de courts-circuits hydrauliques est considéré comme un facteur clé responsable de la dégradation de la qualité des EUT en sortie de réservoir. Certaines modélisations s'attachent à définir l'emplacement et le type de rampes d'alimentation, l'effet de la compartimentation du réservoir à installer (Shilton and Harrison, 2003). Les résultats montrent la nécessité d'adapter les techniques au cas par cas selon les conditions locales d'implantation (vent, forme du bassin, ...).

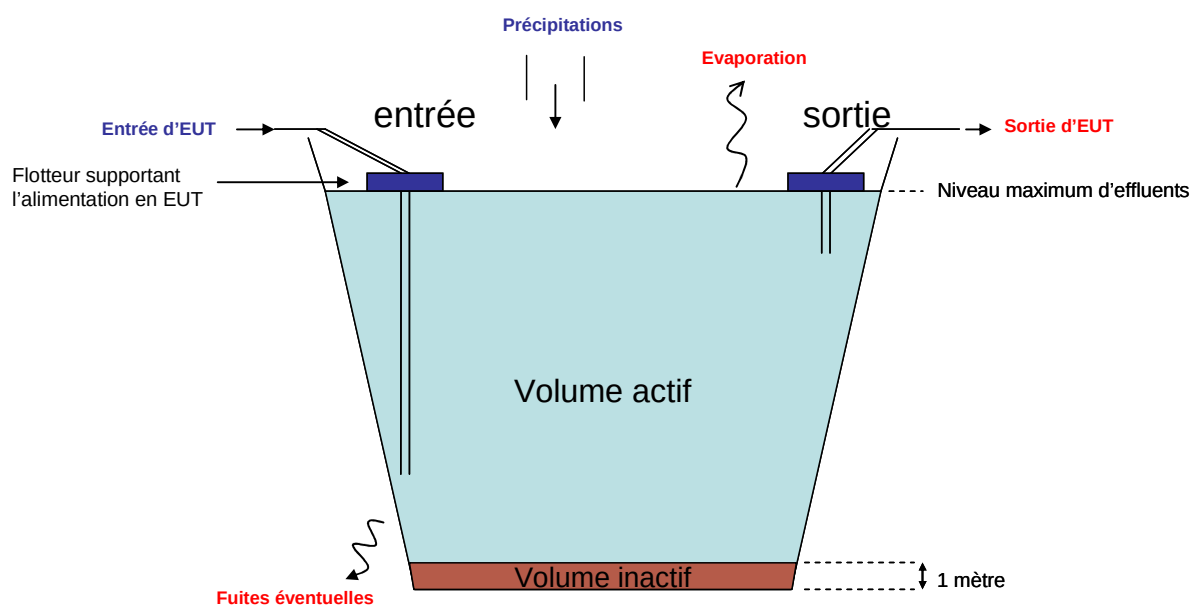


Figure 20 : Schéma d'un réservoir de stockage à surface libre

3.1.3. Dimensionnement et évolution

L'oxygénation des réservoirs étant essentiellement due à l'activité photosynthétique en surface, plus le ratio surface/volume est important, plus le taux d'oxygène dissous dans le réservoir sera faible. Ainsi, l'augmentation de la profondeur du réservoir impliquera une diminution de la charge organique appliquée au réservoir pour assurer le maintien des conditions aérobies dans le réservoir. Dans le cas où le foncier disponible est trop réduit, l'utilisation d'aérateurs et /ou brasseur doit être considérée.

Initialement, pour les réservoirs de stockage des EUT à surface libre, la charge organique recommandée était de maximum 15g DBO₅/m²/j pour maintenir les conditions aérobies dans des réservoirs de 2 à 11 mètres de profondeur et pour des concentrations d'EUT d'environ 40-50 mg DBO₅/L en Israël (Dor and Raber, 1990).

Des retours d'expériences plus récents en Israël suggèrent une charge organique maximale de 6 g DBO₅/m²/j pour des concentrations maximales de 40 à 50 mg DBO₅/L et des profondeurs de 5,5 à 10,5 mètres (Juanicó and Dor, 1999). En respectant une charge de 5 g DBO₅/m²/j, le stockage des EUT est garanti sans odeurs y compris la nuit lorsque l'activité photosynthétique est nulle. En complément, ces retours présentent un abattement de la DBO₅ à hauteur de 80% dans les conditions israéliennes.

Des valeurs de dimensionnement plus récentes en Italie du sud et Sicile suggèrent une **charge organique appliquée maximale de 30 à 40 kg DBO₅/ha/j soit 3 à 4 g DBO₅/m²/j** (Mancini and Vagliasindi, 2006). Au-delà de cette limite, des équipements spécifiques seront nécessaires pour éviter le développement de conditions anaérobies dans l'ensemble du réservoir. Ces préconisations supposent des ouvrages dimensionnés à 12,5 jusqu'à 20 m²/EH (pour 1 EH équivalent à 60 g DBO₅/j) ce qui peut correspondre à l'équivalent de 0,4 à 0,9 « hab. raccordé »/m² (pour 1 « habitant raccordé » équivalent à 0,15m³/j d'EUT de concentration en DBO₅ comprise entre 30 et 35 mg/L).

Cependant, le calcul de cette charge est dépendant du niveau d'EUT dans le réservoir. Selon le profil du réservoir : à niveau haut, la surface du réservoir sera plus grande, au niveau bas, elle pourra être considérablement réduite. Le dimensionnement doit, de ce fait, s'appliquer sur la surface minimale du réservoir, en niveau bas. Le non-respect de cette consigne va impliquer des surcharges organiques du système et un risque de conditions anaérobies dans la colonne d'eau.

Ces calculs de dimensionnement restent basés sur des retours de terrain pour des conditions spécifiques. Les charges préconisées appliquées ne permettent pas la prise en compte de la profondeur du réservoir. Le recours à des techniques de modélisation est nécessaire pour appréhender l'implantation de ces ouvrages dans de nouvelles conditions.

Le calcul de la surface minimale de réservoir nécessaire ($S_{r, \min}$) en m² (niveau bas) s'effectue à partir du volume d'EUT produit par jour à la station en m³/j $V_{EUT, j}$, de la charge organique maximale applicable au réservoir $CO_{\max}$ en g/m²/j et de la concentration maximale en DBO₅ des EUT en sortie de station $C_{DBO5 \max}$:

$$S_{r, \min} = \frac{C_{DBO5 \max} \times V_{EUT, j}}{CO_{\max}}$$

La profondeur maximale du réservoir $P_{r, \max}$ prend en compte le besoin annuel maximal en EUT pour irrigation $V_{irr, \max}$ en m³ et la surface minimale du réservoir $S_{r, \min}$ en gardant la sécurité d'1 mètre en fond de bassin (volume mort pour matières décantées) :

$$P_{r, \max} = 1 + \frac{V_{irr, \max}}{S_{r, \min}}$$

Ce calcul de profondeur maximale n'intègre pas volontairement l'augmentation de surface du réservoir par effet de bord à niveau haut pour maintenir une certaine marge de sécurité dans le dimensionnement.

Le temps de collecte t des EUT en jours est calculé comme suit :

$$t = \frac{V_{irr\ max}}{V_{EUT,j}}$$

3.2. Hydraulique des réservoirs saisonniers ouverts

3.2.1. Les réservoirs de stockage à alimentation continue

Un des premiers modèles de réservoir superficiel est le réservoir simple à alimentation continue constitué d'un bassin unique alimenté toute l'année par les EUT en sortie de station de traitement (pas de rejet). Il permet une optimisation des volumes à valoriser. Le régime hydraulique appliqué à ces réservoirs suppose un volume journalier stable en entrée de réservoir et des volumes en sortie variables selon la demande (Figure 21). Un bilan des volumes journaliers entre l'entrée et la sortie permet de dimensionner le système pour ne jamais descendre au niveau de la zone inactive.

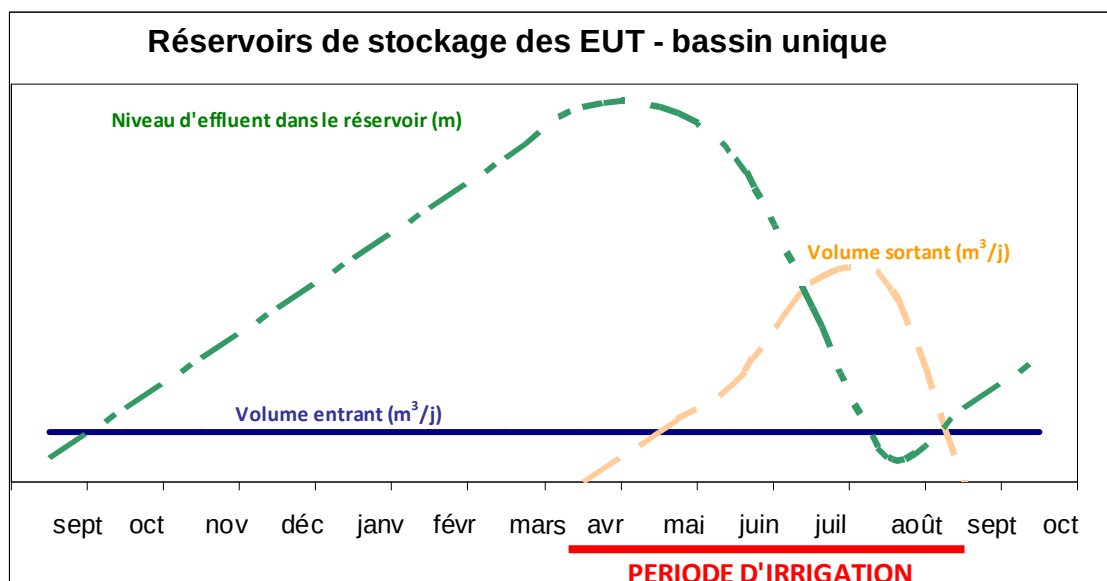


Figure 21 : Gestion des volumes dans le réservoir de stockage à surface libre

Ce modèle n'intègre que l'aspect stockage du réservoir sans prise en compte de la qualité des EUT. En réalité, les réactions physico-chimiques et biologiques exposées dans les paragraphes précédents impliquent des variations de la qualité des EUT dans le réservoir (développement algal, stratification, courts-circuits hydrauliques...). Selon les charges appliquées, les conditions climatiques, la saison de prélèvements, des variations de la qualité des EUT sont constatées.

Pour le cas où les EUT ont été préalablement « stabilisées » et conformes aux exigences réglementaires, il existe un risque de dégradation de la qualité physico-chimique (augmentation des concentrations en DCO, MES et turbidité). De plus, pour les classes de qualité les plus strictes (notamment aux Etats-Unis avec des exigences d'abattement de coliformes totaux < 2,2 NPP/100mL ou italien avec E. coli < 10 UFC/100mL), des risques de contamination dans les réservoirs de stockage

à surface libre par la présence d'animaux en surface sont identifiés (Higgins *et al.*, 2009). D'autres études montrent la possibilité de nouvelle augmentation de certains indicateurs bactériens dans les EUT chlorées (Higgins *et al.*, 2009; Jjemba *et al.*, 2010). Dans le cas de réglementations strictes, des unités complémentaires de filtration, désinfection en aval du réservoir sont indispensables (Fuog *et al.*, 1995).

Dans la majorité des cas, le réservoir de stockage combine l'objectif de stockage quantitatif au potentiel d'affinage. Dans ces cas, une des principales limites du système à réservoir unique à alimentation continue est la dégradation de la qualité microbiologique des EUT lors de la période d'irrigation. Après stockage, la qualité des EUT est optimale en début de saison d'irrigation quand le réservoir est plein (surface importante) avec des effluents à long temps de séjour. La qualité des EUT se dégrade très rapidement lorsque le niveau d'effluents baisse (surface réduite, charge organique supérieure). La contribution des EUT en entrée de réservoir est plus importante, un effet de contamination peut être identifié. La qualité des effluents dans le réservoir est fortement dégradée à la fin de la saison d'irrigation quand le réservoir est pratiquement vide.

Le réservoir fonctionnant en régime transitoire, le temps de séjour des effluents est variable. On parlera de Pourcentage d'Effluents Frais (PEF) pour représenter la part d'effluents récemment introduite dans le réservoir. Ce PEF est directement lié au risque de dégradation de la qualité microbiologique. De nombreuses études (Bahri *et al.*, 2001; Barbagallo *et al.*, 2003a; Barbagallo *et al.*, 2003b; Cirelli *et al.*, 2009; Liran *et al.*, 1994; Mancini *et al.*, 2007) montrent la corrélation positive qui existe entre le PEF et la concentration en indicateurs fécaux. Plus le PEF est important, plus la concentration en indicateurs fécaux est importante.

Les premiers suivis analytiques (Juanicó and Dor, 1999) de plusieurs réservoirs de stockage à alimentation continue en Israël montrent que pour une saison d'irrigation de 4 à 5 mois par an, la moyenne annuelle des temps de séjour des effluents dans les réservoirs est de 80 à 130 jours pour une dégradation moyenne de 70 à 85 % de la charge en DBO₅ ; 50 à 85 % de la charge en DCO et de 40 à 80 % de la charge en MES. La dégradation des coliformes totaux dans les réservoirs semble s'élever à seulement 1 unité log en moyenne annuelle du fait de l'introduction continue d'effluents frais dans le réservoir.

