
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

L'impact des algues nuisibles et de leurs toxines sur la vie humaine et les techniques de traitement

SETEC HYDRATEC

Agence de Tours 11 rue Edouard vaillant 37000
TOURS



Tuteur entreprise :

Frederic PRIN ; Virginie MEVEL

Responsable Directeur du développement International ;

Ingénieure Principale

Tuteur académique :

Francesca Di Pietro

Sabine Greulich

Yusufu MUHETABAER

IMA

2021-2022

Table des matières

1.	Introduction	1
1.1	Introduction de la structure d'accueil	1
1.2	Mission de stage et déroulement de la mission	2
1.3	Contexte général	3
2.	Etude bibliographique sur les algues	3
2.1	Typologie et classification.....	3
2.2	Clés d'identification (famille).....	4
2.2.1	Les chlorophytes (chlorophyta) : Algues vertes	4
2.2.2	Les cyanoschyzophytes (Cyanobacteria) : Algues bleues.....	5
2.2.3	Les Chromophytes (Heterokontophyta) : Algues brunes (diatomées).....	5
2.2.4	Les Rhodophytes (Rhodophyta) : ce sont les algues rouges	5
2.3	Caractéristiques	6
2.3.1	Période d'apparition.....	6
2.3.2	Paramètres et conditions favorisant leur apparition	7
3.	Les nuisances sur les usages de l'eau.....	10
3.1	Habs (« les marée rouges »)	10
3.2	Cyanobactéries et leurs toxines.....	11
3.3	Impacts sur les eaux de baignade.....	12
3.3.1	Recommandations de l'OMS.....	12
3.3.2	Réglementations en France.....	13
3.4	Impacts sur les eaux destinées à la consommation humaine	15
3.4.1	Recommandations de l'OMS.....	15
3.4.2	Réglementation en France	16
3.5	Exemples de problématiques de plan d'eau, liés aux algues en France.....	16
3.5.1	Lac au Duc	16
3.5.2	Antilles.....	17
4.	Stratégies de prévention et traitements.....	18
4.1	Les méthodes directement sur les plans d'eau	18
4.1.1	Étangs de Hollande.....	18
4.1.2	Lac d'Enghien-les-Bains	19
4.1.3	Val-Favry à Coignières	20
4.2	Suivi	21
4.3	Les méthodes sur eau potable	21
4.3.1	L'impact des proliférations de cyanobactéries sur le traitement de l'eau.....	21
4.3.2	Technologies d'élimination des algues dans les usines de traitement de l'eau.....	22
4.3.3	Études de cas sur l'utilisation des méthodes de traitement de l'eau	29
5.	Conclusion.....	30
	Bibliographie	31

Liste des figures

Figure 1 : La distribution de l'entreprise dans toute la France.	1
Figure 2 : vision actuelle de la classification des algues.....	4
Figure 3 : Photo de chlorophycées.....	4
Figure 4: Photo de cyanophycées.....	5
Figure 5: Photo de diatomées	5
Figure 6: Photo de Rhodophycées.....	6
Figure 7: la période d'apparition des différentes algues	6
Figure 8: Processus entrant en jeu dans l'eutrophisation.....	9
Figure 9: Schéma conceptuel des zones de transfert, rétention et épuration de l'azote (N) et du phosphore (P) le long du continuum terre–mer	10
Figure 10: Schéma décisionnel du programme de surveillance des zones de baignade et de loisirs nautiques (avis du 6 mai 2003 du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France)	14
Figure 11: Lac au Duc.....	16
Figure 12: D'importantes masses de sargasses sont présentes le long de la côte nord-est de Grande-Terre (Guadeloupe).	17
Figure 13: Schéma de construction de l'équipement utilisé dans la méthode des ultrasons	18
Figure 14: Étangs de Hollande	19
Figure 15: Schéma de l'aération.....	19
Figure 16: Lac d'Enghien-les-Bains	20
Figure 17: la plateforme de purification solaire	20
Figure 18: Le fluorimètre	21
Figure 19 : Microtamisage.....	24
Figure 20 : Processus de coagulation, flocculation et de sédimentation	25
Figure 21 : Flottateur Purostar	26
Figure 22 : La construction d'AquaDAF	27
Figure 23 : La principe de fonctionnement de l'Aquadaf HF.....	27
Figure 24: Schéma de fonctionnement de l'Actiflo® Carb	30
Figure 25: Synthèse élimination des algues sur Actiflo® + Actiflo® Carb	30

Liste des tableaux

Tableau 1: vitesse d'écoulement moyenne et concentration d'algues à Zongguan en février et mars	8
Tableau 2: Valeurs seuils de classification de l'état trophique des plans d'eau	8
Tableau 3 : Toxines produites par les HAB et leurs symptômes	11
Tableau 4 : Cyanobactéries capables de produire des toxins	12
Tableau 5: Valeurs guides proposées par l'OMS	13
Tableau 6: Comparaison des procédés d'élimination des algues et leurs toxines	23
Tableau 7 : Microtamisage et Macrotamisage	24
Tableau 8 : Le tableau du taux d'élimination des algues	27
Tableau 9: comparaison des différentes méthodes d'adsorption et de leurs avantages et désavantages	28
Tableau 10: Elimination des algues par différentes filières	29

Annexes

Annexe 1 Le modèle hydraulique du ru de Montsoul à Baillet en France	34
Annexe 2 Projet Bouchemaine	37

1. Introduction

1.1 Introduction de la structure d'accueil

Setec Hydratec est un bureau d'études techniques fondé en 1974 employant 180 collaborateurs (décembre 2020) œuvrant dans tous les domaines de l'ingénierie de l'eau et des sites et sols pollués, pour le compte de collectivités territoriales, des services de l'Etat et de clients privés. La société est implantée sur toute la France comme suit : (Figure 1)

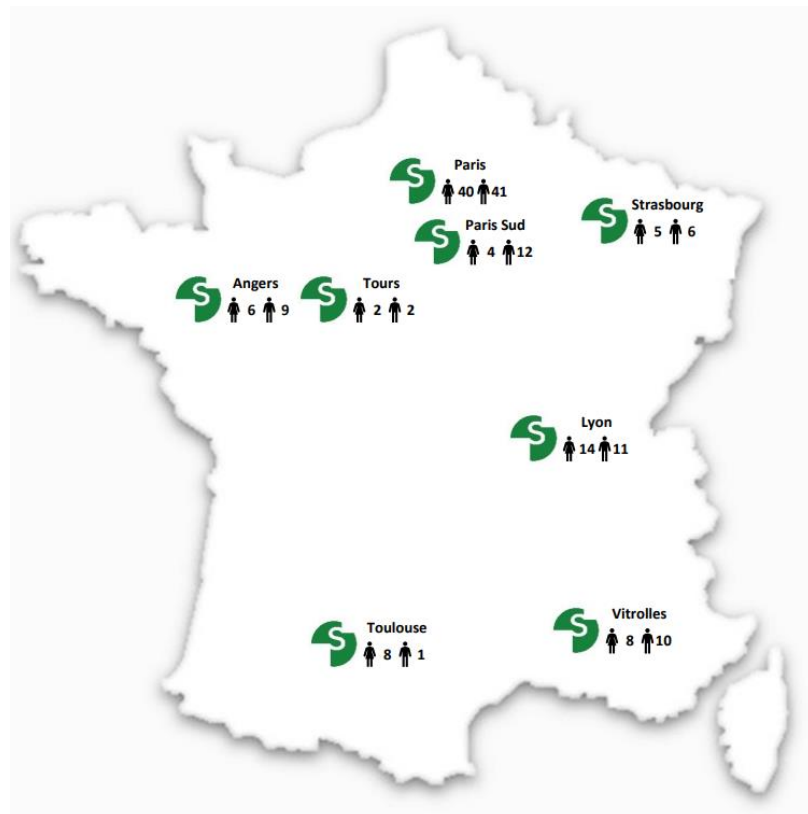


Figure 1 : La distribution de l'entreprise dans toute la France.

Dans ses domaines techniques de compétence, setec hydratec est susceptible d'intervenir à chaque stade de la vie d'un projet :

- Etudes générales, schémas directeurs,
- Etudes de faisabilité, de programmation,
- Maîtrise d'œuvre complète (conception et suivi des travaux), assistance à maîtrise d'ouvrage,
- Etudes de conception détaillée / d'exécution,
- Dossiers réglementaires,
- Diagnostics et expertises.

Les domaines techniques de compétence sont :

- **Hydraulique urbaine** : étude des réseaux d'eau potable, d'assainissement (EU, EP) et des ouvrages associés (réservoirs, bassins de stockage, stations de pompage, ouvrages de traitement en réseau, équipements).
- **Hydraulique fluviale** : Aménagements de cours d'eau, étiages, crues et inondations, navigation, digues et barrages.

- **Traitement de l'eau** : Usines de toute taille et de toute technologies adaptées aux besoins des collectivités et des industriels : traitement d'eaux usées, d'eau potable, effluents industriels.
- **Environnement industriel** : Traitement d'eau industriel, process industriel.
- **Aéraulique** : Expertise en aéraulique appliquée aux problèmes aérodynamiques, aérothermiques et pollutions rencontrées dans la conception et l'exploitation des systèmes de ventilation des tunnels et des émissaires. Cette expertise s'appuie sur un logiciel dédié « express-air », certifié CETU, développé par setec hydratec et utilisé par le groupe setec.
- **Hydrogéologie** : Etudes des ressources souterraines en eau, modélisation des écoulements souterrains (2D/3D), études hydro dispersives sur les polluants.
- **Sites et sols pollués** : Caractérisation de la pollution des sols, étude des dispositifs de remédiation.
- **Hydraulique maritime** : hydrodynamique maritime, conception d'ouvrages portuaires ou littoraux, études d'agitation, et gestion du littoral.
- **Métérologie** : Mesure et diagnostic des milieux aquatiques et des réseaux.
- **Hydro-informatique** : Développement et commercialisation de logiciels de modélisation des écoulements (gravitaire, sous pression, air). ([Http://intranet.hydra.setec.fr/](http://intranet.hydra.setec.fr/))



Hydra est une plateforme de modélisation hydrologique et hydraulique permettant de faire appel dans un même modèle aux fonctionnalités propres aux réseaux d'assainissement, aux systèmes fluviaux et maritimes afin de répondre aux problématiques complexes d'interconnexion des réseaux de collecte des eaux pluviales et des débordements de surface dans la gestion des inondations des grandes métropoles.

Cette plateforme permet de piloter un moteur de calcul robuste et performant, capable de traiter l'ensemble des domaines suivants ainsi que leurs interactions : hydrologie, propagations de crue dans les réseaux d'assainissement, les cours d'eau et les plaines inondables, interactions entre les débordements de cours d'eau, les débordements de réseaux d'assainissement et les écoulements de surface dans les zones urbaines, submersions marines, phénomènes transitoires rapides et leurs conséquences, modélisation courantologie, transport solide, optimisation de gestion des ouvrages et des grands systèmes hydrologiques et hydrauliques

1.2 Mission de stage et déroulement de la mission

Au départ, le titre de ce stage était "Etude de la pollution organique et du phénomène de prolifération d'algues sur le fleuve Boug à Vinnytsia (Ukraine), et des solutions de traitement pour la production d'eau potable et l'amélioration de la qualité des milieux".

Toutefois, le projet a dû être annulé en raison du déclenchement soudain de la guerre en Ukraine, au mois de février 2022. Pendant que l'entreprise trouvait un nouveau projet compatible avec les requis du stage, j'ai suivi deux sessions de formation avec le logiciel HYDRA de l'entreprise.

Au retour de la formation, j'ai travaillé avec les équipes d'hydraulique urbaine et fluviale pour réaliser la modélisation de deux projets. (Annexe 1).

Après les travaux de modélisation, je me suis concentrée sur la recherche sur les algues. La majeure partie du stage a donc été consacrée aux problèmes d'algues.

La recherche a principalement permis de résoudre les problèmes de :

- L'impact des toxines produites par les algues dans le plan d'eau sur les humains et les espèces aquatiques,
- Le traitement des algues et de leurs toxines dans l'eau potable.

1.3 Contexte général

Les algues photosynthétiques contribuent au bon état des écosystèmes aquatiques en formant la base du réseau alimentaire, en fixant le carbone et en produisant de l'oxygène. Dans certaines circonstances, certaines espèces peuvent former des proliférations de cellules à forte biomasse et/ou toxiques (ou "efflorescences"), causant ainsi des dommages aux écosystèmes aquatiques, y compris aux plantes et aux animaux, ainsi qu'aux humains par exposition directe aux toxines présentes dans l'eau ou par la consommation de fruits de mer toxiques. (R.M. Kudela et al. 2015)

Cette étude présente les grandes familles d'algues, telles que les cyanobactéries, les algues rouges, les algues vertes et brunes et les problématiques associées liées aux toxines provenant des algues nuisibles. Il présente également les recommandations établies par l'OMS et la France pour la microcystine dans le traitement de l'eau potable. En complément, le rapport indique les méthodes traitements des algues.

2. Etude bibliographique sur les algues

L'étude bibliographie s'est articulées autour de 3 axes principaux :

- La typologie et la classification des algues,
- Les clés d'identifications et les caractéristiques visuelles des 4 groupes d'algues,
- Les caractéristiques associées aux 4 groupes (période d'apparition et leurs conditions de développement),
- Les impacts des différentes familles sur les écosystèmes et les usages de l'eau,
- Présentation d'exemples de problématiques liées au développement d'algues,

2.1 Typologie et classification

La base de données internationale sur les algues Alga Base (M.D. Guiry, Irlande) recense environ 127 000 noms d'espèces, dont la majorité de **microalgues (< 300 µm)**. Il y aurait environ 9 000 espèces de **macro-algues (> 300 µm)**, dont 1 500 peuplent les mers d'Europe, et le nombre total de microalgues, quant à lui, varie selon les estimations de 100 000 à plusieurs millions. -

La classification des algues peut être complexe. Mais on peut la simplifier en considérant quatre groupes : les algues bleues, les algues rouges, les algues brunes et les algues vertes. (Figure2)

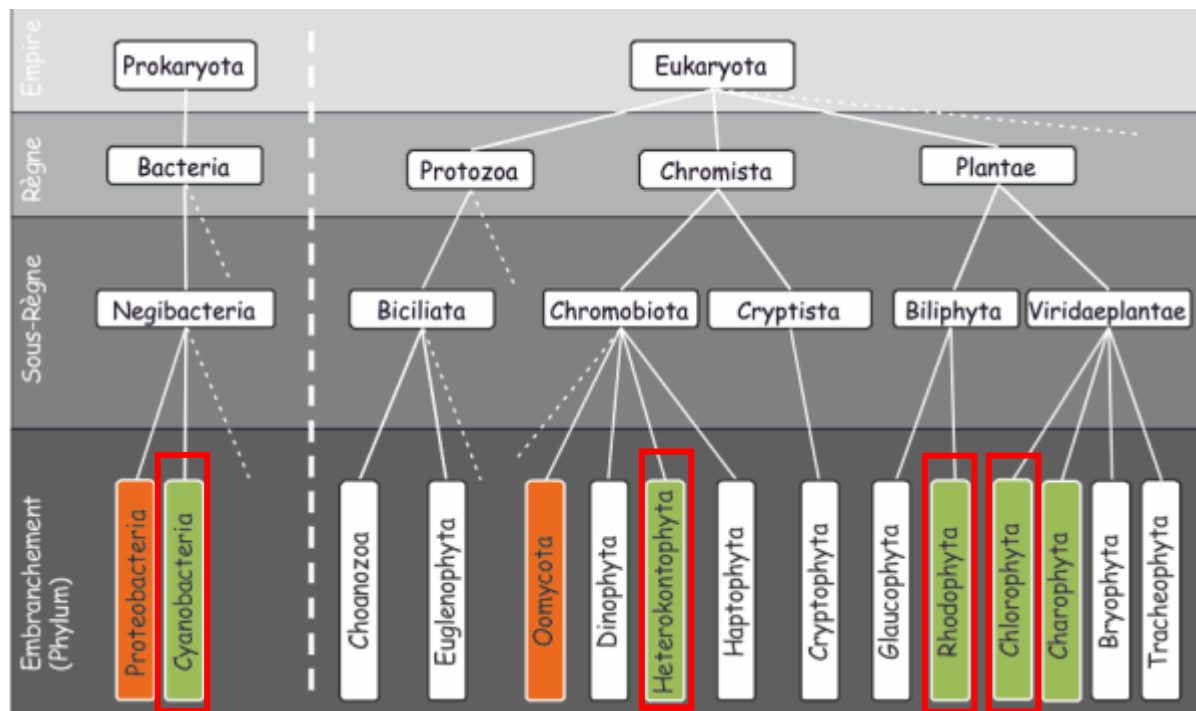


Figure 2 : vision actuelle de la classification des algues. (Cavalier-Smith, 2004 ; Guiry et al., 2013).
Les embranchements colorés en vert contiennent les algues comprises dans cette étude.

