

UNIVERSITE DE LIMOGES

FACULTE DE PHARMACIE

ANNEE 1995

THESE N° 358

**FLEUR D'EAU DE CYANOPHYCEES
ET TOXICITE CHEZ L'HOMME**

**THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

présentée et soutenue publiquement le : 18 décembre 1995

PAR

Catherine BOYEAU

Née le 24 avril 1971 à La Rochefoucauld (16)

EXAMINATEURS DE LA THESE

Monsieur le Professeur C. MOESCH - Président

PAR ORDRE ALPHABETIQUE

Mademoiselle F. BRETHERNOUX - Juge

Monsieur P. COMBROUZE - Juge

Monsieur A. GHESTEM - Juge

UNIVERSITE DE LIMOGES

FACULTE DE PHARMACIE

DOYEN DE LA FACULTE:

Monsieur le Professeur RABY Claude

ASSESEURS:

Monsieur le Professeur GHESTEM Axel
Monsieur DREYFUSS Gilles - Maître de Conférences

PROFESSEURS:

BENEYTOUT Jean-Louis	BIOCHIMIE
BERNARD Michel	PHYSIQUE-BIOPHYSIQUE
BOSGIRAUD Claudine	BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE PARASITOLOGIE
BROSSARD Claude	PHARMACOTECHNIE
BUXERAUD Jacques	CHIMIE ORGANIQUE CHIMIE THERAPEUTIQUE
CARDOT Philippe	CHIMIE ANALYTIQUE
CHULIA Albert	PHARMACOGNOSIE
CHULIA Dominique	PHARMACOTECHNIE
DELAGE Christiane	CHIMIE GENERALE ET MINERALE
GHESTEM Axel	BOTANIQUE ET CRYPTOLOGIE
HABRIOUX Gérard	BIOCHIMIE FONDAMENTALE
LACHATRE Gérard	TOXICOLOGIE
MOESCH Christian	HYGIENE
OUDART Nicole	PHARMACODYNAMIE
RABY Claude	PHARMACIE CHIMIQUE ET CHIMIE ORGANIQUE

SECRETAIRE GENERAL DE LA FACULTE - CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS

POMMARET Maryse

Je dédie cette thèse à mes chers parents dont le soutien permanent m'a donné la force de continuer ainsi qu'à mes frères et à tous mes amis proches.

Tous m'ont encouragée chaleureusement à leur manière et je leur dois cette devise que j'ai faite mienne : "quand on veut, on peut".

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon maître de thèse Monsieur le Professeur Moesch, pour son accueil et son aide tout au long de ce travail, à Monsieur Jaouen du Service Santé-Environnement (DDASS Haute-Vienne).

Je remercie également Mademoiselle Brethenoux, Pharmacienne, Monsieur Combrouze, Ingénieur en Hydrologie-Ichtyologie ainsi que Monsieur Ghestem Professeur de Botanique et Cryptogamie, d'avoir accepté d'être membres de mon jury.

PLAN GENERAL

INTRODUCTION

Chapitre I : Généralités sur les "fleurs d'eau".

Section 1) Classification des Cyanophycées - Notions générales

Section 2) La "fleur d'eau"

Section 3) Espèces toxiques - Toxines

Section 4) Répartition géographique des "fleurs d'eau" toxiques

Chapitre II : Quelques exemples de "fleurs d'eau" de cyanophycées dans la région limousine.

Section 1) Etude régionale pendant la saison 1992

Section 2) "Fleur d'eau" à Lavaud

Chapitre III : Toxicologie humaine.

Section 1) "Bloom" toxique

Section 2) Symptomatologie

Section 3) Biologie - Radiologie

Section 4) Toxicité indirecte ?

Chapitre IV : Mesures préventives - Discussion.

Section 1) Prise de conscience

Section 2) Problèmes rencontrés

Section 3) Solutions

CONCLUSION

LEXIQUE

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Dans des conditions particulières, les Cyanophycées ou Algues Bleues peuvent proliférer massivement en eaux douce et marine pour former à la surface de l'eau ce qu'on appelle une "fleur d'eau" ou "bloom algal".

Ces Algues ont été responsables de la mort d'animaux dans beaucoup de pays et sont également reliées à quelques formes de maladies humaines.

Nous ne traiterons dans cette thèse que la "fleur d'eau" en eau douce en expliquant, dans un premier temps, comment se passe le phénomène, et quelle est son ampleur.

Dans un deuxième temps, on montrera que les Cyanophycées peuvent se révéler toxiques vis à vis de l'homme.

Enfin, on expliquera, malgré les problèmes rencontrés, comment lutter contre ces Algues peu banales et prévenir toute atteinte humaine possible.

I - GENERALITES SUR LES FLEURS D'EAU

1) Classification des Cyanophycées - Notions générales (1, 2)

Les algues sont des organismes vivants possédant naturellement de la chlorophylle dans toutes leurs cellules et croissant dans le milieu aquatique ou dans un milieu très humide.

La flore algale des eaux douces est beaucoup moins riche que celle des eaux marines mais dans les deux cas il existe des algues benthiques * et planctoniques *.

Le limnoplankton * est constitué en partie d'algues microscopiques. Les caractéristiques fondamentales de toutes ces algues n'en restent pas moins les mêmes:

- présence de chlorophylle a : capacité de photosynthèse *
- vie aquatique
- absence de vaisseaux conducteurs
- différenciation cellulaire peu poussée

Les différents embranchements des algues reposent sur des caractères cytologiques et biochimiques regroupant les chlorophycophytes, chrysophycophytes, cyanophycophytes, phéophycophytes, pyrrophycophytes et rhodophycophytes (3). Les cyanophycophytes ou cyanophycées sont des algues unicellulaires ou pluricellulaires, aérobies à Gram négatif, considérées par certains comme une subdivision des eubactéries phototrophes * (4). Certes, elles sont différentes car elles ne possèdent ni noyau véritable (on parle de procaryote), ni mitochondries, ni corps de Golgi, ni chromatophores : la chlorophylle et les pigments surnuméraires qui l'accompagnent (biliprotéides bleus appelés phycoyanine donnant le nom à l'algue : cyanophycées, biliprotéides rouges ou phycoérythrine, et carotène) (3, 5-7) et qui souvent en modifient la couleur, ne sont pas portés sur des organites de forme déterminée, les chloroplastes, mais sont dispersés dans le cytoplasme qui prend alors une couleur homogène variant du bleu-vert au vert noirâtre, brunâtre rouge - bleu ou bien encore violet. Les réserves photosynthétiques sont constituées par du glycogène (8) ; des vacuoles gazeuses existent dans les cellules de cyanophycées planctoniques : elles contiennent de l'azote et servent de flotteurs. De telles vacuoles naissent aussi dans les cellules de cyanophycées placées dans un milieu privé d'oxygène (5, 8).

Chaque cellule possède une paroi pectocellulosique profonde et rigide, la locula, soudée au protoplasme, une couche intermédiaire ou vagina et une gaine mucilagineuse. La gélification de cette gaine est surtout importante chez les Nostocacées.