D'autres expériences en réservoirs à alimentation continue montrent des possibilités de traitement des coliformes fécaux (FC) de l'ordre de 2 à 3 log pour un cas espagnol (Llorens *et al.*, 1992).

La prédiction de l'abattement microbiologique de ces unités se base sur des équations de premier ordre appliquées au réacteur continu du type :

$$N_t = \frac{N_0}{1 + K_T \times TDS}$$

Avec N_T la concentration en coliformes fécaux (UFC/100mL) dans le réservoir au temps t ,

N_0 la concentration en coliformes fécaux (UFC/100mL) en entrée de réservoir

K_T le coefficient de mortalité des coliformes fécaux (j^{-1})

TDS le temps de séjour moyen des EUT dans le réservoir (j)

La détermination du coefficient Kt dépend de l'intensité solaire et la température (Barbagallo *et al.*, 2003a; E. Friedler *et al.*, 2003; Mannina *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2002). Ainsi, Kt varie dans le temps (saison) et l'espace (implantation). Des corrections de l'intensité lumineuse en intégrant l'effet de profondeur et de la concentration en MES permettent d'affiner le calcul (Xu *et al.*, 2002). L'équation de Marais permet de corriger l'effet de température. Le calcul du temps de séjour est proposé par Juanicó

and Dor (1999) et des améliorations sont plus tard émises par Cirelli *et al.* (2009) substituant la notion de temps de séjour du pourcentage d'effluents les plus frais au temps de séjour moyen.

Malgré le développement de techniques de prédiction de l'abattement des pathogènes dans le réservoir de stockage, des variations de qualité sont observées dans l'année. L'influence du pourcentage d'effluents frais est identifié comme un élément majeur contribuant au limite de l'abattement des pathogènes. Ce paramètre met en lumière les courts-circuits hydrauliques qui peuvent être présents dans les réservoirs à alimentation continue, ces derniers étant amplifiés par la présence de stratification et un mauvais agencement des points d'alimentation et de pompage (Barbagallo *et al.*, 2003b; Brissaud *et al.*, 2003a). Les réservoirs à alimentation continue ont ainsi des limites de traitement des pathogènes, mais peuvent pour autant satisfaire les exigences de traitement les plus souples (Tableau 3).

Tableau 3 : Caractéristiques de réservoirs saisonniers à alimentation continue

Pays	Volume du réservoir m^3	Profondeur du réservoir m	Temps de séjour moyen j	Abattement CF $unité \log$	K_T j^{-1}	Références
Espagne	15 000	8	88	2 - 3		Llorens, 1992
Israël	6 400 000	10,5	80 - 100	1		Dor, 1990; Juanico, 1991, 1994; Shelef, 1994; Liran 1994
Tunisie	130 000	1,45 - 4	40	1 - 2		Bahri, 2000, 20001
France	11 300 - 90 000	1,4 - 2,8	144	2 - 3	0,05 - 58	Xu, 2002
Italie	25 000	5	70 - 120	2 - 5	0,04 - 40	Barbagallo, 2003
Italie	80 000	3,75	30	2 - 3	0,06 - 22,5 5,1 - 71,4*	Lopez, 2006; Cirelli 2009 * avec intégration TDS%PE

Pour répondre au problème de courts-circuits hydrauliques, plusieurs solutions peuvent être proposées :

- Stopper l'alimentation du réservoir avant et pendant la saison d'irrigation si le rejet des EUT dans le milieu récepteur est possible : alimentation séquencée d'un réservoir,
- Mettre en place plusieurs réservoirs en parallèle avec une alimentation séquencée pour maintenir le contrôle du rejet dans le milieu récepteur si ce dernier n'est pas possible,
- Mettre en place des techniques complémentaires de filtration et désinfection en sortie de bassin pour assurer l'atteinte des objectifs de qualité.

Le choix entre ces techniques devra s'inscrire dans une démarche de logique économique. Des études s'attachent à comparer le choix entre agrandir les réservoirs existants pour répondre à des exigences de traitement plus fines et ajouter un système de désinfection complémentaire en sortie de réservoir (Brissaud *et al.*, 2003b). Dans le contexte de cette étude, l'extension des réservoirs de stockage est moins coûteuse que l'addition de modules de filtration-désinfection complémentaire.

3.2.2. Affinage de la qualité par séquençage de l'alimentation

La mise en place de réservoirs avec une gestion séquencée de l'alimentation permet d'optimiser le potentiel de désinfection attribué à ces unités. Dans ce contexte, les réservoirs de stockage constituent un véritable outil de traitement et d'affinage et sont utilisés de manière séquencée avec des périodes de remplissage, de dégradation, de repos-décantation et des périodes de réutilisation.

Dans ce mode fonctionnement, l'alimentation des réservoirs est stoppée avant le pompage des effluents pour leur valorisation. Les caractéristiques techniques de ces réservoirs sont similaires aux réservoirs à alimentation continue.

Pour une REUT totale des EUT (sans rejet dans le milieu), la mise en place de réservoirs parallèles est indispensable. Lors de l'interruption de l'alimentation du premier réservoir, les effluents doivent être stockés dans un autre réservoir. Le nombre optimal de réservoirs est de 3 à 4 mais peut être de 5 à 6

dans certains cas. Les effluents sont prélevés depuis un seul réservoir tandis que les autres sont en alimentation, au repos ou à l'arrêt. Les cycles d'alimentation / repos sont plus courts lors de la saison d'irrigation et certains réservoirs peuvent être vidés deux fois lors de la saison à la plus forte demande en eau.

Les premières expériences de réservoirs à alimentation séquencée en Israël (Juanico, 1996; Juanico and Shelef, 1994) puis au Brésil (Athayde G.B *et al.*, 2000; Mara and Pearson, 1999a; Mara *et al.*, 1996) montrent la possibilité d'atteinte des niveaux de qualité stricts (< 100 CF UFC/100mL) avec des temps de repos de 15 à 25 jours pour des profondeurs de 2 à 7 mètres. D'autres expériences pilotes en Tunisie (Bahri *et al.*, 2000; Bahri *et al.*, 2001) identifient des qualités d'EUT inférieures à 200 CF UFC/100mL pour un temps de séjour de 40 jours (profondeur de 3 à 4 mètres) et des temps de séjour de 5 à 15 jours pour atteindre le niveau de qualité inférieur à 1000 CF UFC/100mL.

En Italie, des préconisations de stockage d'un minimum de 20 jours avec 2 à 3 réservoirs en parallèle sont émises (Cirelli *et al.*, 2008). Les directives de l'OMS préconisent un temps de séjour de 11 jours des EUT dans le réservoir avant irrigation avec restriction d'usage et de 22 jours pour une irrigation sans restriction d'usage.

Pour des réservoirs à alimentation séquencée, les cycles d'alimentation/repos des réservoirs sont d'environ 30 à 50 jours. Les performances de ces réservoirs sont supérieures aux réservoirs à alimentation continue. Les dégradations sont plus rapides avec par exemple une mortalité des pathogènes de plus de 5 logs. La gestion séquencée des réservoirs permet également l'abattement du phosphore par ajout de coagulant et décantation (Juanico and Dor, 1999). Des adaptations locales avec la prise en compte de nombreuses particularités (qualité des EUT entrantes, climat, réservoir, agencement, temps de repos...) sont nécessaires et supposent l'intégration de nombreux paramètres. Le recours à des techniques de modélisation est préconisé.

3.3. Modélisation

La modélisation des réservoirs représente un outil d'aide à la décision incontournable pour adapter le dimensionnement d'un réservoir dans un projet spécifique, garantir l'atteinte des exigences requises, déterminer les conditions d'exploitation et les modules de traitement nécessaires. Les réservoirs de stockage des EUT étant au carrefour de nombreuses disciplines (limnologie pour les réservoirs les plus grands, épuration et microbiologie, hydraulique, ...), l'établissement de modèle intégrant l'ensemble de ces caractéristiques s'avère complexe.

Les techniques de modélisation des réservoirs se sont développées dans un premier temps, par des modèles dits simples, permettant la représentation de certaines réactions isolées pour aboutir ensuite à l'élaboration de modèles complexes agencant l'ensemble des modèles simples.

3.3.1. Modèles simples

Prédiction de la concentration maximale en DBO_5 des EUT en entrée et conditions d'oxygénation

Les premiers modèles s'attachent à prédire la concentration maximale en DBO_5 acceptable des EUT en entrée de réservoir sans favoriser l'établissement de conditions anaérobies dans des réservoirs avec ou sans stratification. Les hypothèses initiales prévoient une concentration nulle en oxygène dissous des EUT en entrée ; les débits d'alimentation et de pompage en sortie négligeables face aux volumes stockés (grands réservoirs) ; les constantes de dégradation fixes pour le phénomène de diffusion eau-atmosphère, la respiration microbienne et la consommation en oxygène pour la dégradation de la DBO_5 ; le taux de production d'oxygène photosynthétique dépend uniquement de l'intensité du rayonnement solaire et est considéré constant à travers la colonne d'eau pour le modèle homogène et constant dans l'horizon supérieur pour le modèle stratifié. Les conditions initiales impliquent la présence de conditions anaérobies dans le réservoir dès 6h du matin.

Les limites de ces modèles sont clairement dans l'absence de prise en compte du régime transitoire représentatif des réservoirs de stockage. De plus, les constantes choisies ne prennent pas en compte les variations des conditions environnementales, les charges de nutriments, la concentration algale...

Ces modèles sont très limités et ne permettent pas une simulation dynamique des réservoirs. Toutefois, ils permettent de connaître les limites statiques des réservoirs en concentrations de DBO_5 . Comparé aux données réelles, le modèle homogène est représentatif des réservoirs dont la profondeur est comprise entre 0 et 4 mètres tandis que le modèle stratifié correspond à des profondeurs de réservoirs de 5 à 7 mètres. L'établissement de conditions anaérobies s'opère selon les simulations à des concentrations supérieures à 20 mg/L DBO_5 pour le modèle homogène et 40 mg/L pour le modèle stratifié.

Prédiction de l'accumulation de la matière organique dans les sédiments

Ce modèle est conçu pour la prédiction de l'accumulation des sédiments en fond de bassin en prenant en compte les taux de sédimentation et de dégradation en fonction de la concentration en matière organique des sédiments (Avnimelech and Wodka, 1988).

Les hypothèses initiales intègrent une constante fixe de dégradation de la matière organique dans les sédiments ; la dégradation des sédiments est régie par une réaction cinétique de premier ordre dépendante uniquement de la concentration en matière organique des sédiments.

Les limites de ce modèle sont dans le choix des constantes de sédimentation (0,31 kg C/m²/an) et de dégradation (0,42 /an) qui ne permet la prise en compte de l'influence de la température, du taux d'oxygène dissous sur la constante de dégradation. Le régime transitoire du réservoir n'est pas pris en compte.

Modèle statistique de prédiction de la dégradation de la DBO_5 et DCO en régime transitoire

A partir de l'expérience israélienne, des modèles empiriques ont pu être définis pour déterminer les facteurs influençant les concentrations en DBO_5 et DCO dans les réservoirs (Juanico, 1991; Juanico and Shelef, 1991, 1994).

Les résultats montrent une simulation conforme aux données observées excepté en fin de période d'irrigation où le niveau d'EUT et leur temps de séjour dans le réservoir sont les plus faibles et le PEF_{30} (fraction d'effluents ayant séjournés au moins 30 jours dans le réservoir) maximal. Dans ces conditions, l'hypothèse d'un réacteur parfaitement mélangé n'est plus applicable face à la présence de courts-circuits hydrauliques.

Le PEF_{30} est identifié comme le paramètre affectant majoritairement les dégradations de DBO_5 et DCO par corrélation négative. Le temps de séjour n'est pas déterminant pour appréhender les dégradations de la matière organique compte tenu du régime hydraulique appliqué. Les performances en DBO_5 ne semblent pas affectées par la concentration en DBO_5 en entrée de réservoir tandis que les performances en DCO sont affectées par la concentration en entrée. Les dégradations sont plus importantes à faible niveau d'EUT dans le réservoir (oxygénation favorisée).

Ce modèle ne peut être transposé, étant développé sur une base de données d'un territoire donné mais permet la compréhension des mécanismes de dégradation de la matière organique. Le PEF étant déterminé comme un paramètre clé, de nouveaux modèles se sont développés pour appréhender la qualité des EUT dans le réservoir à partir du calcul de l'âge hydraulique des effluents sur la base du PEF (Consoli *et al.*, 2011; Juanico and Friedler, 1994).

3.3.2. Modèles numériques

Le développement de modèles mécanistiques-empiriques pour prédire la qualité des EUT en sortie de réservoir en fonction du régime hydraulique, de la qualité des EUT en entrée, des caractéristiques du réservoir et des conditions météorologiques a été initié par E. Friedler *et al.* (2003) et amélioré par Mannina *et al.* (2008).

Ce modèle est un méta-modèle regroupant une compilation de sous-modèles intégrant :

- L'hydraulique,
- La variation journalière des radiations solaires,
- La pénétration des radiations solaires dans la colonne d'eau,
- La communauté algale,
- La communauté zooplanctonique,
- L'accumulation de la matière organique,
- La sédimentation et la dégradation dans la colonne d'eau et sédiments,
- La mortalité des micro-organismes pathogènes dans la colonne d'eau et sédiments,
- Les interactions entre les sédiments et la colonne d'eau.

