

Problèmes de proliférations biologiques dans les retenues de substitution.

novembre 2018

1. Problématiques et missions.	1
2. Diagnostic des anomalies.	
2.1 Caractéristiques des ressources utilisées & état des lieux.	2
2.2 Mécanismes réactionnels.	5
3. Recommandations.	
3.1 Contrôle du biofilm dans les canalisations.	7
3.2 Détartrage et nettoyage des équipements.	7
3.3 Contrôle des proliférations algales.	9
3.4 Autres risques.	15
3.5 Programme de maîtrise des risques.	16
Annexes.	19





1. Problématiques & Missions.

Selon la CACG, des problèmes de prolifération végétale s'observent depuis quelques années dans ces réserves. Ces proliférations sont problématiques sur deux réserves car s'ajoute le problème de développement de biofilms à l'intérieur des canalisations de distribution et d'irrigation, limitant ainsi la pression, très problématique pour les irrigants.

1) Compréhension des phénomènes.

Il est demandé à l'expert de :

- expliquer en quoi les paramètres permettent de caractériser le phénomène. §2.2
- Indiquer quelles sont les causes : §2.2
- Vecteur de contamination et/ou de développement ? §3.4
- Indiquer quels sont les facteurs de contrôle, les leviers de gestion ? §3
- Indiquer si le curage des sédiments permettra de diminuer suffisamment le phénomène. §3.2

2) Conseil pour trouver des solutions adaptées §3

Le traitement chimique a déjà été réalisé se révélant efficace seulement quelque temps. Un traitement biologique a été mis en place cette année à l'intérieur des canalisations pour éradiquer les biofilms. Les résultats ont été peu probants.

Le curage va être effectué. D'autres solutions sont à étudier et comparer en termes d'efficacité et de coût : bouées à ultrasons, introduction de carpe amour, ombrage grâce à des panneaux photovoltaïques ou autre, filtration...

L'expert conseillera l'exploitant sur les solutions les plus adaptées.

1

3) Conseil pour réaliser un suivi permettant d'anticiper les phénomènes. §3

Il est demandé à l'expert d'indiquer comment suivre les retenues pour anticiper ce phénomène (quels sont les paramètres à suivre, les seuils à ne pas dépasser, fréquence de suivi).

2. Diagnostic des anomalies.

2.1 Caractéristiques des ressources utilisées & état des lieux.

2.1.1 Retenues d'Oulmes et de Saint-Pierre le Vieux :

Les retenues de Saint-Pierre le Vieux et d'Oulmes nord sont alimentées par des captages dans la nappe libre du Dogger. L'annexe n°1 présente les moyennes obtenues par les analyses de qualité réalisées depuis 1997 dans le périmètre de Fontenay-le Comte ([moyennes des valeurs de quatre captages proches](#)¹).

Il en ressort les éléments suivants pour la ressource :

- Elle ne présente aucun risque de salinisation du sol ($R.A.S^2 < 3$) ni de colmatage ferrique ou manganique (teneurs respectives < 200 et $100 \mu\text{g/l}$).
- Elle est riche en phosphore total (en moyenne $70 \mu\text{g/l}$) et en nitrates ($> 33 \text{ mg/l}$), elle présente donc un fort risque d'eutrophisation (Cf. §2.1.1). Le rapport N/P est totalement déséquilibré (> 480).
- Elle est à l'équilibre calcocarbonique (indice de Langelier $\approx -0,04$ – voir §2.2.2).
- Elle est carencée en bore (recommandation OMS $0,2-0,5 \text{ mg/l}$) d'autant plus que son pH élevé insolubilise cet élément.
- Elle est très pauvre en matière organique.
- Sa qualité sanitaire est excellente.

L'eau des retenues d'Oulmes et de Saint-Pierre est verte, non septique mais avec une odeur normale de géosmine : ceci traduit clairement une **eau eutrophe**. La teneur en cyanobactéries est très élevée à Oulmes (>160.000 cellules par ml), supérieur au seuil d'alerte fixé par l'OMS pour la production d'eau potable, mais la teneur en microcystines est inférieure au seuil de quantification.

Paramètres	Unités	Valeurs mesurées à Oulmes	
		12/09/18 ³	17/10/18 ⁴
Température	°C	19,7	20,3
Redox	mV	nd	+167
Conductivité	$\mu\text{S/cm}$	314	397
pH		9,0	8,3
TH	°F	9,8	10-20
TAC	°F	nd	< 10
Nitrates	mg/l	3,1	< 5
Nitrites	mg/l	0,13	$< 0,1$
Turbidité	NFU	3,4	nd
Phosphore total	mg/l	0,089	nd



Chara major (Image idtools.org)

2

Il en ressort les éléments suivants pour les retenues :

- La qualité se dégrade avec le stockage : le pH augmente par eutrophisation et dégazage du CO_2 , le phosphore se concentre par évaporation, les algues prolifèrent. Les plans d'eau sont devenus eutrophes.
- L'équilibre calcocarbonique est inchangé.
- Le rapport N/P s'est amélioré (≈ 34) par l'eutrophisation (la consommation d'azote des microalgues est très supérieure à celle du phosphore).

Le fond des retenues d'Oulmes et de Saint-Pierre est uniformément recouvert d'un sédiment verdâtre d'environ 10 cm, faiblement organique et tapissé de résidus secs de thalles de *Chara major* (algue Charophycées). Cette algue est celle observée dans la vidéo filmée à Saint-Pierre sur les crépines.

¹ Codes BSS : 05867X0062/F1, 05867X0154/F, 05867X0175/F2, 05868X0220/PZ2.

² Ratio d'Absorption du Sodium (R.A.S ou S.A.R).

³ Rapport Qualyse n°18LH-10125-1 du 12/09/18.

⁴ Mesures sur site (Consult'eau 17/10/18).

Cette algue peut atteindre 100 cm et calcifie son thalle par biominéralisation (c'est pourquoi les débris sont « cassants »). Elle est indicatrice d'eau stagnante à dureté élevée et fortement éclairée, et se comporte ici en espèce pionnière.

Les analyses⁵ du sédiment d'Oulmes nord révèle les éléments suivants :

- Une siccité élevée (> 35%, sédiment donc solide) et une composition quasi exclusive de fines⁶ (sables fins, limons, argiles) normalement issues du pompage (surtout en milieu karstifié).
- L'absence de matières organiques (DBO5 < 3 mg/l dans le lixiviat⁷, et teneur < 3% dans le sédiment⁵) explique la couleur non noire et l'absence d'odeur. Le sédiment n'étant pas organique, il n'intervient que très peu dans la genèse secondaire du biofilm (cf. § 2.2.3).
- Une valorisation agricole possible, mais pour d'autres usages il est nécessaire de compléter les analyses par les paramètres manquants (notés « à déterminer »).

A cause de son stockage, l'eau des retenues acquiert presque toutes les caractéristiques d'une eau douce superficielle eutrophe (comme celle d'une rivière).



2.1.2 Retenue de Pouillé :

La retenue de Pouillé est quant à elle alimentée par un forage dans la nappe captive du Lias inférieur, plus ou moins karstifiée, et donc de qualité potentiellement variable. Les analyses d'eau disponibles sur le site internet du BRGM sont très anciennes et probablement peu indicatives de la situation actuelle, mais les données physicochimiques sont probablement inchangées. Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes obtenues des analyses de 1974 et de 1977⁸ et celles mesurées dans la retenue⁹.

Familles	Paramètres	Unités	Ressource (moyenne)	Retenue Pouillé	
				12/09/2018	17/10/2018
Métaux & métalloïdes	Fer	µg/l	170		
	Fluor	mg/l	0,5		
	Manganèse	µg/l	30		
Physicochimie	Ammonium	mg/l	0,03		
	Calcium	mg/l	96,2		
	Chlorures	mg/l	24		
	Conductivité à 20°C	µS/cm	578,5	256	314
	Dureté totale	°F	31,8		30-40
	Hydrogénocarbonates	mg/l	344,6		
	Magnésium	mg/l	16,9		
	Nitrates	mg/l	20,65		< 5
	Nitrites	mg/l	0	0,06	< 0,1
	Orthophosphates (PO4)	mg/l	0,2		
	Oxydabilité au KMnO4	mg/l	< 5		
	Phosphore total	mg/l		0,079	
	Potassium	mg/l	2,05		
	pH		7,77	10,6	9,4
	Redox	mV			149
	Sodium	mg/l	12,3		
	Sulfates	mg/l	15,8		
	Titre alcalimétrique complet (T.A.C.)	°F	27		< 5
	Turbidité	NFU		3,4	

Il en ressort les éléments suivants pour la ressource de Pouillé :

- Elle ne présente aucun risque de salinisation du sol (R.A.S < 3) ni de colmatage ferrique ou manganique.
- Elle est riche en orthophosphates (en moyenne 200 µg/l) et en nitrates (> 20 mg/l), elle présente donc un très fort risque d'eutrophisation (Cf. §2.1.1). Le rapport N/P est certainement aberrant.
- La ressource n'est pas à l'équilibre calcocarbonique, elle est faiblement entartrante (indice de Langelier ≈ -0,56 – Cf. § 2.2.2).
- Elle est pauvre en matière organique.

⁵ Rapport Qualyse n°18SO-159-1 et 2 du 12/09/18 et n°18SO-187-1 du 17/10/18.

⁶ Analyse granulométrique par tamisage réalisée par CACG le 19/10/18.

⁷ Rapport Qualyse n°18LH-10129-1 du 28/09/18.