Les cyanophycées ne possèdent ni cil, ni flagelle ; elles sont mobiles par reptation, glissement, mouvements rotatoires, ou oscillation de la partie terminale.

Le noyau des cellules est remplacé par un corps central (cytoplasme + chromatine) qui n'est pas séparé du cytoplasme par une membrane nucléaire (9) et qui, lors de la division, ne forme pas de chromosomes. Les cyanophycées sont des organismes végétaux sans reproduction sexuée mais à reproduction par multiplication végétative (division binaire des cellules qui assure la multiplication des espèces unicellulaires et la croissance des formes pluricellulaires), ou par des spores non nageuses telles que les coccospores rondes inertes ou hormospores pluricellulaires, mobiles par rotation reproduisant la plante mère (4,8).

Les cyanophycées sont constituées d'éléments identiques isolés ou disposés en file linéaire, le filament.

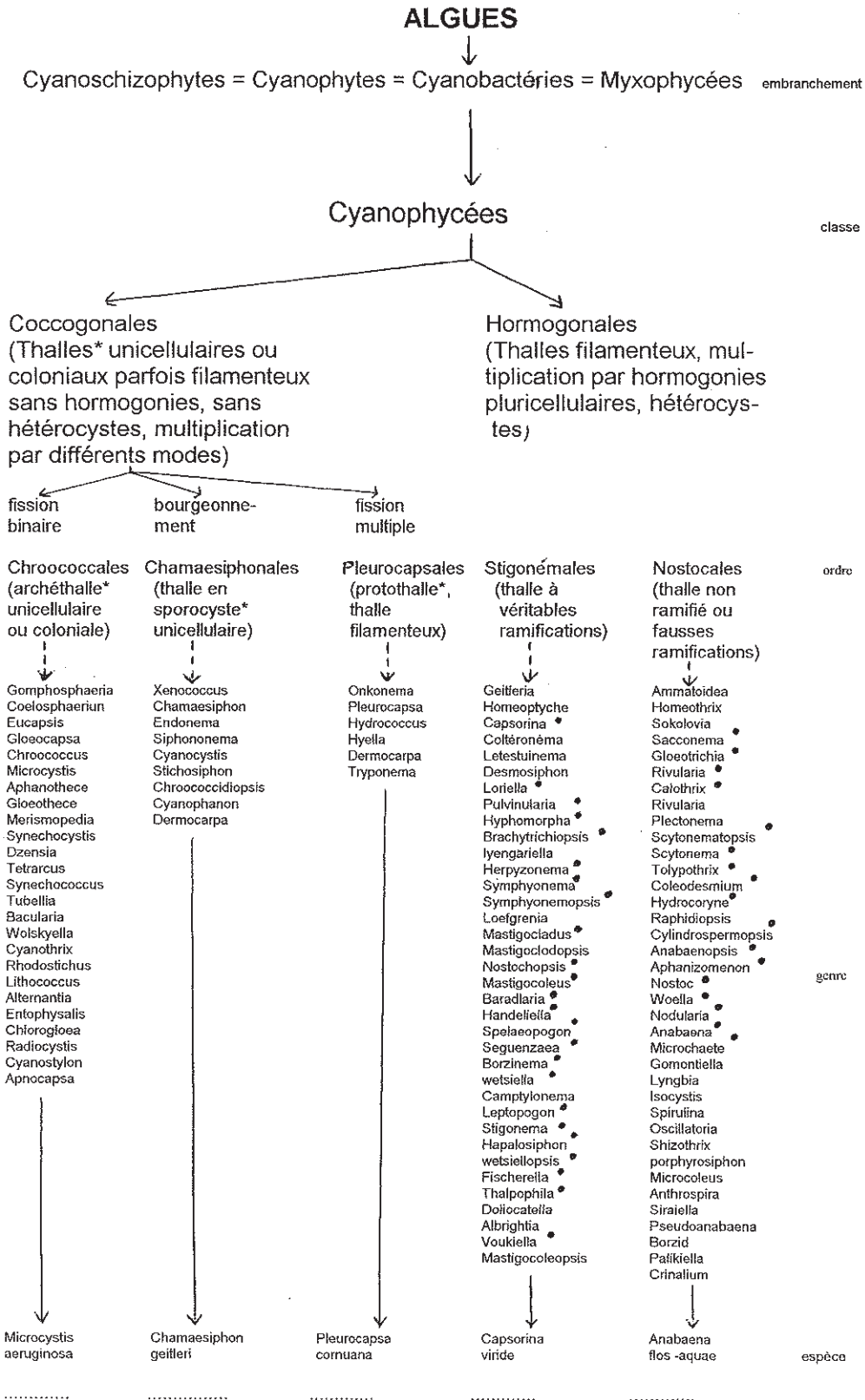
Même si elles sont fondamentalement photoautotrophes (leur chromatoplaste feuilleté et imprégné de chlorophylle assurant ce mode de nutrition), quelques rares espèces *Spirulina*, *Oscillatoria* apparaissent être facultativement hétérotrophes * et s'adaptent lentement de manière à utiliser du glucose à l'obscurité (7, 8).

On distingue plus de 2000 espèces de cyanophycées formant environ 150 genres et 20 familles qu'on regroupe en cinq ordres : (4,7)

- chroococcales
- pleurocapsales
- stigonémales
- chamaesiphonales
- nostocales

Tous les biologistes ont la même conception du découpage des cyanophycées en familles, mais le classement en différents ordres varie d'un auteur à l'autre.

On retiendra la classification suivante :



Ces espèces vivent pour la plupart dans la mer, les eaux douces ou sur les sols humides. Elles possèdent une grande adaptabilité et peuplent des milieux aquatiques variés : ruisseaux, lacs, pavés humides, rochers des cascades où elles forment un enduit vert-bleu plus ou moins onctueux. Les plus sévères conditions de possibilité de vie n'arrêtent pas leur vie active. Ainsi les trouve-t-on dans les eaux très chaudes, très froides, eaux douces, eaux chargées en sels... (8).

Malgré leur très petite taille, certaines jouent dans la nature un rôle extrêmement important. Ainsi les *Nostoc*, *Calothrix*, *Anabaena* symbiotiques et bien d'autres encore savent assimiler l'azote de l'eau et de l'air grâce aux hétérocystes *. En effet, comme les bactéries, certaines cyanophycées peuvent, par le biais de l'azote atmosphérique, enrichir le sol en composés organiques nécessaires à la nutrition des plantes. L'azote entre alors dans le cycle de la matière vivante. Les cyanophycées ont une grande capacité de synthèse de matière et une grande rapidité de division cellulaire. A elles seules, même microscopiques, elles peuvent couvrir la surface entière d'un lac (8).

2) La "fleur d'eau"

a) Définition - Développement (1, 10, 12) (fig. 2)

L'eutrophisation, du mot grec "*eutrophos*" signifiant "bonne alimentation, sur-alimentation", est un processus évolutif, naturel ou provoqué, rendant un écosystème, et particulièrement un lac, de plus en plus riche en organismes vivants et en matières organiques. Il arrive ainsi que l'évolution des algues se trouve accélérée lorsque les conditions deviennent favorables. Cette croissance importante du phytoplancton peut atteindre une épaisseur de plusieurs centimètres à la surface de l'eau, dominer nettement et priver presque totalement de lumière et d'oxygène les couches d'eau inférieures.