Le réservoir est représenté par les conditions initiales suivantes :

- Série verticale de 6 niveaux horizontaux intégrant les variations de volume (profil du bassin),
- Horizon représentant les sédiments de 5 cm,
- Respect du principe de conservation de la masse dans chaque horizon,
- Modèle biologique simplifié (algues, zooplanctons, bactéries pathogènes),
- Choix du régime thermique (3 états : homogène, stratifié, alternance journalière).

Les paramètres d'entrée sont les suivants :

- Pluies,
- Evaporation,
- Radiations solaires,
- Régime hydraulique (débits d'alimentation et sortie, distribution spatiale des prélèvements),
- Caractéristiques du réservoir,
- Qualité des EUT en entrée,
- Température du bassin.

Les paramètres de sortie sont les suivants :

Dans la colonne d'eau :

- Algues (développement, respiration, mortalité, décantation),
- Oxygène dissous (diffusion et mélange entre compartiments, diffusion atmosphérique, production et consommation, apports par eaux pluviales),
- Indicateurs bactériologiques (mortalité, décantation),
- Matière organique (bactéries et décantation),
- Zooplancton (développement, respiration, mortalité),
- Paramètres opérationnels (niveau d'EUT, surface et hauteur des horizons).

Dans les sédiments :

- Matière organique (cinétique, concentration, oxygène dissous),
- Indicateurs microbiens (mortalité en fonction de la température et taux d'oxygénation).

Paramètres manquants :

- Phosphore et azote : les teneurs en azote et phosphore sont supposées comme en excès donc non limitantes pour le développement biologique, l'intégration des teneurs en nutriments n'est que fonction de la teneur en matière organique.
- Biomasse bactérienne : cette population souvent détaillée dans l'approche épuratoire est intégrée à la matière organique.

Résultats

Les constantes de dégradation et les conditions initiales du modèle ont été choisies pour son adaptation au contexte israélien. Les algues sont représentées par le taux de chlorophylle (sur la base de $0.025 \text{ mg C}/\mu\text{g chl}_a$), la matière organique par la DCO et le COT et la concentration en zooplancton à partir de $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ mg C/animal}$. Le modèle a été calibré sur des réservoirs israéliens existants avec les concentrations suivantes : 260 mg/L DCO , $940 \mu\text{g/L chlorophylle}$ et $4 \cdot 10^6 \text{ UFC/100mL}$. Les EUT sont pompées en sortie à 1 mètres de profondeur et filtrées (le résidu est renvoyé dans le réservoir). L'alimentation est effectuée dans l'hypolimnion.

Mannina *et al.* (2008) a adapté ce modèle au contexte italien. La comparaison des résultats du modèle aux résultats d'un réservoir profond 6 mètres permet de valider le modèle.

3.3.3. Développement

Le développement des techniques de modélisation favorise l'implantation de ces systèmes mais leur nombre et le prix important des licences semblent dissuader les gestionnaires (Miller and Quinlan, 2003).

Actuellement, plusieurs courants se sont dégagés et suggèrent aujourd'hui l'adaptation de technique de traitement pour favoriser les projets de REUT.

Les techniques de lagunage particulièrement efficaces dans les zones fortement exposées au rayonnement solaire et avec des températures élevées, peuvent être adaptées pour la valorisation agricole. Certains auteurs (Juanico and Shelef, 1994; Mara and Pearson, 1999a) proposent :

- l'adaptation de réservoir – lagune en sortie de lagune anaérobie pour des usages restrictifs,
- l'utilisation d'EUT pour des usages restrictifs en sortie d'un premier réservoir et pour des usages non restrictifs en sortie d'un dernier réservoir en aval,
- La mise en place de réservoirs en parallèle pour des usages non restrictifs.

D'autres courants proposent de favoriser le recyclage des nutriments en limitant le traitement des eaux usées au traitement primaire accompagné d'une désinfection. Cornel and Weber (2004) suggèrent de compartimenter une station de traitement à boues activées avec une chaîne de traitement du carbone seul pour le recyclage des EUT et en parallèle d'autres chaînes avec des modules de traitement de l'azote et du phosphore pour les rejets d'EUT dans le milieu récepteur.

Cependant, depuis ces expérimentations, l'évolution de certaines législations notamment en Israël (Kfir *et al.*, 2012) et en Italie (Barbagallo *et al.*, 2012) vers des objectifs de qualité clairement plus stricts ($< 10 \text{ FC UFC} / 100\text{mL}$) remettent en cause ces modèles. L'atteinte de ces objectifs nécessite l'utilisation de techniques de désinfection plus intensives et questionne la viabilité économique de nombreux projets de petites tailles.

3.4. Conclusions

Les réservoirs de stockage saisonniers à surface libre sont assimilables à des lagunes de finition. Les longs temps de séjour de ces unités favorisent les dégradations et notamment la désinfection des EUT. Une gestion de l'alimentation des réservoirs semble incontournable pour limiter les contaminations par les effluents frais.

Pour les contraintes réglementaires les plus strictes (classe A du type « californien » avec des concentrations requises en coliformes inférieures à 10 UFC/100 mL), des phénomènes de dégradation de la qualité microbiologiques sont constatés notamment par la présence d'oiseaux à proximité des réservoirs. Dans ce contexte, des unités de filtration et désinfection en sortie de réservoir sont exigées.

Pour des classes de qualité plus souples (classe A du type OMS avec des concentrations requises en coliformes inférieures à 1 000 UFC/100 mL, cas de la France), les réservoirs de stockage sont capables d'assurer une qualité d'EUT conforme pour un dimensionnement adapté et pour des temps de séjour supérieurs à 30 jours. Cependant, la prise en compte des spécificités locales est indispensable pour garantir la qualité requise tout au long de l'année.

Pour des usages agricoles (type fourrage, destination industrielle), les réservoirs saisonniers à surface libre peuvent garantir la qualité requise dans le respect des règles de dimensionnement et d'aménagements précisés dans les paragraphes précédents.

Des recherches complémentaires pour améliorer le dimensionnement de ces ouvrages sont nécessaires. D'ores et déjà, les retours d'expériences de terrain témoignent de la présence d'odeurs et de développement algal excessif dans certains bassins. Outre les odeurs qui sont directement reliées à un problème de dimensionnement, le développement algal est incontournable et implique une augmentation saisonnière de la DBO₅, DCO, MES et turbidité, facteurs dégradant la qualité en sortie de réservoirs.

4. Les réservoirs opérationnels : une réserve de régulation

Le rôle principal des réservoirs opérationnels est de réguler les volumes journaliers d'EUT pour répondre aux pics de demande (Figure 22) mais il est également multiple si on considère l'ensemble des opérations de maintenance d'un réseau de distribution des EUT :

- assurer une réserve en cas de problème,
- permettre une gestion des pressions sur le réseau de distribution,
- offrir un point de traitement complémentaire si des besoins de désinfection sont nécessaires pour palier le phénomène de croissance bactérienne dans les réseaux de distribution,
- permettre un contrôle de la qualité des EUT.

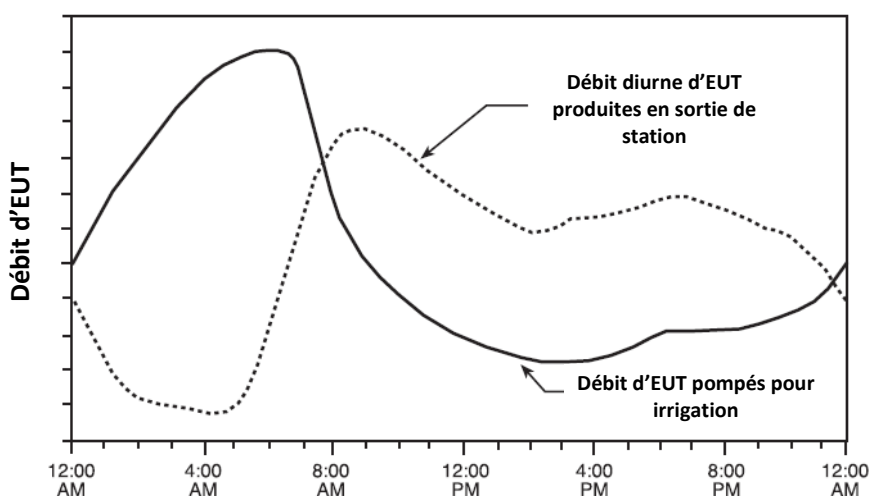


Figure 22 : Régulation des débits journaliers par les réservoirs opérationnels

Des équipements spécifiques de suivi sont nécessaires pour la gestion des volumes (mesures de débits et hauteur d'EUT) mais aussi de la qualité (sondes de mesures en continu de l'oxygène dissous, H_2S , chlore résiduel...). Il est préférable d'équiper ces ouvrages de télégestion pour commander les pompes pour irrigation et réapprovisionnement.

4.1. Les réservoirs opérationnels à surface libre

4.1.1. Contrôle de la qualité

Les réservoirs opérationnels à surface libre (Figure 23) se différencient des réservoirs saisonniers par leur temps de séjour réduit à un maximum de 2 à 3 jours. Ils permettent une régulation des flux journaliers d'EUT produits par les STEU pour les adapter aux besoins en irrigation. Ils peuvent être utilisés seul ou en aval de réservoirs saisonniers comme réservoirs satellites.

L'exposition des EUT à la lumière favorise le développement de réactions biologiques mais aussi physico-chimiques similaires aux réactions présentes dans les réservoirs saisonniers ouverts (cf. §1.4.1).

Les faibles temps de séjour de ces unités ne permettent ni l'atteinte d'un « équilibre » au sein du réservoir ni la mise en place d'une désinfection en surface. Selon la température extérieure et celle des EUT, les réactions pourront être stimulées ou limitées au sein du réservoir. Le développement algal représente un risque de dégradation de la qualité des EUT par augmentation des concentrations en

DCO, MES et turbidité et une dégradation esthétique des ouvrages (cas des golfs). Des techniques de gestion du développement algal sont ainsi nécessaires.



Figure 23 : Réservoirs opérationnels ouverts

A gauche : Réservoir opérationnel d'EUT ouvert pour l'irrigation d'une pépinière en Floride (<http://madisonfloridavoice.net>)

A droite : Réservoir opérationnel pour l'irrigation de golf (<http://www.ci.goldsboro.nc.us>)

Les réservoirs opérationnels permettent le stockage d'eau maximum l'équivalent de quelques jours d'irrigation. Les variations de niveau dans ces réservoirs seront ainsi très importantes. En théorie, ces ouvrages sont soumis à un cycle de « recharge / vidange » complet. Dans la réalité, la présence de sédiments en fond de bassin va limiter la vidange complète des ouvrages.

Pour les réservoirs saisonniers, les variations de volume sont moins importantes et permettent ainsi de privilégier un pompage des EUT entre la zone la plus chargée en algues et l'hypolimnion. Pour les réservoirs opérationnels, cette adaptation sera plus difficile. En conséquence, un contrôle du développement algal est nécessaire pour limiter le colmatage des équipements en amont.

4.1.2. Gestion des réservoirs opérationnels

L'atteinte des objectifs de qualité des EUT pour l'irrigation en sortie de STEU ne garantit pas une qualité d'effluents suffisante pour assurer un équilibre au sein des réservoirs. Selon la charge en nutriments des EUT, on constatera une variabilité importante de la réponse biologique.

Cependant, la prise en compte de la charge en nutriments n'est pas intégrée dans les données de dimensionnement de la bibliographie. Seule la charge organique maximale de **3 à 4 g DBO₅/m²/j** est préconisée. Mais selon la profondeur des réservoirs, la charge en nutriments et les conditions climatiques de la zone, la gestion de ces ouvrages pourra varier.

Des retours d'expériences aux Etats-Unis (Miller and Quinlan, 2003; Miller *et al.*, 2009) d'unités de stockage opérationnelles d'EUT après traitement poussé font état de dégradation de la qualité des EUT dans les réservoirs ouverts par développement algal et émissions olfactives et proposent un ensemble d'alternatives pour faire face à ce problème. Les charges organiques appliquées aux réservoirs ne sont pas détaillées.

On considérera les outils suivants comme moyens de contrôle de l'activité biologique responsable des désagréments courants :

- la désinfection dans le réservoir,
- la limitation des nutriments,
- le brassage et l'oxygénation.

Désinfection du réservoir

Face à la sensibilité des réservoirs d'EUT à l'eutrophisation, le contrôle de l'activité biologique par désinfection peut permettre le maintien de la qualité des EUT dans les réservoirs ouverts.

Parmi les techniques classiques de désinfection, seul le traitement par chloration a un effet rémanent. L'injection de chlore en amont du réservoir et/ou dans le réservoir avec des teneurs résiduelles importantes (minimum de 1 mg/L de chlore résiduel) peut éviter le développement de l'activité biologique mais nécessite un suivi fin et des volumes de désinfectants importants (Figure 24). Selon la charge en nutriments des EUT, les volumes requis pour maintenir la désinfection pourront être considérables mettant en péril la viabilité économique du système. Il faut ajouter que l'utilisation de chlore est actuellement controversée face au développement de sous-produits (Abou-Elela *et al.*, 2012; Karnik *et al.*, 2005; Tian *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2013; X. L. Zhang *et al.*, 2013).