⁸ codes BSS : 05866X0069/F et 05866X0086/F

⁹ Rapport Qualyse n°18LH-10125-1 du 12/09/18 + n° 18LH-11418-1 et Consult'eau 17/10/18.

Remarque : Les données disponibles étant rares, il est prudent de surveiller certains ions toxiques pour les plantes (fluor, bore, arsenic) et ceux indicateurs d'une surexploitation de la nappe tels que le sélénium et le fluor et l'arsenic, d'autant plus que l'aquifère est karstifié et donc soumis sporadiquement à des variations brutales de qualité.

Il en ressort les éléments suivants pour la retenue :

- L'eau de la retenue de Pouillé est limpide et sans odeur.
- Sa qualité se dégrade avec le stockage : le pH augmente par eutrophisation et dégazage du CO₂, le phosphore et les nitrates sont consommés, les algues prolifèrent. Le plan d'eau est devenu eutrophe.
- L'équilibre calcocarbonique est déplacé vers l'entartrage (IL > 1).

Le fond de la retenue de Pouillé est recouvert uniformément d'un sédiment d'aspect sableux très fin (issu du pompage), non verdâtre et non organique (ni noir ni olfactif).

Il est tapissé d'algues filamenteuses du genre *Cladophora sp* (Ulvophycées). Cette algue est indicatrice d'eau à dureté élevée et eutrophisée.



Tapis de cladophores



4

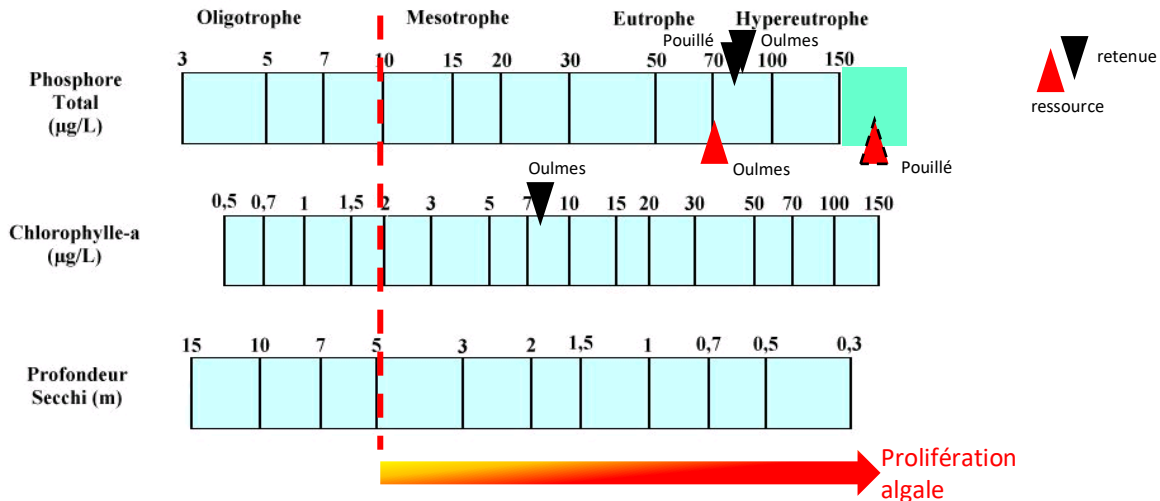


2.2 Mécanismes réactionnels.

2.2.1 Eutrophisation :

Toutes les masses d'eau du monde, naturelles ou artificielles, froides ou chaudes, renferment des algues (il en existe plus de 100.000 espèces). Leur prolifération, appelée efflorescence (ou bloom), est toujours due à la conjonction de plusieurs facteurs abiotiques : **montée en température (> 15°C), ensoleillement important, stabilité de la colonne d'eau, et surtout enrichissement de l'eau en azote et en phosphore soluble (> 30 µg/l)**¹⁰.

Outre le constat visuel (eau verte, pullulation algale), la situation trophique (ou *TSI – Trophic State Index*) est évaluée grâce à la mesure de plusieurs grandeurs et la détermination d'indices trophiques¹¹.



Les genres/espèces qui colonisent les plans d'eau stagnante sont les plus diversifiés, avec des formes libres en suspension (planctoniques) et fixés au substrat (phytobenthiques).

Exemples de genres d'algues d'eau douce

Formes planctoniques	Formes benthiques
<i>Pediastrum</i>	<i>Cladophora</i>
<i>Scenedesmus</i>	<i>Chara</i>
<i>Kirchnerellia</i>	<i>Spirogyra</i>
<i>Chlamydomonas</i>	<i>Ulothrix</i>
<i>Euglena</i>	<i>Anabaena</i>
...	...



L'eutrophisation est une mécanique simple :

1. L'azote et le phosphore étant des facteurs limitants pour les végétaux, tout enrichissement de l'eau en ces éléments stimule leur croissance et crée donc de la matière organique. La photosynthèse consomme du gaz carbonique (acide faible), le pH augmente durant le jour (et baisse la nuit) avec un delta d'environ 1 unité.
2. Une fois leur cycle de vie achevé, les végétaux meurent et forment une boue. La matière organique de cette boue est minéralisée, et libère à nouveau au printemps suivant l'azote et le phosphore dans la masse d'eau. Ces éléments viennent s'ajouter à ceux apportés par la ressource, le flux eutrophe croît donc un peu chaque année. Dans la boue les germes saprophytes prolifèrent, ils consomment beaucoup d'oxygène.

Le phénomène est donc irréversible et plus intense chaque année : seul un curage des boues peut ralentir le phénomène car il supprime le relargage du flux eutrophe des années précédentes.

¹⁰ ANSES 2006 - Évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et autres activités récréatives.

¹¹ Exemple Carlson, 1996.

Pour information, si la masse de boue avoisine 1800 tonnes de MS¹², sachant que la masse d'azote est de 0,4% (3,7 g N/kg PS – Qualyse n°18SO-187-1), cela représente environ 7 tonnes d'azote stockées. Dilué dans 650.000 m³ cela équivaut à un flux annuel de 10 mg N/l soit un tiers du flux apporté par la ressource. Mais cette hypothèse suggère que tout l'azote soit relargué, ce qui n'est pas possible. D'ailleurs l'analyse Qualyse n°18LH-10129-2 montre bien que le lixiviat ne relargue quasiment pas de nitrates ni nitrites. Cela démontre simplement qu'un sédiment peut aggraver l'eutrophisation d'année en année, ici son impact sur l'eutrophisation ne peut être que très faible.

Remarque concernant les apports exogènes :

Les masses d'eaux superficielles hébergent plus ou moins sporadiquement des oiseaux, des rongeurs et d'autres représentants de la faune sauvage. Cette faune apporte à la masse d'eau des fientes plus ou moins riches en azote et en phosphore (et en germes cf. § 3.4.1) : par exemple un cygne excrète 0,5 g de phosphore par jour, un canard 0,20 g.

Les quantités apportées sont toujours difficiles à estimer car elles nécessitent un recensement des animaux présents pour en déduire des flux de germes. Dans les cas de sites dortoirs le risque est bien évidemment accru, encore faut-il effectuer une surveillance du site pour le déterminer.

A titre d'exemple, si une retenue contenant 400.000 m³ héberge en permanence 100 cygnes et 1000 canards, cela représente un flux quotidien d'environ 0,6 µg de phosphore par litre (100 x 0,5g + 1000 x 0,2g = 35g / 400.000). Cela augmenterait globalement de 0,8 à 0,9 % le flux initial d'Oulmes ou de Pouillé (négligeable).

Ici, les eaux brutes stockées sont stagnantes, ce qui accroît leur évaporation, les sels minéraux s'y concentrent plus rapidement ce qui augmente leurs teneurs : la masse d'eau est donc logiquement envahie rapidement par des algues planctoniques (eau verte) et benthiques (algues fixées).

Les recommandations de contrôle sont traitées au § 3.3.

2.2.2 Entartrage et autres dépôts :

L'eau se met toute seule à l'équilibre calcocarbonique en fonction de l'environnement, notamment des conditions de température et de pH. Pour déterminer cet équilibre on calcule simplement l'indice de Langelier (I.L) qui exprime le pH de saturation (noté pH_s) : un écart supérieur à 0,3 (maxi 0,5) entre le pH mesuré et le pH_s signifie soit une eau corrosive (IL < 0,5) ou entartrante (I.L > 0,5).

Ici les ressources profondes voient leur pH augmenter avec l'eutrophisation (puisque la photosynthèse consomme du gaz carbonique, un acide faible) ainsi que la montée en température (les gaz désaturent – Loi de Henry) : l'eau s'équilibre avec ces nouvelles conditions, l'indice de Langelier devient voisin de 0,75, l'eau entartrante dépose les ions carbonates en excès (tartre) sur la géomembrane et dans les canalisations.

Quelques dépôts de fer, couleur rouille, sont aussi visibles de façon plus éparses. Il s'agit de dépôts d'oxyde de fer à la suite de l'oxydation du fer ferreux (Fe²⁺) soluble en fer ferrique (Fe³⁺) insoluble. L'eau profonde est riche en fer ferreux si elle est désoxygénée, ce qui n'est pas le cas des retenues utilisées ici, ou de façon très sporadique.

Les recommandations de contrôle sont traitées au § 3.2.



2.2.3 Biofilm :

Le biofilm est une fine pellicule de cellules vivantes et de leurs exopolymères. Il est créé dans tous les réseaux d'eau, même ceux véhiculant l'eau potable chlorée en continu, les réseaux des piscines et des industries.