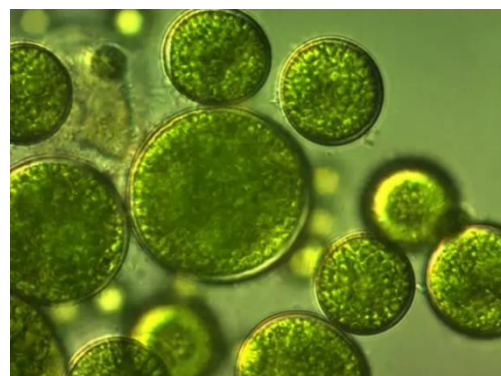
2.2 Clés d'identification (famille)

2.2.1 Les chlorophytes (chlorophyta) : Algues vertes

Les chlorophycées de la classe Chlorophyceae sont des algues vertes qui se distinguent principalement sur la base de la morphologie ultrastructurale parmi les chlorophytes.

Une Chlorophycée est un terme botanique pour identifier une algue de couleur franchement verte, la chlorophylle n'étant masquée par aucun autre pigment. (www.aquaportail.com/taxonomie-classe-40-chlorophyceae.html)

La coloration des chlorophycées est verte et associée à texture filamenteuse. Les certaines flottent sur l'eau. D'autres se fixent sur un substrat solide. (Figure 3)



Source : consoglobe.com

Figure 3 : Photo de chlorophycées

2.2.2 Les cyanoschyzophytes (Cyanobacteria) : Algues bleues

La structure de ces algues est similaire à celle des bactéries, d'où le nom de cyanobactéries. Il s'agit du seul type d'algue à être procaryote (sans noyau). La coloration de ce type d'algue est variable, telle que bleu-vert, vert-olive ou violet. Elles colorent généralement l'eau en vert ou forment une couche vert-turquoise lorsqu'elles sont présentes en quantité excessive et certaines produisent des toxines s'appelles cyanotoxines. (Figure 4)

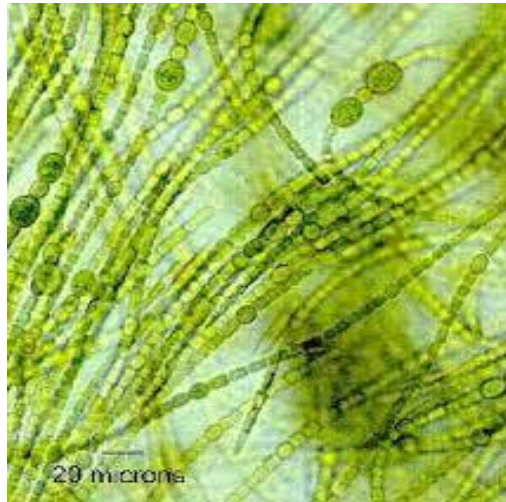


Figure 4: Photo de cyanophycées Source : evolution-biologique.org

2.2.3 Les Chromophytes (Heterokontophyta) : Algues brunes (diatomées)

Ce type d'algues possède un squelette siliceux et constitue l'essentiel du phytoplancton d'eau douce. Elles sont de couleur brune en raison de leurs parois en silicium. Lorsqu'elles sont vivantes, elles flottent dans l'eau et en augmentent la turbidité. À leur mort, elles forment une mince couche organique brune sur les roches. (Figure 5)

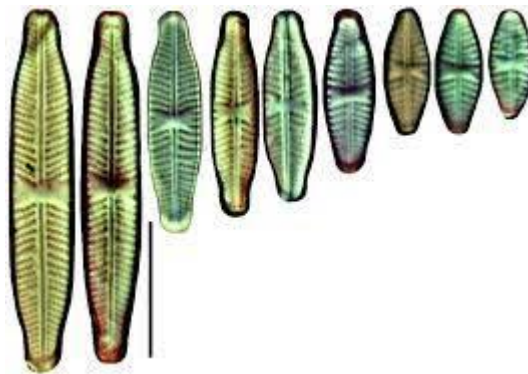


Figure 5: Photo de diatomées <https://www.oeil.nc/>

2.2.4 Les Rhodophytes (Rhodophyta) : ce sont les algues rouges

Il s'agit d'un vaste taxon d'algues principalement marines et multicellulaires. La plupart sont sessiles, c'est-à-dire qu'elles se développent sur un certain nombre de substrats. La grande majorité des algues rouges est présentée dans le milieu marin. Elles ont une composition pigmentaire composée d'une seule chlorophylle, la chlorophylle a, de caroténoïdes et de pigments caractéristiques, les phycobilines. (Figure 6)

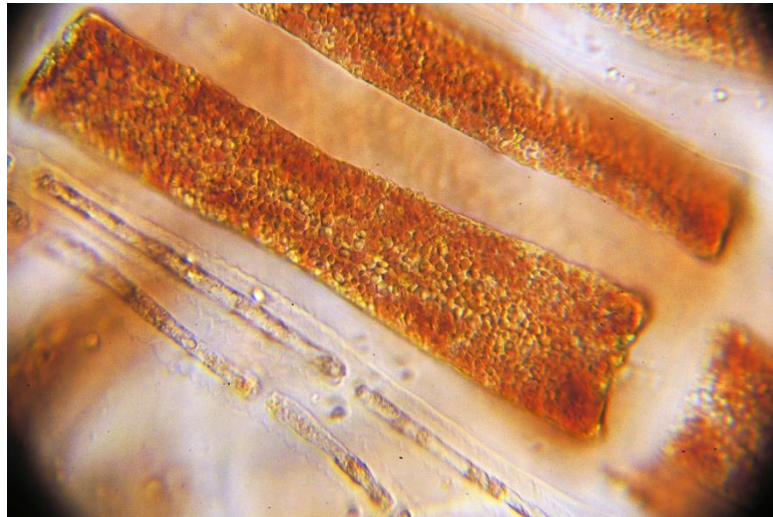


Figure 6: Photo de Rhodophycées Source : <https://www.oeil.nc/>

2.3 Caractéristiques

2.3.1 Période d'apparition

Chaque type d'algue a un effet différent et une période de développement différente. La figure 7 représente les trois principaux types d'algues observés au cours des quatre saisons et identifie leurs périodes de croissance.

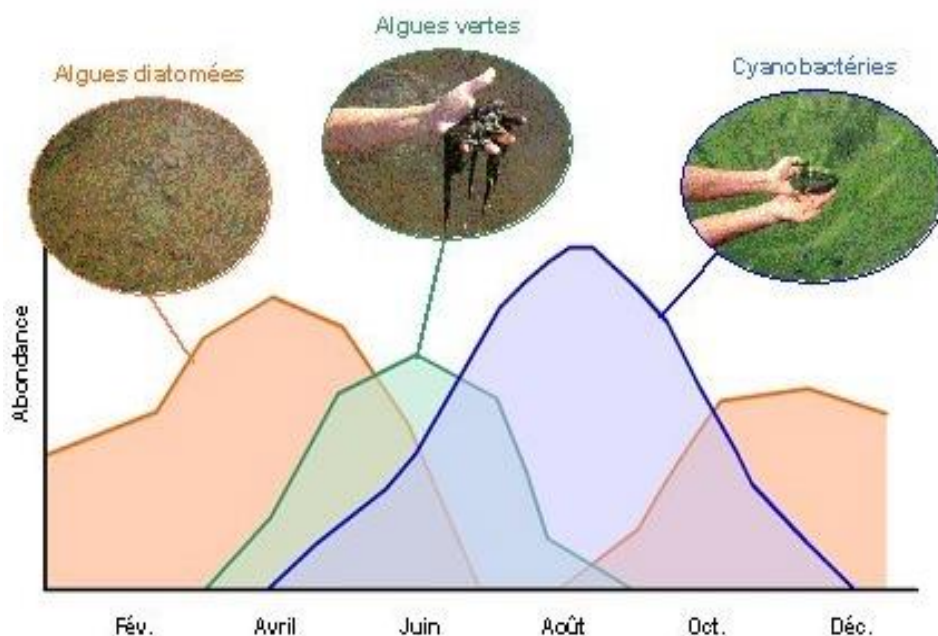


Figure 7: la période d'apparition des différentes algues
(Source : <https://rappel.qc.ca/fiches-informatives/algues-et-cyanobacteries/>)

Les chlorophycées sont plus abondantes en été, dans des eaux plus chaudes avec moins d'oxygène. Les diatomées sont plus abondantes au printemps ou au début de l'hiver et les cyanophycées sont surtout présentes à la fin de l'été dans les milieux eutrophisés.

Quant aux algues rouges, elles diminuent considérablement en hiver et atteignent leur densité maximale entre avril et septembre.

2.3.2 Paramètres et conditions favorisant leur apparition

Le taux de croissance des algues et la période de leur apparition sont liés à un certain nombre de facteurs naturels et humains. Ils influencent toujours le développement des algues. Les principaux facteurs sont développés ci-dessous :

a) Température

Elle a un effet direct sur le métabolisme de la plante. La température est l'un des facteurs les plus importants pour déterminer le succès de la croissance des algues dans l'eau. Chaque famille d'algues possède sa propre température de développement.

Par exemple, certaines familles d'algues survivent à des températures basses : les algues brunes se développent plus rapidement à des températures basses (hiver). Certaines familles et espèces préfèrent survivre à des températures plus élevées. Par exemple, de nombreuses algues bleues survivent au-dessus de 25°C. (Chorus, I et al., 1999). Pour Microcystis, la croissance est très lente à des températures inférieures à 13-15°C, avec des taux de croissance maximum entre 27 et 37°C. (Reynolds 1987) La température influe sur le taux de croissance et la précocité de l'apparition, mais les algues peuvent toujours se développer et survivre à n'importe quelle température extrême.

b) Lumière

C'est la principale source d'énergie. La lumière est un facteur important qui conditionne la croissance des algues. (Reynolds 1997) En effet, les algues dépendent de la photosynthèse pour leur survie.

Lorsque la lumière pénètre dans la colonne d'eau, elle est absorbée par les molécules d'eau, la matière organique dissoute et les particules inorganiques. En conséquence, l'intensité lumineuse diminue avec la profondeur. En outre, les algues absorbent et diffusent efficacement la lumière, de sorte que les zones situées sous une prolifération d'algues sont "ombragées".

c) PH

Le pH de l'environnement des bassins est principalement influencé par le système d'équilibre des carbonates ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \leftrightarrow 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$) dans la colonne d'eau. Dans les masses d'eau eutrophes, l'activité biologique a l'effet le plus significatif sur les niveaux de CO_2 . Par conséquent, lorsque la densité des cellules de microalgues dans un plan d'eau atteint un certain nombre, leur nombre et leur activité métabolique peuvent avoir un impact significatif sur le pH du milieu aquatique. (Fa Wen Su et al., 2016)

L'énergie générée pendant la photosynthèse est utilisée par les algues pour fixer le carbone inorganique afin de former de nouvelles cellules et de réparer les cellules. L'absorption de CO_2 par les algues au cours de la photosynthèse augmente la concentration d'ions OH^- et donc le pH. En présence d'algues, des valeurs de pH supérieures à 10 ont été observées dans les eaux naturelles (Talling 1976, Maberly 1996). Lorsque le soleil se couche en fin de journée, la photosynthèse et donc l'absorption de CO_2 , s'arrêtent, et les algues entrent dans une phase respiratoire, au cours de laquelle l'oxygène est consommé et le CO_2 est produit. Par conséquent, les niveaux de pH diminuent la nuit. Le passage de l'activité photosynthétique pendant la journée à l'activité respiratoire pendant la nuit entraîne des fluctuations diurnes du pH qui sont caractéristiques de la présence d'algues dans les zones humides.

(Maberly 1996). Par conséquent, la surveillance en ligne du pH, qui permet de détecter les fluctuations diurnes du pH, peut aider à détecter les proliférations d'algues dans leurs sources d'eau.

d) Influence du débit

Dans les rivières, les efflorescences d'algues ont tendance à se produire plus fréquemment dans des conditions de sécheresse, lorsque les débits et les turbulences sont faibles et que les temps de rétention augmentent.

WANG Hong-ping et al. dans leur étude sur le mécanisme des facteurs hydrologiques provoquant des efflorescences algues dans la rivière Hanjing ont noté que le débit mensuel moyen diminue au fur et à mesure que l'année avance, ce qui correspond à une augmentation de la concentration d'algues. (Tableau 1)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Débit	0.213	0.583	0.410	0.319	0.396	0.479	0.130	0.414	0.168
Concentration (10 ⁴ /L)	2.104	40.5	66.2	42.6	108	50.6	3.269	5.170	

Tableau 1: vitesse d'écoulement moyenne et concentration d'algues à Zongguan en février et mars (WANG Hong-ping et al., 2004)

En Australie, les conditions de faible débit dans les rivières ont été associées au développement d'efflorescences d'algues bleues toxiques (Maier et al. 1998, Steffensen et al. 1999). De même, les efflorescences d'Oscillatoria et de Cyclotella dans la rivière Schuylkill (Philadelphie, PA) ont coïncidé avec des conditions de faible débit (Burlingame et al. 1986).

e) Nutriments

Le carbone, l'azote et le phosphore sont des nutriments essentiels qui contribuent à la croissance des algues. Si la quantité d'azote et de phosphore est élevée, l'eau se trouve dans un état d'eutrophisation, ce qui entraîne une prolifération incontrôlée d'algues (également appelé bloom).

L'eutrophisation est un phénomène de l'écosystème des masses d'eau à écoulement lent (lacs ou réservoirs) où les algues prennent progressivement l'avantage et occupent l'espace vital des autres organismes aquatiques en leur faisant concurrence pour leur survie. Son apparition marque généralement la pollution des masses d'eau.

En général, l'eutrophisation se manifeste sous deux formes : la première est l'eutrophisation naturelle et la seconde est causée par l'homme. Cependant, comme l'apparition de l'eutrophisation naturelle s'accompagne souvent de dizaines de milliers d'années d'évolution naturelle, toute l'eutrophisation que nous observons habituellement dans les masses d'eau est anthropique.

Phosphore

Le Phosphore peut être assimilé directement par les plantes, principalement lorsqu'il est dissous sous forme d'orthophosphate. Ses principales sources sont les stations d'épuration, les rejets domestiques, l'industrie et enfin les apports diffus dus aux engrais (lessivage du sol lors de fortes pluies).

Statut trophique	Phosphore total (µg/L)	Chlorophylle a (µg/L)	Transparence (m)
Ultra-oligotrophe	< 5	< 2,5	> 6
Oligotrophe	5-10	< 8	> 3
Mésotrophe	10-30	8-25	3-1,5
Eutrophe	30-100	25-75	1,5-0,7
Hypereutrophe	> 100	> 75	< 0,7

Tableau 2: Valeurs seuils de classification de l'état trophique des plans d'eau (<https://www.encyclopedie-environnement.org/>)

D'après le tableau 2, plus la valeur du phosphore est élevée, plus la concentration d'algues est dense. C'est en fonction de ces indicateurs que la rivière est classée.

Azote

La forme la plus stable de l'azote est celle qui est absorbée directement par les plantes. L'azote étant présent dans l'atmosphère, il constitue une riche source d'azote pour les plantes et les algues qui jouent un rôle de fixation de l'azote. L'azote inorganique combiné, sous forme de NH_4^+ ou de NO_3^- , est un nutriment important pour la synthèse des acides aminés dans les algues.

L'azote ammoniacal est l'azote chimiquement combiné sous forme d'ammoniac ou d'ions ammonium, c'est-à-dire l'azote présent dans l'eau sous forme de l'ammoniac NH_3 favorable et des ions ammonium NH_4^+ .

L'azote ammoniacal est produit à partir de diverses sources :

- 1) À la suite d'un phénomène naturel qui se produit dans la colonne d'eau, comme l'exposition au soleil qui provoque une croissance sauvage des algues et la production de grandes quantités de matières alcalines.
- 2) En raison de la présence de divers produits fertilisants dans l'eau du robinet, qui constituent une source adéquate d'azote pour la production d'azote ammoniacal en raison de l'accumulation continue d'azote élémentaire dans la masse d'eau.
- 3) L'azote ammoniacal est produit par l'accumulation à long terme de protéines solubles dans les aliments pour animaux qui se dissolvent dans l'eau.