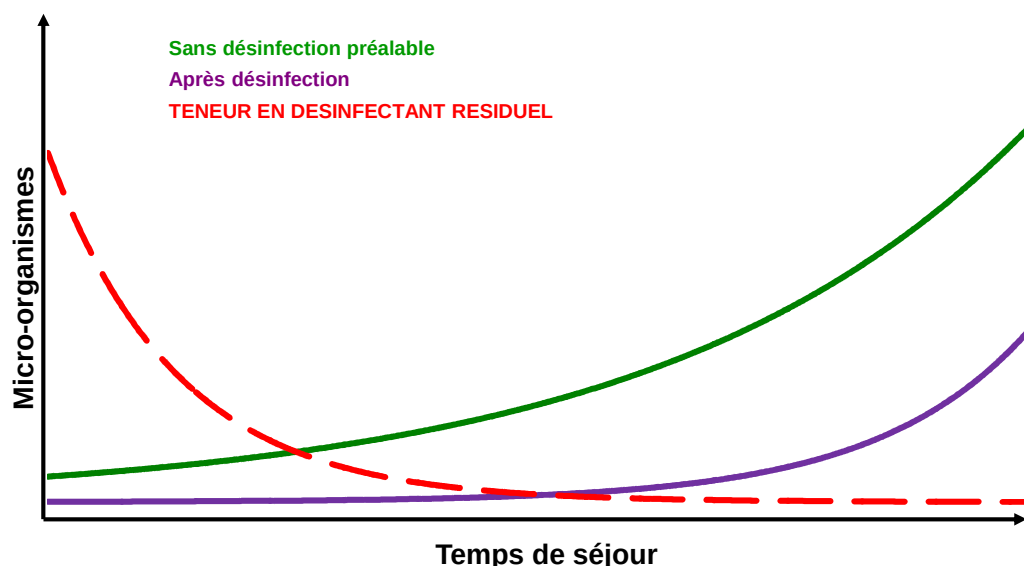


Figure 24 : Influence du temps de séjour sur la croissance des micro-organismes en présence de nutriments

Le traitement par le cuivre, algicide, peut remédier au contrôle temporaire des populations algales. Le dosage du sulfate de cuivre pour les réservoirs d'EUT est calculé à partir des conditions physico-chimiques des eaux stockées. Les effets du cuivre permettent de contrôler temporairement les algues mais ne résolvent pas le problème des émissions gazeuses en fond de bassin. Toutefois, son activité temporaire, son coût et sa toxicité remettent en cause son usage.

Limitation des nutriments

Dans la plupart des lacs naturels, le phosphore est le nutriment limitant. Lorsque la concentration en phosphore diminue, les algues stoppent leur développement. Le contrôle du développement algal par la limitation du phosphore dans les systèmes naturels prévoit une concentration maximale en phosphore total de 0,05 mg PT/L. Cette valeur ne peut être atteinte que par la mise en place de techniques de traitement poussées (nanofiltration, osmose inverse). Dans le cas d'une valorisation

agricole, l'utilisation de ces techniques est remise en cause face à leur coût important de maintenance et énergétique (Verrecht *et al.*, 2012).

L'application de sels d'aluminium ou de fer ou chlorure ferrique en surface de réservoirs de stockage peut être utilisée pour favoriser la précipitation de composés phosphorés. Cependant, la gestion de ces techniques doit s'adapter aux conditions d'exploitation du réservoir et prendre en compte la charge en phosphore des EUT et une gestion par séquençage de l'alimentation des réservoirs pour permettre des phases de traitement et de décantation. Si le réservoir est alimenté régulièrement par des EUT chargées en phosphore, le traitement ne sera pas rentable en raison de son coût et de la maintenance requise pour une fréquence d'application importante.

La gestion du phosphore implique de considérer le phénomène de relargage du phosphore adsorbé dans les sédiments au moment de la destratification. Cet effet peut freiner tout projet de limitation du phosphore.

Contrôle de l'oxygénation

Le maintien de conditions aérobies dans le bassin est incontournable pour pallier au problème d'émissions gazeuses. Beaucoup de réservoirs sont suffisamment profonds pour être stratifiés. Dans ce cas, l'hypolimnion est isolé des phénomènes de réoxygénation. Il peut devenir rapidement anaérobie et être responsable d'émissions gazeuses et de solubilisation des nutriments piégés dans les sédiments.

Le respect des consignes de dimensionnement (profondeur vs charge appliquée) doit permettre, en théorie, d'éviter ces désagréments. Dans la réalité, les variations de niveaux d'effluents dans le réservoir associées aux potentielles variations de charges peuvent être responsables de perturbations accidentelles ou chroniques de l'ouvrage. Le recours à des techniques d'aération artificielle, soit par injection d'air ou d'oxygène, ou par brassage, est une solution pour faire face à ces problèmes. L'utilisation de ces techniques peut également faciliter l'implantation de réservoir sur des surfaces limitées (dimensionnement adapté intégrant l'aération artificielle).

L'injection locale d'air (comprimé ou non) ou d'oxygène en fond de réservoir par des séries de drains permet la destratification du bassin. La remontée des bulles d'air vont engager un mélange vertical de la colonne d'eau.

L'injection d'air comprimé ne va pas directement affecter la concentration en oxygène dissous dans la masse d'eau mais favoriser la recirculation artificielle. Le matériel peut être installé sur une petite portion du fond du réservoir. La recirculation une fois engagée, affectera l'ensemble du réservoir. Outre la consommation énergétique, l'inconvénient principal de cette technique est le bruit des compresseurs, qui peut être limité en isolant les compresseurs dans des caissons insonorisés.

L'injection d'air ou d'oxygène en fond de bassin évite les problèmes sonores des compresseurs. En complément, la vaporisation de l'azote ammoniacal dissous (stripping) contribue à la dégradation de l'azote dans le réservoir.

Une gestion spécifique de l'aération doit assurer la destratification de la colonne d'eau mais peut aussi intégrer la présence de jets en surface pour son aspect paysager. Cette pratique est utilisée pour les réservoirs opérationnels en vue d'irriguer des espaces verts (golfs par exemple) (Figure 25).

La mise en place de brasseurs peut favoriser les mélanges et éviter l'établissement de conditions anaérobies en fond de bassin.



Figure 25 : Aération des lagunes de stockage du golf de Citrus et Yasmine dans l'arrière-pays d'Hammamet, Tunisie (rapport AFD)

4.2. Réservoirs opérationnels fermés : les citernes

Comme pour le stockage de l'eau potable, ces unités sont généralement des cuves fermées (citernes ou réservoirs) en acier ou béton armé pour les cuves rigides ou en polyester induit de PVC avec traitement anti-UV pour les citernes souples (Figure 26). Le volume de ces réservoirs est limité à 600 m³ pour les ouvrages préfabriqués mais peut atteindre jusqu'à 10 000 m³ pour les ouvrages fabriqués. Ce type de réservoir peut être enterré, en surface ou surélevé selon les contextes.



Figure 26 : Réservoirs opérationnels fermés

A gauche : Citernes souples (max 500 m³)

Au centre : Kihei réservoir, Hawaï aux Etats-Unis en béton et aluminium (capacité 4 000 m³) (<http://www.hwea.org>)

A droite : Réservoir surélevé du golf de Wedgewood en Caroline du Nord aux Etats-Unis (capacité de 1100 m³) (<http://www.wilsonnc.org>)

4.2.1. Cinétique et stabilisation des EUT

Pour les réservoirs fermés, l'absence de lumière favorise les processus anaérobies, l'apport d'oxygène étant limité à l'oxygène dissous des EUT entrantes. La prise en compte de l'influence de la température est nécessaire. Ce paramètre a un effet direct sur les réactions chimiques et biologiques; l'augmentation de la température favorisant les réactions (croissance des micro-organismes, consommation du chlore résiduel ...).

Selon le taux d'oxygénation des EUT entrantes, les charges en nutriments et matière organique, la température et le temps de séjour des EUT stockées, des solutions peuvent permettre de garantir la stabilisation des EUT dans ces réservoirs :

- limitation du temps de séjour ;
- stabilisation des réactions microbiennes par désinfection (chlore résiduel indispensable) ;
- injection mécanique d'oxygène ;
- brassage du réservoir.

Les retours d'expérience sur ce type de stockage ne font pas état de dégradation de la qualité des EUT pour un stockage inférieur à 24 heures sans mention d'équipements spécifiques ni détails sur la qualité des EUT stockées (Miller G., 2009). Un suivi de ces unités sur site s'avère incontournable pour éditer des règles de gestion de ces réservoirs pour des qualités et temps de séjour variables.

4.2.2. Entretien et maintenance

Pour permettre les opérations de maintenance, inspection, réhabilitation des réservoirs, il est recommandé de fournir au moins deux accès sécurisés au réservoir.

Pour des temps de séjour plus longs, des aérateurs ou brasseurs peuvent être nécessaires pour limiter l'établissement de conditions anaérobies responsables d'émanations d'H₂S. Des brasseurs mécaniques peuvent être accrochés au toit du réservoir ou sur les parois avec le moteur à l'extérieur. Des brasseurs mécaniques submersibles sont également possibles. Les aérateurs sont généralement composés d'un compresseur d'air à l'extérieur du réservoir. Pour les ouvrages préfabriqués, plus rarement, l'installation du compresseur à l'intérieur est pratiquée avec un risque important de corrosion. Des compresseurs portables peuvent être nécessaires pour répondre à des problèmes occasionnels. Les cheminées d'aération doivent être équipées de filtre à air.

Pour l'unité de désinfection, les expériences témoignent d'une pratique de désinfection ponctuelle par ajout de solutions chlorées pour la solution la plus souple et pour répondre à un besoin permanent de désinfection. Pour des besoins saisonniers, l'utilisation de stations de traitement mobiles est envisageable.

Selon le choix du matériau de la cuve (béton ou acier), les contraintes de maintenance varient. Le tableau ci-dessous résume les avantages et inconvénients de ces deux techniques (

Tableau 4).

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des techniques de réservoirs fermés (adapté de Company et al. (2007))

Réservoir en acier	
Avantages	Inconvénients
peu de risque de fuites (soudures) pas d'effet d'expansion thermique ou contraction pour un entretien des revêtements réguliers, une durée de vie supérieure à 50 ans coût d'investissement faible (selon implantation et taille)	protection cathodique nécessaire planning d'entretien des revêtements et peintures nécessaire seulement pour un usage en surface (au sol ou surélevé)

Réservoir en béton	
Avantages	Inconvénients
faible coût de maintenance usage souterrain ou de surface possible implantation facilitée des équipements techniques (vannages, suivi, aération, ...) 	risque de fissures pour des dimensionnement ou construction incorrects prise en compte des effets d'expansion thermique et de contraction nécessaire coût d'investissement plus important que pour les réservoirs en acier

Comme l'intérieur des réservoirs est en contact avec des EUT, un revêtement spécifique et adapté aux EUT est recommandé. Aux Etats-Unis, les revêtements de réservoirs de stockage pour les EUT sont préconisés par des références nationales (AWWA, NSF). Les revêtements les plus courants sont l'époxy, les peintures polyuréthane.

Les besoins en revêtements extérieurs, sujets au rayonnement ultra-violet sont plus souples. Les services techniques peuvent exiger la mise en place de revêtement du type époxy, uréthane ou peintures acryliques.

4.3. Conclusions

Les réservoirs opérationnels sont nécessaires à la régulation journalière des débits d'EUT mais permettent également un outil de contrôle de la qualité des EUT produites. Leur taille dépend du degré de fluctuation de la demande en eau d'irrigation et de la disponibilité d'autres sources de prélèvement.

Les réservoirs opérationnels fermés sont généralement réservés pour des qualités d'EUT très fines (usages récréatifs, urbains, ...), ces derniers étant plus coûteux. Les réservoirs à surface libre, le plus souvent plus rentables, nécessitent une disponibilité foncière plus importante. Dans le cas d'une pression foncière trop importante, le recours à des réservoirs fermés peut être nécessaire. Les réservoirs à surface libre sont responsables de dégradation de la qualité des EUT par développement algal et un taux de chlore résiduel difficile à maintenir.

5. Perspectives de recherches

Le présent rapport a permis d'apporter des informations sur la caractérisation des réservoirs de stockage des EUT mais des études complémentaires pour le transfert de ces techniques dans de nouveaux contextes sont nécessaires. La complexité des mécanismes et réactions présentes dans ces ouvrages demandent de développer encore les recherches. Des suivis sur site sont nécessaires pour adapter les modèles présentés et compléter les retours d'expériences actuels.

Toutefois, en premier lieu, l'évaluation économique de ces projets est incontournable pour favoriser leur implantation. Certains auteurs se sont attachés à évaluer les différences de coûts entre certains choix techniques (Barbagallo *et al.*, 2012; Bloetscher, 2012; Brissaud, 2007; Brissaud *et al.*, 2003b; Darwish *et al.*, 2007; Lopez *et al.*, 2006; Oron *et al.*, 2008) mais leurs études s'appliquent exclusivement à des contextes particuliers. Les techniques de stockage saisonnier à surface libre combinant les objectifs de traitement et stockage (réservoirs à alimentation séquencée) semblent les plus rentables, mais nécessitent une disponibilité foncière importante. Le calcul de la viabilité économique de ces projets est complexe car il doit considérer les retombées économiques de la valorisation agricole mais aussi l'impact des rejets sur le milieu. Le recours à des techniques d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) peut être un moyen de représenter le « coût » et les impacts de certains choix techniques (Meneses *et al.*, 2010).