Sa formation est due à la présence de matière organique (même à l'état de traces) et de nutriments, et son épaisseur dépend des conditions de température, de vitesse de circulation de l'eau et de la rugosité du support.

L'eau d'irrigation offre toutes les conditions optimales à sa formation : matière organique, eutrophie, mucus algaux présents, température supérieure à 15°C, vitesse lente, matériau PEHD, etc.

Les recommandations de contrôle sont traitées au § 3.1.

¹² Données : 46000 m² x 0,1 m d'épaisseur = 4600 m³.

3. Recommandations.



3.1 Contrôle du biofilm dans les canalisations.

L'environnement réactionnel étant favorable à sa formation, la stratégie d'action repose pour l'instant sur une action curative. Lutter contre le biofilm dans les canalisations est une problématique ubiquitaire, quel que soit le liquide transporté, et de très nombreuses solutions sont déjà mises en œuvre : biocides, choc thermique, vitesse élevée, ice pigging (injection de glace pilée), etc. Mais au regard de l'usage agricole de l'eau et des équipements utilisés, il n'y a que peu de techniques envisageables.

Injection d'un biocide

Le recours à des biocides halogénés comme le chlore ou le brome, et/ou aux biodispersants chimiques est inenvisageable, à cause de leurs toxicités intrinsèques (ou induites par les résidus). Les biocides non rémanents tel que le peroxyde d'hydrogène sont efficaces si l'eau est propre (pauvre en matière organique) mais onéreuses (environ 20 €/m³).

Choc thermique

Un choc thermique se fait à une température de 65-70°C (pratiqué par exemple dans les tours aéroréfrigérantes), mais cette température est incompatible avec les installations d'irrigation.

Choc hydraulique

L'augmentation de la vitesse de circulation (à plus de 2,5 m/s) n'est pas non plus envisageable car elle génère un écoulement très turbulent néfaste aux installations.

Autres solutions

Certaines techniques sont en cours de développement, comme celle de l'ice pigging (injection de glace pilée sous pression), très efficace en action curative mais très coûteux et réalisé par très peu de prestataires pour le moment (ex. Suez dans le réseau d'eau de Dijon).

Les solutions biologiques, notamment enzymatiques, ont une efficacité très limitée et non adaptée aux débits mis en œuvre ici.

Aucun moyen de contrôle n'est donc efficace a posteriori, hormis le choc biocide à faire avec une fréquence régulière (comme déjà réalisé par un des irrigants) et en utilisant un biocide non rémanent et sans résidus tel que le peroxyde d'hydrogène (en outre titulaire d'une attestation de conformité sanitaire). [Je recommande cette technique.](#)

Un détartrage à l'aide d'acide chlorhydrique ou sulfamique peut s'avérer nécessaire à la fin de chaque saison (suivi d'un rinçage), ou une application de biodispersant à base d'amines aliphatiques (naturelles pour assurer leur biodégradabilité par le sol).

Actions préventives

Réduire au maximum l'entrée de matière organique, donc contrôler les proliférations algales puisque ce sont elles qui les créent in situ (Cf. § 3.3).

3.2 Détartrage et nettoyage des équipements.

Les équipements subissent un encrassement dû notamment à la formation de biofilm et à la rugosité créée par le tartre. Les apports de particules fines par les pompes créent quant à eux l'essentiel du sédiment. La stratégie est curative, et l'approche peut être in situ (en eau) et/ou en à-sec partiel ou total.

3.2.1 Détartrage :

Mis en œuvre après vidange, il s'agit de pulvériser un acide (chlorhydrique ou sulfamique) sur la géomembrane ou d'en injecter une solution concentrée dans les canalisations. Après un temps de contact de plusieurs minutes (15-60), il faut soit brosser et rincer à l'eau claire, soit rincer abondamment dans le cas

des canalisations. Puis il faut neutraliser la laitance acide créée à l'aide d'une solution alcaline pour obtenir un effluent non polluant.

Au regard des surfaces à traiter et de leur pente, l'opération s'avère très lourde techniquement et donc très onéreuse. Je ne la recommande pas, le tartre déposé n'altère pas la qualité de l'eau ni la géomembrane, il n'est que peu problématique, son seul inconvénient est mineur (accroche de biofilm, inesthétique).

3.2.2 Evacuation des sédiments :

Cette opération a surtout deux objectifs, évacuer les matières eutrophisantes accumulées, et maintenir la qualité de l'eau durablement. Dans toutes les masses d'eaux superficielles, le curage est indispensable et relativement efficace. Mais ici il ne revêt pas actuellement de caractère d'urgence au regard du volume de boue très faible, de sa nature minérale, et de la qualité de l'eau stockée.

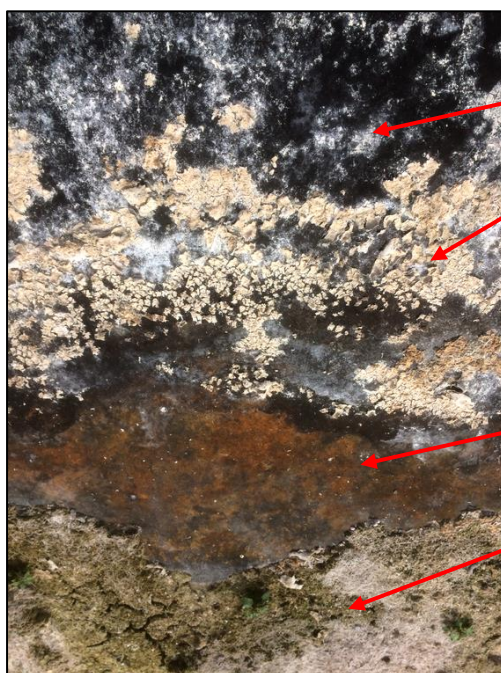
Elle est en général réalisée après vidange, pour minimiser le volume à gérer en obtenant une siccité élevée par dessiccation naturelle. Mais des appareils de nettoyage continuels existent aussi, certains éprouvés comme les robots nettoyeurs, d'autres en développement comme le robot dévaseur (utilisé par VNF) : ces deux machines sont adaptées aux retenues de substitution.

Ces robots brossent et/ou aspirent la boue liquide et la refoulent par un tuyau en dehors de la masse d'eau. Cette boue liquide doit ensuite être traitée avant contrôle qualité et épandage.

Exemple le modèle YT 600 ou 800 de chez WEDA (prix mini 75 k€) <http://www.weda.se/industry/>
Ou le robot dévaseur (prix nc) <http://robotdevaseur.com/>



Weda YT800



Tartre

Biofilm adhérent au tartre

Dépôt d'oxyde de fer

Sédiment



3.3 Contrôle des proliférations algales.

Les proliférations algales causent ici de nombreux problèmes, formation de matière organique soluble, formation de substances adhésives voire de toxines, alimentation du biofilm, et augmentation du pH.

Là aussi l'environnement réactionnel est favorable à leur développement, avec une eau eutrophe, fortement éclairée et stagnante. La stratégie de lutte à envisager ici est plutôt préventive que curative, pour les raisons suivantes :

- La plupart des traitements algicides sont à base de biocides rémanents et toxiques pour les végétaux.
- Le volume d'eau à traiter est considérable, le coût d'un traitement biocide serait très important, et faute de rémanence, trop peu adapté au stockage à l'air libre,
- La réglementation biocide est très stricte quant aux usages autorisés et la protection de l'environnement.

La lutte préventive repose classiquement sur la réduction du flux eutrophe mais n'est pas envisageable ici.

Lyse cellulaire par sonication (transduction à ultrasons)

Les systèmes à ultrasons (> 20 kHz) sont utilisés depuis les années 70 dans les masses d'eaux pour lutter contre les algues et le biofilm. Cette technique s'adapte à toutes les masses d'eau.

La performance globale ne dépasse pas 75% d'élimination, et est plutôt sélective : les *Oscillatoria* (cyanobactéries) y sont insensibles, ainsi que 5 espèces de microalgues très communes (*Scenedesmus*, *Pediastrum*, *Euglena*, ...) et les macrophytes tels que *Chara*, *Pitophora* ou *Nitella*¹³. Une étude menée à Douarnenez (29) pendant 4 ans a même révélé l'absence d'effet sur les blooms phytoplanctoniques¹⁴.

L'efficacité dépend de nombreux paramètres, météorologiques, chimiques (conductivité, turbidité, ...), et période d'utilisation.

Les systèmes à ultrasons sont suspectés de sélectionner des formes algales résistantes, notamment chez les cyanobactéries.

L'efficacité sur le biofilm des réseaux est plus modeste car la portée des ondes est limitée par la ramification des réseaux.

Le coût des appareils est assez élevé, de 6000 à 13000 € HT pour cette taille de bassin, et un seul appareil ne suffit pas en général au-delà de deux hectares.



La consommation énergétique est en revanche faible, certains modèles sont mêmes solaires (cf. photo ci-dessus).

Exemple de fabricants : <https://www.lgsonic.com/>, <https://www.aquasonic.eu/>

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Diminution des cyanobactéries et un peu du biofilm. Consommation énergétique très faible. Mise en œuvre très facile.	Efficacité théorique souvent surestimée. Efficacité sélective. Sélection possible de formes algales résistantes. Augmentation de la turbidité (lyse algale, matière organique). Risque sanitaire par relargage des toxines algales. Action lente (plusieurs semaines à mois). Coût du matériel élevé (longévité 10 ans ¹⁵).