Les cyanophycées constituent souvent la plus grande proportion du phytoplancton dans les eaux eutrophiques * (8).

Leur pullulation peut être rapide et surabondante. Ce type d'algue adapté aux eaux très minéralisées est capable de descendre au fond de l'eau pour aller chercher les éléments nécessaires à sa croissance et y pulluler ; les cellules se vacuolisent, se remplissent de lipides, sécrètent en abondance un mucilage diffusant (13) ; elles remontent ainsi à la surface, se réunissent et donnent au bout de quelques jours des amas gluants de matière mucilagineuse. A ces masses gluantes gélatineuses, communiquant à l'eau une coloration soutenue particulière (8, 14), on donne le nom de "fleur d'eau" ou "bloom algal" en anglais ; ces termes correspondent à un aspect particulier de la productivité (3, 13).

Les conséquences de ces "fleurs d'eau" peuvent être catastrophiques pour la pisciculture. En effet, leur influence est à la fois d'ordre mécanique et chimique : d'une part, elles emprisonnent et immobilisent dans un réseau inextricable et gluant, les crustacés, larves, alevins de poissons qui ne tardent pas à mourir épuisés. D'autre part, les cyanophycées sont rapidement décomposées lors des chaleurs orageuses accompagnées de baisses barométriques ; elles meurent, tombent au fond en achevant de consommer le peu d'oxygène qui reste car la quantité de matière organique très divisée qu'elles constituent brusquement absorbe tout l'oxygène dissous. La raréfaction de l'oxygène permet aux bactéries anaérobies d'attaquer les matières organiques en profondeur. Les poissons périssent ainsi en masse par asphyxie.

Lors du phénomène "fleur d'eau", les cyanophycées rejettent des substances de type antibiotique qui arrêtent ou ralentissent la multiplication de toute autre espèce qu'elles-mêmes (3, 7, 8, 15).

On voit donc l'importance des "fleurs d'eau" de cyanophycées sachant qu'elles peuvent proliférer en eau eutrophique pour constituer 90 % de la biomasse en dessous des limites de lumière dominant alors l'écologie de l'eau (15).

b) Cyanophycées mises en cause (15-19)

Les espèces de cyanophycées les plus rencontrées dans la "fleur d'eau" sont *Microcystis aeruginosa* et *Anabaena flos-aquae*. En fait, on peut distinguer deux grands groupes de cyanophycées à espèces variées à l'origine des "fleurs d'eau". Ceux-ci incluent :

- groupes à hétérocystes fixant l'azote : *Anabaena* étant le plus courant puis *Aphanizomenon*, *Gloeotrichia*, *Cylindrospermopsis*, *Nostoc* et *Nodularia*.

- quelques espèces sans hétérocystes, donc ne fixant pas l'azote : *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Schizothrix*, *Spirulina*, *Lyngbia*, *Gomphosphaeria* et *Aphanothèce*.

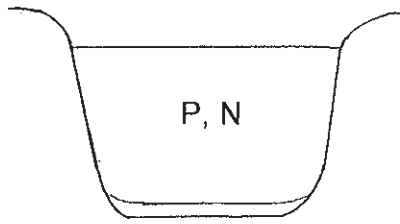
Dans certains lacs auvergnats et alpins, les "fleurs d'eau" en juillet-août sont composées en grande partie par *Aphanizomenon flos-aquae* (7).

c) Conditions

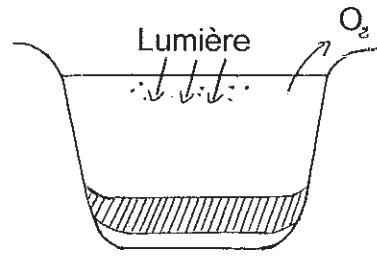
Ce phénomène naturel inquiétant se développe en particulier dans les barrages fermiers, les réservoirs, les étangs, les lacs, les rivières lentes, soit tous les milieux se renouvelant lentement ou pas du tout (9, 12). En temps normal les matières organiques dissoutes proviennent de la décomposition de la faune et de la flore aquatiques (1, 19). Mais en cas d'enrichissement en sels minéraux, la prolifération des algues s'accélère (1, 12, 17, 20-23).

Les éléments fertilisants exogènes proviennent des activités humaines (1) : épandage d'engrais partiellement emportés par les eaux de ruissellement, de versement des eaux usées, des égouts urbains, eaux résiduelles d'usines agricoles, industries papetière, énergétique, alimentaire (16). Les eaux qui s'enrichissent en nutriments sont dites eutrophes (7).

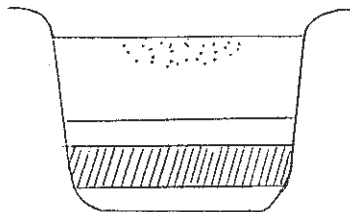
L'examen des cycles d'azote et du phosphore montre que les apports en ces deux éléments sont fixés à certaines périodes par les microorganismes, mais aussi par les végétaux et piégés dans les sédiments en complexes ferriques ou manganiques (fig 3 et 4). Le relargage d'azote et de phosphore par les sédiments est un processus complexe gouverné par l'interaction de nombreux mécanismes physiques, chimiques et biologiques (24). Il constitue le facteur déclenchant de la pullulation des cyanophycées (16, 17).



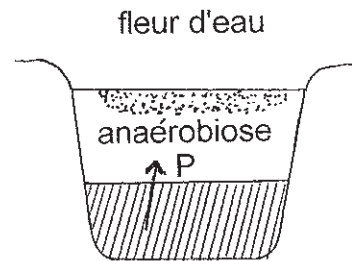
1) apports de N et P par les
eaux usées et lessivage
=
pollution croissante



2) prolifération des algues
donc augmentation des
matières organiques,
sursaturation en O₂,
épuisement du CO₂



3) après la mort des algues ,
il y a décomposition aérobie
donc consommation d'O₂ dans
les couches profondes par
les saprophytes.
Les sédiments s'enrichissent
en matières organiques.



4) Dans certaines conditions il y
relargage des PO₄³⁻ piégés dans
les sédiments donc croissance
accrue des algues. Au stade
ultime il y a chute totale de l'O₂,
la fermentation anaérobie putride
dégage du sulfure d'hydrogène H₂S
et de l'ammoniac.

Fig 2 : Phénomène de la "fleur d'eau" (25)

⇒ Phosphore : P (21, 26)

Le phosphore est le nutriment le plus incriminé, utilisé sous forme biodisponible : les orthophosphates. Quand ces derniers sont apportés au milieu, l'enrichissement en cyanophycées peut être considérable et brutal.