Le stockage des EUT engendre par ailleurs un coût de construction des ouvrages de stockage, du réseau associé et des opérations de maintenance (MED WWR WG, 2007). Le retour sur investissement est très variable selon les cas et se calcule à long terme en intégrant la préservation des milieux (rivière, nappe, zones humides...) mais aussi le potentiel de valorisation agricole.

En compléments, de nouvelles problématiques émergentes sont à considérer dans le contexte du stockage des EUT :

- Production d'huiles végétales par les algues

Le potentiel de production d'huiles végétales par les algues est actuellement étudié (Alp and Cirak, 2012; Demirbas, 2011; González and Kafarov, 2010; Manzanera *et al.*, 2008; Parkavi and Mathumitha, 2010, 2011; Rhodes, 2009; Sforza *et al.*, 2010). Ce phénomène peut contribuer à valoriser le problème du développement algal dans les réservoirs et mérite d'être étudié.

- Développement de cyanobactéries dans les réservoirs :

Le développement de cyanobactéries semble être favorisé par la présence en excès de nutriments azotés et phosphorés. Ces organismes peuvent être responsables de la libération d'endotoxines dans le milieu, les microcystines qui sont des hépatotoxines. Outre le risque de toxicité humaine, les cyanotoxines sont responsables de la dégradation des milieux par voie directe (compétition, toxicité envers d'autres organismes) et indirecte (dégradation de l'oxygénation du milieu, efflorescence algale, ...). Dans ce contexte, il s'agira de vérifier que l'ouvrage de stockage ne contribue pas à la formation de ces toxines (Barrington *et al.*, 2013; Haider *et al.*, 2003; Oudra *et al.*, 2000).

- Phénomène de résistance des bactéries aux antibiotiques : marquage des EUT

Certaines études identifient des phénomènes de résistance aux antibiotiques dans les communautés bactériennes issues d'EUT désinfectées. Ces bactéries sont utilisées comme marqueurs de pollutions et se retrouvent dans les sols irrigués par des eaux usées traitées (Al-Bahry *et al.*, 2012; Del Re *et al.*, 2007; McLain and Williams, 2010). Ce phénomène peut être un outil de suivi de la dynamique des communautés bactériennes dans les réservoirs mixtes.

- Maîtrise de la distribution des EUT en aval

Des phénomènes de croissance de biofilms dans les réseaux de distribution en aval sont identifiés et peuvent engendrer le colmatage du réseau. Les facteurs qui contribuent au développement de biofilms dans le réseau de distribution sont la présence de nutriments dans les EUT, la rugosité des canalisations, la présence de microorganismes en amont du réseau de distribution, la faible concentration en chlore, le pH et la température et la vitesse d'écoulement des EUT dans le réseau. Les moyens de lutte contre ce phénomène peuvent être d'augmenter la désinfection, de réguler le temps de séjour, de purger le réseau. La section des canalisations est également importante, plus elle est petite, plus les EUT s'écouleront rapidement limitant le risque de sédimentation et de développement des microorganismes (Jjemba *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2006; Thayanukul *et al.*, 2013; Weinrich *et al.*, 2010).

- Maîtrise des techniques d'irrigation en aval

Des adaptations peuvent être requises en sortie de réservoirs (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments, 2008; Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, 2012; U.S. Environmental Protection Agency, 2004) :

- o Pour l'irrigation directe : les EUT sont déversées sur les champs agricoles, le ruissellement de ces dernières doit être contrôlé pour ne pas atteindre le milieu récepteur sans autorisation de rejet (collecte et pompage) ;
- o Pour l'irrigation par aspersion, les sels dissous et les MES peuvent colmater les asperseurs. Des systèmes de filtration peuvent être nécessaires. L'aspersion est encadrée par la mise en place de zones tampons pour éviter toute propagation de pathogènes.
- o Pour l'irrigation par goutte-à-goutte, une filtration est nécessaire pour éviter le colmatage. L'alimentation des réseaux d'irrigation par goutte à goutte par des EUT plus chargées en MES que des eaux souterraines induit un colmatage des filtres ainsi qu'une dépendance aux opérations de maintenance pour le rétrolavage des filtres. (Teltsch *et al.*, 1992)

- Prolifération de moustiques dans les ouvrages de stockage

- REUT et agriculture biologique

6. Conclusion

Face aux problématiques de disponibilité de la ressource en eau, la réutilisation des eaux usées traitées est souvent admise comme une solution permettant la limitation des prélèvements sur le milieu, le recyclage des nutriments et le contrôle des rejets. Cette étude s'intéresse préférentiellement à la valorisation agricole des EUT, ce secteur étant l'un des plus consommateurs en eau. La valorisation agricole des EUT implique une régulation des volumes produits par la station de traitement pour répondre aux besoins en irrigation. Les réservoirs de stockage permettent d'adapter la production d'EUT aux volumes requis. La problématique principale associée à ces ouvrages est de déterminer l'impact des réservoirs sur la qualité des EUT et leur modalités de gestion. Ce rapport permet d'identifier les types de réservoirs de stockage utilisés dans les projets de REUT, leurs caractéristiques et enjeux. A travers cette étude, il est clairement identifié que le stockage des EUT peut modifier la qualité des eaux usées traitées. La problématique majeure est ainsi de quantifier son impact sur la qualité afin de considérer les choix opérationnels nécessaires pour l'implantation de nouveaux projets.

Cette étude met en lumière 4 classes de réservoirs de stockage :

- Les réservoirs saisonniers à surface libre,
- Les réservoirs saisonniers confinés,
- Les réservoirs opérationnels à surface libre,
- Les réservoirs opérationnels fermés.

Ces types de réservoirs nécessitent des dimensionnements, maintenance et exploitation spécifiques qui varieront selon les contextes et les classes de qualité requises.

Les réservoirs saisonniers, très utilisés pour une valorisation agricole, permettent une régulation intersaisonnière voire pluriannuelle des EUT. On distingue parmi les réservoirs saisonniers, les réservoirs confinés souterrains des réservoirs de surface. Le stockage saisonnier des EUT en sous-sol (milieu confiné), appelé « recharge d'aquifère », est une technique spécifique qui peut être pratiquée par injection directe des EUT dans l'aquifère ou par infiltration-percolation. Ces pratiques engagent des connaissances spécifiques en hydrogéologie notamment qui ne sont pas développées dans ce rapport. Le stockage saisonnier en surface peut permettre l'affinage du traitement des EUT avec des temps de séjour importants dans le réservoir et un fort potentiel de désinfection par exposition solaire. Cependant, pour assurer une qualité continue en sortie de réservoir, une gestion spécifique de ces ouvrages est nécessaire. A travers la littérature, il est clairement identifié que les réservoirs à alimentation continue présentent des dégradations saisonnières de la qualité des EUT à valoriser par des phénomènes de by-pass. Pour répondre à cette problématique, une gestion séquentielle des réservoirs est proposée, permettant des phases d'alimentation, repos, vidange des réservoirs. Par ailleurs, le développement algal en surface implique la mise en place de filtre en sortie d'ouvrage pour limiter le colmatage du réseau d'irrigation en aval. Le dimensionnement de ces réservoirs implique la connaissance de nombreux paramètres spécifiques au projet de REUT et engage le recours à des études au cas par cas au moyen de logiciel de modélisation.

Les réservoirs opérationnels permettent une régulation journalière des volumes d'EUT. Ils peuvent être implantés en tant que réservoirs principaux pour des projets de petite ampleur ou utilisés en tant que réservoirs satellites pour la distribution des EUT en complément de stockages saisonniers. Leur dimensionnement et exploitation s'approchent des réservoirs d'eau potable avec une maintenance plus régulière par la présence de matière organique et nutriments résiduels. Ils peuvent être également fermés ou à surface libre selon la disponibilité foncière du projet et la qualité d'EUT requise. Les réservoirs opérationnels fermés permettent une gestion de la qualité des EUT en absence de lumière (pas de développement algal) mais seront limités par leur capacité de stockage et leur coût. Les réservoirs opérationnels à surface libre seront en revanche sujets à des risques de dégradation de la qualité des EUT par contaminations fécales (mammifères, oiseaux) ou par développement algal.

Glossaire

Conditions anaérobies : l'anaérobie se caractérise par l'absence d'oxygène et de nitrates

Conditions anoxiques : l'anoxie se caractérise par l'absence d'oxygène et la présence de nitrates

Débit minimal d'un cours d'eau ou débit réservé : débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces présentes décrit par l'article L.214-18 du code de l'environnement

Eaux Usées Traitées : eaux usées traitées par une station de traitement, eaux en sortie de station

Sigles & Abréviations

AC : Assainissement Collectif

AEP : Alimentation en Eau Potable

ANC : Assainissement Non Collectif

ANSES : Agence Nationale de la Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail

AWWA : American Water Works Association

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

BRM : Bioréacteur à Membrane

CF : Coliformes Fécaux

CT : Coliformes Totaux

COT : Carbone Organique Total

DBO₅ : Demande Biochimique en Oxygène à cinq jours, concentration exprimée en mg d'O₂/L

DCO : Demande Chimique en Oxygène, concentration exprimée en mg d'O₂/L

DERU : Directive Européenne sur les Eaux Résiduaire Urbaines

ECP : Eaux Claires Parasites

EUT : Eaux Usées Traitées

Irstea : Institut national de Recherches en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

MES : Matières en Suspension, concentration exprimée en mg/L

N-NH₄ : Azote Ammoniacal, concentration exprimée en mg de N/L

N-NO₃ : Ions nitrates, concentration exprimée en mg de N/L

NSF : National Sanitation Foundation

NTK : Azote Kjeldahl, concentration exprimée en mg de N/L

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

PT : Phosphore Total, concentration exprimée en mg de P/L

REUT : Réutilisation des Eaux Usées Traitées

STEU : Station d'Épuration des Eaux Usées

UFC : Unités Formant une Colonie (CFU en anglais : Colony-Forming Unit)

Bibliographie

- Abeliovich, A., 1982, Biological equilibrium in a wastewater reservoir: *Water Research*, v. 16, p. 1135-1138.
- Abou-Elela, S.I., El-Sayed, M.M.H., El-Gendy, A.S. and Abou-Taleb, E.M., 2012, Comparative study of disinfection of secondary treated wastewater using chlorine, UV and ozone: *Journal of Applied Sciences Research*, v. 8, p. 5190-5197.
- Abreu-Acosta, N. and Vera, L., 2011, Occurrence and removal of parasites, enteric bacteria and faecal contamination indicators in wastewater natural reclamation systems in Tenerife-Canary Islands, Spain: *Ecological Engineering*, v. 37, p. 496-503.
- Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments, 2008, Réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage ou l'irrigation, p. 71.
- Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, A., Environnement, Travail (ANSES), 2012, Réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures, l'arrosage des espaces verts par aspersion et le lavage des voiries, *in* scientifique, E., ed., Avis de l'Anses
- Rapport d'expertise collective.
- Al-Assa'd, T.A. and Abdulla, F.A., 2010, Artificial groundwater recharge to a semi-arid basin: Case study of Mujib aquifer, Jordan: *Environmental Earth Sciences*, v. 60, p. 845-859.
- Al-Bahry, S.N., Mahmoud, I.Y. and Al-Musharafi, S.K., 2012, Antibiotic resistant bacteria used as bioindicators of environmental pollution produced by tertiary treated sewage effluent, Volume 164: 11th International Conference on Water Pollution: Modelling, Monitoring and Management - Water Pollution XI, WP 2012: New Forest, p. 313-323.
- Alp, D. and Cirak, B., 2012, Biofuels from micro- and macroalgae: *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, v. 28, p. 719-726.
- American Water Works Association, 2009, Water reclamation for groundwater recharge: *Journal / American Water Works Association*, v. 101, p. 136.
- Athayde G.B, Jr., Mara, D.D., Pearson, H.W. and Silva, S.A., 2000, Faecal coliform die-off in wastewater storage and treatment reservoirs, Volume 42: 4th International Specialist Conference on Waste Stabilization Ponds: Technology and the Environment: Marrakech, Morocco, Int Water Assoc, p. 139-147.
- Avnimelech, Y. and Wodka, M., 1988, Accumulation of nutrients in the sediments of Malleh Haskishon reclaimed effluents reservoir: *Water Research*, v. 22, p. 1437-1442.
- Ayuso-Gabella, N., Page, D., Masciopinto, C., Aharoni, A., Salgot, M. and Wintgens, T., 2011, Quantifying the effect of Managed Aquifer Recharge on the microbiological human health risks of irrigating crops with recycled water: *Agricultural Water Management*, v. 99, p. 93-102.
- Bahri, A., Basset, C. and Jrad-Fantar, A., 2000, Agronomic and health aspects of storage ponds located on a golf course irrigated with reclaimed wastewater in Tunisia, Volume 42: 4th International Specialist Conference on Waste Stabilization Ponds: Technology and the Environment: Marrakech, Morocco, Int Water Assoc, p. 399-406.
- Bahri, A., Basset, C., Oueslati, F. and Brissaud, F., 2001, Reuse of reclaimed wastewater for golf course irrigation in Tunisia, Volume 43, p. 117-124.
- Barbagallo, S., Brissaud, F., Cirelli, G.L., Consoli, S. and Xu, P., 2003a, Volume 3, p. 169-175.
- Barbagallo, S., Cirelli, G.L., Consoli, S., Licciardello, F., Marzo, A. and Toscano, A., 2012, Analysis of treated wastewater reuse potential for irrigation in Sicily: *Water Science and Technology*, v. 65, p. 2024-2033.
- Barbagallo, S., Cirelli, G.L., Consoli, S. and Somma, F., 2003b, Volume 47, p. 169-176.