Je ne recommande pas cette technique, les bénéfices apportés ne contrebalancent pas les inconvénients générés. Elle risque d'aggraver la problématique du biofilm et sa performance est trop variable.

¹³ Applying Ultrasound Technology to Control Algae and Biofilm. Hutchinson, 2009.

¹⁴ Apports de phosphore et proliférations de cyanobactéries dans le Lac au Duc (Morbihan) : Diagnostic et propositions d'actions préventives et curatives potentielles. Observatoire Départemental de l'Environnement du Morbihan, [2012](#).

¹⁵ Selon l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (2010).

Prédation par des poissons phytoplanctonophages

On utilise en général des carpes argentées (*Hypophthalmichthys molitrix*) qui consomment des cyanobactéries et des algues filamenteuses, mais d'autres poissons ont aussi été testés comme le rotengle, avec des efficacités médiocres.

Cette méthode est utilisée depuis longtemps au Maroc (Echihabi et al. 2001) et la littérature cite quelques exemples fructueux (Xie et al. 2003) avec la raréfaction/disparition des proliférations de cyanobactéries suite à l'introduction de carpes argentées ou Amour¹⁶.



Mais dans les faits la mise en œuvre est complexe pour plusieurs raisons¹⁷ :

- Les carpes sont des fousseurs permanents, qui remettent en suspension de nombreuses particules et augmentent la turbidité. Ces particules sont susceptibles de se retrouver dans les canalisations, avec leur cortège de bactéries fixées à leurs surfaces.
- Ces carpes ne sont pas exclusivement phytoplanctonophages, elles consomment de préférence du plancton et des invertébrés. Les plantes fibreuses sont consommées en priorité, les characées et les algues filamenteuses en dernier ressort^{18,19}.
- Elles ne se nourrissent en continu qu'à une température supérieure à 20°C.
- Les individus introduits depuis des élevages font rarement plus de 5 kg, ils ne grandissent que d'un kg par an s'ils arrivent à consommer au moins 50 kg d'algues.
- Les carpes excrètent des mucus riches en azote et leurs fientes sont souvent contaminées par des bactéries potentiellement pathogènes comme les salmonelles²⁰.
- Elles relarguent presque toute la nourriture organique consommée sous forme de sels minéraux solubles (80% de l'azote et 30% du phosphore). Dans leur revue sur les impacts écologique de la carpe herbivore, Dibble et Kovalenko (2009), relèvent qu'en plan d'eau « *la carpe herbivore peut dégrader la qualité de l'eau : la remise en suspension des sédiments lors de son alimentation et la décomposition des fèces induisant une augmentation des concentrations en nitrite, nitrate et phosphate puis une diminution de l'oxygène dissous, souvent suivis de blooms algaux* ». On peut aussi citer « Elle assimile moins de 50% de la matière végétale qu'elle consomme et excrète le reste partiellement digéré. Ces déchets organiques retournent dans l'environnement et peuvent contribuer à une eutrophisation et par la suite à un chute de l'oxygène dissous et à la mort de poissons²¹ ».
- Lorsque la retenue est vidée ou arrive en niveau bas, il faut absolument capturer les animaux et les maintenir en bassin dédié : la capture nécessite une équipe de pêcheurs et la pose de filets, puis le transbordement en bassines et le transfert en étang (le stress généré tue une partie du cheptel). Si le taux d'oxygène baisse (à moins de 0,2 mg/l²²), notamment la nuit à cause de l'eutrophisation, les animaux meurent et contaminent l'eau : en situation eutrophe l'anoxie nocturne est un phénomène très courant. A moins de 4 mg/l elles ne s'alimentent plus²³.

¹⁶ Kirkağaç et Demir 2006.

¹⁷ Le Courrier de l'environnement de l'INRA n°51, février 2004. [Les dessous noirs de l'Amour blanc.](#)

¹⁸ Le Louarn in Keith et Allardi, 2001

¹⁹ Dibble et Kovalenko, 2009.

²⁰ Etude sur l'élevage des carpes dites chinoises en France et évaluation de leur possible reproduction naturelle dans les cours d'eau Français. Teletchea & al. Université de Nancy.

²¹ Galveston Bay Foundation, 2002.

²² Bruslé et Quignard, 2001.

²³ Masser, 2002



AVANTAGES	INCONVENIENTS
Action rapide. Mis en œuvre facile. Coût peu élevé.	Relargage de MES, de matière organique, d'azote, de phosphore. Risque sanitaire accru par émission de germes pathogènes. Action faible sur les macrophytes comme Chara et les filamenteuses. Action faible à température < 20°C. Gestion du cheptel compliquée en fin de saison et en condition eutrophe.

Je ne recommande pas cette technique, les bénéfices apportés ne contrebalancent pas les inconvénients générés. Elle risque d'aggraver la problématique du biofilm et des cyanobactéries.

Déstratification de la colonne d'eau

Le brassage de la masse d'eau est bénéfique à son aération et empêche la création d'une stratification thermique verticale, favorable à la prolifération algale en surface.

Elle se fait par exemple à l'aide d'aérateurs électriques flottants ou de diffuseurs profonds (si P > 5m). Au regard de la profondeur des retenues de substitution, l'agitation de la surface n'est pas envisageable, seule l'insufflation peut être utilisée : un compresseur d'air placé sur la berge, alimente en air des diffuseurs répartis sur le fond. Voir plus de détails sur la technicité et les coûts sur le [document](#) de Defoy & Leblanc.

Elle est bien entendu énergivore (jusqu'à 0,02€/m³/mois soit 20.000 € par mois). Une combinaison avec un ombrage solaire (voir ci-dessous) permettrait bien entendu d'en minimiser le coût.

Son efficacité est variable selon le niveau d'eutrophie et les groupes d'algues, mais il y a globalement un consensus sur le bénéfice envers les cyanobactéries^{24,25,26}. Elle a aussi l'inconvénient d'augmenter un peu la turbidité de l'eau car elle réduit évidemment la décantation des particules, en l'occurrence des fines et des algues mortes, qui seront évacuées vers le réseau d'irrigation et participeront à la création du biofilm dans les équipements.

Exemple de réalisation :

<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/beiepe/book/export/html/106>



AVANTAGES	INCONVENIENTS
Diminution des cyanobactéries. Précipitation du phosphore. Mise en œuvre assez facile.	Augmentation des microalgues sauf cyanobactéries. Efficacité théorique souvent surestimée, et action plutôt localisée à la zone brassée. Peu adaptée aux bassins très profonds. Relargage de MES et de phosphore. Augmentation du pH. Coût des équipements. Consommation énergétique.

Je ne recommande pas cette technique, les bénéfices apportés ne contrebalancent pas les inconvénients générés. Elle risque d'aggraver la problématique du biofilm et est trop énergivore.

²⁴ Evaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et de leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et aux autres activités récréatives. AFSSET, 2006.

²⁵ [Avis](#) concernant l'aération ou la circulation artificielle de l'eau des lacs comme mesures de restauration de la qualité de l'eau. Ministère de l'Environnement du Québec, 2003.

²⁶ Lac d'Hanningfield (Simmons, 1997), retenue de Grangent dans la Loire (Latour-Duris et al., 2002).

La réduction de luminosité

La suppression de l'éclaircissement par une couverture flottante est très efficace si elle est totale (ou presque).

Panneaux photovoltaïques flottants

Le seul exemple français est le lac de Piolenc (Vaucluse), il est actuellement en construction, mais n'a pas pour vocation de créer un ombrage mais d'utiliser la surface disponible : aucune étude n'a donc encore été menée sur ses impacts sur les algues. Sa mise en œuvre sur un ouvrage ayant des berges inclinées est un obstacle à considérer, car le marnage de la retenue réduit sa surface peu à peu., nécessitant donc le retrait progressif de certains panneaux. Les très rares installations actuelles n'ont été réalisées que sur des plans d'eau sans marnage.



Installation lacustre d'Illkirch-Graffenstaden au sud de Strasbourg

Couverture flottante de shade balls (*bird balls*)

Issues d'une technique de laboratoire (billes anti-évaporation pour bain-Marie), elles ont été testées entre 2008 et 2017 sur les cinq retenues d'eau potable d'Hollywood, cette technique consiste à recouvrir la surface d'un plan d'eau de billes flottantes en PVC noir de 10 cm de diamètre (lestées de 200 g d'eau pour ne pas être emportées par le vent) : l'obscurcissement obtenu est de 90%.

L'objectif premier était notamment de réduire l'évaporation de 90%, mais bien entendu cela permet aussi de freiner le développement algal et d'empêcher l'accès des oiseaux (fonction originelle).

Le coût des billes est d'environ 40-50 € par m² (hors mise en œuvre). Leur durée de vie est d'environ 10 ans (PVC recyclable) mais le bilan carbone de leur fabrication est très mauvais.

Elles ont l'inconvénient de stimuler la croissance bactérienne²⁷, en offrant un support de culture près de la surface (oxygénée et chaude) et en supprimant les UV germicides naturels. Cette prolifération impacte négativement la qualité bactériologique de l'eau stockée.

Elles ont l'avantage indéniable de pouvoir s'adapter à toutes les masses d'eau, et toutes les formes de bassin.

Remarque : une autre génération est à l'étude, en forme de dodécaèdre, afin d'atteindre 100% d'obscurcissement.



²⁷ The water footprint of water conservation using shade balls in California. Nature Sustainability, 2018; 1 (7).