Dans le livre sur la Limnologie (7), Hammer déjà en 1964 constatait son implication : *Anabaena flos-aquae* apparaissait dès que la teneur en phosphates atteignait une valeur de l'ordre de 15 à 30 mg/ m³ ; au moment de la "fleur d'eau", cette concentration était voisine de zéro

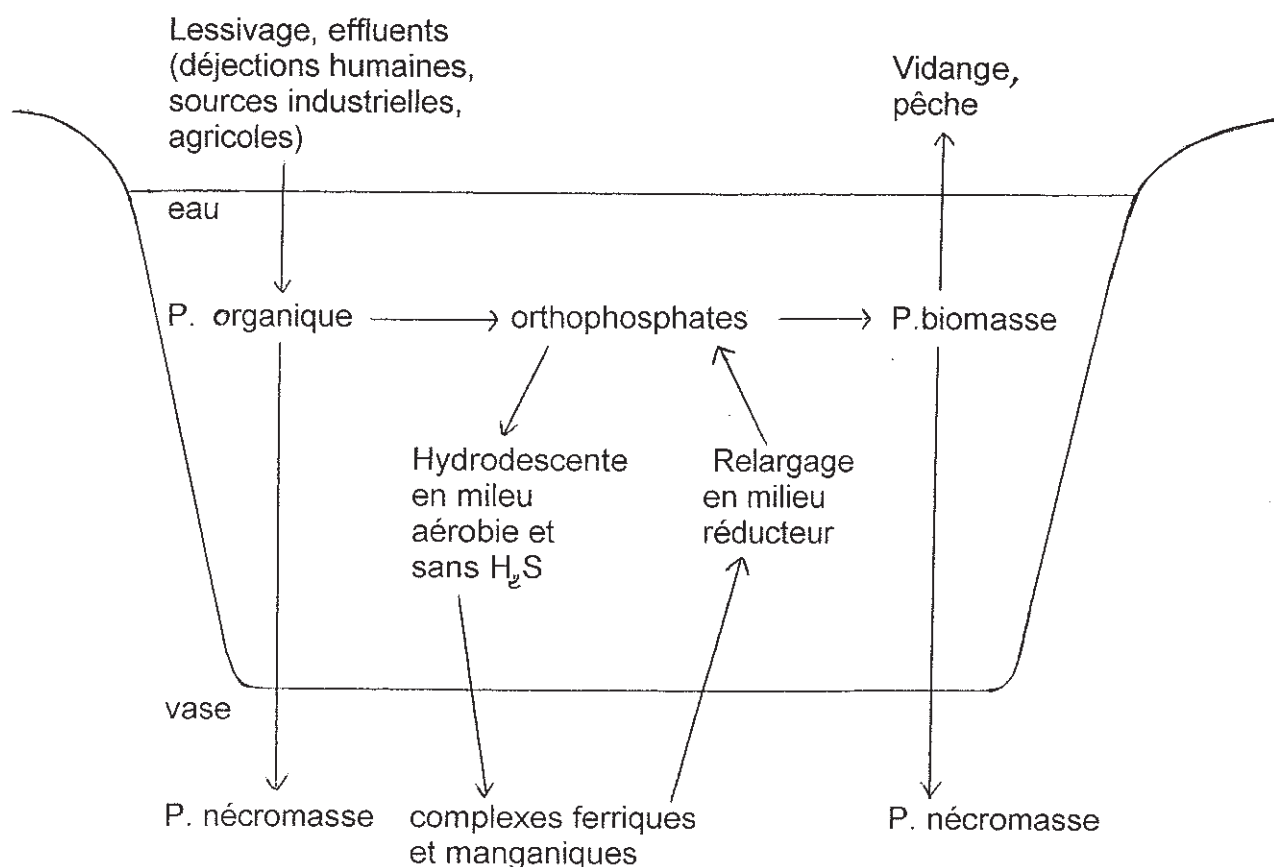


Fig 3 : Cycle du phosphore dans un lac (24).

⇒ Azote : N (6, 7, 15, 21)

Certaines cyanophycées utilisent les ions NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- et divers produits organiques azotés (acides aminés, urée, amides...) (26).

D'autres fixent directement l'azote atmosphérique à partir des oses qu'elles synthétisent ou le trouvent dans leur alimentation, et le transforment en azote organique.

L'absence de photosynthèse écarte ainsi la production d'oxygène qui inhibe lui-même la nitrogénase (enzyme responsable de la fixation de l'azote atmosphérique, localisée dans les hétérocystes) (27). Ces espèces fixatrices possèdent une grande capacité de stockage du phosphore et une aptitude à la migration verticale, leur permettant ainsi d'exploiter des gradients de nutriments et de lumière pour qu'elles puissent être dominantes. La fixation d'azote exige une température assez élevée de l'ordre de 25°C .