- Barrington, D.J., Reichwaldt, E.S. and Ghadouani, A., 2013, The use of hydrogen peroxide to remove cyanobacteria and microcystins from waste stabilization ponds and hypereutrophic systems: *Ecological Engineering*, v. 50, p. 86-94.
- Bloetscher, F., 2012, Comparing costs and benefits of wastewater aquifer recharge as alternative water supply to reclaimed water and brackish water: AWWA Sustainable Water Management Conference and Exposition 2012: Portland, OR, p. 351-379.
- Boutin, C., Heduit, A. and Helmer, J.M., 2009, Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées traitées (REUT), Irstea.
- Brissaud, F., 2007, Low technology systems for wastewater treatment: Perspectives, *in* Martinez, S.G., ed., Volume 55, p. 1-9.
- Brissaud, F., Tournoud, M.G., Drakides, C. and Lazarova, V., 2003a, Mixing and its impact on faecal coliform removal in a stabilisation pond, Volume 48, p. 75-80.
- Brissaud, F., Xu, P. and Auset, M., 2003b, Extensive reclamation technologies, assets for the development of water reuse in the Mediterranean, Volume 3, p. 209-216.
- Casanova, J., Béchu, E., Bouzi, M., Leroy, P., Maton, L. and Pettenati, M., 2008, Appui au projet de REcharge artificielle et Gestion Active des nappes Littorales (REGAL). Rapport intermédiaire., BRGM, p. 63.
- Cirelli, G.L., Consoli, S. and Di Grande, V., 2008, Long-term storage of reclaimed water: the case studies in Sicily (Italy): *Desalination*, v. 218, p. 62-73.
- Cirelli, G.L., Consoli, S. and Juanicó, M., 2009, Modelling *Escherichia coli* concentration in a wastewater reservoir using an operational parameter MRT%FE and first order kinetics: *Journal of Environmental Management*, v. 90, p. 604-614.
- Company, M.E.I.A., Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R. and Tchobanoglous, G., 2007, *Water Reuse : Issues, Technologies, and Applications: Issues, Technologies, and Applications*, McGraw-hill.
- Consoli, S., Cirelli, G.L. and Juanicó, M., 2011, A simplified method to calculate the percentage of fresh effluents (PFE) in non-steady state reactors: *Water SA*, v. 37, p. 553-558.
- Cornel, P. and Weber, B., 2004, Water reuse for irrigation from waste water treatment plants with seasonal varied operation modes, Volume 50, p. 47-53.
- Darwish, M.R., Sharara, M., Sidahmed, M. and Haidar, M., 2007, The impact of a storage facility on optimality conditions of wastewater reuse in land application: A case study in Lebanon: *Resources, Conservation and Recycling*, v. 51, p. 175-189.
- Del Re, G., Di Donato, A., Volpe, R. and Perilli, M.G., 2007, Urban wastewater reuse: Water treatment and effectiveness on antibiotic-resistant bacteria abatement, Volume 103: 4th International Conference on Sustainable Water Resources Management: Kos, p. 437-446.
- Demirbas, A., 2011, Biodiesel from oilgae, biofixation of carbon dioxide by microalgae: A solution to pollution problems: *Applied Energy*, v. 88, p. 3541-3547.
- Dor, I., Kalinsky, I., Eren, J. and Dimentman, C., 1987, Deep wastewater reservoirs in Israel - I: Limnological changes following selfpurification: *Water Science and Technology*, v. 19, p. 317-322.
- Dor, I. and Raber, M., 1990, Deep wastewater reservoirs in Israel: Empirical data for monitoring and control: *Water Research*, v. 24, p. 1077-1084.
- Friedler, E., 2001, Water reuse - An integral part of water resources management: Israel as a case study: *Water Policy*, v. 3, p. 29-39.
- Friedler, E. and Juanico, M., 1996, Treatment and storage of wastewater for agricultural irrigation: *International Water and Irrigation*, v. 16, p. 26-30.
- Friedler, E., Juanico, M. and Shelef, G., 2003, Simulation model of wastewater stabilization reservoirs: *Ecological Engineering*, v. 20, p. 121-145.

- Fuog, R.M., Giberson, K.C. and Lawrence, R.L., 1995, Wastewater reclamation at Rancho Murieta, California; Golf course irrigation with upgraded pond effluent meeting California's strictest requirements for wastewater reuse: *Water Science and Technology*, v. 31, p. 399-408.
- González, A. and Kafarov, V., 2010, Design of a multifunctional reactor for third generation biofuels production, *Volume 21*, p. 1297-1302.
- Haider, S., Naithani, V., Viswanathan, P.N. and Kakkar, P., 2003, Cyanobacterial toxins: A growing environmental concern: *Chemosphere*, v. 52, p. 1-21.
- Higgins, J., Warnken, J., Teasdale, P.R. and Arthur, J.M., 2009, Decline in recycled water quality during short-term storage in open ponds: *Journal of Water and Health*, v. 7, p. 597-608.
- Hochstrat, R., Wintgens, T., Kazner, C., Jeffrey, P., Jefferson, B. and Melin, T., 2010, Managed aquifer recharge with reclaimed water: Approaches to a European guidance framework: *Water Science and Technology*, v. 62, p. 1265-1273.
- Hoppe-Jones, C., Dickenson, E.R.V. and Drewes, J.E., 2012, The role of microbial adaptation and biodegradable dissolved organic carbon on the attenuation of trace organic chemicals during groundwater recharge: *Science of the Total Environment*, v. 437, p. 137-144.
- Idelovitch, E., Icekson-Tal, N., Avraham, O. and Michail, M., 2003, *Volume 3*, p. 239-246.
- Jjemba, P.K., Weinrich, L.A., Cheng, W., Giraldo, E. and LeChevallier, M.W., 2010, Regrowth of potential opportunistic pathogens and algae in reclaimed-water distribution systems: *Applied and Environmental Microbiology*, v. 76, p. 4169-4178.
- Juanico, M., 1991, Should waste stabilization ponds be designed for perfect-mixing or plug-flow?: *Water Science and Technology*, v. 23, p. 1495-1502.
- Juanico, M., 1996, The performance of batch stabilization reservoirs for wastewater treatment, storage and reuse in Israel, *Volume 33: Proceedings of the 1995 IAWQ 2nd International Symposium on Wastewater Reclamation and Reuse: Iraklio, Greece*, p. 149-159.
- Juanico, M., 1999, Comment on 'A hybrid waste stabilization pond and wastewater storage and treatment reservoir system for wastewater reuse for both restricted and unrestricted crop irrigation' a technical note published in *Water Research* 33(2): 591-594, 1999, by D. Mara and H. Pearson: *Water Research*, v. 33, p. 3536-3538.
- Juanico, M., Azov, Y., Teltsch, B. and Shelef, G., 1995a, Effect of effluent addition to a freshwater reservoir on the filter clogging capacity of irrigation water: *Water Research*, v. 29, p. 1695-1702.
- Juanicó, M. and Dor, I., 1999, Hypertrophic Reservoirs for Wastewater Storage and Reuse: *Ecology, Performance, and Engineering Design*, Springer.
- Juanico, M. and Friedler, E., 1994, Hydraulic age distribution in perfectly mixed non-steady-state reactors: *Journal of Environmental Engineering*, v. 120, p. 1427-1445.
- Juanicó, M. and Milstein, A., 2004, *Volume 50*, p. 55-60.
- Juanico, M., Ravid, R., Azov, Y. and Teltsch, B., 1995b, Removal of trace metals from wastewater during long-term storage in seasonal reservoirs: *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 82, p. 617-633.
- Juanico, M. and Shelef, G., 1991, The performance of stabilization reservoirs as a function of design and operation parameters: *Water Science and Technology*, v. 23, p. 1509-1516.
- Juanico, M. and Shelef, G., 1994, Design, operation and performance of stabilization reservoirs for wastewater irrigation in Israel: *Water Research*, v. 28, p. 175-186.
- Karnik, B.S., Davies, S.H., Baumann, M.J. and Masten, S.J., 2005, The effects of combined ozonation and filtration on disinfection by-product formation: *Water Research*, v. 39, p. 2839-2850.
- Kellner, E. and Pires, E.C., 2002, The influence of thermal stratification on the hydraulic behavior of waste stabilization ponds, *Volume 45*, p. 41-48.
- Kfir, O., Tal, A., Gross, A. and Adar, E., 2012, The effect of reservoir operational features on recycled wastewater quality: *Resources, Conservation and Recycling*, v. 68, p. 76-87.

- Le Pimpec, P., Liénard, A., Bonnard, R., Lafont, M., Cazin, B., Bossard, P., Hubert, B., Bray, M., 2012, Guide partique de l'agent préleveur chargé de la police des milieux aquatiques.
- Lee, D.G., Kim, S.J. and Park, S.J., 2006, Effect of reservoirs on microbiological water qualities in a drinking water distribution system: *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 16, p. 1060-1067.
- Levantesi, C., La Mantia, R., Masciopinto, C., Böckelmann, U., Ayuso-Gabella, M.N., Salgot, M., Tandoi, V., Van Houtte, E., Wintgens, T. and Grohmann, E., 2010, Quantification of pathogenic microorganisms and microbial indicators in three wastewater reclamation and managed aquifer recharge facilities in Europe: *Science of the Total Environment*, v. 408, p. 4923-4930.
- Li, J., Fu, J., Zhang, H., Li, Z., Ma, Y., Wu, M. and Liu, X., 2013, Spatial and seasonal variations of occurrences and concentrations of endocrine disrupting chemicals in unconfined and confined aquifers recharged by reclaimed water: A field study along the Chaobai River, Beijing: *Science of the Total Environment*, v. 450-451, p. 162-168.
- Liran, A., Juanico, M. and Shelef, G., 1994, Coliform removal in a stabilization reservoir for wastewater irrigation in Israel: *Water Research*, v. 28, p. 1305-1314.
- Llorens, M., Saez, J. and Soler, A., 1992, Influence of thermal stratification on the behaviour of a deep wastewater stabilization pond: *Water Research*, v. 26, p. 569-577.
- Lopez, A., Pollice, A., Lonigro, A., Masi, S., Palese, A.M., Cirelli, G.L., Toscano, A. and Passino, R., 2006, Agricultural wastewater reuse in southern Italy: *Desalination*, v. 187, p. 323-334.
- Maliva, R.G., Guo, W. and Missimer, T.M., 2006, Aquifer storage and recovery: Recent hydrogeological advances and system performance: *Water Environment Research*, v. 78, p. 2428-2435.
- Maliva, R.G., Missimer, T.M., Winslow, F.P. and Herrmann, R., 2011, Aquifer storage and recovery of treated sewage effluent in the middle east: *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 36, p. 63-74.
- Mancini, G., Barone, C., Roccaro, P. and Vagliasindi, F.G.A., 2007, *in* Kim, I.S., Kim, S., and Cho, J., eds., Volume 55, p. 417-424.
- Mancini, G. and Vagliasindi, F.G.A., 2006, Issues and guidelines for treated wastewater reservoirs design and operation: *International Journal of Environment and Pollution*, v. 28, p. 128-143.
- Mannina, G., Mancini, G., Torregrossa, M. and Viviani, G., 2008, Volume 57, p. 1037-1045.
- Manzanera, M., Molina-Muñoz, M.L. and González-López, J., 2008, Biodiesel: An alternative fuel: *Recent Patents on Biotechnology*, v. 2, p. 25-34.
- Mara, D.D., 2000, The production of microbiologically safe effluents for wastewater reuse in the Middle East and North Africa: *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 123, p. 595-603.
- Mara, D.D. and Pearson, H.W., 1999a, A hybrid waste stabilization pond and wastewater storage and treatment reservoir system for wastewater reuse for both restricted and unrestricted crop irrigation: *Water Research*, v. 33, p. 591-594.
- Mara, D.D. and Pearson, H.W., 1999b, Reply to comment: A hybrid wastewater stabilization pond and wastewater storage and treatment reservoir system for wastewater reuse for both restricted and unrestricted crop irrigation: *Water Research*, v. 33, p. 3539-3540.
- Mara, D.D., Pearson, H.W., Silva, S.A., De Oliveira, R., Araujo, A.L.C., De Oliveira, R.E. and Soares, J., 1996, Process performance of an experimental deep effluent storage reservoir under different organic loadings in northeast Brazil, *in* Mara, D.D., Pearson, H.W., and Silva, S.A., eds., Volume 33: *Proceedings of the 1995 3rd International Symposium on Waste Stabilization Ponds: Technology and Applications*: Joao Pessoa, Braz, p. 243-249.
- Maynard, H.E., Ouki, S.K. and Williams, S.C., 1999, Tertiary lagoons: A review of removal mechanisms and performance: *Water Research*, v. 33, p. 1-13.
- McLain, J.E.T. and Williams, C.F., 2010, Development of antibiotic resistance in bacteria of soils irrigated with reclaimed wastewater, Volume 2: 5th National Decennial Irrigation Conference 2010, Held in Conjunction with Irrigation Show 2010: Phoenix, AZ, p. 1065-1073.
- MED WWR WG, 2007, Mediterranean Wastewater Reuse Report, *in* EUWI, M., ed.