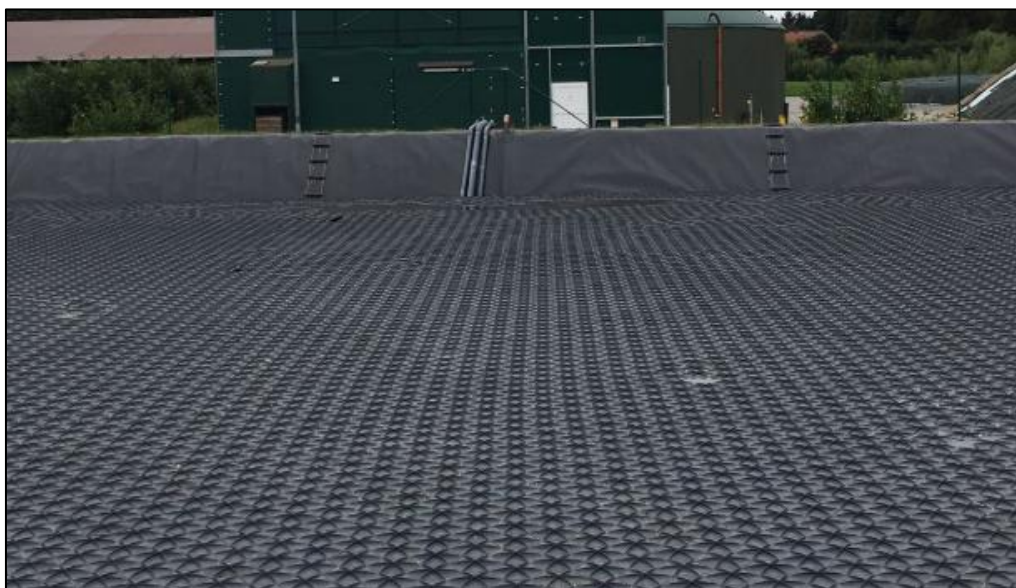
Shade balls sur un réservoir à Hollywood (Los Angeles)

Couverture flottante de dalles PVC

La technique est similaire à celle-ci-dessus, mais utilise des dalles PVC hexagonales flottantes qui s'auto-assemblent. Elles sont davantage utilisées dans le cadre d'eau usée, leur durée de vie est de 25 ans.

Le coût est voisin de celui des shade balls, mais l'obscurcissement est quasi total. Je n'ai aucune information quant aux effets négatifs, car à ma connaissance elles sont utilisées dans des eaux usées, où la qualité bactériologique importe peu. L'obscurcissement étant total, le développement algal est inhibé.

Exemple de fabricant : [Hexa-cover](#).



Couverture flottante par dalles hexagonales (image Wintex Cover)

Couvertures flottantes par liner

Issues des techniques d'hivernage des piscines type bâche à bulles, elles sont posées à même le plan d'eau sur lequel elles flottent, et sont arrimées sur les berges. Elles doivent utiliser des matériaux poreux sinon l'eau de pluie et les salissures s'y accumulent, elles se plissent et perdent leur efficacité : elles sont à mon avis inadaptées à des retenues d'une telle superficie.

Le coût des couvertures est d'environ 100-200 € par m² (hors mise en œuvre). Leur durée de vie est d'environ 10 ans (PVC ou PEHD recyclable) mais le bilan carbone de leur fabrication est aussi très mauvais.

Exemple de fabricant : <https://fcliners.com/fr/applications/>

SYSTEMES	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Couvertures flottantes par liner	Obscurcissement efficace. Aucune incidence sur la qualité d'eau. Evaporation très réduite.	Mise en œuvre difficile sur des superficies étendues et les berges inclinées. Coût élevé.
Couverture par shade balls	Obscurcissement efficace. Coût faible. Mise en œuvre très facile. Evaporation très réduite.	Durée de vie limitée. Favorable au biofilm. Risque sanitaire accru. Gestion difficile des balles en fin de vie (collecte compliquée).
Couverture par plaques flottantes	Obscurcissement efficace. Coût faible. Mise en œuvre très facile. Durée de vie importante. Evaporation très réduite.	Favorable au biofilm ? Risque sanitaire accru ? Gestion difficile des plaques en fin de vie (collecte compliquée).
Couverture photovoltaïque	Production d'énergie. Structure pérenne. Evaporation réduite.	Obscurcissement partiel. Coût très élevé. Impacts inconnus sur le risque algal ou sanitaire. Mise en œuvre difficile sur des superficies étendues et les berges inclinées.

L'association de plusieurs technologies est bien entendu envisageable, par exemple la couverture des plans d'eaux par des panneaux solaires flottants associés à des *shade balls*.



3.4 Autres risques.

Le risque cyanobactéries

L'analyse des cyanobactéries et leurs toxines réalisée en septembre 2018²⁸ révèle une quantité importante de cellules (>160.000 par ml) mais une teneur faible en microcystines totales.

L'OMS considère que le risque toxinique devient modéré à partir de 100.000 cellules par ml, et recommande d'interdire la baignade et la production d'eau potable²⁹, mais sans indication quant à l'irrigation.

Toutefois un risque sanitaire n'est pas à exclure, car plusieurs études décrivent une éventuelle bioaccumulation de cyanotoxines dans les plantes cultivées : l'irrigation des cultures par l'eau contenant des cyanobactéries est une source de contamination pour l'humain³⁰, et l'eau de réservoir utilisée pour l'abreuvement a également été à l'origine d'intoxications de bovins et de moutons par des cyanobactéries en Afrique du sud³¹ (*Nodularia spumigena* ou *Microcystis aeruginosa*).

En outre, l'irrigation avec de l'eau contenant les cyanotoxines peut causer des pertes économiques car les cyanotoxines sont aussi toxiques pour de nombreuses plantes cultivées (réduction de croissance et de biomasse, stress oxydatif, diminution de l'activité photosynthétique, perturbation de l'assimilation des éléments minéraux, brunissements et nécroses³²).

Remarque : dans les échantillons naturels et à l'obscurité, les microcystines peuvent persister plusieurs mois voire des années (Sivonen & Jones 1999), la mise à l'obscurité partielle des bassins augmenterait donc leur persistance.

Le risque légionnelles

Les bactéries légionnelles sont des bacilles résistants et ubiquitaires dans les eaux, qui affectionnent les eaux tièdes (20-45°C) et eutrophes. Les retenues étant stagnantes et exposées en plein soleil, elles atteignent une température suffisante pour leur multiplication : un risque légionnelle n'est donc pas exclu, d'autant plus que les eaux sont apportées par aspersion, ce qui génère des aérosols, seule voie contaminante pour ces bactéries.

Facteur aggravant du risque, la présence de biofilm constitue un support idéal à leur prolifération, ainsi que celle des cyanobactéries qui relarguent des nutriments propices³³.

Remarque : suite à une trentaine de cas de légionellose apparus dans la région lyonnaise en mai 2005, la Préfecture avait exigé la désinfection des eaux d'irrigation pour les maraîchers.



Les autres germes à risques

Les masses d'eaux superficielles hébergent plus ou moins sporadiquement des oiseaux, des rongeurs et d'autres représentants de la faune sauvage. Cette faune apporte à la masse d'eau des fientes plus ou moins contaminées par une flore fécale normale (ex. coliformes, entérocoques) et une flore potentiellement pathogène (ex. salmonelles, *Campylobacter*, virus). La décomposition de leurs cadavres est susceptible d'émettre d'autres souches potentiellement pathogènes tels que des clostridies et virus (ex. grippe aviaire). Les quantités apportées sont toujours très difficiles à estimer car elles nécessitent un recensement des animaux présents pour estimer leurs masses et en déduire des flux de germes. Dans les cas de sites dorts, le risque est bien évidemment accru, encore faut-il effectuer une surveillance du site pour le déterminer.

De nombreuses études ont estimé les teneurs en germes dans les fientes des oiseaux³⁴ et des ragondins : ces teneurs sont presque toujours voisines de celles des déjections humaines (ex. *E. coli* 1,9.10⁹/jour par humain, mouette 2.10⁹/jour, canard 1,1.10¹⁰, etc.). Le flux dépend donc de la quantité d'animaux et de la masse d'eau présente.

²⁸ Rapport Qualyse n°18LH-10124-1.

²⁹ Les limites de qualité sont de 1 µg/l de microcystine LR pour l'eau potable et de 25 µg/l pour la baignade (Circ. DGS annuelle).

³⁰ Chorus et Bartram 1999, Corbel et al 2014

³¹ Van Halderen et al., 1995

³² Occurrence of cyanobacteria producing toxins in irrigation freshwaters: which impacts on crop quality and public health? J. Mater. Environ. Sci. 6 (10) (2015) 2986-3001.

³³ Fields, 2002 ; Tyson et al., 1980

³⁴ Par exemple : The impact of bird populations on the microbial quality of bathing waters. Wither & al., 2003.

Hormis des recommandations du SEQ-eau et de l’OMS, ces germes ne sont pas réglementés dans l’eau d’irrigation (cf. annexe 2). Selon la DGS³⁵ le risque d’une contamination de l’environnement semble très faible (pour le virus de la grippe aviaire), toutefois un diagnostic de leur présence devrait aussi être envisagé, mais à mon avis le risque prédominant demeure celui des légionnelles et des cyanobactéries, sujets d’ailleurs d’actualité.