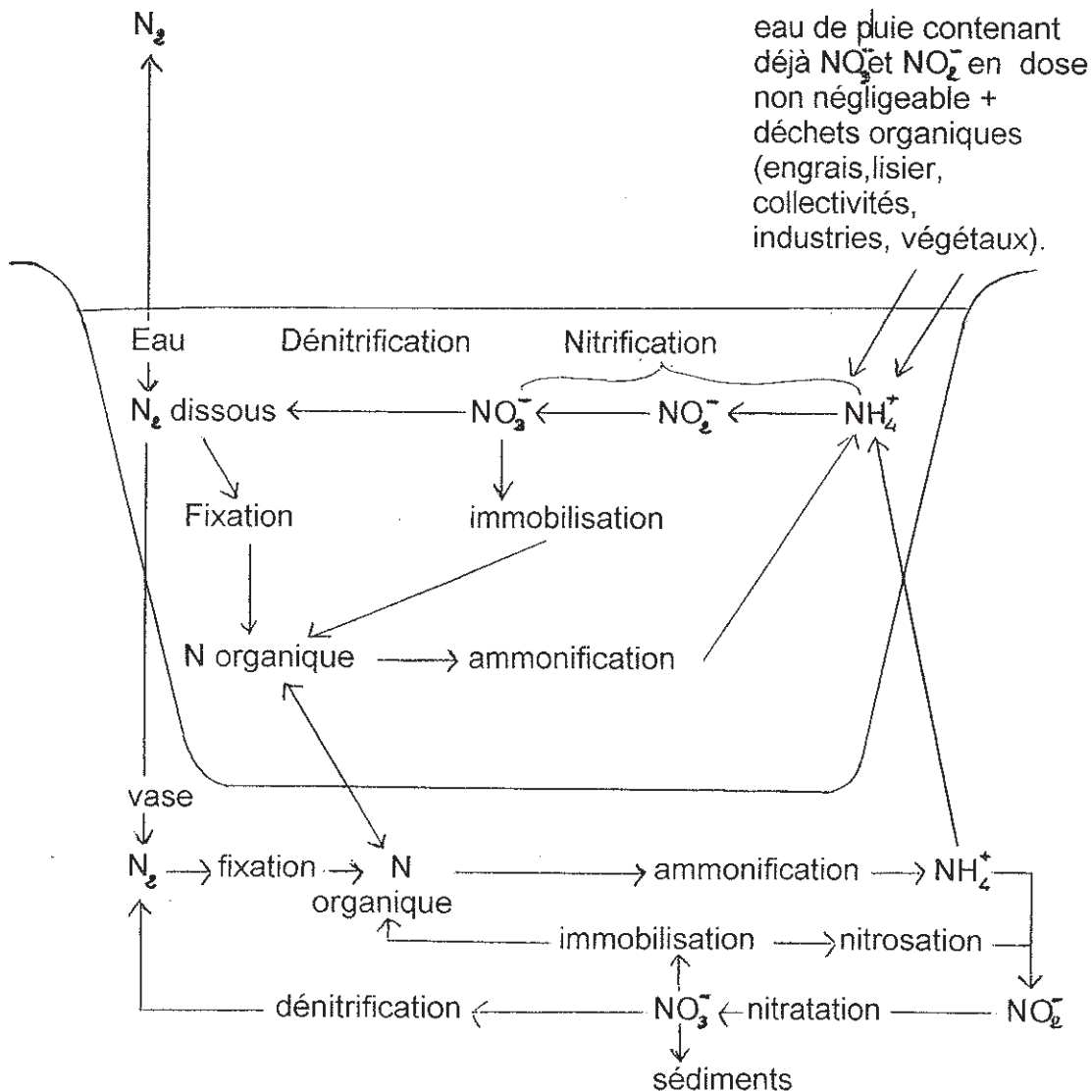


Fig 4 : Cycle de l'azote dans un lac

Le changement des concentrations en nutriments azotés et phosphorés est à l'origine de l'intense et rapide pullulation des cyanophycées (26). En région tempérée, la diminution du rapport TN /TP (rapport de l'azote total sur le phosphore total exprimé en atomes grammes) en dessous de 29 favorise le développement des cyanophycées fixatrices d'azote atmosphérique (24, 28). La proportion de ce type d'algues est inversement proportionnelle au rapport TN/TP (24). Ce dernier peut descendre jusqu'à 5 dans les eaux polluées riches en phosphates. On note que si le rapport :

. Silice/ Phosphore diminue : les diatomées passent le relais aux chlorophycées et aux cyanophycées (la silice étant le facteur limitant des diatomées) (27).

. Azote/ Phosphore diminue : les chlorophycées laissent place aux cyanophycées fixatrices d'azote (27).

D'une manière générale, on dit que le phosphore est un facteur limitant * pour les espèces fixatrices d'azote atmosphérique mais beaucoup de questions restent encore non élucidées (26).

⇒ Dioxyde de carbone : CO_2 (29)

Le dioxyde de carbone atmosphérique alimente la croissance des algues photosynthétiques. Ce gaz est utilisé le jour et restitué sous forme condensée d'oxygène. Reste cependant le fait que le CO_2 ne peut être directement incriminé vu que la "fleur d'eau" peut être due à des cyanophycées non photosynthétiques n'utilisant donc pas ce gaz.

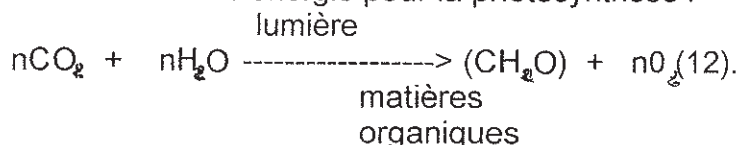
⇒ Oxygène : O_2

La désoxygénation de l'interface eau-sédiment a pour effet de réinjecter dans l'eau les phosphates stockés, car il se crée un environnement réducteur qui permet le passage des Fe^{3+} liés aux PO_4^{3-} dans les sédiments, à Fe^{2+} (24,28) (fig. 3).

Certaines cyanophycées interrompent leur respiration dans des conditions anoxiques et utilisent alors le sulfure d'hydrogène (H_2S) au lieu de l'eau et libèrent du soufre et non de l' O_2 (7).

⇒ Lumière (3, 14, 26)

Elle est source d'énergie pour la photosynthèse :



Une intense lumière n'est pas à l'origine d'une pullulation massive de la biomasse algale car la photosynthèse chez les cyanophycées peut être initiée à de faibles intensités lumineuses (19). La "fleur d'eau" s'auto-intensifie jusqu'à ce qu'elle s'autolimite de lumière (27).

⇒ Climat (7, 24, 26, 27, 30)

Une "fleur d'eau" arrive lorsque le climat devient sec, ensoleillé et chaud (températures allant de 15 à 35° C) (14-16, 20-22, 31). Pour comprendre le phénomène, il faut étudier les phénomènes thermiques dans l'eau:

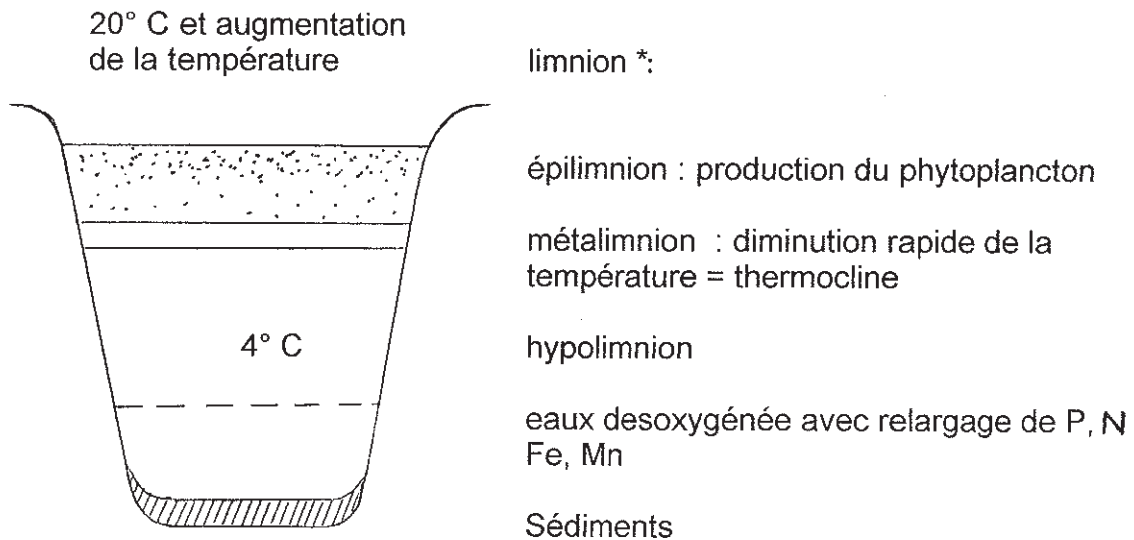
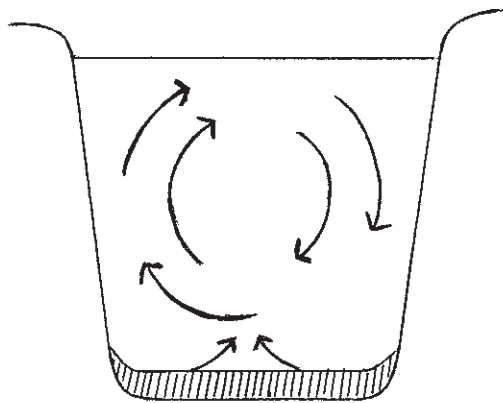


Fig 5 : Stratification thermique des eaux dans un lac eutrophique en situation estivale.