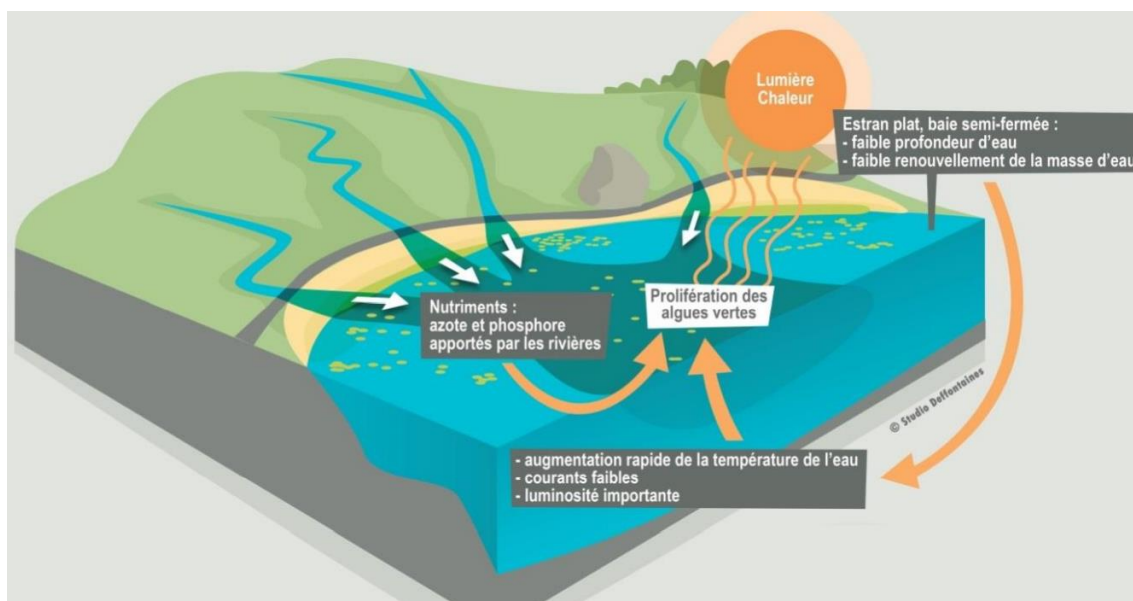


Figure 8: Processus entrant en jeu dans l'eutrophisation

(Source : Communauté Lannion-Trégor. Processus entrant en jeu dans l'eutrophisation des eaux du proche littoral [Internet]. 2014. Disponible sur : <http://www.lanniontregor.com/fr/environnement/la-qualite-de-l-eau/algues-vertes-actions-et-gestion.ht>)

Les nitrates proviennent principalement du ruissellement et de l'infiltration des zones d'utilisation des engrais et du pâturage du bétail en aval, ainsi que de la phase de transformation finale de la pollution azotée de certaines industries. (Figure 9)

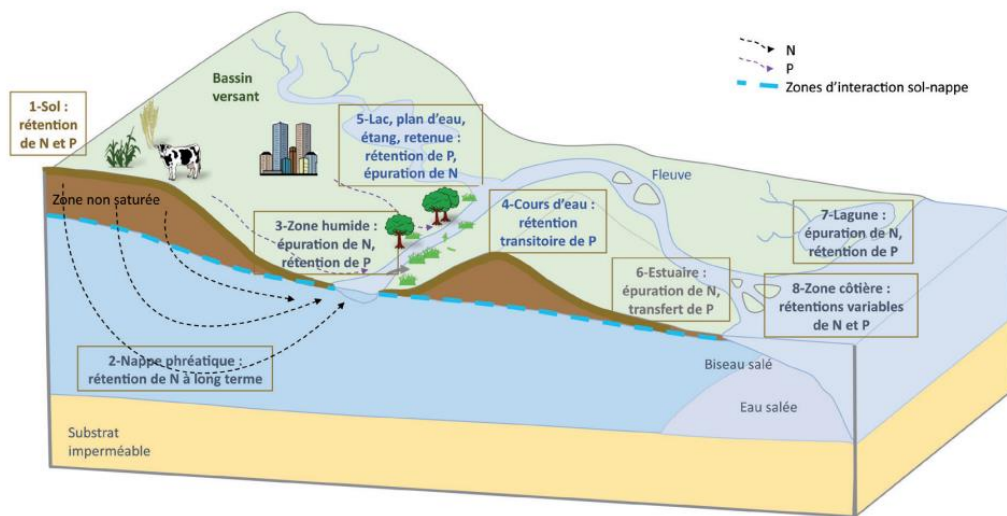


Figure 9: Schéma conceptuel des zones de transfert, rétention et épuration de l'azote (N) et du phosphore (P) le long du continuum terre-mer (Source : ESCo)

Après les résultats expérimentaux de Yan Wang et al, (2006) , *Phaeocystis globosa*, qui provoque une efflorescence d'algues nuisibles (HAB), a été isolée de la mer de Chine méridionale et cultivée dans un milieu F/2 modifié sous des concentrations variables de nitrate. La croissance cellulaire et l'activité de la nitrate réductase (NR) ont été étudiées. *P. globosa* cultivée sans nitrate a montré une faible activité NR, une croissance cellulaire inhibée et aucune courbe de croissance. La concentration optimale de nitrate pour la croissance des cellules d'algues et l'activité NR était de 3,62 mmol. L-1. Sous 4 niveaux différents de nitrate, l'activité NR dans les cellules a atteint son maximum au jour 9, mais la densité cellulaire a atteint son maximum au jour 16. La densité cellulaire et l'activité NR différaient significativement de la concentration en nitrate. Ainsi, l'eau de mer eutrophique avec une concentration élevée de nitrate est appropriée pour la croissance de *P. globosa* et a un grand potentiel pour se développer en marée rouge.

3. Les nuisances sur les usages de l'eau

3.1 Habs (« les marées rouges »)

Le terme HAB est un descripteur socio-économique, mais pas strictement scientifique, car il fait référence à la perception humaine de la "nocivité" et à la variété d'événements négatifs causés par les algues, y compris certaines cyanobactéries et macro-algues. (R.M. Kudela et al. 2015.)

Les Harmful Algal Blooms (HAB) sont causés par des algues nuisibles et/ou toxiques et ont des impacts négatifs directs et indirects sur les écosystèmes aquatiques, les ressources côtières et la santé humaine. Les causes sont complexes, mais dans certains cas, elles peuvent être attribuées au changement climatique et aux impacts humains, notamment l'eutrophisation, la modification des habitats et l'introduction d'espèces exogènes par l'homme.

Les HAB nuisent à la santé des humains, des animaux et des plantes aquatiques, dans certains cas, au fonctionnement de l'écosystème. L'apparition des HABs peut entraîner une diminution de la sécurité des produits de la mer et de la qualité de l'eau.

Nom de la toxine	Nom complet	Noms des algues toxigènes	Les symptômes
PSP	Paralytic shellfish poisoning	Alexandrium, Pyrodinium et Gymnodinium	Les symptômes de la PSP se traduisent initialement par un engourdissement et une sensation de brûlure ou de picotement des lèvres et de la langue qui s'étendent au visage et au bout des doigts. Il en résulte un manque général de coordination musculaire dans les bras, les jambes et le cou. Il existe également une variété d'autres symptômes moins fréquemment signalés. Les cas graves de PSP ont entraîné une paralysie respiratoire et la mort. (Ward et al., 1997)
DSP	Diarrhetic shellfish poisoning	Un certain nombre d'espèces d'algues des genres Dinophysis et Prorocentrum ont été associées à la DSP.	Diarrhée, nausées, vomissements, douleurs et crampes abdominales modérées à sévères, et frissons. Aucun décès n'est à déplorer et le rétablissement total est attendu dans les trois jours, avec ou sans assistance médicale. (FDA, 2001).
ASP	Amnesic shellfish poisoning	La croissance dense d'une algue du genre Pseudonitzschia provoque l'ASP.	Aux premiers stades de l'ASP, l'individu éprouve généralement une détresse intestinale. Une ASP sévère peut provoquer une grimace faciale ou un mouvement de mastication, une perte de mémoire à court terme et des difficultés respiratoires. (FDA, 2001).
CFP	Ciguatera Fish poisoning	Gambierdiscus toxicus	Diarrhée, douleurs abdominales, nausées, vomissements, sensations cutanées anormales ou altérées, vertiges, manque de coordination musculaire, inversion des sensations de froid et de chaud, douleurs musculaires et démangeaisons. La mort est peu fréquente, mais peut survenir. (FDA, 2001).

Tableau 3 : Toxines produites par les HAB et leurs symptômes

3.2 Cyanobactéries et leurs toxines

Les cyanobactéries peuvent former des efflorescences vertes ou rouges (dites blooms) à cyanobactéries, dont 75 % sont reconnues comme étant toxiques (Chorus I.) Ces dernières libèrent une large gamme de métabolites secondaires : certains provoquant des mauvais goûts dans l'eau de boisson, la chair de poisson et les fruits de mer (Smith PK et al., 2008), et d'autres de natures oligopeptides ou alcaloïdes reconnues sous le nom de cyanotoxines. À ce jour, plus de 157 toxines sont décrites et classées dans 55 catégories, basées sur la similarité structurelle et l'activité biologique. (Huang IS et al., 2019)

Les algues bleues-vertes produisent trois principaux types de toxines :

- **Les hépatotoxines** : Les hépatotoxines endommagent le foie et peuvent également augmenter le risque de certains types de cancer. Les symptômes comprennent des nausées, des vomissements, de la diarrhée et, dans les cas extrêmes, même une insuffisance hépatique aiguë.
- **Les neurotoxines** : Les neurotoxines endommagent les nerfs et peuvent provoquer des tremblements musculaires, en particulier dans les muscles dont les animaux et les gens ont besoin pour respirer. Les symptômes comprennent des crampes musculaires, des contractions et, dans les cas extrêmes, une paralysie, une insuffisance cardiaque ou respiratoire, voire la mort.

- **Les allergènes (Dermatoxine) :** Les allergènes sont censés produire une série de réactions, notamment des éruptions cutanées, une irritation des yeux et éventuellement une gastro-entérite.

Catégorie	Toxines	Genres ou espèces producteurs
Neurotoxine	Anatoxine-a	<i>Anabaena flos-aquae</i> ; <i>Anabaena spiroides</i> ; <i>Anabaena circinalis</i> ; <i>Aphanizomenon</i> sp.; <i>Cylindrospermum</i> sp.; <i>Oscillatoria</i> sp.; <i>Microcystis</i> sp.; <i>Phormidium</i> sp.; <i>Planktothrix</i> sp.; <i>Woronichinia</i> sp.
	Anatoxine-a(s)	<i>Anabaena flos-aquae</i> ; <i>Anabaena lemmermanii</i>
	Homo-anatoxine	<i>Planktothrix</i> sp.
	Saxitoxine	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> ; <i>Anabaena circinalis</i> ; <i>Anabaena</i> sp.; <i>Aphanizomenon</i> sp.; <i>Cylindrospermum</i> sp.; <i>Lyngbya</i> sp.
	Néosaxitoxine	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> ; <i>Anabaena circinalis</i>
Hépatotoxine	Nodularine	<i>Nodularia spumigena</i>
	Cylindrospermopsine	<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> ; <i>Aphanizomenon ovalisporum</i> ; <i>Umezakia natans</i> ; <i>Raphidiopsis curvata</i> ; <i>Anabaena</i> sp.
	Microcystine	<i>Microcystis aeruginosa</i> ; <i>Anabaena millenii</i> ; <i>Microcystis</i> sp.; <i>Planktothrix</i> sp.; <i>Oscillatoria</i> sp.; <i>Nostoc</i> sp.; <i>Anabaena</i> sp.; <i>Anabaenopsis</i> sp.; <i>Hapalosiphon</i> sp.
Dermatotoxine	Lyngbytoxine-a	<i>Lyngbya</i> sp.
	Debromaplysiatoxine	<i>Lyngbya</i> sp.; <i>Schizothrix calcicola</i> , <i>Oscillatoria nigroviridis</i>
	Aplysiatoxine	<i>Lyngbya</i> sp.; <i>Oscillatoria</i> sp.; <i>Planktothrix</i> sp.; <i>Schizothrix</i> sp.
	Lipopolysaccharides	Toutes

Tableau 4 : *Cyanobactéries capables de produire des toxines* (The report of research from the National Institute of scientific research in Quebec, Canada, 2014)

3.3 Impacts sur les eaux de baignade

3.3.1 Recommandations de l'OMS

L'OMS a élaboré en 1999 des recommandations pour les eaux récréatives et les cyanobactéries (Tableau5). Ces valeurs guides sont présentées en trois niveaux et ont été établies à partir d'études ou de cas d'intoxication avérée :

- **Seuil à faible risque sanitaire :** La valeur guide de 20 000 cellules /ml dérive d'une étude épidémiologique de (Pilotto et al. ,1997)
- **Seuil à risque sanitaire modéré :** l'évaluation du risque se base sur la valeur guide de la microcystine-LR dans l'eau potable. A une abondance de 100 000 cellules/ml, une concentration de 20µg/l de microcystines peut être attendue, un niveau 20 fois plus élevé que la valeur guide pour l'eau potable. (Manon ANTOINE,2009)
- **Seuil à haut risque sanitaire :** des cas d'empoisonnements mortels d'animaux et des problèmes sanitaires chez l'homme ont été rapportés, après exposition à de l'écume. (Manon ANTOINE,2009)

Niveau	Valeur guide	Risques sanitaires	Actions
Niveau 1 : Seuil à faible risque sanitaire	20 000 cell/mL ou 10 µg/L de chlorophylle-a	- Risques à court terme faibles : irritations cutanées, oculaires, nasales, gastro-entérite - Risques à long terme : improbables	- Pas de restriction d'usage de l'eau - Information du public - Information des autorités
Niveau 2 : Seuil à risque sanitaire modéré	100 000 cell/mL ou 50 µg/L de chlorophylle-a	- Risques à court terme élevés : irritations cutanées, oculaires, nasales, gastro-entérite - Risques modérés à long terme dus à l'ingestion accidentelle de cyanotoxines	- Contrôle quotidien de la présence d'écume - Limitation de la baignade et des activités nautiques - Information du public - Information des autorités
Niveau 3 : Seuil à haut risque sanitaire	Présence d'écume	- Risques d'empoisonnements sévères - Risques à long terme dus à l'ingestion accidentelle de cyanotoxines - Risques à court terme élevés : irritations cutanées, oculaires, nasales, gastro-entérite	- Contrôle quotidien de la présence d'écume - Interdiction de la baignade et des activités nautiques - Etablissement d'un suivi sanitaire - Information du public - Information des autorités

Tableau 5: Valeurs guides proposées par l'OMS Source : (Manon ANTOINE, 2009)

3.3.2 Réglementations en France

En l'absence de recommandations communautaires spécifiques à la surveillance et la gestion du risque lié à la prolifération de cyanobactéries dans les eaux de baignade, certains états membres, dont la France, ont établi leurs propres recommandations. Ainsi en 2003, 2004 et 2005 des recommandations de surveillance et de gestion de phénomènes de prolifération de cyanobactéries dans des eaux de baignade ont été publiées par la Direction générale de la santé (circulaires DGS/SD7A 2003/270(34), 2004/364(35), 2005/304(36)) sur la base d'un avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (avis du CSHPF du 6 mai 2003). Ils ont défini trois niveaux d'alerte pour les cyanobactéries et les mesures à prendre pour chaque niveau. (Manon ANTOINE, 2009) (Figure 10)

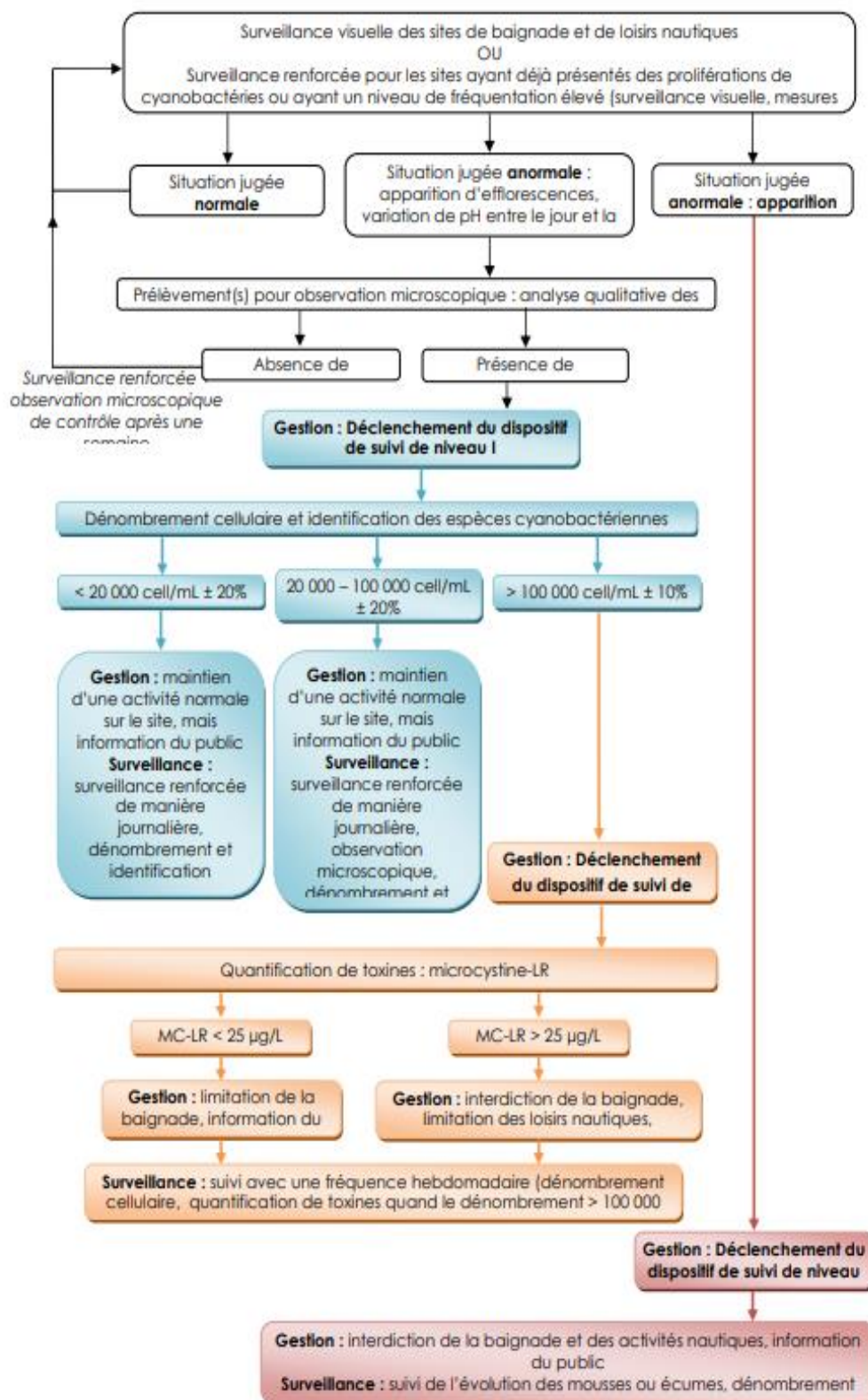


Figure 10: Schéma décisionnel du programme de surveillance des zones de baignade et de loisirs nautiques (avis du 6 mai 2003 du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France)

Si les cyanobactéries sont présentes et majoritaires le dispositif de suivi de niveau 1 est déclenché et des dénombrements et des identifications cyanobactériennes doivent être effectués. Le dispositif de suivi de niveau 2 est quant à lui déclenché si le comptage est supérieur à 100 000 cellules/ml ($\pm 10\%$). La baignade doit être interdite dès que la concentration en microcystine dépasse les 25 µg/L.