3.5 Programme de maîtrise des risques.

Les eaux d’irrigation ne doivent pas être une menace pour les sols, les cultures, l’environnement et le personnel technique. Il convient donc d’anticiper les dérives de qualité afin d’anticiper les phénomènes problématiques, dans le cadre d’un programme de maîtrise des risques.

Il n’y a pas actuellement de valeurs limites spécifiques aux eaux d’irrigation, toutefois, **dans le cadre d’un programme de maîtrise des risques** il est recommandé de surveiller régulièrement la teneur en germes pathogènes dans l’eau stockée, notamment celles des cyanobactéries et des légionnelles, ainsi que la teneur en microcystines, puisque sa qualité actuelle se rapproche de celles des eaux de surface. L’ANSES a d’ailleurs proposé de nouvelles recommandations³⁶ pour l’irrigation par aspersion avec les eaux usées traitées, certes plus contaminées, mais néanmoins proches des eaux stockées ici. Ce rapport préconise d’ailleurs une vidange totale et un rinçage du réseau à la fin de la saison d’irrigation : « *Des procédures de nettoyage et d’entretien de ce réseau, déterminées par les exploitants, devraient être élaborées et mises en œuvre* ».

L’étape initiale de ce programme est l’établissement de critères de suivi qualitatifs, de valeurs guides et de valeurs seuils, et d’un calendrier analytique.

16

D’un point de vue réglementaire et normatif on peut s’appuyer sur les ressources suivantes :

- L’OMS a édité en 2013 un document sur les « [Bonnes pratiques d’irrigation](#) » où sont recommandées des valeurs seuils,
- Le [SEQ-eau v2](#)³⁷ de 2003,
- La NF EN 12484-1 : si un des paramètres minimum dépasse la recommandation, il faut procéder à une analyse complète.
- L’Arrêté du 02/08/10 relatif à la réutilisation des eaux usées urbaines traitées (REUSE).
- L’Arrêté conjoint n° 1276-01 du 17 octobre 2002 portant fixation des normes de qualité des eaux destinées à l’irrigation (Maroc³⁸).

Les valeurs seuils citées dans ces documents sont récapitulées dans [l’annexe n°2](#), ainsi qu’une fréquence annuelle de suivi recommandée a minima, et des propositions de valeurs seuils dans l’eau distribuée.

[Atteindre une valeur d’alerte signifie déclencher un protocole de surveillance particulier, par exemple une analyse rapprochée.](#)

[Atteindre une valeur limite signifie l’arrêt de la distribution et/ou la mise en œuvre de protocoles d’urgence \(désinfection, traitement spécifique, ...\) et l’information aux irrigants.](#)

³⁵ Circulaire N° DGS/SD7A/2006/235 du 30 mai 2006.

³⁶ Réutilisation des eaux usées traitées pour l’irrigation des cultures, l’arrosage des espaces verts par aspersion et le lavage des voiries ANSES mars 2012 : <https://www.anses.fr/system/files/EAUX2009sa0329Ra.pdf>

³⁷ Système d’Évaluation de la Qualité de l’eau.

³⁸ Cet Arrêté est cité à titre d’exemple car la réglementation marocaine est relativement détaillée dans le domaine de l’irrigation.

Surveillance des ressources :

Le programme national de surveillance des masses d'eaux souterraines est amplement suffisant, sous réserve d'obtention de données actualisées chaque année : l'absence de données récentes pour le forage de Pouillé doit être corrigée dans les meilleurs délais.

D'autre part il est recommandé de réfléchir à un **protocole décisionnel** en cas de ressource dégradée (pollution accidentelle ou vandalisme, non conformités). Par exemple, quelle action en cas d'augmentation de la teneur en sélénium, indicatrice d'une surexploitation de la nappe ?

Surveillance des retenues :

Le stockage prolongé fait évoluer négativement la qualité de l'eau, il s'agit donc de fixer certains paramètres plus spécifiques des eaux de surface, et un calendrier dédié. Celui-ci peut par exemple s'organiser avec une analyse avant la saison d'irrigation et une autre à mi-saison.



Traitement de l'eau distribuée :

En cas de contamination une injection de biocide non rémanent (ex. peroxyde d'hydrogène), ou un traitement UV (> 33 mJ/cm²), dans l'eau distribuée pourrait réduire fortement la teneur en germes, mais pas celle des toxines. Celles-ci nécessitent le recours à une oxydation radicalaire puissante (ex. ozonation) suivie d'une filtration sur charbon actif en grain. Malheureusement, la mise en œuvre de ces technologies sur une eau de surface est beaucoup plus complexe que sur une eau souterraine : l'eau désinfectée doit d'abord être débarrassée de ses MES et matières organiques.

Problématiques	Traitements curatifs préconisés ³⁹ (sur l'eau refoulée)
Turbidité liée aux microalgues et MES.	Coagulation-floculation suivie d'une décantation et/ou filtration sur sable.
Matières organiques solubles.	Coagulation au chlorure ferrique suivie d'une décantation et/ou filtration sur sable. Ou traitement biologique sur biofiltre.
Contaminations microbiologiques.	Filtration suivie d'une injection de désinfectant non rémanent ou d'une irradiation UV germicide.
Risque toxinique.	Oxydation radicalaire type ozonation suivie d'une filtration sur charbon actif en grains.

17

Abattre les pollutions problématiques des retenues reviendrait à créer une véritable usine de traitement sur chaque site.

Ces technologies classiques des usines de production d'eau potable sont très efficaces mais très onéreuses en termes d'investissement (ici > 500 k€ par site) et d'exploitation (0,50 à 1,50 €/m³).

Au regard du vide juridique concernant le statut des eaux d'irrigation, cette approche n'est envisageable qu'à long terme, l'essentiel est d'abord de constituer plusieurs campagnes d'analyses des germes problématiques (et des cyanotoxines) afin de prioriser les éventuelles actions à mener.

Prioriser les actions

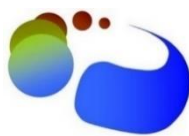
Au regard du calendrier et des attentes des irrigants, je recommande les actions suivantes :

- ❶ Ne pas curer les sédiments pour le moment, leur implication dans les problématiques est trop faible.
Ne pas nettoyer la géomembrane.

³⁹ Selon le Mémento technique de l'eau. Degrémont & Suez® et le site Internet <https://www.suezwaterhandbook.fr/>

- ② Etablir un programme de maîtrise des risques intégrant un programme de suivi de qualité des eaux distribuées et des ressources (annexe 2), et des protocoles d'intervention contre les incidents possibles.
- ③ Mettre en œuvre un protocole de nettoyage des matériels, par exemple 2 fois par an, afin d'éradiquer le biofilm et les salissures dans les réseaux et tuyaux.
- ④ Couvrir les retenues afin de conserver au maximum aux eaux pompées leur qualité d'eau souterraine et réduire drastiquement l'évaporation.

Le mode de gestion actuel des retenues, à l'air libre et en plein soleil pendant plusieurs mois, entraîne le cumul des problématiques classiques des eaux souterraines (déséquilibre calcocarbonique, désaturation en O₂, ...) et de celles des eaux superficielles (eutrophisation, contamination risque toxinique). La qualité de l'eau distribuée n'est pas mauvaise pour les cultures mais simplement dégradée par le stockage, et les problématiques citées en objet en découlent.



ANNEXE N°1

Analyses d'eaux dans la nappe libre du Dogger (source BRGM-BSS) – voir fichier Excel.

Résultats des analyses (moyennes de 4 captages de Fontenay-le-Comte)