- Meneses, M., Pasqualino, J.C. and Castells, F., 2010, Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications: *Chemosphere*, v. 81, p. 266-272.
- Miller, G. and Quinlan, E., 2003, Impact of Surface Storage on Reclaimed Water: Seasonal And Long Term, Water Environment Research Foundation.
- Miller, G., Rimer, A.E., Crook, J., Quinlan, B. and Kobylinski, E.A., 2009, Selecting Treatment Trains for Seasonal Storage of Reclaimed Water Treatment of Influent to and Withdrawals from Storage: A Resource Guide, WateReuse Foundation.
- Miller G., R.A., Crook J., Quinlan B., Kobylinski E., 2009, Selecting treatment trains for seasonal storage of reclaimed water treatment of influent to and withdrawals from storage : a resource guide.
- Missimer, T.M., Drewes, J.E., Amy, G., Maliva, R.G. and Keller, S., 2012, Restoration of Wadi Aquifers by Artificial Recharge with Treated Waste Water: *Ground Water*, v. 50, p. 514-527.
- Oron, G., Gillerman, L., Bick, A., Manor, Y., Buriakovsky, N. and Hagin, J., 2008, Volume 57, p. 1383-1388.
- Ortuño, F., Molinero, J., Garrido, T. and Custodio, E., 2012, Seawater injection barrier recharge with advanced reclaimed water at Llobregat delta aquifer (Spain): *Water Science and Technology*, v. 66, p. 2083-2089.
- Oudra, B., El Andaloussi, M., Franca, S., Barros, P., Martins, R., Oufdou, K., Sbiyyaa, B., Loudlki, M., Mezrioui, N. and Vasconcelos, V., 2000, Volume 42, p. 179-186.
- Page, D., Dillon, P., Toze, S., Bixio, D., Genthe, B., Jiménez Cisneros, B.E. and Wintgens, T., 2010, Valuing the subsurface pathogen treatment barrier in water recycling via aquifers for drinking supplies: *Water Research*, v. 44, p. 1841-1852.
- Parkavi, K. and Mathumitha, B., 2010, Review of key research efforts to make algae fuels sustainable: *Journal of ASTM International*, v. 7.
- Parkavi, K. and Mathumitha, B., 2011, Review of key research efforts to make algae fuels sustainable: *ASTM Special Technical Publication*, v. 1477, p. 566-576.
- Pettenati, M., 2007, Introduction au transfert réactif d'eau de recharge artificielle à travers la ZNS. Rapport intermédiaire., BRGM, p. 86.
- Rhodes, C.J., 2009, Oil from algae; salvation from peak oil?: *Science Progress*, v. 92, p. 39-90.
- Sforza, E., Bertucco, A., Morosinotto, T. and Giacometti, G.M., 2010, Vegetal oil from microalgae: Species selection and optimization of growth parameters, Volume 20, p. 199-204.
- Shelef, G., 1991, The role of wastewater reuse in water resources management in Israel: *Water Science and Technology*, v. 23, p. 2081-2089.
- Shelef, G., Juanico, M. and Vikinsky, M., 1987, Reuse of stabilization pond effluent for agricultural irrigation in Israel: *Water Science and Technology*, v. 19, p. 299-305.
- Shilton, A. and Harrison, J., 2003, Development of guidelines for improved hydraulic design of waste stabilisation ponds, Volume 48, p. 173-180.
- Teijon, G., Candela, L., Tamoh, K., Molina-Díaz, A. and Fernández-Alba, A.R., 2010, Occurrence of emerging contaminants, priority substances (2008/105/CE) and heavy metals in treated wastewater and groundwater at Depurbaix facility (Barcelona, Spain): *Science of the Total Environment*, v. 408, p. 3584-3595.
- Teltsch, B., Azov, Y., Juanico, M. and Shelef, G., 1992, Plankton community changes due to the addition of treated effluents to a freshwater reservoir used for drip irrigation: *Water Research*, v. 26, p. 657-668.
- Teltsch, B., Juanico, M., Azov, Y., Ben Harim, I. and Shelef, G., 1991, The clogging capacity of reclaimed wastewater: A new quality criterion for drip irrigation: *Water Science and Technology*, v. 24, p. 123-131.
- Thayanukul, P., Kurisu, F., Kasuga, I. and Furumai, H., 2013, Evaluation of microbial regrowth potential by assimilable organic carbon in various reclaimed water and distribution systems: *Water Research*, v. 47, p. 225-232.

- Tian, C., Liu, R., Liu, H. and Qu, J., 2013, Disinfection by-products formation and precursors transformation during chlorination and chloramination of highly-polluted source water: Significance of ammonia: *Water Research*, v. 47, p. 5901-5910.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2004, Guidelines for Water Reuse, *in* Municipal Support Division Office of Wastewater Management Office of Water Washington, D., ed., Camp Dresser & McKee, Inc., p. 478.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2012, Guidelines for Water Reuse, *in* Management, O.o.W., and Water, O.o., eds.: Washington, D.C., CDM Smith Inc., p. 643.
- Van Houtte, E. and Verbauwheide, J., 2012, Sustainable groundwater management using reclaimed water: The Torreele/St-André case in Flanders, Belgium: *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, v. 61, p. 473-483.
- Verrecht, B., James, C., Germain, E., Birks, R., Barugh, A., Pearce, P. and Judd, S., 2012, Economical evaluation and operating experiences of a small-scale MBR for nonpotable reuse: *Journal of Environmental Engineering (United States)*, v. 138, p. 594-600.
- Weinrich, L.A., Jjemba, P.K., Giraldo, E. and LeChevallier, M.W., 2010, Implications of organic carbon in the deterioration of water quality in reclaimed water distribution systems: *Water Research*, v. 44, p. 5367-5375.
- Wuilleumier, A. and Seguin, J.J., 2008, Réalimentation des aquifères en France. Une synthèse. Rapport final., BRGM, p. 122.
- Xu, P., Brissaud, F. and Fazio, A., 2002, Non-steady-state modelling of faecal coliform removal in deep tertiary lagoons: *Water Research*, v. 36, p. 3074-3082.
- Xu, P., Valette, F., Brissaud, F., Fazio, A. and Lazarova, V., 2001, Volume 43, p. 67-74.
- Yang, X., Guo, W., Zhang, X., Chen, F., Ye, T. and Liu, W., 2013, Formation of disinfection by-products after pre-oxidation with chlorine dioxide or ferrate: *Water Research*, v. 47, p. 5856-5864.
- Zhang, X., Zhao, X. and Zhang, M., 2012, Functional diversity changes of microbial communities along a soil aquifer for reclaimed water recharge: *FEMS Microbiology Ecology*, v. 80, p. 9-18.
- Zhang, X., Zhao, X., Zhang, M. and Wu, Q.Y., 2011, Safety evaluation of an artificial groundwater recharge system for reclaimed water reuse based on bioassays: *Desalination*, v. 281, p. 185-189.
- Zhang, X.L., Yang, H.W., Wang, X.M., Fu, J. and Xie, Y.F., 2013, Formation of disinfection by-products: Effect of temperature and kinetic modeling: *Chemosphere*, v. 90, p. 634-639.

Table des illustrations

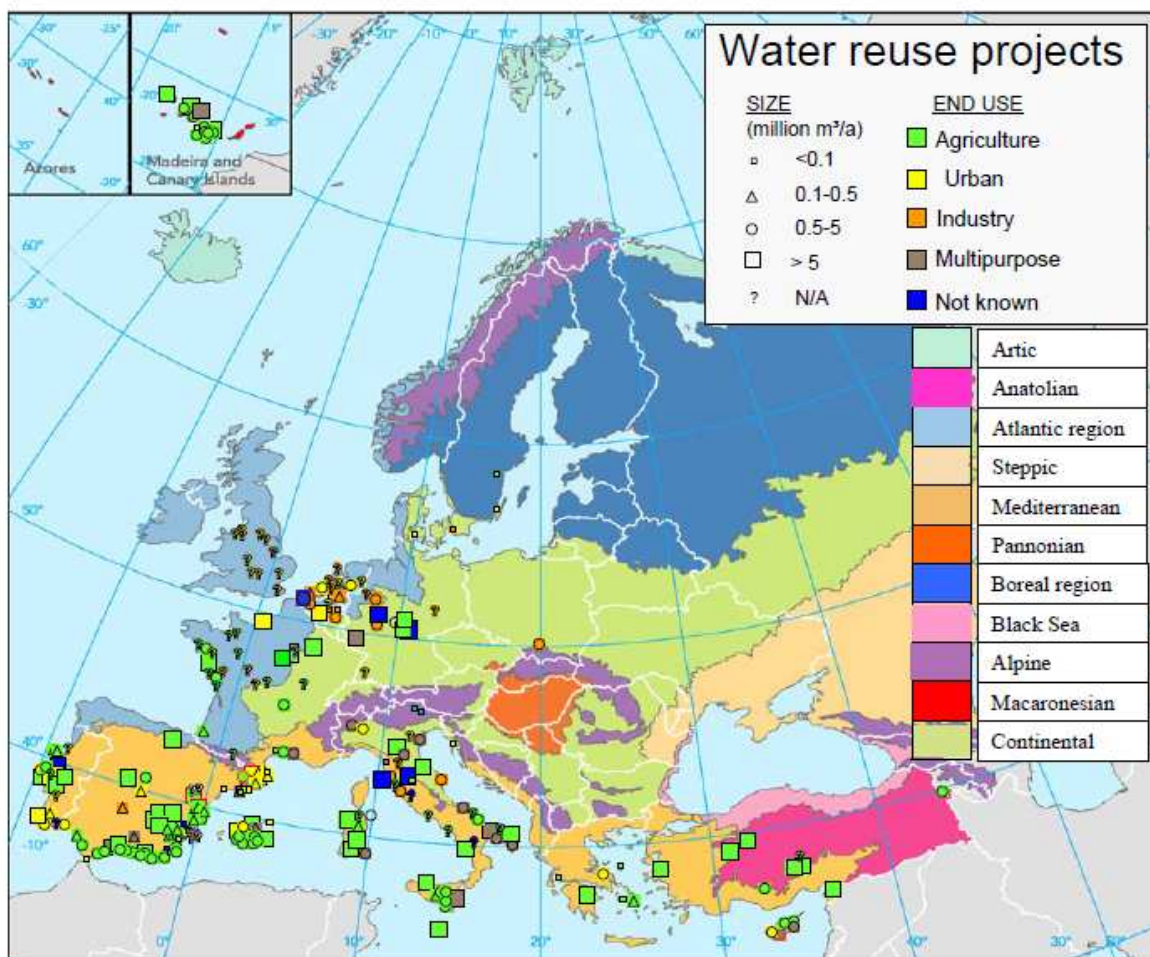
Figure 1 : REUT sans ouvrage de stockage, schéma de principe	12
Figure 2 : REUT avec ouvrage de stockage, schéma de principe	13
Figure 3 : Intérêts du stockage des EUT	14
Figure 4 : Type de réservoirs selon leur temps de séjour	15
Figure 5 : Réservoirs saisonniers confinés	16
Figure 6 : Schéma du phénomène de stratification.....	21
Figure 7 : Variabilité des saisons d'irrigation.....	24
Figure 8 : Capacité de production journalière d'EUT des stations	25
Figure 9 : Exemples d'options pour atteindre la réduction de 10^{-6} DALY par personne par an.....	27
Figure 10 : Illustration des points de contrôle pour la validation des projets de REUT sans aspersion dans le cadre de l'Arrêté du 2 août 2010	30
Figure 11 : Illustration des points de contrôle pour la validation des projets de REUT avec aspersion dans le cadre de l'Arrêté du 2 août 2010 (en jaune les points de contrôle spécifiques à l'irrigation par aspersion).....	31
Figure 12 : Variabilité de la qualité des EUT à stocker dans les réservoirs saisonniers à surface libre.....	33
Figure 13 : Type de procédés en amont des réservoirs de stockage (enquête Irstea-SATESE 2011)	34
Figure 14 : Type de désinfection utilisées (enquête Irstea-SATESE 2011).....	34
Figure 15 : Image satellite de la station et réservoir de stockage associé de Thorigné (79) (extrait Google Earth)	35
Figure 16 : Image satellite de la station et réservoir de stockage associé de Chambray-les-Tours "La Madeleine" (37) (extrait Google Earth).....	36
Figure 17 : Image satellite de la station et réservoir de stockage associé de Bas Mauco (40) (extrait Google Earth)	36
Figure 18 : Réservoirs saisonniers à surface libre	38
Figure 19 : Importance du ratio Surface/Volume.....	38
Figure 20 : Schéma d'un réservoir de stockage à surface libre	39
Figure 21 : Gestion des volumes dans le réservoir de stockage à surface libre.....	39
Figure 22 : Régulation des débits journaliers par les réservoirs opérationnels	39
Figure 23 : Réservoirs opérationnels ouverts.....	39
Figure 24 : Influence du temps de séjour sur la recroissance des micro-organismes en présence de nutriments.....	39
Figure 25 : Aération des lagunes de stockage du golf de Citrus et Yasmine dans l'arrière-pays d'Hammamet, Tunisie (rapport AFD).....	39
Figure 26 : Réservoirs opérationnels fermés	39