Plus la température à l'extérieur augmente, plus la stratification s'accroît au sein de l'eau. Progressivement l'eau de l'hypolimnion se dés-oxygène, ce qui permet le relargage du contenu des sédiments. Les cyanophycées viennent chercher les nutriments en profondeur et remontent à la surface grâce à leurs vacuoles gazeuses. Lorsque la température atteint 25° C, les diatomées sont rapidement remplacées par les chlorophycées, lesquelles laissent place aux cyanophycées vers 35° C. Une différence de 8° C sépare l'optimum de productivité primaire des chlorophycées de celui des cyanophycées (25)

Ces dernières peuvent également être réactivées à la suite d'un changement de temps récent : chute des températures, vent, orage, pluie. Ce temps, non seulement entraîne par ruissellement d'autres apports nutritifs et cyanophycées en profondeur, mais favorise également un brassage général des eaux : en effet, les eaux superficielles se refroidissent suffisamment pour s'enfoncer et atteindre l'hypolimnion .



mélange vertical des masses d'eau superposées lors de la stratification = circulation des eaux par homogénéisation thermique qui distribue N et P dans la masse d'eau.

dégradation et sédimentation de la matière organique produite en période estivale.

Fig 6 : Destratification thermique des eaux dans un lac eutrophique en situation automnale (changement de temps).

Le brassage des eaux permet de redistribuer les nutriments biodisponibles et de les mettre à disposition du phytoplancton. C'est pourquoi une "fleur d'eau" peut apparaître brutalement à l'arrivée de l'automne.

Citation : "Le temps qui avait été chaud et sec pendant six semaines a changé soudainement dans la soirée du 9 août... une lourde pluie est tombée et la température a chuté de façon marquée ; le temps frais couvert a duré quelques jours. L'eau du lac est devenue brunâtre ; elle paraissait contenir un matériel fin flocculant suspendu. Une petite quantité de couche mousseuse brune était visible le long des rives..." (26).

Certes, la substance eutrophisante la plus incriminée est le phosphate, mais chaque eau douce a des conditions locales particulières et il faut tenir compte d'autres facteurs agissant conjointement :

- excrétion de produits par les cyanophycées qui suppriment la croissance des autres phytoplanctons (3, 7, 8, 15) : on parle d'hétéroantagonisme.

- lenteur de renouvellement de l'eau : l'eutrophisation ne se traduit pas si la biomasse est évacuée au fur et à mesure qu'elle se forme (28). Les retenues d'eau sont donc les premières touchées.

- bas niveau de l'eau (21) : la baisse du niveau modifie considérablement l'ensemble des conditions physico-chimiques. La masse d'eau devenue moins importante s'échauffe, accélérant la destratification lors d'un changement de temps ; l'équilibre des sels de l'acide carbonique est perturbé ; le pH est modifié ; la teneur en oxygène change ; le milieu peut devenir anaérobie (6,14).

- pH > 6 ; les cyanophycées se développent mieux à pH 8 (6, 7, 14).
- diminution de la concentration des métaux lourds dans l'eau (26).

d - Caractères organoleptiques

Une population d'algues d'une telle densité est visible à l'oeil humain (17) : l'eau contenant une "fleur d'eau" de cyanophycées prend une couleur anormale qui varie selon le type d'algues : brun-rougeâtre, bleu-vert, bleu-laiteux ou vert brillant (14, 26).

Ainsi, la pellicule de cyanophycées à la surface de l'eau altère fortement la transparence et apparaît contenir un matériel fin, flocculeux, suspendu. S'il s'agit d'une eau retenue, une couche d'aspect gras peut se trouver le long des rives.

Citation : "le propriétaire avait noté une couche verte accumulée le long de la rive quand son animal buvait" (26).

De plus, le "bloom" de cyanophycées transmet une odeur et un goût désagréables à l'eau (9, 32-34). La relation a été démontrée très tôt, dès 1883 (17).

En effet, les cyanophycées produisent plusieurs métabolites (31). Parmi eux, le bétacyclocitrone qui a une odeur typique de tabac, et une large gamme d'hydrocarbures, d'acides gras, de composés aromatiques, cétones, terpènes, amines et sulfures, peuvent aussi donner une odeur et un goût particuliers aux poissons et aux autres organismes aqueux. Des espèces de cyanophycées telles que *Lyngbia*, *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis weissenbergii* produisent des hydrocarbures aliphatiques et particulièrement des n-heptadécanes. D'autres synthétisent des acides gras en C16 et C18, et leurs esters donnent un goût désagréable avec le 2 aminopropane, la triméthylamine, le 1 - aminopropane et l'éthanolamine.

Cependant, ces modifications organoleptiques peuvent être cachées si l'eau est utilisée pour la cuisine (32), notamment si le niveau du plan d'eau est bas (21).

c - Période (26)

La durée d'une "fleur d'eau" porte sur un temps plus ou moins long, souvent une à plusieurs semaines, et varie avec la localisation mais aussi avec l'espèce (27).

D'une manière générale, il existe un caractère saisonnier car les "fleurs d'eau" se répètent suivant un même cycle d'une année à l'autre (19).

En raison de la période de croissance végétale ininterrompue, la productivité des lacs et réservoirs tropicaux est généralement plus élevée que celles des plans d'eau tempérés. Le développement d'une "fleur d'eau" n'est pas soumis à un cycle annuel et peut se manifester à toute période de l'année (24, 32). En Australie, l'apparition de *Microcystis aeruginosa* et d'*Anabaena flos-aquae* est annuelle avec une plus grande fréquence pendant la saison chaude, on dit que le "Barcoo" est endémique * (32, 33).

Dans les pays tempérés, le temps chaud et sec reste un facteur déclenchant, c'est-à-dire une période allant de l'été jusqu'au début de l'automne (1, 7, 8, 14, 34).

En Ecosse, des réservoirs ont supporté des "fleurs d'eau" de juin jusqu'à début décembre.

En Amérique du Nord, les concentrations de cyanophycées sont suffisantes pour former des "blooms" durant les mois d'été.