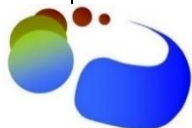
Paramètres	Unité	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Moyennes			
Métaux & métalloïdes	Aluminium	µg/l	10	10	10	10	10	9	10		60	50	70	60	70	75	50					36,0			
	Antimoine	µg/l							0,5		0,5	0,5						0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		
	Arsenic	µg/l							0	2		2	2	2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		
	Bore	µg/l							22,4	55		40	50	40	50	50	50	50	100	100	100	100	40		
	Cadmium	µg/l	1	1	1	2	2	0,131	2	2		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		
	Chrome	µg/l																	0,5					0,5	
	Cuivre	µg/l	50	50	50	10	21	50	10															0,8	
	Fer	µg/l	30	30	30	30	50	50	50	10		10	10	10	10	10	10	10	10	10				21,8	
	Fluor	mg/l	0,13	0,13	0,132	0,177	0,12	0,13	0,136	0,13		0,29	0,15	0,19	0,21	0,18	0,1	0,15	0,12	0,13	0,14	0,14		0,2	
	Manganèse	µg/l	5	5	5	5	5	5,5	12	20		20	12					22		5	5	5		9,4	
	Nickel	µg/l								10		5	5					0,5	5		5	5		5,1	
	Plomb	µg/l	5	5	5	10	10	12	10	2,66									0,05					6,6	
	Sélénium	µg/l								10														1,7	
	Zinc	µg/l	20	20	20	20	10	6	10								1,3	1,1	1,1	0,6	0,5	0,7		14,5	
	Gaz dissous	Anhydride carbonique libre	mg/l										47,564						23,85	44,7	44,09	43,82		40,8	
Oxygène dissous		mg/l	7,9	8	5,5	8	6	5	12,9								3				5,2	5,5		6,7	
Physicochimie	Ammonium	mg/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05		0,05	0,05				0,12	0,05	0,05	0,01	0,01		0,04		
	Calcium	mg/l	115	122,4	117	112,03	115,43	15,44	112,51	112,96		108,7	112,9	107,8	114,9	109,6	114,8	114	119	112	108	108		108,0	
	Carbonates	mg/l		0	0	0	0	0,02	0									0	0	0	0	0		0,00	
	Carbone Organique	mg/l											1,12						0,75		0,96			0,9	
	Chlore total	mg/l	0,1	0,2	0,55	0,8	0,4	0,1	0,6	0,1		0,52												0,4	
	Chlore libre	mg/l										0,51	0,3											0,4	
	Chlorures	mg/l	36,3	35,5	32,7	32	30,3	33,2	29	27,3		29,2	27,4	30,9	30,4	30,7	31	27,3	26	25	25	26		29,7	
	Conductivité à 20°C	µS/cm	644	637	567	593	616	615	657	678		666	664	658	643	657	666	657	692	701	677	672		650,5	
	Dureté totale	°F	36	33,1	32,2	31,35	32,3	31,3	31,2	29,4			31,06	29,6	31,6	30,3	31,6	31,6	32,7	31,6	30,5	30,6		31,6	
	Hydrogénocarbonates	mg/l	274,5	291,58	302,56	305	308,66	295,24	298,9	301,34		301,34	311,1	295,24	300,12	295,24	302,56	301	274	317,2	313,54	309,88		299,9	
	Magnésium	mg/l	6,88	8	8,1	7	8,15	6,5	7,5	7,5		8,5	8,6	6,5	7,1	7,2	7,1	8	7,16	8,73	8,48	8,74		7,7	
	Matière sèche à 180°C	mg/l	413	410	391	418	392	0,2	405									432	162					335,9	
	Nitrates	mg/l	41,1	47	37,6	27	35	30	31,7	28		27	28	21,9	28,8	28,1	31,2	39	36	41	43	41		33,8	
	Nitrites	mg/l	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01		0,02	
	Odeur			0	0	0	0	0,04	0										0	0	0			0,0	
	Orthophosphates (PO4)	mg/l	0,04	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,1	0,08		0,05	0,06	0,02		0,02				0,046				0,05	
	Oxydabilité au KMnO4 à chaud	mg/l	0,87	0,3	0,5	0,5	0,52	0,82	0,5	0,65		1	1	1	1		2	0,55						0,8	
	Phosphore total	mg/l	0,09	0,06	0,07	0,023	0,1	0,08	0,05	0,08						0,115	0,115	0,03	0,069		0,046	0,046		0,07	
	Potassium	mg/l	2,3	2,6	2,75	2,7	2,63	10	2,5			3,1	2,6	2,9	2,8	2,8	3,1	2,3	2,63	3,15	3,12	3,36		3,2	
	pH		7,6	7,5	7,27	7,5	7,1	7,4	7,2	6,7		6,9	6,95					7,15	7,3	7,1	7,1				7,2
	Potentiel redox	mV																172	202					187,0	
	Silice	mg/l	8,64	9	10,3	10,2	10,5	10,5	10,29	10		10,1	9,84	10,73	10,1	10,6	11	11,8	10,2	8,97	4,77	8,44		9,8	
	Sodium	mg/l	16,65	17	16,28	16	16,09	10	15	16		16	15	16,3	16,3	17,4	17,5	14,5	15,5	15	15,1	14,8		15,6	
	Sulfates	mg/l	46,3	42	42,7	32	33	15,76	32	31		32,8	30,4	32,6	34	30,5	33,5	31,5	33	27	27	23		32,1	
	Température de l'Eau	°C	11,7	12,9	14,5	14,5	15,3	15	14,6	15,1		15,4	15,2	14,2	14,1	14,8	14,6	13,4	25,6	14,6	14,8	27		15,6	
	Titre alcalimétrique (T.A.)	°F	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,0	
	Titre alcalimétrique complet (T.A.C.)	°F	22,5	23	24,8	25	27	24	24,5	24,7		24,7	25,5	24,2	24,6	24,2	24,8	24,6	26	26	25,7	25,4		24,8	
	Turbidité Formazine Néphélon	NFU	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,25	0,25	0,41	0,45	1,5	0,45	0,9	1,32	1,12	0,51	1,2	0,25	0,25	0,25		0,5	
	Microbiologie	Bactéries sulfito-réductrices y	fc/100ml						0															0	
		Coliformes thermotolérants	fc/100m	2	0	0	8	0	3	0			0	2								1	5		1
Cryptosporidium spp		u/100L																					1	0	
Entérocoques		fc/100m	0	0	0	1	0	3	0	0		0	0					0	0	0	0	7		1	
Escherichia coli (E. coli)		fc/100ml								0		0	0						0	0	0	3		1	
Giardia spp		u/100L																					1		0



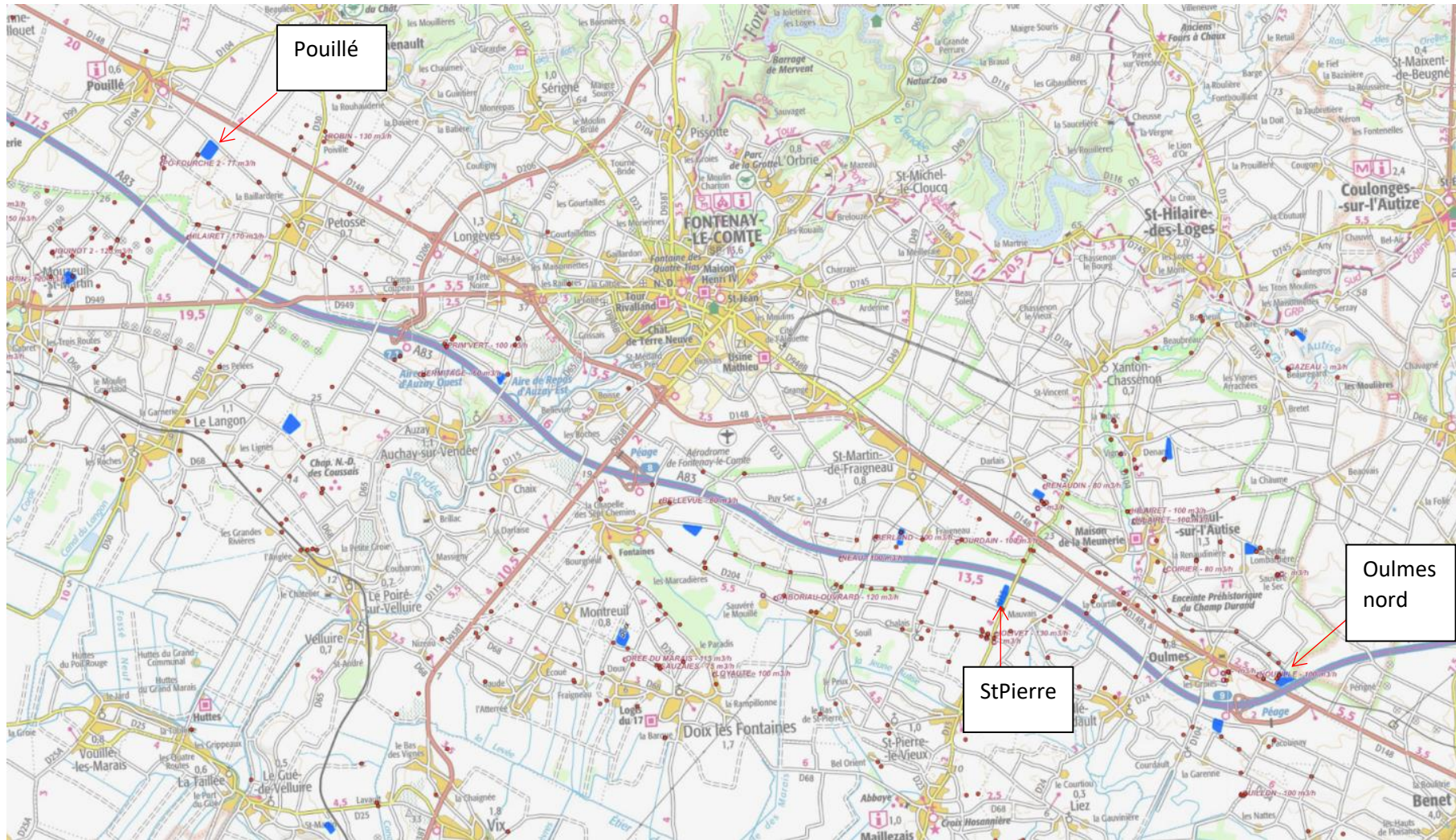
ANNEXE N°2

Valeurs seuils pour l'eau d'irrigation et calendrier analytique. – voir fichier Excel.