Tableau 1 : Recommandations pour atteindre l'objectif de réduction de 10^{-6} DALY par personne par an (source : OMS, 2006)	28
Tableau 2 : Niveaux de qualité sanitaire des EUT (extrait de l'arrêté du 2 août 2010).....	29
Tableau 3 : Caractéristiques de réservoirs saisonniers à alimentation continue	39
Tableau 4 : Avantages et inconvénients des techniques de réservoirs fermés (adapté de Company et al. (2007))	39

Annexes

Annexe 1 : Contexte de la réutilisation d'EUT en Europe (source Aquarec)

Répartition des projets de REUT en Europe en 2006 selon les usages et la taille des projets



Annexe 2 : Types d'usage associés aux niveaux de qualité définis par l'Arrêté du 2 août 2010 pour la REUT

Type d'usage	Niveau de qualité sanitaire des EUT			
	A	B	C	D
Culture maraichères, fruits et légumes non transformés	+	-	-	-
Culture maraichères, fruits et légumes transformés	+	+	-	-
Pâturage	+	+a	-	-
Espaces verts et forêts ouverts au public	+b	-	-	-
Fleurs vendues coupées	+	+	-	-
Autres cultures florales	+	+	+C	-
Pépinières et arbustes	+	+	+C	-
Fourrage frais	+	+a	-	-
Autres cultures céréalières et fourragères	+	+	+C	-
Arboriculture fruitière	+	+	+C	-
Forêt d'exploitation avec accès contrôlé	+	+	+C	+C

a sous réserve du respect de délai après irrigation de 10j sans abattoir sur STEU ou 21j avec abattoir

b irrigation en dehors des heures d'ouverture au public

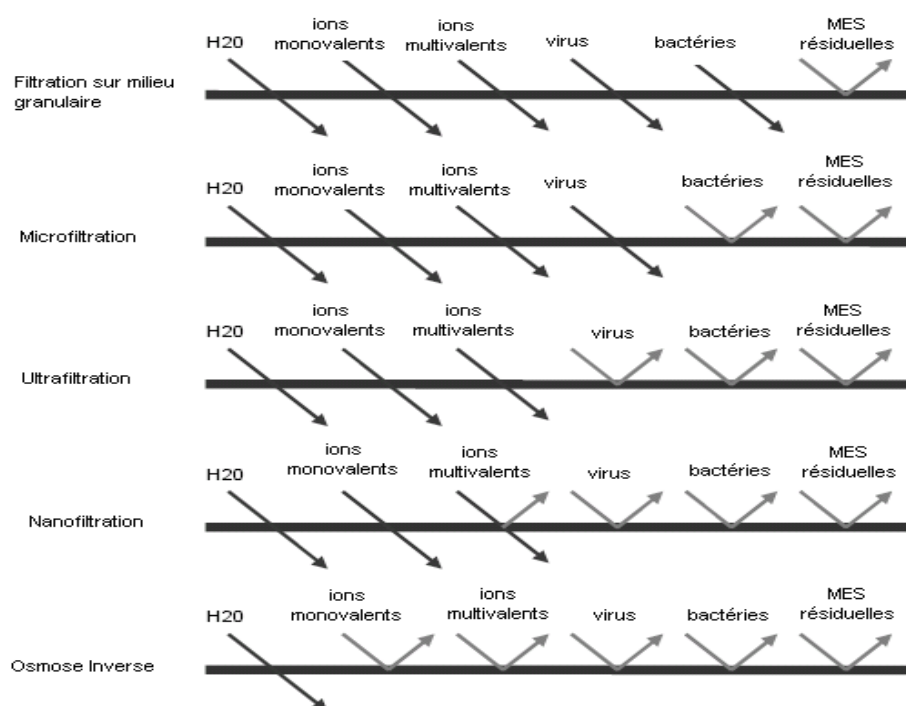
c uniquement par irrigation localisée

Extrait de l'Arrêté du 2 août 2010

Annexe 3 : Traitement tertiaire : Techniques de filtration

Représentation des capacités de filtration de différentes techniques de traitement tertiaire

Source : Boutin et al. (2009)



Efficacité « attendue » du traitement tertiaire (en % ou u.log)

Source : Boutin *et al.* (2009)

	MF	UF	NF	OI	Filtration sur milieu granulaire	Lagunage	Infiltration-percolation
DBO	75 - 90	80 - 90	COT : 90 – 98	COT : 90 – 98			60 - 100
DCO	70 - 85	75 – 90					30 - 50
MES	95 - 98	96 – 99.9	40 – 60	90 – 98	1 à 8 mg/L ^b		65 - 95
N-NH₄⁺	5- 15	5 - 15					65 - 60
N-NO₃⁻	0 - 2	0 – 2	10 - 30	84 - 96			-
PO₄³⁻	0 - 2	0 - 2	<i>retenu^a</i>	<i>retenu^a</i>			20
NaCl			10 – 50	90 - 99			
NaSO₄			80 – 95	90 - 99			60 - 100
CaCl₂			10 – 50	90 - 99			
MgSO₄			80 – 95	95 - 99			
Coliformes fécaux	2 – 5 u.log	3 – 6 u.log	3 - 5 u.log	4 - 7 u.log	vitesse rapide : 0.3 – 0.7 u.log ^c vitesse lente : 2 – 3 log ^c	DTS court : 1-3 u.log ^d DTS long : 2-4 u log ^d	2 – 4 u.log selon la charge hydraulique
Protozoaires	2 – 5 u.log	> 6 u.log	> 6 u.log	4 – 7 u.log	0 – 3 u.log		
Virus	0 – 2 u.log	2 - 7 u.log	3 – 5 u.log	4 – 7 u.log	0 – 1 u.log	1 – 3 u.log	1,5 – 2,5 u.log

(a) : extrait de Seira, 2008 - (b) : extrait de Asano *et al.*, 2007- (c) : extrait de CG29-DEE-SATEA, 2008 ; vitesse rapide : 10-12 m/h ; vitesse lente : charge hydraulique de 0.2 à 0.6 m/j - (d) : extrait de CG29-DEE-SATEA, 2008 ; DTS court : 30-40 jours ; DTS long : 60-80 jours - (e) : extrait de De Koning *et al.*, 2008

Annexe 4 : Enquête Irstea-SATESE 2011

Département	N° Dép	Code SANDRE	Station	Type de traitement en amont du réservoir	Type de désinfection amont/aval du réservoir	Type de réservoir	Caractéristiques du réservoir	Temps de résidence dans le réservoir	Déclaration du réservoir avec la station	Présence du réservoir sur le site de la station	Type de réseau en aval du réservoir	Période de REUT	Objet de la REUT	Problèmes rencontrés
Deux-Sèvres	79	0579J74V003	MELLE	BA aération prolongée (8 100 EH)	2 lagunes de finitions	1bassin	30 000 m³	48 j	oui	oui	refoulement		Valorisation agricole	Développement d'algues filamenteuses dans la dernière lagune de finition (colmatage des pompes) Problème de tenue de la bache d'étanchéité (changée il y a 4 ans) Qualité bactériologique (abattements : Arrêté 02/08/2010)
Deux-Sèvres	79	04790J7S0001	NUEIL LES AUBIERS	BA aération prolongée (5 665 EH)	-	2 lagunes de finition	2 800 m³ + 4 200 m³ 1m de profondeur	10-15j	oui	oui	50 m gravitaire	6 mois/12 fonction du débit rivière	Valorisation agricole	Développement d'algues (colmatage des pompes) Qualité bactériologique (abattements : Arrêté 02/08/2010)
Deux-Sèvres	79	0479299S0002	ST VARENT	BA aération prolongée (2 500 EH)	-	3 lagunes sans bache	3 400 + 3 100 + 3 500 m³ Profondeur 1m	50-70j	oui	oui	20 m gravitaire	6 mois/12 fonction du débit rivière	Valorisation agricole	Qualité bactériologique (Arrêté 02/08/2010)
Deux-Sèvres	79	0479327S0001	THORIGNE	BA aération prolongée (3 300 EH)	lagunage tertiaire	réservoir semi-enterré	60 000 m³ (10 000m² x 6 m)	8 mois	oui	oui	200 m refoulement	toute l'année pas de milieu récepteur	Valorisation agricole	Colmatage des crèpines (occasionnel) Qualité bactériologique (Arrêté 02/08/2010)
Indre et Loire	37	04370JDS0005	AUZOUER-en-TOURAINE « La Gacerie »	BA aération prolongée (1000 EH) Traitement N-P	-	1lagune	50 000 m³	?	non	non	3 km refoulement		Valorisation agricole	Qualité bactériologique
Indre et Loire	37	0437050S0003	CHAMBRAY-LES-TOURS « La Madeleine »	BA aération prolongée (8 000 EH) Traitement N-P	-	1lagune	10 000 m³ (1ha : 1m)	?	non	oui	100 m refoulement		Valorisation espèces verts et espaces publics, stade, hypodrome	
Indre et Loire	37	0437054S0001	CHANCEAUX SUR CHOISILLE	BA aération prolongée (3 600 EH) Traitement N-P	2 lagunes de finitions	1lagune			non	oui	30 m refoulement		Irrigation d'un stade de football	
Indre et Loire	37	0437JDS0002	SAINT-ROCH	BA aération prolongée (1000 EH) Traitement N-P	-	1lagune	?	?	non	non	50 m refoulement		Valorisation agricole	Qualité bactériologique (Arrêté 02/08/2010)
Indre et Loire	37	0437269S0002	VERNEUIL SUR INDRE « La Capitainerie »	Infiltration - percolation (250EH)		1lagune	?	?	non	oui	-		Irrigation golf	Développement d'algues (colmatage pompes)
Lot	46			Boues activées séquencées	Avant : chloration Après : FAS+UV	ancien clarificateur	585 m³ (255 m² x 2 m) béton armé	hebdomadaire	?	?	amont 50 m gravitaire		Valorisation industrielle + Projet REUT espaces verts, nettoyage voies et réserve incendie	Développement d'algues Conformité en sortie de réservoir
Manche	50	0350J880J000	FOLLIGNY	Lagunage naturel (1200 EH)	-	1lagune	2 130 m³ (1700 m² x 15 m)		non	oui	refoulement (DN75)	toute l'année pas de milieu récepteur	Valorisation agricole	RAS
Manche	50	03504J003000	MONT SAINT MICHEL	Lagunage naturel (5 000 EH)	-	1lagune	2 000 m³ (2 000 m² x 1m)	2-3j	oui	oui	refoulement		Valorisation agricole	RAS
Pays de la Loire	44	04440JDS0002	DERVAL	BA aération prolongée (4 000 EH)	-	ancienne lagune de la station	Suivi de deux bassins sur site d'épandage (2 x 2 000 m³)	30j	non	?	16 km	pas de rejet du 1 ^{er} juin au 30 septembre	Valorisation agricole	
Pays de la Loire	44	0444JDS0001	PORNIC Les Salettes	BA aération prolongée (50 000 EH) Traitement N-P M membrane et UV	traitement membranaire + UV	Lagunes d'irrigation sur site	Dans stockage, réception du bypass du bassin tampon en amont de la station		non	oui	refoulement	1 ^{er} avril - 30 octobre zone baignable	Irrigation golf	
Landes	40	0540026V002	BAS-MAUCO	BA aération prolongée (1000 EH)	-	1lagune (2 bassins)	1 ^{er} bassin : 1250 m² x 1m 2 ^e bassin : 1200m² x 1m		non	oui	amont : gravitaire		Valorisation agricole (maïs)	RAS
Landes	40	0540JDS0V002	MEILHAN	BA aération prolongée (600 EH)	-				non	?	amont : gravitaire		Valorisation agricole (maïs)	Surcharge hydraulique dans le canal de sortie
Landes	40	0540JDS0002	MONTAUT	BA aération prolongée (2 800 EH)	-	1lagune + 1lac collinaire	3 000 m³ (2 500 x 120 m)	10j	non	oui	refoulement		Valorisation agricole (maïs)	Développement d'algues
Maine et Loire	49	0449075S0002	CHAPELLE SAINT FLORENT	Lagunage aéré (1900 EH)	-	plan d'eau	38 000 m³ (125 ha et 3 m)	annuel	non	oui			Valorisation agricole (maïs)	RAS
Maine et Loire	49	0449JDS0001	LE FULET	Lagunage aéré (1100 EH)	-	plan d'eau	40 000 m³ (1ha et 4 m)	6 mois	oui	oui			Valorisation agricole (maïs)	Bache dégradée par la grêle
Maine et Loire	49	0449204S0001	LE MESNIL EN VALLEE	Lagunage aéré (2 500 EH)	-	plan d'eau	71000 m³ (14 ha et 5 m)	annuel	oui	oui			Valorisation agricole (maïs)	RAS

Onema
Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Irstea Centre de Lyon
5 rue de la Doua
CS 70077
69626 Villeurbanne
04 72 20 87 87
www.irstea.fr