3.4 Impacts sur les eaux destinées à la consommation humaine

3.4.1 Recommandations de l'OMS

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a donné une valeur limite pour l'eau potable de 1µg/l pour la microcystine LR. Pour les autres toxines, les données toxicologiques ne sont pas suffisantes pour établir des valeurs limites. (Manon ANTOINE, 2009). Des seuils de concentration sont toutefois proposés concernant la consommation humaine :

- **Seuil de vigilance (environ 200 cell/ml) :** Ce seuil correspond à la détection dans 1 ml d'eau brute d'une colonie ou de filaments de cyanobactéries. Quand ce seuil est atteint, il est conseillé d'augmenter la fréquence d'échantillonnage à au moins une fois par semaine, de façon à observer un changement rapide de la biomasse cyanobactérienne.
- **Seuil 1 d'alerte (2 000 cell/ml) :** Ce seuil indique la possibilité de dépasser la valeur guide établie par l'OMS pour l'eau de boisson, et nécessite d'évaluer l'efficacité de la filière de traitement de potabilisation à éliminer les cyanotoxines ou la possibilité d'avoir recours à un captage de secours présentant une eau moins chargée en cyanobactéries. Un tel niveau de biomasse nécessite de s'entretenir avec les autorités sanitaires et de poursuivre la surveillance des eaux brutes avec une fréquence au moins hebdomadaire. Une identification des genres ou espèces cyanobactériennes doit être réalisée afin de déterminer les cyanotoxines pouvant être potentiellement présentes. Des analyses cyanotoxines sur l'eau distribuée peuvent également être envisagées. Si celles-ci sont négatives mais que la biomasse reste supérieure au seuil d'alerte 1, la surveillance des cyanobactéries dans l'eau brute doit être maintenue.
- **Seuil 2 d'alerte (100 000 cell/ml) :** Une telle concentration témoigne d'un risque accru d'effets néfastes sur la santé à court terme si aucun traitement n'est mis en place ou si la filière de potabilisation n'est pas assez efficace en termes d'élimination de cyanobactéries et de cyanotoxines. Il est donc primordial pour le gestionnaire de connaître l'efficacité de sa filière de traitement ainsi que ses performances. En l'absence d'étape de traitement comprenant du charbon actif ou une autre technologie avancée afin d'éliminer les cyanotoxines, il convient d'envisager la mise en place d'un plan d'urgence pour garantir la distribution de l'eau d'alimentation.

3.4.2 Réglementation en France

La valeur de 1 µg/L de microcystine-LR établie par l'OMS a été reprise en France dans un premier temps dans le décret 2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exception des eaux minérales naturelles.

Pour le contrôle des cyanobactéries, en France, trois niveaux ont été adoptés :

- **Niveau 1** : densité de cyanobactéries < 20 000 cellules/ml : comptage 2 fois par mois.
- **Niveau 2** : densité de cyanobactéries comprise entre 20 000 et 100 000 cellules/ml : comptage hebdomadaire.
- **Niveau 3** : densité de cyanobactéries > 100 000 cellules/ml : mesure de la concentration en microcystines, restrictions d'usage, contrôle deux fois par mois pour les toxines et contrôle chaque semaine pour les algues.
-

3.5 Exemples de problématiques de plan d'eau, liés aux algues en France

La France, où de nombreux étangs artificiels ont été aménagés dans les campagnes éloignées de la côte dans les années 1960-1970, est également concernée. Dans l'Ouest, le Lac au Duc, dans le Morbihan doit régulièrement interdire la baignade, l'été, après une forte période de chaleur.

3.5.1 Lac au Duc

Un nouveau contrôle sanitaire des eaux du Lac au duc a été effectué le 20 août 2018. Les algues bleues sont encore trop présentes pour permettre la baignade et la consommation de poissons. Le résultat du contrôle sanitaire des eaux du Lac au duc réalisé le 20 août est sans appel. La concentration d'algues bleues est supérieure au seuil habituel. Avec **467 020 cyanobactéries par millilitre**, impossible d'autoriser la baignade et la consommation de poisson. (Ouest-france.fr)

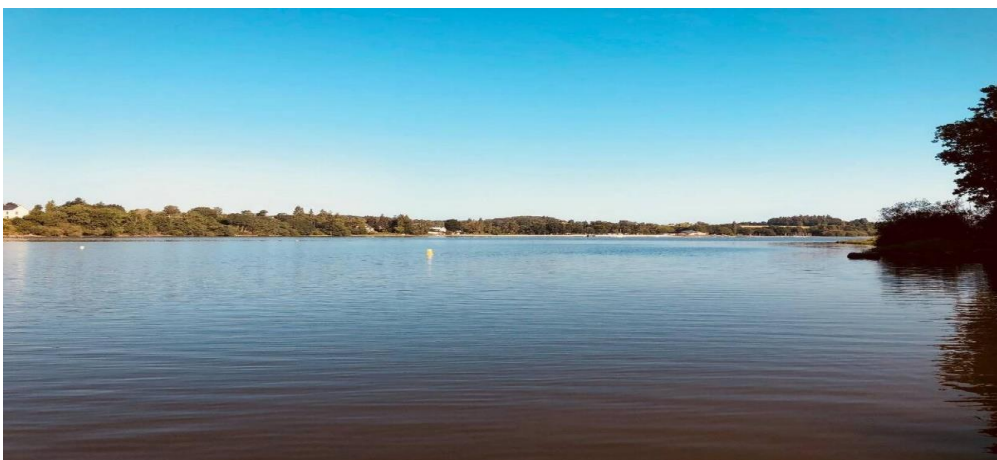


Figure 11: Lac au Duc (source : ouest-france.fr)

3.5.2 Antilles

Les sargasses forment de vastes bancs d'algues brunes tissés en rang serrés, leur épaisseur peut atteindre un mètre et peut s'étaler jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres à la surface de l'Atlantique. Lorsque ces algues s'amoncellent et sèchent, elles dégagent de l'ammoniac et de l'hydrogène sulfuré. Couplés, ces gaz toxiques sentent l'œuf pourri et dégradent les rivages. Respirer de l'hydrogène sulfuré et de l'ammoniac entraîne picotements à la gorge, brûlures aux yeux, toux sèche, nausées et troubles digestifs.

Ce phénomène est la conséquence d'une nouvelle organisation des courants marins parcourant l'Atlantique dans l'hémisphère nord. Les algues suivent des courants marins qui les dirigent sur les côtes martiniquaises, en particulier vers la zone atlantique.

Depuis plusieurs années, des hordes d'algues brunes, les sargasses, ont envahi le littoral des Antilles sur des dizaines de kilomètres. Une conférence, prévue du mercredi 23 au samedi 26 octobre, 2018 en Guadeloupe est prévue pour discuter de cette problématique.

Les sargasses étaient d'abord localisées dans le nord de l'Atlantique, mais elles se sont déplacées vers le Sud entre Amérique latine et Afrique. Elles ne sont pas nouvelles dans les Antilles, où elles investissent le littoral depuis 2011. Mais, depuis février, elles arrivent en masse sur les côtes de Guadeloupe, Martinique, Saint-Martin, Saint-Barthélemy.

En avril 2018, une lettre a été écrite à Monsieur le Président Macron disant que des problèmes sanitaires, causés par ces algues sont apparus dans ces zones environnantes. Le nettoyage et le retrait des sargasses environnantes sont demandés au plus vite. Fin septembre 2018, le chef de l'Etat a confirmé ce plan : "L'Etat s'est engagé à co-financer un plan d'équipement des territoires à hauteur de 4 à 5 millions d'euros sur 2018-2019 au sein d'un plan global d'équipement qui s'élèvera à 12 millions d'euros. (https://www.francetvinfo.fr/sante/environnement-et-sante/c-est-quoi-le-probleme-avec-les-sargasses-ces-algues-toxiques-qui-prolifere-dans-les-antilles_2962815.html)



Figure 12: D'importantes masses de sargasses sont présentes le long de la côte nord-est de Grande-Terre (Guadeloupe).
(Source : Photo d'illustration. — GILLES MOREL/SIPA)

4. Stratégies de prévention et traitements

4.1 Les méthodes directement sur les plans d'eau

4.1.1 Étangs de Hollande

Le principe des ultrasons contre les cyanobactéries est réglé pour correspondre à la fréquence de résonance de la membrane cellulaire de la vésicule de l'algue, ce qui fait vibrer la vésicule, qui perd rapidement son élasticité et finit par se rompre. Des gaz sont ainsi libérés et les algues ne flottent plus et coulent au fond de la colonne d'eau. Elles ne sont plus capables de faire la photosynthèse et, par conséquent, se dégradent et meurent.



Figure 13: Schéma de construction de l'équipement utilisé dans la méthode des ultrasons (Source : <https://www.rt78.fr/actualites/cyanobox>)

La communauté d'agglomération Rambouillet Territoires a investi 20 000 euros dans l'installation d'un dispositif à ultrasons immergé pour prévenir le développement des cyanobactéries en avril 2021, avec l'accord du Syndicat Mixte d'Aménagement et de Gestion des Étangs et Rigoles (SMAGER).



Figure 14: Étangs de Hollande (Source : <https://www.rt78.fr/actualites/cyanobox/>)

4.1.2 Lac d'Enghien-les-Bains

L'aérateur fonctionne en soulevant l'eau du fond vers la surface où elle absorbe de l'oxygène puis retombe. Au contact de l'atmosphère, l'eau se remplit d'oxygène, puis se diffuse à nouveau dans la masse d'eau environnante. Le mouvement qui en résulte renforce l'oxydation du plan d'eau. (Figure15)

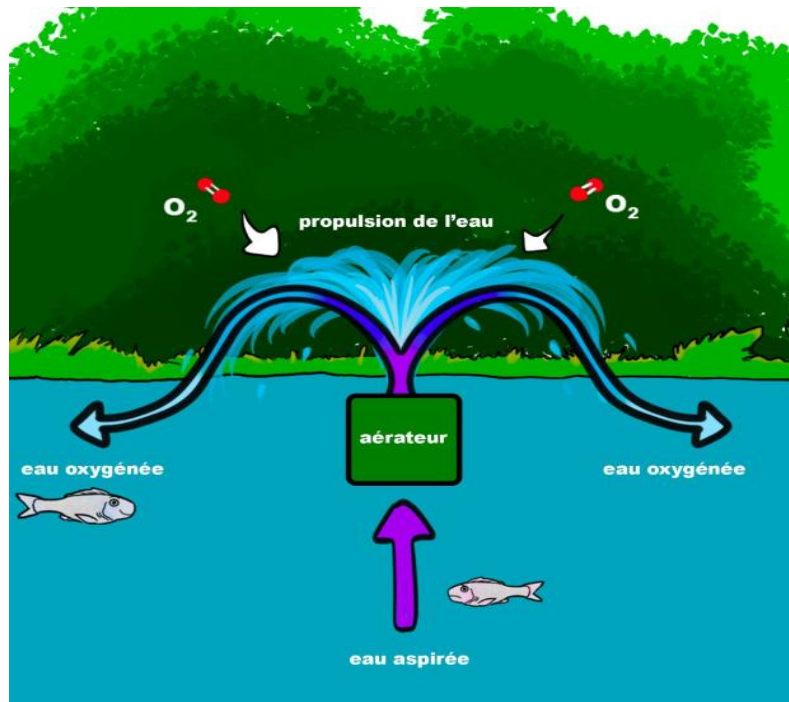


Figure 15: Schéma de l'aération (source : <https://siare95.fr/siare-vous-informe/actualites/lutte-contre-les-cyanobacteries-au-lac-denghien-que-fait-le-siare.html>)

Le lac d'Enghien, d'une profondeur de 1,3 m, situé au point bas du bassin versant de l'Enghien, est alimenté par les ruisseaux de la forêt de Montmorency. Cependant, le tarissement des cours d'eau par temps chaud a entraîné l'arrêt du renouvellement de l'eau du lac. L'augmentation de la température de l'eau a conduit à une évaporation importante qui a diminué l'oxygène dans l'eau.

SIARE a installé six aérateurs et six hydro-éjecteurs dans la zone du lac en août pour augmenter l'oxygène.



Figure 16: Lac d'Enghien-les-Bains

4.1.3 Val-Favry à Coignières

Fin juin 2020, la plateforme de purification solaire a été lancée sur le bassin du Val-Favry à coignières. Ce projet a été lancé par Aquagreen en partenariat avec SQY.



Figure 17: la plateforme de purification solaire (Source : <https://www.saint-quentin-en-yvelines.fr/fr/actualites/une-solution-innovante-pour-la-gestion-des-milieux-aquatiques-23291>)

Cette technologie combine la circulation d'eau entièrement pressurisée, la dissolution de l'air atmosphérique, l'aération et le jet d'eau sous forme de brassage hydraulique et elle fonctionne également en augmentant les réactions d'oxydoréduction pour détruire les nutriments tels que les nitrates, dégrader les matières organiques, puis clarifier l'eau en réduisant les matières en suspension. (<https://www.aquagreen-tech.com/gamme-aquagreen-solar/>)

Le procédé autonome de recirculation d'eau permet, par diffusion rapide de microbulles d'oxygène dans l'eau, une réduction ou une élimination des polluants de l'environnement pour préserver la faune et la flore aquatiques.

4.2 Suivi

Il existe de nombreuses méthodes pour analyser les cyanobactéries, mais elles prennent généralement beaucoup de temps. Pour les scientifiques, il est essentiel d'améliorer les méthodes de détection et de quantification des cyanobactéries, dans le but de mieux connaître leur nombre et de réduire le temps nécessaire pour fournir des résultats d'analyse.

Les chercheurs de l'équipe Ecovea de Bordeaux participent à cette recherche : en collaboration avec Microbia Environnement, une start-up spécialisée dans le diagnostic génétique, ils mettent au point un biocapteur génétique visant à quantifier un nombre particulièrement élevé de quatre cyanobactéries potentiellement toxiques dans l'eau douce en moins de trois heures. Les chercheurs ont mis au point un nouveau protocole de surveillance et d'alerte plus réactif appelé Cyanalert (AlgaeTorch), basé sur l'utilisation d'un fluoromètre, un type de capteur de pointe. En moins d'une minute, le capteur fournit une mesure de la quantité de cyanobactéries dans l'eau. (<https://libnanews.com/eaux-de-baignade-comment-mieux-detecter-les-cyanobacteries-toxiques/>)



Figure 18: Le fluorimètre (Source : Christophe Laplace-Treytore/Irstea, CC BY-NC-ND)

4.3 Les méthodes sur eau potable

4.3.1 L'impact des proliférations de cyanobactéries sur le traitement de l'eau

Les cyanobactéries peuvent utiliser des nutriments tels que l'azote et le phosphore et d'autres oligo-éléments présents dans la colonne d'eau pour synthétiser de la matière organique intracellulaire au cours de leur croissance. Certaines de ces substances organiques sont libérées dans la colonne d'eau à la suite du métabolisme ou de la détérioration des cellules d'algues, comme les substances odorantes et les toxines algales. La présence de toxines résiduelles d'algues dans l'eau potable présente un risque grave pour la santé humaine. (Li Guoping et al., 2018) Les techniques traditionnelles de purification de l'eau ne sont pas efficaces pour éliminer les toxines d'algues et il est difficile de respecter les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et de la France concernant la teneur en toxines d'algues dans l'eau potable ($MC-LR \leq 1,0 \mu g/L$) (directive 2020/2184 du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la production pour la consommation humaine, évolution par rapport à la directive 98/83/CE ; OMS, 2011), de sorte que la recherche de méthodes efficaces pour éliminer les toxines d'algues est devenue un problème urgent.