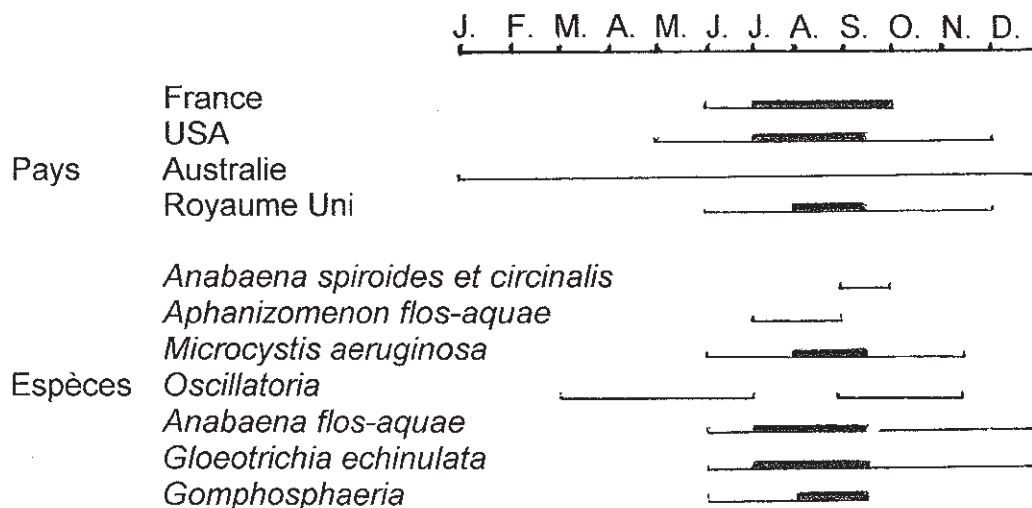


Fig. 7 : Répartition des fleurs d'eau dans l'année en fonction de certains pays et certaines espèces (7, 14, 15, 22, 29, 35, 36).

— fréquence moindre
 ——— fréquence importante

3 - Espèces toxiques - toxines

De toute les "fleurs d'eau" d'algues apparues jusqu'à présent, celles des cyanophycées restent les plus nuisibles (18).

L'estimation de la toxicité, faite à partir de 300 sites européens entre 1981 et 1989 par des injections intrapéritonéales sur la souris, indique une incidence de toxicité de 45 à 75 % (18, 22, 26). Des cinquante genres, trois ont été de loin montrés comme toxiques : *Anabaena*, *Microcystis* et *Aphanizomenon* (9, 15, 22, 31, 34) ; cinq autres interviennent également : *Oscillatoria*, *Gomphosphaeria* (= *coelosphaerium kutzingianum*), *Nostoc*, *Nodularia* et *Cylindrospermopsis* (15, 22, 34).

a - Espèces toxiques (18)

⇒ ordre des chroococcales :

● *Microcystis aeruginosa* (26) (aussi connue comme *Anacystis mereghini* ou *Anacystis cyanea*) : c'est l'espèce la plus souvent incriminée et celle qui se distribue le plus largement du point de vue géographique (31, 35, 36). Cette algue bleu-vert, globuleuse, cosmopolite, se trouve le plus souvent dans les bas fonds des eaux douces. C'est d'ailleurs la première algue à avoir été identifiée comme toxique : *Microcystis aeruginosa* a été montrée comme ayant des besoins relatifs en phosphore assez bas et démontre sa capacité à utiliser du sulfure comme alternative au phosphore dans son métabolisme donnant préférence à l'élément qui est présent en quantité suffisante (37). La température optimale pour sa croissance est de 32,5°C (34). A cette température, elle produit une petite quantité de toxines (production maximale des toxines à 25°C) (34).

Microcystis aeruginosa a un fort besoin en azote et sa croissance devient maximale lorsque le taux TN/TP est haut. Cependant la proportion des clones toxiques varie entre 6 et 86 % (18,31).

● *Microcystis viridis* (35) : elle se présente sous forme d'agrégats d'unités cellulaires cubiformes qui apparaissent à la surface, coexistant avec d'autres cyanophycées en petit nombre. Elle produit une nodularine ainsi que des microcystines- RR - YR et -LR (14,31) et sa toxicité est plus forte que celle de *Microcystis aeruginosa*. C'est une algue qui contribue à la toxicité du "bloom" (31).

⇒ Ordre des nostocales

● le genre *Oscillatoria* peut croître à basse lumière ou en absence de lumière en utilisant le carbone organique assimilable (15, 38). Il produit principalement des hépatotoxines dont les plus dangereuses proviennent d'*Oscillatoria agardhii* (38). Les Oscillaires se déplacent par reptation et forment souvent de grandes plaques d'un vert-bleu sombre.

● *Anabaena flos-aquae* : elle reste avant toute l'algue responsable de la plupart des incidents graves, des empoisonnements dramatiques (26). Elle contient des alcaloïdes toxiques neuromusculaires qui agissent rapidement et auxquels les ruminants et oiseaux sont les plus sensibles (26). Cependant, la toxicité varie beaucoup en fonction des conditions d'environnement (34).

● *Aphanizomenon flos-aquae* (26,34) : dans les conditions normales de croissance, les toxines qu'elle contient ne sont pas relarguées. Il faut absolument une lyse cellulaire provoquée par un traitement chimique pour libérer alors les endotoxines: aphantoxines, ichtyotoxines, saxitoxines.

● *Cylindrospermopsis raciborskii* : trouvable dans toutes les eaux douces australiennes, ce genre est responsable du "Barcoo" (33) (maladie diagnostiquée comme étant due à une endotoxine relarguée suite à la destruction de l'algue tropicale par le cuivre ; la maladie varie en durée et sévérité) (32).

Une température au dessus de 25°C est nécessaire pour une croissance vigoureuse de l'espèce (19).

Liste des cyanophycées d'eau douce ayant présenté des souches toxiques : (14-18, 22, 29, 34, 36).

Ordre des chroococcales

Coelosphaerium kutzingianum (= *gomphosphaeria*).

Microcystis aeruginosa

Microcystis farlowiana

Microcystis flos-aquae

Microcystis viridis

Microcystis wesenbergii

Ordre des stigonémales

Fischerella

Hapalosiphon.

Ordre des nostocales

Anabaena affinis
Anabaena circinalis var. *contracta*.
Anabaena flos-aquae
Anabaena lemmermannii
Anabaena raciborskii
Anabaena spiroides
Aphanizomenon
Cylindrospermopsis raciborskii
Gloeotrichia echinulata
Lyngbia birgei
Microcoleus
Nodularia spumigena
Nostoc muscorum
Nostoc rivulare
Oscillatoria agardhii
Oscillatoria agulteria
Oscillatoria rubescens
Schizothrix calcicola
Scytonema hofmani
Scytonema pseudohofmani
Spirulina
Tolypothrix

b - Les toxines (18)

Les différentes souches de cyanophycées produisent deux types de toxines surtout à la fin de la croissance : les cytotoxines et les biotoxines (7, 17), qui sont produites dans les cellules en cours de développement et libérées dans le milieu jusqu'à ce que celui-ci devienne impropre à la multiplication de ces mêmes cellules. Il se produit un autoantagonisme et blocage de la population. Les cyanophycées accumulent alors les substances actives (7).

Les cytotoxines sont détectées par des essais sur des cultures de cellules mammifères (17). Aucune évidence n'existe sur la mort d'animal due à cette sorte de toxine (17).

Les biotoxines sont les composés les plus courants, produisant les intoxications humaines et animales (17).

On observe un nombre de toxines physiologiquement différentes (26). La nature précise de la plupart de ces composés est encore peu claire et les toxines elles-mêmes peuvent changer de "bloom" en "bloom" même au sein d'une même espèce : il y a hétérogénéité génétique (9, 15, 26, 29, 39).