Groupes	Paramètres	Unités	Valeurs seuils recommandées					Valeurs conseillées		Fréquence		
			NF EN 12484-1	OMS 2013	SEQ-eau	Peterson, 1999	Maroc (2002)	REUSE (2010)	Alerte	Limite	ressource	retenue
Métaux & métalloïdes	Aluminium	mg/l		5		5	5		5	1/an	1/saison	
	Arsenic	µg/l		100	2000		100		100	1/an	1/saison	
	Beryllium	µg/l		100			100		100	1/an	1/saison	
	Bore	mg/l		3		0,2-0,8	3		3	1/an	1/saison	
	Cadmium	µg/l		10	10		10		10	1/an	1/saison	
	Chrome	µg/l		100	100		1000		100	1/an	1/saison	
	Cobalt	µg/l		50			500		50	1/an	1/saison	
	Cuivre	µg/l		200	5000	200	2000		200	1/an	1/saison	
	Fer total	µg/l		5000		1000-5000	5000		1000	1/an	1/saison	
	Fluor	mg/l		1,0		1	1		1	1/an	1/saison	
	Lithium	mg/l		2,5			2,5		2,5	1/an	1/saison	
	Manganèse	µg/l		200		20-200	200		200	1/an	1/saison	
	Molybdène	µg/l		10		20-70	10	10	70	1/an	1/saison	
	Nickel	µg/l		200	2000	< 100	2000	100	200	1/an	1/saison	
	Plomb	µg/l		5000	2000	<2000	5000		2000	1/an	1/saison	
	Selenium	µg/l		20	20		20		20	1/an	1/saison	
Vanadium	µg/l		100			100		100	1/an	1/saison		
Zinc	µg/l		2000	5000	100-2000	2000		2000	1/an	1/saison		
Physicochimie	Ammonium	mg/l								1/an	1/saison	
	Calcium	mg/l				40-120			120	1/an	1/saison	
	Chlore libre	mg/l		5		< 0,5		0,1	0,5		1/saison	
	Chlorures	mg/l	<400	350	700		350	400	700	2/an	2/saison	
	Conductivité à 25°C	µS/cm	<1500	3000			12000	1500	3000	2/an	2/saison	
	DBO5	mg/l						60		1/an	1/saison	
	Dureté TAC (alcalinité)	°F				200			200	1/an	1/saison	
	Dureté TH (totale)	°F	<50	50				50		2/an	2/saison	
	Equilibre calcocarbonique	-						IL ±0,5		1/an	1/saison	
	Magnésium	mg/l				6-25			25	1/an	1/saison	
	Matières en suspension	mg/l					200	15		1/an	1/saison	
	Microcystines totales	µg/l							25		2/saison	
	Nitrates	mg/l					30			1/an	2/saison	
	Nitrites	mg/l						0,1	0,2	1/an	2/saison	
	pH	-		6,5-8		5-7	6,5-8,4			2/an	2/saison	
	Phosphore total	µg/l								2/an	2/saison	
	Potassium	mg/l				0,5-5			5	1/an	1/saison	
	Résidu sec à 105°C	mg/l		2000	3500	875		1000	2000	1/an	1/saison	
	Sodium	mg/l		200		0-50	15		200	1/an	1/saison	
	Salinité	mg/l				1,5	7,68		1,5			
Sulfates	mg/l				24-240	250		250	1/an	1/saison		
Température	°C					35			1/an	2/saison		
Microbiologie	Coliformes totaux	UFC/100 ml			1000			100	1000	1/an	2/saison	
	Coliformes thermotolérants (fécaux)	UFC/100 ml			100		1000	250	100	250	1/an	2/saison
	Microcystis aeruginosa	u/ml							10.000	100.000		2/saison
	Legionella sp	UFC/l							10.000	100.000		2/saison



ANNEXE N°3
Plan de situation des réserves étudiées (source CACG).



ANNEXE N°4

Analyse des valorisations possibles du sédiment de la retenue d'Oulmes.

(voir fichier Excel® associé au rapport)

Conformité à l'Arrêté du 8 janvier 1998 : épandage agricole			
Paramètres	Unités	Valeurs seuils	Résultats moyennés
Métaux			
Cadmium (Cd)	mg/kg VS	10	0,30
Chrome (Cr)	mg/kg VS	1000	<7
Cuivre (Cu)	mg/kg VS	1000	<5
Mercurure (Hg)	mg/kg VS	10	0,055
Nickel (Ni)	mg/kg VS	200	<5
Plomb (Pb)	mg/kg VS	800	<5
Zinc (Zn)	mg/kg VS	3000	38,1
Chrome + cuivre + nickel + zinc	mg/kg VS	4000	<69
Fluoranthène	mg/kg VS	5	0,012
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg VS	2,5	<0,01
Benzo(a)pyrène	mg/kg VS	2	<0,02
SOMVIE PCB (7)	mg/kg VS	0,8	<0,03
Matière organique	%		39,5
Carbone organique	B/kg VS		29,3
Teneur en matière organique	%		2,93
Conformité à la Circulaire du 18 janvier 2001 : épandage non agricole			
Paramètres	Unités	Valeurs seuils	Résultats moyennés
Métaux			
Arsenic (As)	mg/kg VS	10	1
Cadmium (Cd)	mg/kg VS	1000	0,30
Chrome (Cr)	mg/kg VS	1000	<7
Cuivre (Cu)	mg/kg VS	10	<5
Mercurure (Hg)	mg/kg VS	4000	0,06
Nickel (Ni)	mg/kg VS	200	<5
Plomb (Pb)	mg/kg VS	800	<5
Zinc (Zn)	mg/kg VS	3000	38,10
Fluoranthène	mg/kg VS	5	0,012
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg VS	2,5	<0,01
Benzo(a)pyrène	mg/kg VS	2	<0,02
SOMVIE PCB (7)	mg/kg VS	0,8	<0,03
Inhibition mobilité Daphnia magna 24h (%)	% (CE 50)		nd
Inhibition mobilité Daphnia magna après 24 heures	Equitox/m	1	nd
Conformité à l'arrêté du 12/12/2014 : admission en CSDU3			
Paramètres	Unités	Valeurs seuils	Résultats moyennés
Matière sèche (Boue ; Sédiment - NF EN 12880)	% P. B.	>30	39,5
Préparation Physico-Chimiques			
Matière sèche	% P. B.	>30	39,5
Indice de pollution			
Carbone Organique Total par Combustion	mg/kg VS	30 000	nd
Hydrocarbures totaux			
Indice Hydrocarbures (C10-C40)	mg/kg VS	500	nd
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs)			
Somme des HAP	mg/kg VS	50	0,1
Polychlorobiphényles (PCBs)			
SOMVIE PCB (7)	mg/kg VS	1	0
Composés Volatils (BTEX)			
Somme des BTEX	mg/kg VS	6	nd
Analyses Immédiates sur éluat			
pH (Potential d'Hydrogène)			nd
Résidu sec à 105°C (Fraction soluble) sur éluat	mg/kg VS	4000	nd
Résidu sec à 105°C (calcul)	% VS		nd
Indices de pollution sur éluat			
Carbone Organique par oxydation (CO1) sur éluat	mg/kg VS	500	nd
Chlorures (Cl)	mg/kg VS	800	nd
Fluorures	mg/kg VS	10	nd
Sulfates	mg/kg VS	1000	nd
Indice phénol (calcul mg/kg)	mg/kg VS	1	nd
Métaux sur éluat			
Arsenic (As) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	0,5	nd
Antimoine (Sb) ICP/MS Eluat	mg/kg VS	0,06	nd
Baryum (Ba) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	20	nd
Cadmium (Cd) ICP/MS Eluat	mg/kg VS	0,04	nd
Chrome (Cr) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	0,5	nd
Cuivre (Cu) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	2	nd
Mercurure (Hg) sur éluat	mg/kg VS	0,01	nd
Molybdène (Mo) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	0,5	nd
Nickel (Ni) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	0,4	nd
Plomb (Pb) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	0,5	nd
Sélénium (Se) ICP/MS Eluat	mg/kg VS	0,1	nd
Zinc (Zn) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	4	nd
Conformité à l'arrêté du 15/02/2016 : admission en CSDU1			
Paramètres	Unités	Valeurs seuils	Résultats moyennés
COT (Boues) par combustion sèche	mg/kg VS	800	nd
Sulfate (SO4) sur éluat	mg/kg VS	20000	nd
Chlorures (Cl)	mg/kg VS	15000	nd
Fluorures	mg/kg VS	150	nd
Métaux sur éluat			
Arsenic (As) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	2	nd
Antimoine (Sb) ICP/MS Eluat	mg/kg VS	0,7	nd
Baryum (Ba) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	100	nd
Cadmium (Cd) ICP/MS Eluat	mg/kg VS	1	nd
Chrome (Cr) ICP/MS Eluat	mg/kg VS	10	nd
Cuivre (Cu) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	25	nd
Mercurure (Hg) sur éluat	mg/kg VS	0,2	nd
Molybdène (Mo) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	10	nd
Nickel (Ni) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	10	nd
Plomb (Pb) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	10	nd
Sélénium (Se) ICP/MS Eluat	mg/kg VS	0,5	nd
Zinc (Zn) ICP/AES Eluat	mg/kg VS	50	nd
Analyses Immédiates sur éluat			
Résidu sec à 105°C (Fraction soluble) sur éluat	mg/kg VS	60000	nd
Matière organique			
Matière organique totale	%	6	2,93
Revégétalisation et remodelage			
Paramètres	Unités	Valeurs seuils	Résultats moyennés
Métaux			
Cadmium (Cd)	mg/kg VS	10	0,30
Chrome (Cr)	mg/kg VS	65	<5
Cuivre (Cu)	mg/kg VS	95	0,06
Mercurure (Hg)	mg/kg VS	3,5	<5
Nickel (Ni)	mg/kg VS	70	<5
Plomb (Pb)	mg/kg VS	200	38,10
Zinc (Zn)	mg/kg VS	4500	<69
Fluoranthène	mg/kg VS	5	0,012
Benzo(a)pyrène	mg/kg VS	2	<0,02
Hydrocarbures totaux			
Indice Hydrocarbures (C10-C40)	mg/kg VS	2500	nd
Matière organique			
Matière organique totale	%	15	2,93

conforme
à préciser (non mesuré ou LO insuffisante)
non conforme