En effet, les proliférations de cyanobactéries ont plusieurs effets néfastes sur le traitement de l'eau. Par exemple : (Li Guoping et al.,2018)

1. Interruption des processus de coagulation et de sédimentation

Dans le même temps, les métabolites des algues réagissent avec les produits d'hydrolyse du coagulant pendant le processus de coagulation pour générer des complexes et se fixer à la surface des particules du floc, empêchant ainsi une collision et une agrégation efficaces entre les particules.

Les cellules d'algues génèrent une grande quantité de OH⁻ pendant la photosynthèse, ce qui entraîne une augmentation significative du pH de la colonne d'eau, ce qui conduit à une réduction de la variété des coagulants disponibles et réduit la charge des produits d'hydrolyse des coagulants tels que les sels d'aluminium et de fer, ce qui n'est pas propice à la déstabilisation des cellules d'algues et des particules de floc, affectant sérieusement l'effet de coagulation.

Les algues ayant des poches d'air à l'intérieur de leurs cellules ont une densité cellulaire plus faible et sont donc soumises à une plus grande flottabilité et moins susceptibles de couler.

2. Réduction du cycle de fonctionnement du réservoir du filtre

Comme le processus conventionnel de coagulation et de sédimentation ne permet pas d'éliminer efficacement les algues de la colonne d'eau, les algues qui ne sont pas éliminées de l'effluent entrent dans l'étape de traitement suivante.

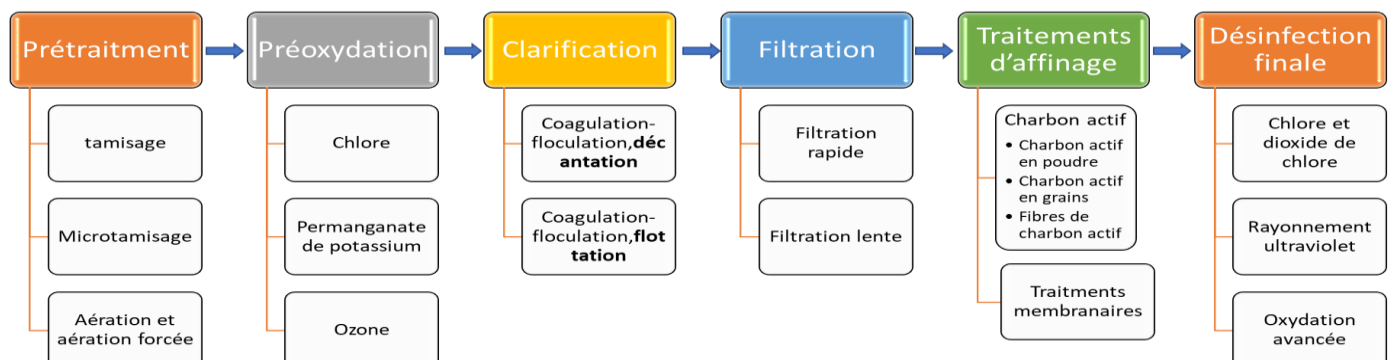
3. Dégradation des structures du processus

Les algues présentes dans les plans d'eau peuvent se développer en s'attachant à la surface des structures en béton armé, accélérant la corrosion du béton par des effets physiques, chimiques et biologiques, endommageant ainsi les tuyaux et provoquant le vieillissement et la rugosité de la surface des structures. Selon certaines études, cette corrosion serait due à la production d'acides organiques ou à la formation de cellules électrochimiques. Les structures corrodées sont plus sensibles à la prolifération des algues, ce qui rend le nettoyage de la surface plus difficile et augmente la quantité de désinfectant nécessaire, entraînant une hausse des coûts de production.

4.3.2 Technologies d'élimination des algues dans les usines de traitement de l'eau

L'élimination des cyanobactéries et des toxines cyanobactériennes dans les stations de traitement de l'eau potable s'effectue tout au long du processus de traitement d'une filière avancée (traitement d'une eau de surface de qualité moyenne à dégradée type A2 /A3) comme présenté ci-dessous.

Synthèse d'une filière de traitement complète



Des techniques physiques, chimiques et biologiques sont généralement utilisées pour réaliser ces traitements. Le tableau ci-après synthétise les principales méthodes permettant l'élimination des algues dans les filières d'eau potable.

Processus d'élimination des algues	Nom de la méthode	Avantages et Inconvénients	Les algues et toxines qui peuvent être éliminées
Méthodes physiques	Dégrillage, dessablage, tamisage (filtration à travers des tamis de 1 à 2 mm)	Ce processus ne piège que les plus grandes algues, mais n'a aucun effet sur les cyanobactéries.	Macroalgues
	Microtamisage entre 25 et 40 µm	Ce processus piège une partie des cyanobactéries.	Cyclotella, Stephanodiscus Microcystis aeruginosa Melosira, Oscillatoria, Anabaena
	Filtration lente	Le taux d'enlèvement est élevé dans les premiers stades et diminue dans les derniers stades. L'espace au sol est important et le cycle de fonctionnement est long.	Le genre Microcystis 80% Planktothrix 30-60% Anabaena 70%
	Filtration rapide	20 m³/h/m²	Avec des taux d'élimination de 14 à 70% selon les genres des cyanobactéries Cyanotoxine
	Traitement membranaires (microfiltration et ultrafiltration)	L'élimination des cellules cyanobactériennes est très efficace, mais pas celle des cyanotoxines. Cependant, s'il est utilisé en combinaison avec du charbon actif en poudre, il peut très bien retenir les cyanotoxines.	Anatoxine-a
	Les ultrasons améliorent le taux d'élimination des algues	Les essais en laboratoire sont efficaces pour favoriser les taux d'élimination des algues, mais les conditions doivent être étroitement contrôlées et les applications pratiques ont encore besoin de temps.	Arthrospira platensis
	Flottation à air	Efficacité de séparation élevée mais de grandes quantités de flocculant doivent être volées.	Algues vertes, algues brune
	Méthode d'adsorption	L'effet d'adsorption des adsorbants conventionnels est instable et de nombreux facteurs affectent l'effet d'adsorption. La recherche de nouveaux adsorbants peut améliorer le taux d'adsorption et réduire les effets secondaires sur l'environnement.	Microcystines-LR
Méthodes chimiques	Permanganate de potassium	À des doses de 1 à 5 mg/L, le permanganate de potassium provoque la lyse des cyanobactéries, qui peuvent libérer des toxines cyanobactériennes intracellulaires.	Microcystines et l'anatoxine-a
	Ozone	En traitement pré-ozone, il faut suivre 0,2 à 0,25 mg d'ozone par mg de carbone organique total (COT). En effet, si cette quantité est dépassée, cela peut entraîner la dissolution des cyanobactéries. (Bonnélye et al.1995 ; Maatouk et al.2002)	L'anatoxine-a et cylindrospermopsine
	Méthodes électrochimiques	Aucun dosage chimique n'est nécessaire et la séparation solide-liquide est facile. Cependant, le processus est influencé par la qualité de l'eau et consomme plus d'énergie.	Cyanobactéries
	Pré-chloration	Taux d'élimination élevé, mais production de substances halogénées nocives.	L'anatoxine-a et cylindrospermopsine
	Coagulation-floculation, décantation	Ce traitement est utilisé pour l'agglomération des sédiments, la clarification, la décoloration et l'amélioration du goût et de l'odeur.	Microcystis spp 90% Planktothrix agardhii 27%
	Coagulation-floculation, flottation	La flottation s'est avérée plus efficace que la décantation pour éliminer les cyanobactéries. Ce procédé n'est pas adapté aux eaux à forte turbidité car il est plus difficile de faire remonter à la surface les particules lourdes telles que le limon et l'argile.	Microcystis aeruginosa 40-80% Anabeana 90-100% Planktothrix 30%
	Photodégradation	L'efficacité de la dégradation est bonne en laboratoire, mais en pratique, le catalyseur doit être modifié pour améliorer l'efficacité de la dégradation des toxines algales.	Nodularin et Microcystine
	Couplage photodégradation-oxydation	L'utilisation séquentielle des UV et de l'ozone (UV/O3) a montré de meilleures performances dans la dégradation et la détoxification de la microcystine-LR que l'application unique ou combinée de l'ozone et des UV, tout en réduisant la dose utilisée pour l'échantillonnage.	Microcystines, l'anatoxine-a, cylindrospermopsine
Méthodes biologiques	Action microbienne ou promotion des organismes mangeurs d'algues	L'effet prend du temps, le mécanisme spécifique d'élimination des algues et les intermédiaires de réaction ne sont pas clairs, et l'application pratique pose encore de nombreux problèmes.	Nodularin, MC-LR, Microcystine, etc. Ça dépend de la souche cultivée.
	Dégradation microbienne	La sélection et la culture de souches de bactéries sont la clé pour améliorer leur efficacité de dégradation.	Ça dépend de la souche cultivée.

Tableau 6: Comparaison des procédés d'élimination des algues et leurs toxines (Leuschner, 1984), (Drikas et al 1997), (Gregory et Zabel,1990), (Steffensen et Nicholson 1994), (Lepistö et.,al 1994),(Drikas et al., 1997),(Mouchet et Bonnélye,1998)(Sherman et al.,1995), (Keijola et al.,1988), (Jones et al., 1994), (Bourneet al., 2005),(Donati et al., 1993), (Hart et Stott ,1993),(Croll et Hart, 1996) (Falconer et al., 1989),(Lambert et al.,1996), (Chow et al., 1997), (Lai et al.,2002)

a. Microtamisage

Le microtamisage est une technologie de filtration de surface qui filtre les particules contenues dans un liquide par tamisage mécanique à travers une toile mince. Ce procédé, également connu sous le nom de « filtration sur toile », est utilisé pour réduire les concentrations en matières en suspension (MES) et en phosphore total (P_{tot}) lorsque les normes de rejet sont plus contraignantes, pour diminuer la quantité d'algues (Tooker et collab., 2012) ainsi que pour améliorer la performance des traitements avancés subséquents (ex. : désinfection UV).

Ouverture des mailles ou des orifices	25-150 µm	0,15-2,5 mm
Technique	Microtamisage	Macrotamisage
Fonctionnement	Gravitaire ou sous pression	Gravitaire ou sous pression

Tableau 7 : Microtamisage et Macrotamisage (Source : SUEZ)

L'objet principal d'un microtamis est d'éliminer le plancton contenu dans les eaux de surface ; il élimine simultanément les matières en suspension de grande taille et les débris végétaux ou animaux que l'eau contient. (SUEZ)

Le microtamisage n'est pas recommandé en amont d'une chaîne de clarification sauf si l'eau dépasse 100 000 cellules de microalgues par ml ; en effet, la réduction du plancton obtenue par microtamisage varie entre 40 et 70 %. À titre comparatif, un bon décanteur (ou flotteur) permet d'obtenir une réduction de 75 à 90 % sans préoxydation, et de 85 à 99 % avec préoxydation. L'emploi de microtamisage doit être limité à des eaux peu chargées en MES. Il est sans action sur la couleur et sur les matières organiques dissoutes et n'élimine que la fraction la plus grossière des particules en suspension.



Figure 19 : Microtamisage (Source : SUEZ.fr)

Gijsbertsen et al. ont réalisé des tests d'élimination des cellules d'algues en utilisant une membrane de microfiltration à pores de 30 µm et ont montré que la membrane éliminait > 98 % des cellules d'algues et détruisait < 2 % des cellules d'algues (Gijsbertsen et al., 2006)

Suez a également mentionné qu'en utilisant des toiles dont le vide de mailles est généralement compris entre 25 et 40 µm, le rendement d'élimination moyen varie de 40 à 70 % suivant les populations algales ; individuellement, les espèces les plus petites (comme les diatomées *Cyclotella*, *Stephanodiscus* ou les algues vertes *Chlorella*, *Scenedesmus*) sont évidemment beaucoup moins bien éliminées (parfois 10% seulement) que les espèces pluricellulaires (ex : *Pediastrum*), coloniales (ex. : *Asterionella*) ou filamenteuses (ex. : *Melosira*, *Oscillatoria*, *Anabaena*), dont l'abattement peut atteindre 70 à 100%.

b. La coagulation

Les procédés de coagulation et de floculation facilitent l'**élimination de MES et des colloïdes** en les rassemblant sous forme de floc dont la séparation est ensuite effectuée par des systèmes de décantation, flottation et/ou filtration.

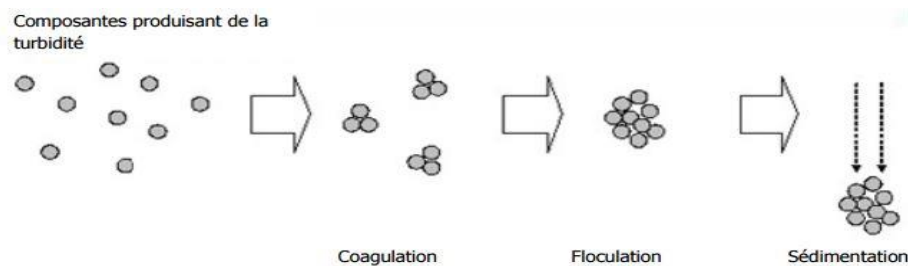


Figure 20 : Processus de coagulation, floculation et de sédimentation (Source : www. Safe drinking water foundation)

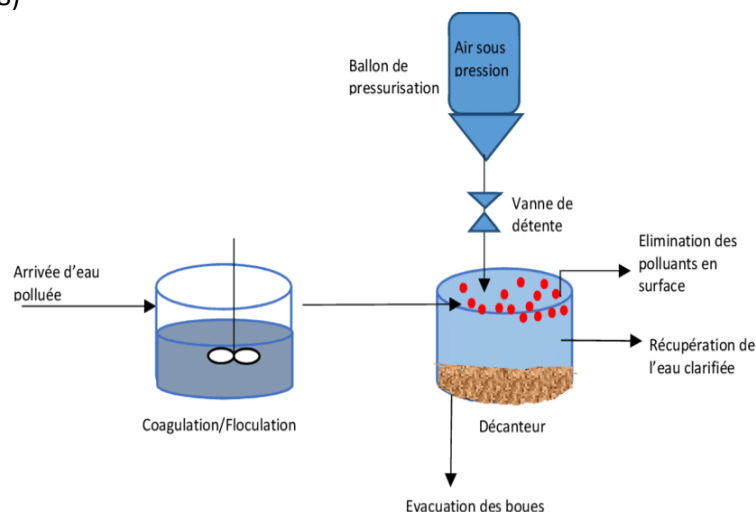
D'après SUEZ, une coagulation, en ajoutant la dose de coagulant correspondant à l'annulation du **potentiel Zêta** et pas seulement à l'obtention de la turbidité minimale ; pour déterminer le taux de traitement, il faut donc pratiquer des études électrophorétiques ou sinon, compter les algues dans les diverses eaux décantées du jar-test.

Chow et al. ont montré que l'utilisation de chlorure ferrique comme floculant pour éliminer les cellules d'algues n'entraînait pas la rupture des cellules et n'augmentait pas la concentration de microcystines dans la colonne d'eau.

c. Flottation à air

La flottation à l'air est une méthode physique d'élimination des algues, par laquelle de minuscules bulles sont combinées à des flocons d'algues de sorte que les flocons suivent les bulles à la surface, ce qui entraîne une séparation solide-liquide. Le procédé est réalisé dans une unité de flottation où l'effluent focalisé est injecté avec de l'eau. Les microbulles pressurisées se mélangent de sorte que les flocons sont attirés à la surface et sont ensuite raclés (figure 21).

La technologie de la flottation par air est principalement divisée en flottation électrolytique, flottation biologique et chimique, flottation par air de dispersion et flottation par air dissous. La flottation à l'air dissous comprend la flottation à l'air dissous sous pression et la flottation à l'air dissous sous vide, généralement utilisée dans les usines d'eau et capable de produire des microbulles de 10-100 µm. (Li Guoping et al.,2018)



Source : https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-du-processus-de-flottation-par-air-dissous_fig2_327881715

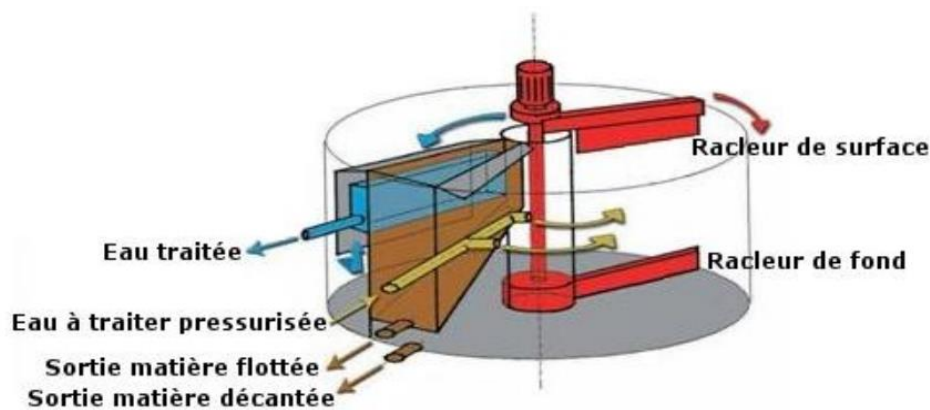


Figure 21 : Flottateur Purostar (source : Manon ANTOINE, 2009)

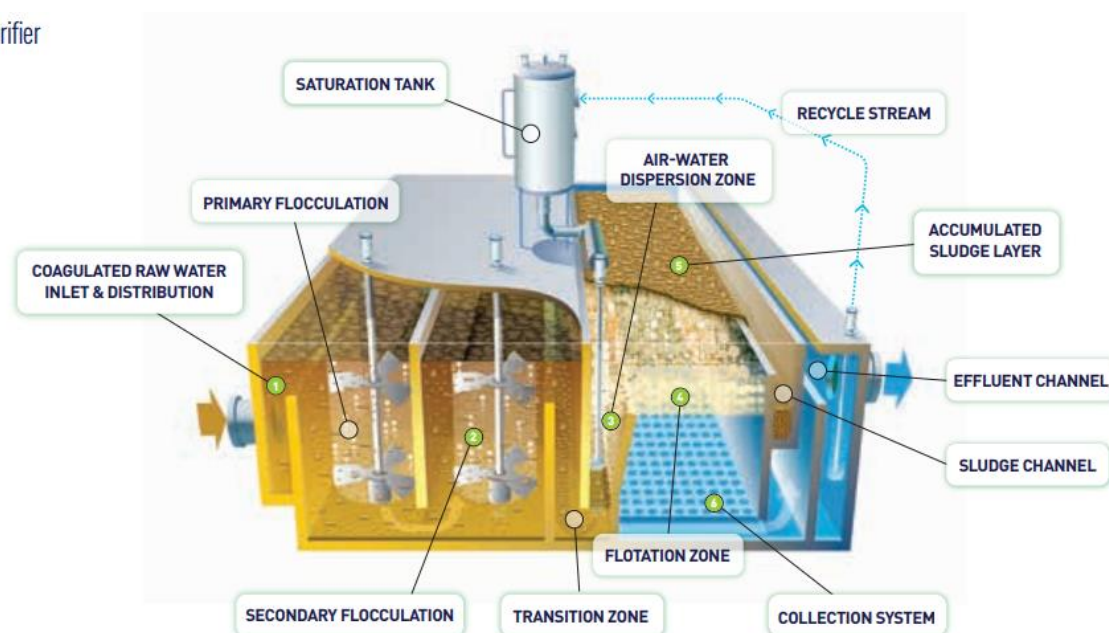
L'efficacité de la séparation pendant la flottation à l'air dépend fortement de l'efficacité de la collision et de l'adhésion entre les cellules d'algues et le flagelle. De nombreuses études ont montré que l'introduction de processus de coagulation peut améliorer la flottation à l'air en augmentant la taille des particules. Par exemple, dans le traitement des eaux brutes du lac Taihu, le procédé de coagulation + flottation par air est plus efficace pour éliminer les algues que le procédé de coagulation + décantation.

Exemples

L'élimination efficace des algues par flottation à air dissous (en anglais DAF pour Dissolved Air Flotation) est une excellente solution pour le traitement de l'eau potable.

SUEZ a développé l'AquaDAF (figure 22), un clarificateur à grande vitesse utilisant la flottation à air dissous pour les surfaces à faible turbidité et les eaux contenant des algues. Le système de collecte des effluents du clarificateur AquaDAF, de conception unique, offre des taux de fonctionnement inégalés par les technologies de flottation conventionnelles.

Aquadaf clarifier

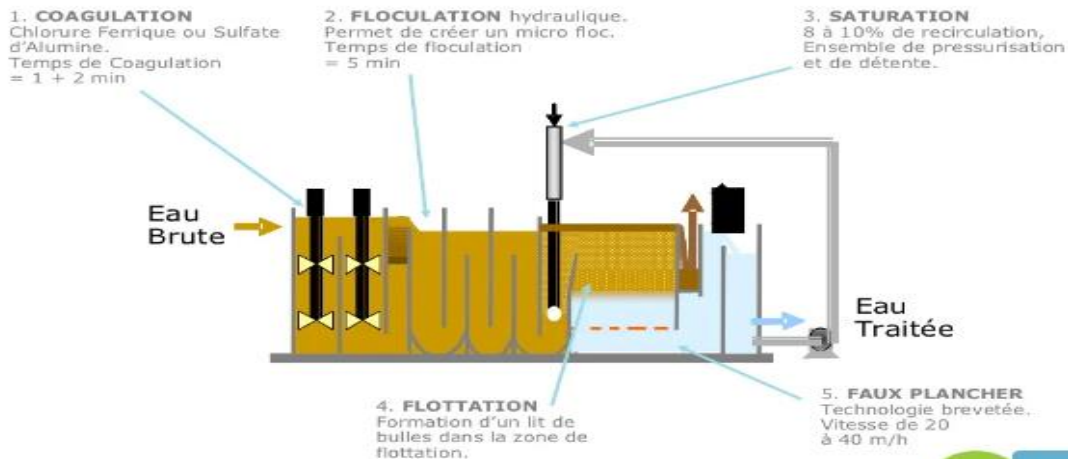


Source : <https://www.watertechnologies.com/products/flotation-technology>

Figure 22 : La construction d'AquaDAF

L'Aquadaf est un produit flexible. Il traite les eaux de surface, même très froides (jusqu'à 0°C). Il s'adapte à des pointes occasionnelles de MES ou turbidité jusqu'à 200 NTU. Il est également un produit compétitif. Une nouvelle conception de l'étape de floculation permet de réduire le temps nécessaire à la réaction à 5 min.

L'Aquadaf™ HF : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



Source : <https://pt.slideshare.net/DegremontWater/presentation-innovationaquadaffr>

Figure 23 : La principe de fonctionnement de l'Aquadaf HF

En plus de cela, il présente les avantages suivants :

- Turbidité clarifiée de moins de 1NTU
- Élimination des algues à plus de 90 %.
- Temps de floculation inférieur à 10 minutes
- Élimination du phosphore inférieure à 0,1mg/l TP
- Concentration des boues de 2 à 4 % après épaissement

En 2008, SUEZ a utilisé cette unité dans le cadre d'un projet de traitement des eaux en Chine. D'après le tableau du taux d'élimination des algues (tableau 8), un taux moyen d'élimination des algues de 96% a été enregistré.



Tableau 8 : Le tableau du taux d'élimination des algues

Source : <https://pt.slideshare.net/DegremontWater/presentation-innovationaquadaffr>

d. La pré-oxydation

Le chlore, l'ozone et le permanganate de potassium sont couramment utilisés comme réactifs dans l'étape de pré-oxydation. Ils améliorent l'efficacité de la coagulation et de l'élimination des algues en inactivant les cellules algales. Ces agents oxydants peuvent détruire ou même désintégrer les parois cellulaires, les membranes cellulaires et le matériel intracellulaire des cellules d'algues.

La préchloration est maintenant couramment utilisée dans les systèmes d'eau pour tuer les cellules d'algues dans l'eau et pour éliminer une partie des toxines d'algues dissoutes, ce qui constitue une bonne solution au problème de la prolifération des algues dans les structures de traitement ultérieures. Pour les échantillons d'eau avec des concentrations d'algues de 2×10^4 cellules/ml, une pré-oxydation avec une dose initiale de chlore de 1 mg/L peut augmenter l'efficacité de la coagulation et l'élimination des algues du chlorure d'aluminium jusqu'à 10 % (Guoping Li, 2018).

Shi Ying et Ma Jun ont montré que l'utilisation de la même dose de permanganate de potassium préoxydé (PPC) dans le réservoir permettait d'éliminer les algues 14 % plus facilement que la préchloration et de réduire considérablement les précurseurs de THM dans l'eau filtrée. Le permanganate de potassium est également efficace pour éliminer les substances odorantes de l'eau, mais une utilisation inappropriée peut entraîner un excès de couleur et de manganèse dans l'effluent.

En tant qu'excellent et puissant oxydant, l'ozone peut oxyder et éliminer certaines matières organiques tout en tuant les algues. Sa capacité à réagir avec les $-C=C-$ de la matière organique réduit le poids moléculaire de la matière organique et élimine son aromaticité, améliorant ainsi la polarité et la biochimie. La pré-oxydation avec l'ozone peut augmenter l'efficacité de l'élimination de la coagulation du chlorure ferrique et des algues de 10 à 15 % et la flottation à l'air et l'élimination des algues de 75 à 93 %.

e. Méthode d'adsorption

Cette méthode est principalement mise en œuvre grâce à l'excellente capacité d'adsorption du charbon actif. La grande surface spécifique et la structure complexe et bien développée des pores déterminent l'excellente capacité d'adsorption du charbon actif. Nous pouvons également classer le charbon actif en charbon actif en grains (CAG), charbon actif en poudre (CAP) et fibres de charbon actif (FCA) en fonction de la taille des particules, de la surface spécifique et de la morphologie.

Nom	Effet de l'adsorption	Avantages et désavantages
CAG (charbon actif en grains)	70%	De longs temps de contact sont nécessaires et l'effet d'élimination est instable. Les bactéries qui recouvrent la surface des colonnes CAG réduisent la capacité à éliminer les toxines algales. (D.M.et al., 2007)
CAP (charbon actif en poudre)	80-90%	Le dosage important requis ne permet pas un traitement ultérieur dans la station d'épuration.
FCA (fibres de charbon actif)	99%	Il possède une plus grande surface spécifique et un système de pores plus riche.
OG (Oxyde de graphite)	1.7-1.87mg/g	Il possède une surface spécifique élevée et une abondance de groupes fonctionnels de surface. Par rapport au charbon actif, le OG ne présente aucune perte significative de capacité d'adsorption des toxines algales après des adsorptions et désorptions répétées et peut être utilisé en continu. (Pavagadhi et al.,2013)
PNS (plaquette en nanosilicate)	99%	L'adsorption des phycotoxines et l'inhibition de la croissance des algues microcystiques dans la colonne d'eau ont moins d'effets secondaires sur l'environnement. (Chang et al.,2014)

Tableau 9: comparaison des différentes méthodes d'adsorption et de leurs avantages et désavantages

Synthèse de pourcentage d'élimination sur différentes étapes de traitement

Traitement	% Élimination	Log d'abattement
Microtamisage	40 à 70 %	0,2 à 0,5
Filtration directe	90 à 98 %	1 à 1,7
Décantation + filtration (sans préoxydation)	95 à 99 %	1,3 à 2
(après préchloration)	99 à 99,9 %	2 à 3
(après préozonation)	97 à 99,8 %	1,5 à 2,7
Flottation + (sans préoxydation)	96 à 99 %	1,4 à 2
filtration (après préchloration ou préozonation)	99 à 99,9 %	2 à 3
Préoxydation + clarification + O ₃ + CAG	99,9 à 99,99 %	3 à 4
Membranes (MF, UF), après décantation ou flottation si nécessaire	> 99,9999	> 6

Tableau 10: Elimination des algues par différentes filières (Source : SUEZ)

4.3.3 Études de cas sur l'utilisation des méthodes de traitement de l'eau

VEOLIA, Actiflo : Un clarificateur ultra compact et performant

La technologie de traitement des algues se développe rapidement et Veolia a mentionné la méthode Actiflo il y a quelques années.

Actiflo® est un procédé de traitement des eaux qui consiste à coaguler l'eau à traiter avec un coagulant à base de sel de fer ou d'aluminium, puis à flocculer l'eau coagulée avec un polymère (synthétique ou biosourcé) et un agent lestant (le microsable), et enfin à décanner les floccs formés dans un décanteur équipé de lamelles. Le mélange boue-microsable est extrait en partie basse du décanteur, et l'eau traitée est extraite en haut du décanteur. Un hydrocyclone sépare la boue du microsable, et ce dernier est réintroduit dans l'ouvrage. Cette technique permet de débarrasser les eaux traitées des impuretés colloïdales ou en suspension, constituées de polluants qu'il est souhaitable d'éliminer.

Basé sur le procédé Actiflo®, l'Actiflo®Carb est équipé d'une cuve de précontact avec charbon actif en poudre (CAP) pour l'adsorption des matières organiques naturelles non flocculables, des goûts et odeurs, des pesticides et des micropolluants organiques émergents. Les caractéristiques de fonctionnement du procédé sont identiques à celles de l'Actiflo®, lui conférant ainsi les avantages d'un traitement rapide et de haute performance tout en assurant la production d'une eau de très grande qualité. Il contient également un hydrocyclone pour récupérer le microsable et le CAP. (VEOLIA, Actiflo® : Un clarificateur ultra compact et performant. Veolia technologie.,)

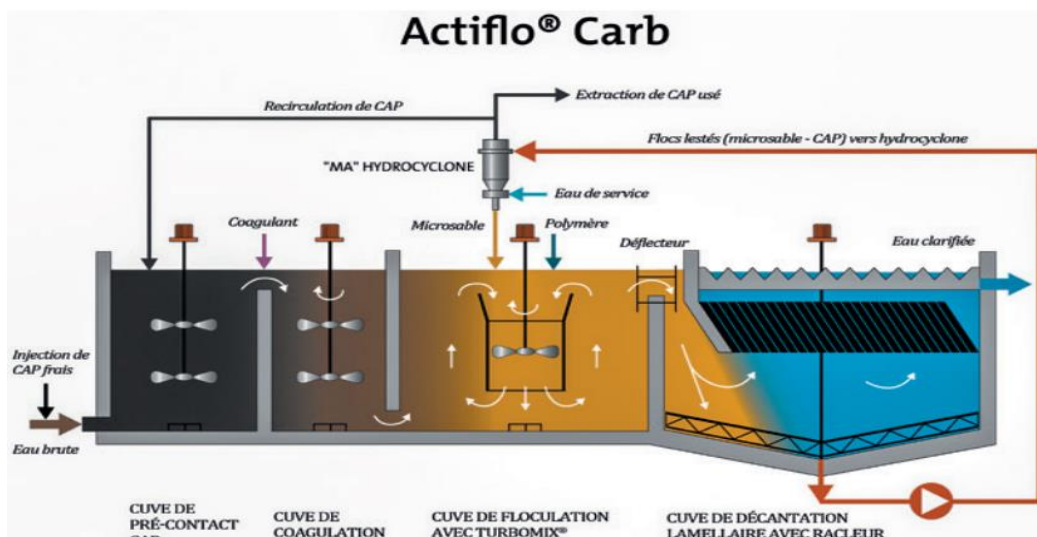


Figure 24: Schéma de fonctionnement de l'Actiflo® Carb (Source : Philippe Sauvignet et al.,)

Concernant la capacité d'élimination des algues totales, le graphique de la figure 25 présente le taux d'élimination cumulé du procédé combinant Actiflo® et Actiflo® Carb. La performance d'une clarification Actiflo® seule présente un taux d'abattement d'algues de 85-95 % en moyenne. Grâce à la mise en place de l'Actiflo® Twin Carb, le taux d'abattement cumulé dépasse 99,5 %.

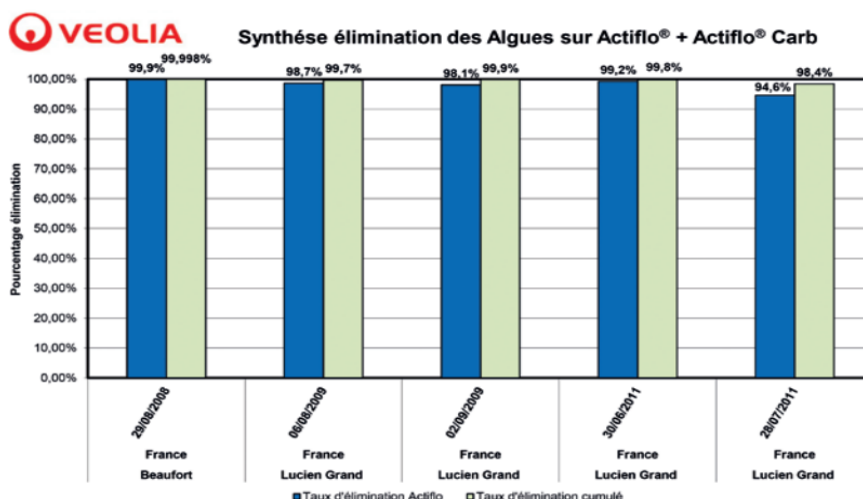


Figure 25: Synthèse élimination des algues sur Actiflo® + Actiflo® Carb (Source : Philippe Sauvignet et al.,)

5. Conclusion

Le rapport permet d'appréhender les différents types d'algues et leur caractérisation.

Les algues productrices de toxines causent des nuisances aux écosystèmes aquatiques, qui comprennent les plantes et les animaux, ainsi qu'aux humains par contact direct avec les toxines présentes dans l'eau ou par la consommation de fruits de mer toxiques. Cela rend leur traitement d'autant plus urgent. Les méthodes d'élimination des algues concentrées décrites dans cet article, bien qu'elles soient largement utilisées, présentent certains problèmes de produits secondaires. Nous devons donc continuer à explorer de nouvelles méthodes d'élimination des algues, très efficaces et moins polluantes, afin de réduire les niveaux de sous-produits dus aux produits chimiques utilisés à un stade ultérieur.

Bibliographie

Bourne D.G., Blakeley R.L., Riddles P. et Jones G.J, 2005. Biodegradation of the cyanobacterial toxin microcystin R in natural water and biologically active slow sand filters. *Water Research*. Volume 40, n°6, Pages 1294-1302.

Burlingame, G., Dann, R.M. and Brock, G.L. 1986. A case study of geosmin in Philadelphia's water. *Journal AWWA* 78(3): 56-61.

Cavalier-Smith T., 2004. Only six kingdoms of life. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*, 271, 1251-1262.

Chorus, I. and Bartram, J. (1999) *Toxic Cyanobacteria in Water—A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. Routledge, London, and New York.

Chorus I. Cyanotoxins – research for environmental safety and human health. In: Chorus I, editor. *Cyanotoxins – occurrence, causes, consequences*. Berlin: Springer-Verlag, 2001.

Croll B. et Hart J., 1996. Algal toxins and customers. Paper presented at the UKWIRAWWARF Technology Transfer Conference, Philadelphia

Donati C., Drikas M., Hayes R. et Newcombe G., 1994. Microcystin-LR adsorption by powdered activated carbon. *Water Research*. Volume 28, Pages 1735-1742.

Drikas M., Chow C.W.K., House J. et Burch M., 1997. A pilot study of the removal of intact cyanobacterial cells. *Journal American Water Works Association*.

Falconer I., Runnegar M., Buckley T., Huynh V. et Bradshaw P., 1989. Using activated carbon to remove toxicity from drinking water containing cyanobacterial blooms. *Journal American Water Works Association*. Volume 81, Pages 102-105.

FDA. 2001. Natural Toxins. Ch. 6. In *Fish and Fishery Products Hazards and Controls Guidance*. 3rd ed., p. 73-82. Food and Drug Administration, Center for Food Safety and Applied Nutrition, Office of Seafood, Washington, DC.

Gregory R. et Zabel, T.F. 1990. Sedimentation and flotation. In: F. W. Pontius [Ed.]. *Water Quality and Treatment, A Handbook of Community Water Supplies*. 4th edition. American Water Works Association, McGraw Hill, Inc., New York, Pages 443-445.

Guiry M.D., Guiry G.M., 2013. *AlgaeBase*, World-wide electronic publication, <<http://www.algaebase.org/>>.

Hart J. et Stott P., 1993. Microcystin-LR Removal from Water. Report FR 0367, Fondation for Water Research, Marlow, UK.

Huang IS, Zimba PV. Cyanobacterial bioactive metabolites. A review of their chemistry and biology. *Harmful Algae* 2019 ; 86 : 139-209.

Jones G.J. et Orr P.T., 1994. Release and degradation of microcystin following algicide treatment of a *Microcystis aeruginosa* bloom in a recreational lake, as determined by HPLC and protein phosphatase inhibition assay. *Water Research*. Volume 28, n°4, Pages 871-876.

Keijola A.M., Himberg K., Esala A.L., Sivonen K. et Hiisvirta L., 1988. Removal of cyanobacterial toxins in water treatment processes: laboratory and pilot-scale experiments. *Toxicity Assessment*. Volume 3, n°5, Pages 643-656.

Lai C.C., Yeh T.C., Tseng C.J., Chen H.W. et Wang G.S., 2002. Conventional versus advanced treatment for eutrophic. *Journal American Water Works Association*. Volume 94, n°12, Pages 96-108.

Lambert T.W., Holmes C.F.B. et Hruddy S.E., 1996. Adsorption of microcystin-LR by activated carbon and removal in full-scale. *Water Treatment*. Volume 30, Pages 1411-1422.

Lepistö L., Lahti K., Niemi J. et Färdig M., 1994. Removal of cyanobacteria and other phytoplankton in four Finnish waterworks. *Arch. Hydrobiol. Algological Studies*, Volume 75, Pages 167-181.

Leuschner C., 1984. Auswirkungen der Phosphateliminierungsanlage Beelitzhof auf die qualitative und quantitative Zusammensetzung der Phytoplanktonpopulation im Wannseewasser bei der Überleitung in den Schlachtensee. Federal Environmental Agency. 62 pages.

Li Guoping, Qi Jing, Lan Huachun. Review on research progress of algae removal technology in water treatment plant[J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(9) :32-39.

Maier, H.R., G.C. Dandy, and M.D. Burch. 1998. Use of artificial neural networks for modelling cyanobacteria *Anabaena* spp. In the River Murray, South Australia. *Ecological Modelling* 105:257-272.

Manon ANTOINE. Analyse et gestion du risque cyanobactéries / cyanotoxines dans les eaux de baignade et les eaux destinées à la consommation humaine du département de la Haute-Vienne 2009.

Mouchet P. et Bonnélye V., 1998. Solving algae problems: French expertise and world-wide applications. *Journal Water SRT - Aqua* Volume 47, n°3, Pages 125-141.

Pilotto L.S., Douglas R.M., Burch M.D., Cameron S., Beers M., Rouch G.J., Robinson P., Kirk M., Cowie C.T., Hardiman S., Moore C. et Attewell R.G., 1997. Health effects of recreational exposure to cyanobacteria (blue green) during recreational water related activities. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*. Volume 21, n°6, Pages 562-566.

R.M. Kudela et al. 2015. Harmful Algal Blooms. A Scientific Summary for Policy Makers. IOC/UNESCO, Paris (IOC/INF-1320).

Reynolds, C.S. 1987. Cyanobacterial Water Blooms. *Advances in Botanical Research* 13:67-143.

Reynolds, C.S. 1997. *Vegetation Processes in the Pelagic*. Ecology Institute, Oldendorf/ Luhe, Germany.

Sherman P., Tully I. et Gibson H., 1995. Removal of cyanobacterial cells and toxins from drinking water with biologically active filters. *Proceedings of the Australian Water and Wastewater Association 16th Federal Convention*, Sydney.

Smith PK, Mahdavi J, Carvalho M, Fisher S, Russell S. Cyberbullying: its nature and impact in secondary school pupils. *J Child Psychol Psychiatry* 2008; 49 (4): 376-85.

Steffensen D. et Nicholson B., 1994. Toxic Cyanobacteria -Current Status of Research and Management. Proceedings of an International Workshop, Adelaide.

Steffensen, D., M. Burch, B. Nicholson, M. Drikas, and P. Baker. 1999. Management of Toxic Blue-Green Algae (Cyanobacteria) in Australia. *Environmental Toxicology* 14(1): 183-195.

SU Fawen¹, GAO Pengcheng, et al. Effects of *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa* on water environment pH. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(6): 1380–1388.

Talling J F. The depletion of carbon dioxide from lake water by phytoplankton[J]. *J Ecol*, 1976, 64(1) : 79–121.

WANG Hong-ping, XIA Jun et al. MECHANISMS FOR HYDROLOGICAL FACTORS CAUSING ALGAL BLOOMS IN HANJING RIVER--- BASED ON KINETICS OF ALGAE GROWTH. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1004- 8227(2004) 03- 0282- 04.

Ward, D., Bernard, D., Collette, R., Kraemer, D., Hart, K., Price, R., and Otwell, S. (Eds.) 1997. Hazards Found in Seafoods, Appendix III. In *HACCP: Hazard Analysis and Critical Control Point Training Curriculum*, 2nd ed., p. 173-188. UNC-SG-96-02. North Carolina Sea Grant, Raleigh, NC.

Annexes

Annexe 1 Le modèle hydraulique du ru de Montsault à Baillet en France

Le Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique (SIAH) des vallées du Croult et du Petit Rosne regroupe une communauté d'Agglomération et 33 communes de l'Est du Val d'Oise dont fait partie la commune de Baillet-en-France.

La commune de Baillet en France est située dans le bassin versant hydrographique du Petit Rosne. Elle est traversée par le ru de Montsault avant sa confluence avec le Petit Rosne à Moisselles. Le projet concerne ce ru.

Le projet s'étend sur 1200 ml, sur la commune de Baillet-en-France, au Sud de la Francilienne.

Les principales contraintes du projet sont les suivantes :

- Variation de débits importante sur le cours d'eau,
- Pratique culturelle au ras des berges,
- Qualité des eaux médiocre,
- Érosion des berges lors des forts débits.

L'objectif premier du projet est de réhabiliter le ru de Montsault afin d'en améliorer l'écoulement et de lutter contre l'érosion des berges. Mais le projet doit également répondre à la DCE sur l'eau adoptée le 23 Octobre 2000 qui a pour objectif le "bon état" écologique et chimique des cours d'eau d'ici 2015. Le SIAH vise le "bon potentiel" écologique d'ici 2027.

L'objectif des travaux qui font l'objet de la présente mission de maîtrise d'œuvre est multiple :

- Limitation des inondations et de l'érosion de berges,
- Valorisation écologique du cours d'eau,
- Valorisation paysagère du site.

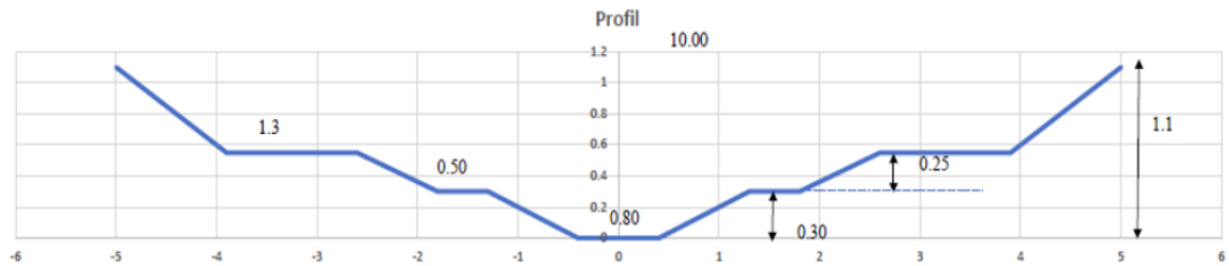


L'étude hydraulique consiste à identifier l'origine des insuffisances du système hydraulique. Il s'agit donc de suivre les étapes suivantes :

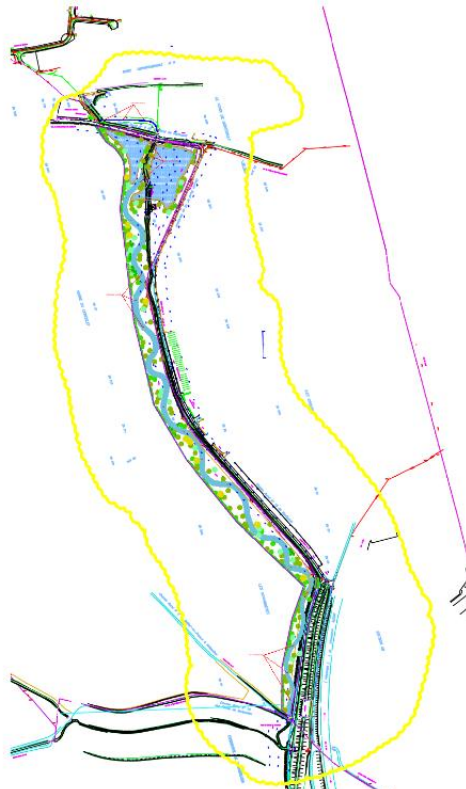
- Collecte des informations relatives à la structure du système hydraulique (cours d'eau, buses, dalots, ouvrages annexes, points singuliers...),
- Réalisation des mesures,
- Montage du modèle hydraulique,
- Calage et validation du modèle,
- Diagnostic du fonctionnement hydraulique du système hydraulique,
- Tests et dimensionnement des aménagements.

Dans ce projet j'ai réalisé :

- Tracer nouveau CE (Changer la rivière très droite en rivière Méandre.)
- Le futur lit du cours d'eau sera composé de lit emboîté trapézoïdaux. Du coup il faut déterminer les cross section (calcul profil et délimiter lit mineur lit majeur)



- Créer deux bassins de stockage.



Annexe 2 Projet Bouchemaine

L'étude hydraulique du réseau pluvial de Bouchemaine a été engagée par la commune de Bouchemaine.

Lors des épisodes pluvieux intenses, des débordements surviennent sur deux cours d'eau présents sur la commune. Les débordements sont observés sur deux secteurs à enjeux, les lieux-dits « Les Moirins » et « La Castouarne ».

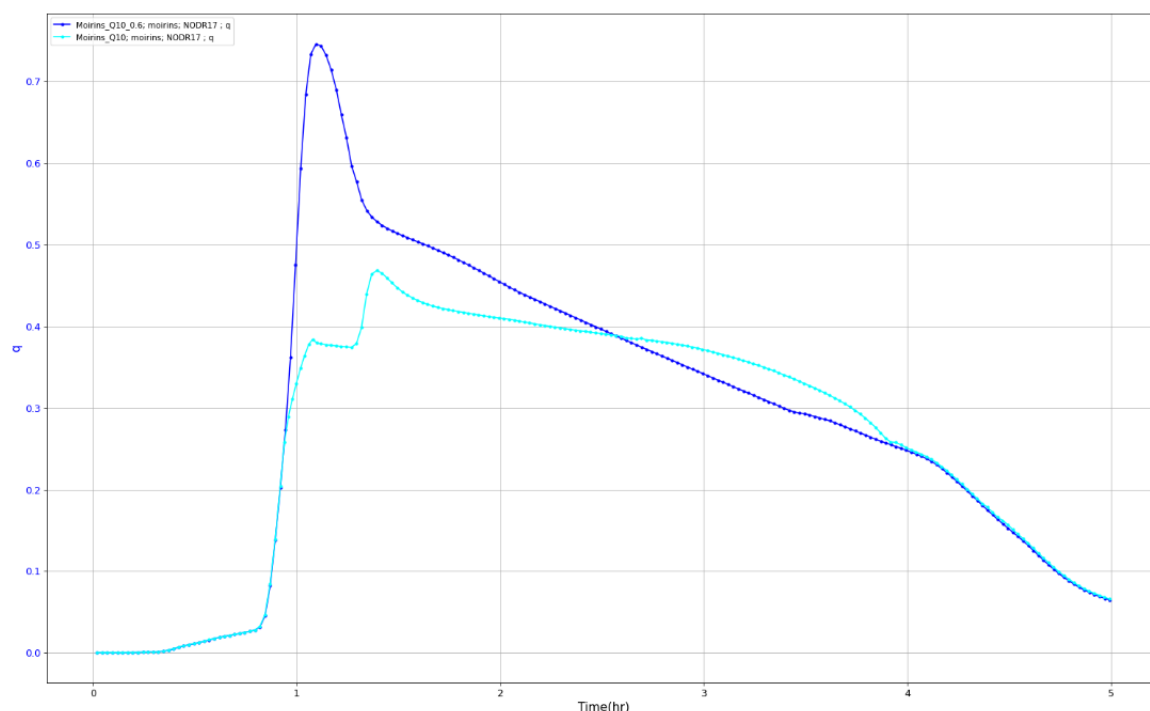
Les désordres observés sur ces secteurs associent à la fois des facteurs liés à l'évolution de l'occupation des sols (urbanisation des sols en lit majeur et augmentation des surfaces imperméabilisées) et des facteurs liés à l'artificialisation des cours d'eau (recalibrage et rectification du lit, busage, absence d'espace latéral...).

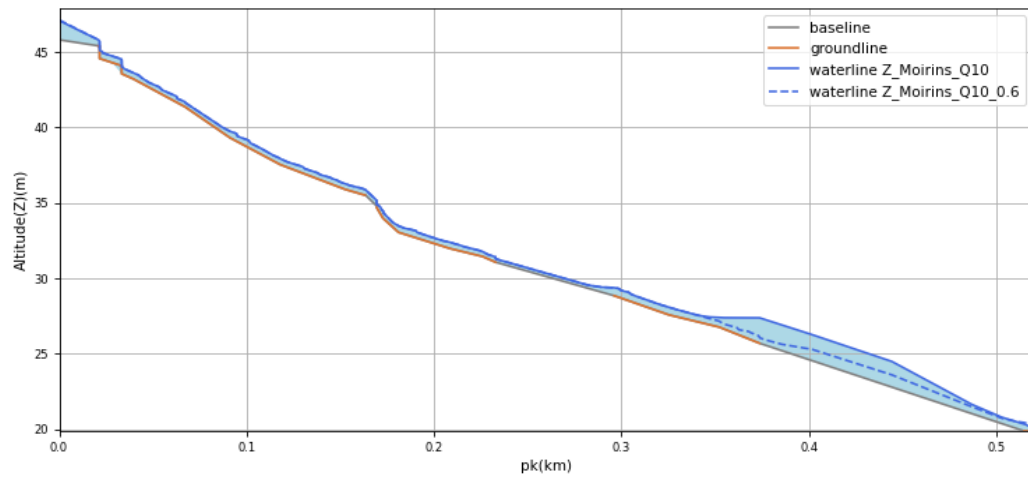
L'objectif de l'étude a été d'établir, dans un premier temps, un état des lieux et un diagnostic des cours d'eau sur les secteurs des Moirins et de la Castouarne (phase 1). Dans un second temps, il s'agissait de proposer des solutions d'aménagement afin de résoudre les dysfonctionnements connus sur ces secteurs (phase 2).

Dans ce projet j'ai réalisé :

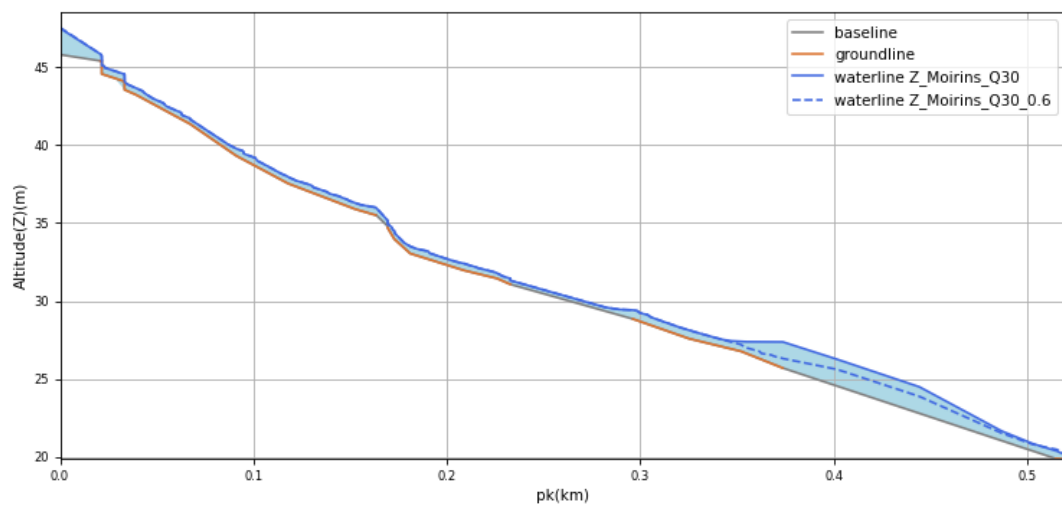
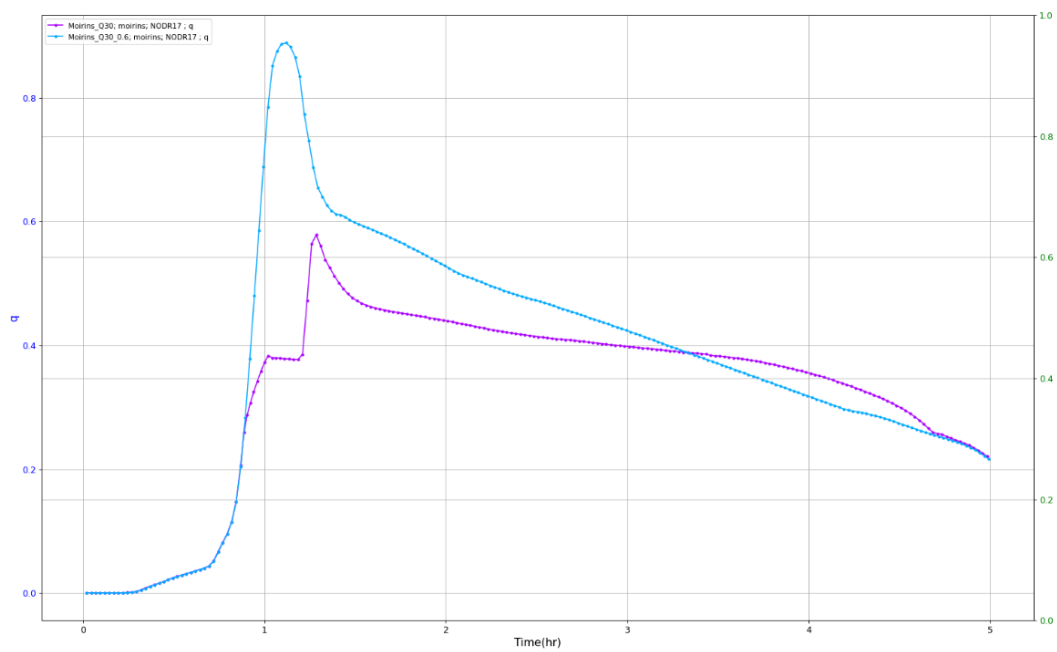
- Modifier la taille du busage pour voir le débordement et comparer le niveau d'eau maximal et débits avant et après la modification de la taille du busage. (Trois différents scénarios, Q10, Q30 et Q100)

➤ Q10

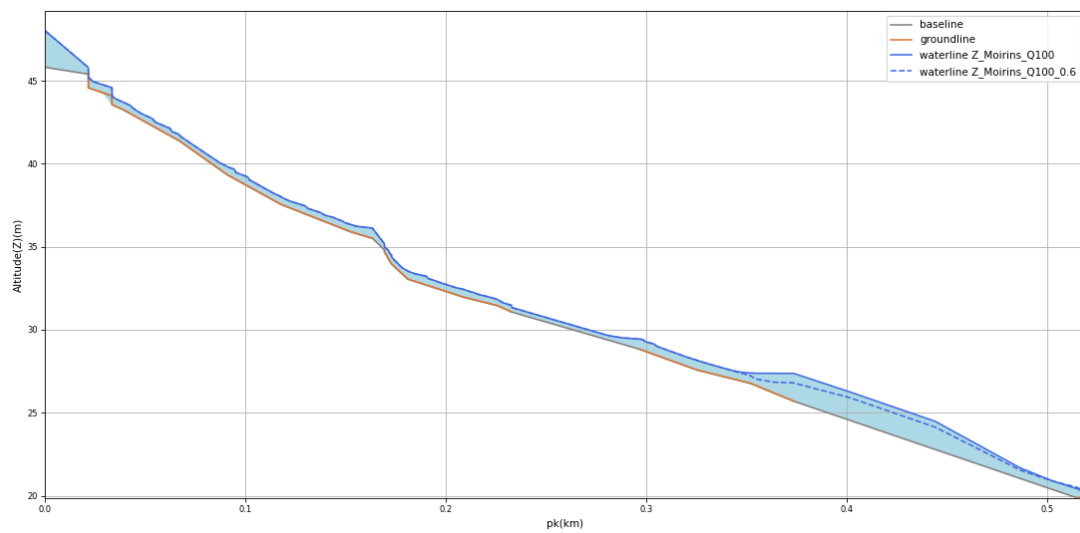
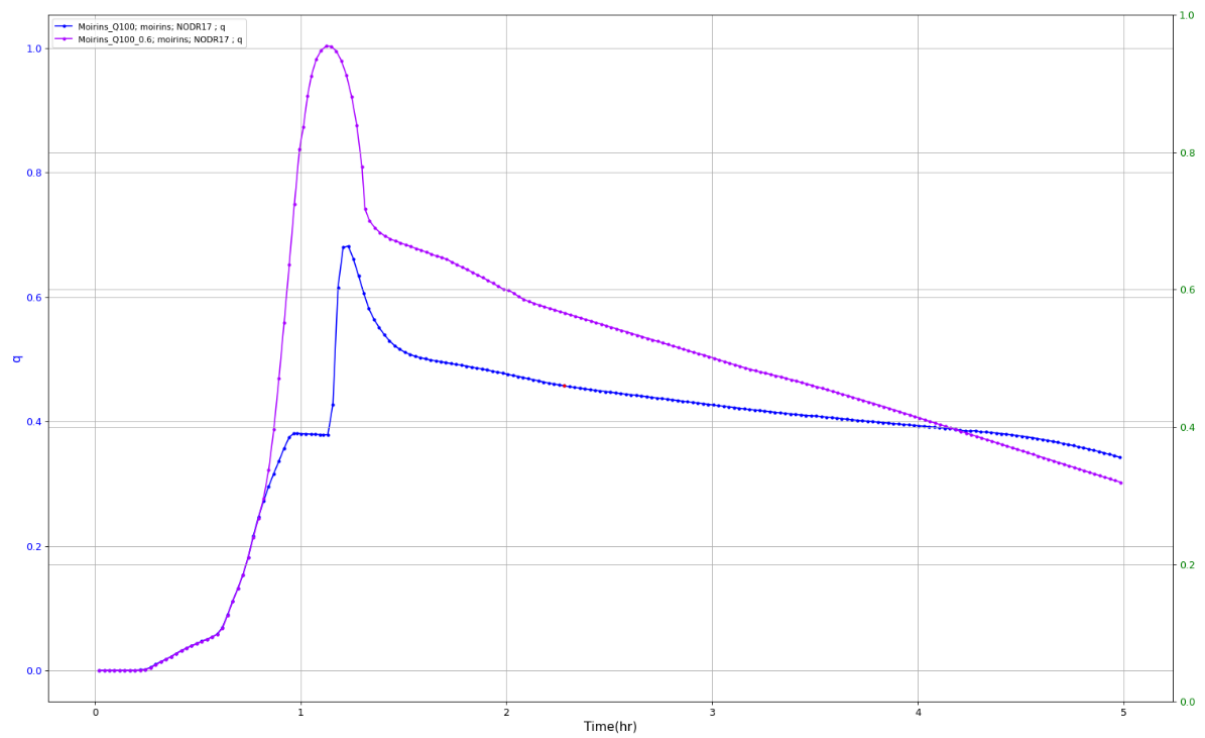




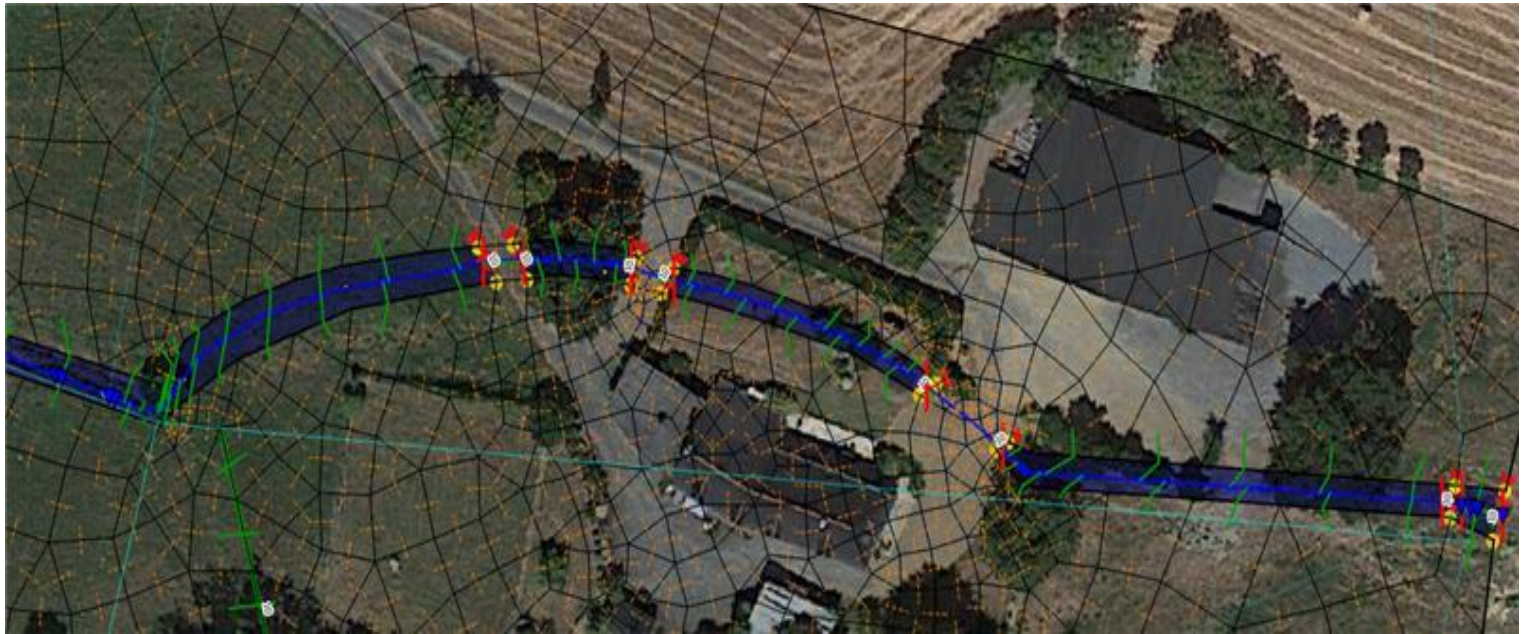
➤ Q30



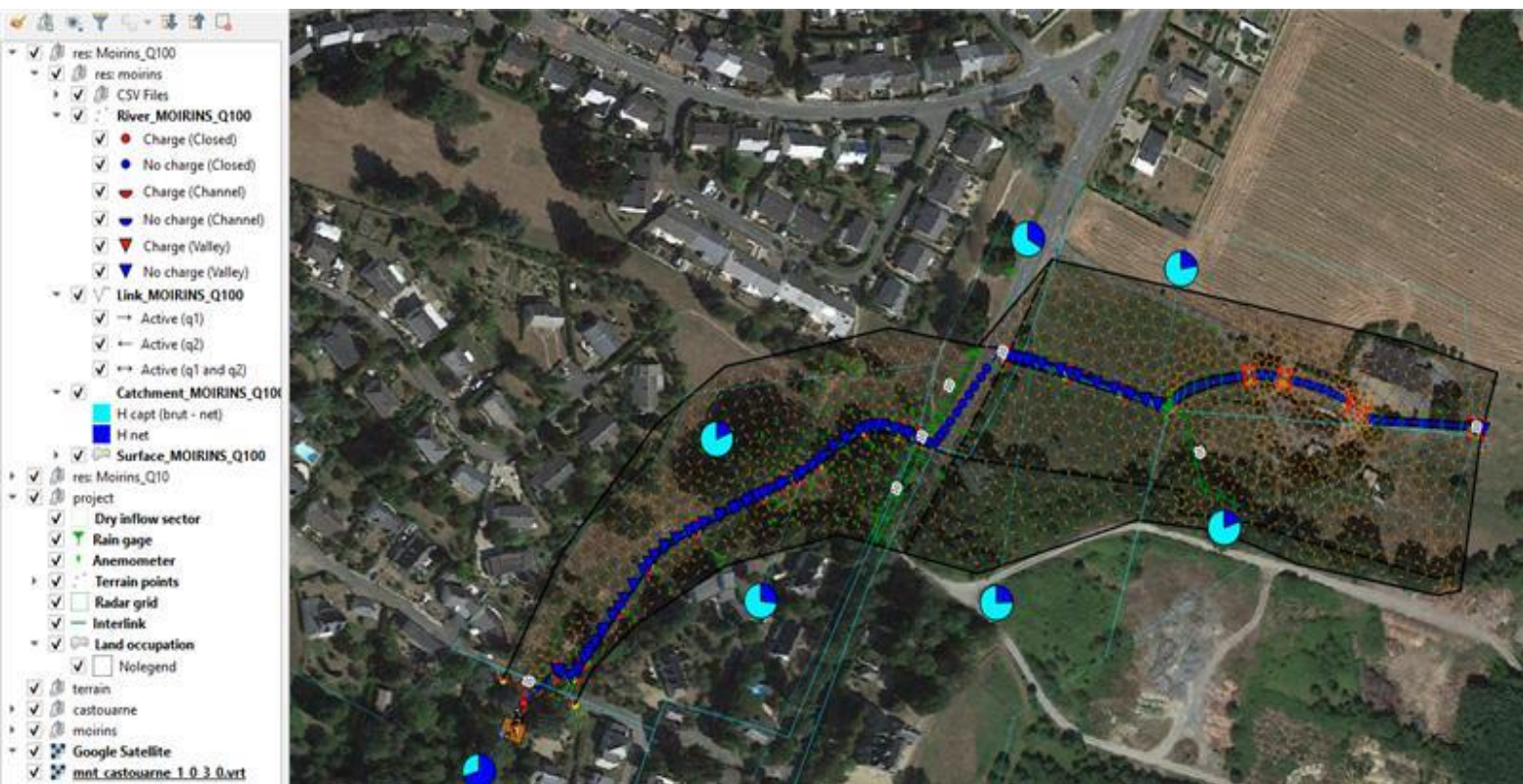
➤ Q100



- Modifier le chemin de la rivière afin que les résidents ne risquent plus d'être inondés lors d'une crue.



- Créer une section transversale sur la nouvelle rivière et calculer et mettre en place un tronçon à ciel ouvert en aval.





Yusufu Muhetabaer
2021-2022

L'impact des algues nuisibles et de leurs toxines sur la vie humaine et les techniques de traitement

Résumé :

Photosynthetic algae contribute to the health of aquatic ecosystems by forming the basis of the food web, fixing carbon, and producing oxygen. Under certain circumstances, some species can form high-biomass and/or toxic cell blooms, causing harm to aquatic ecosystems, including plants and animals, as well as humans through direct exposure to toxins in the water or through consumption of toxic seafood. (R.M. Kudela et al. 2015)

This study presents the major families of algae, such as cyanobacteria, red algae, green algae, and brown algae, and the associated issues related to toxins from harmful algae. It also presents the guidelines established by WHO and France for microcystin in drinking water treatment. In addition, the report indicates the methods of treatment of algae.

Mots Clés : Cyanobactéries, Cyanotoxines, MC-LR, Algues

SETEC HYDRATEC

Agence de Tours 11 rue Edouard

Tuteur entreprise :

Frederic PRIN ; Virginie MEVEL

Responsable Directeur du développement International ; Ingénieure Principale

Tuteur académique :

Francesca Di Pietro

Sabine Greulich