Les toxines qui s'accumulent dans les cellules viables (= endotoxines) agissent soit après ingestion de celles-ci, soit après libération lors de la lyse algale. Les exotoxines, elles, sont relarguées hors de la cellule, de façon libre, à cause de la perméabilité ou de l'âge des cellules algales (14, 22). Ces exotoxines possèdent une fonction antibiotique ; elles jouent un rôle dans le comportement des espèces et leur dominance, dans la protection contre le broutage (18).

Ces toxines sont stables à la chaleur et aux acides, solubles dans l'eau (14).

Deux principaux genres sont généralement rencontrés : les hépatotoxines qui sont des peptides et les neurotoxines qui sont des alcaloïdes (22). A ceux-là s'ajoutent les aphantoxines et les LPS endotoxines (22). De nombreux synonymes ont été employés simultanément. Les termes de VFDF (very fast death factor donnant la mort d'animaux en quelques minutes), FDF (fast death factor, mort en 1 à 3 heures) et SDF (slow death factor provenant de la dégradation lente des produits d'origine algale) (7), utilisés dans les premiers travaux, sont maintenant abandonnés (16).

⇒ Neurotoxines (14, 18, 26, 40)

Ce sont des endotoxines rencontrées le plus souvent chez *Anabaena* et *Aphanizomenon flos-aquae* (29, 39). D'autres espèces sont citées : *Anabaena lemmermanii*, *Gomphosphaeria naegeliana*, *Oscillatoria* (17). L'identification de ces toxines a été faite à partir d'extraits de "bloom" ou contenu stomacal de chiens empoisonnés par chromatographie liquide à haute performance (CLHP), chromatographie en phase gazeuse (CPG) et spectrométrie de masse. De toutes les neurotoxines, une seule a été identifiée chimiquement et vérifiée les propriétés toxicologiques et pharmacologiques : l'anatoxine-a (17). Produite par certaines espèces d'*Anabaena flos-aquae* qui en donnent le nom (26), c'est un alcaloïde de petite taille (PM = 166 Da), de structure rigide, soluble dans l'eau, très stable.

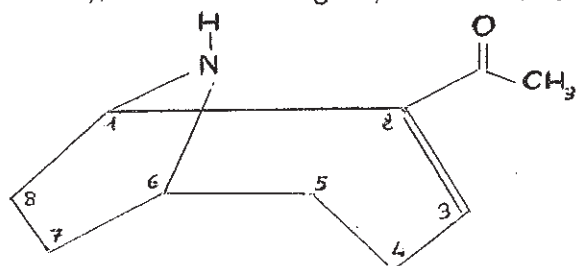


Fig 8 : Structure chimique de l'anatoxine-a, isolée d'un clone toxique d'*Anabaena flos-aquae* (34).

C'est une amine bicyclique secondaire : 2 - acétyl - 9 azabicyclo 4, 2, 1 non - 2 - ène.

Elle agit comme agoniste spécifique des récepteurs nicotiques postsynaptiques à l'acétylcholine au niveau de la plaque motrice et ce, à très faible concentration (ordre de la nanomole). Au niveau central, aucune sensibilisation n'est apparente. On observe alors une paralysie, d'abord au niveau des muscles squelettiques périphériques puis ensuite des muscles respiratoires. La mort survient chez la souris en quelques minutes par arrêt respiratoire (29). La dose létale 50 (DL50) est de 10 à 60 mg/kg.

A cause de son poids moléculaire relativement faible, l'anatoxine-a, est rapidement absorbée quand elle est prise avec de l'eau. Une modification mineure de cet agent anticholinestérasique et une variation de la configuration géométrique ont une petite influence sur le blocage. En effet, la méthylation diminue la puissance agoniste et la puissance de contraction, probablement à cause des interactions stériques. Cependant, l'anatoxine-a n'est pas hydrolysée par la cholinestérase puisqu'elle ne possède pas de fonction ester.

A cette anatoxine-a, s'ajoutent d'autres anatoxines-b,- c,- d (26, 34).

L'anatoxine-b, est également une neurotoxine qui présente une activité anticholinestérasique ; elle est plus toxique que l'anatoxine-a (15).

L'anatoxine-c serait un peptide (15).

L' anatoxine-d est de nature inconnue.

Toutes ces dernières neurotoxines sont produites principalement par la même cyanophycée : *Anabaena flos-aquae*.

⇒ Hépatotoxines (17,22,35)

L'effet neurotoxique plus rapide, peut masquer un effet hépatotoxique simultané, dû à la présence d'une endotoxine peptidique (26, 34, 39). Le nom d' "hépatotoxine" vient du fait de l'impact sur le foie, site premier de toxicité aiguë (15, 19).

Les hépatotoxines sont deux fois plus courantes dans les "fleurs d'eau" que les neurotoxines et sont produites par *Microcystis aeruginosa* (la plus commune des cyanophycées toxiques), *Microcystis viridis*, *Microcystis wesenbergii*, *Microcystis flos-aquae*, *Anabaena flos-aquae*, *Anabaena spiroides*, *Oscillatoria rubescens*, *Oscillatoria agardhii*, *Cylindrospermopsis raciborskii* (16, 18, 19, 26). De là se dégage une catégorie de toxines non volatiles très importantes : les microcystines, encore appelées cyanoginosines qui sont relarguées lorsque les cellules meurent ou sont perturbées (37). On en distingue plus de 24 variétés différentes. Ce sont les toxines les plus fréquentes et les plus anciennement connues ; hépatotoxines hémorragiques puissantes (18), elles ont à leur actif la mort aiguë de nombreux animaux et les atteintes digestives humaines.

Les différentes microcystines -LA, -LR, -RR, -YR, -YM, -YA sont voisines et généralement en mélange. Du point de vue chimique, ce sont des heptapeptides cycliques de masse moléculaire allant de 500 à 4000 Da, indiquant que ces peptides sont les plus gros des toxines des cyanophycées (14). Leurs différences structurales portent sur la variation de deux acides aminés dont les initiales sont utilisées pour dénommer les différentes microcystines :

L : leucine

A : alanine

R : arginine

Y : tyrosine

M : méthionine

Toutes sont détectables par CPG et spectrométrie de masse. La microcystine -LR a été montrée comme l'hépatotoxine la plus puissante (la microcystine -RR étant plus fréquente mais de toxicité plus faible). Elle est soluble dans l'eau et très stable car sa décomposition est limitée (34). La DL 50 est de 50 µg/kg chez la souris (37). Cet heptapeptide toxique, purifié de *Microcystis aeruginosa*, est un puissant inhibiteur spécifique des phosphatases protéiques PP₁ et PP₂ A in vitro (20). Les phosphatases sont des enzymes, facteurs majeurs dans le contrôle de quelques processus cellulaires incluant le métabolisme hydrocarboné, la contraction des muscles et la division cellulaire. Leur inhibition cause une hyperphosphorylation des protéines hépatocytaires incluant les cytokératines responsables de l'orientation des microfilaments et de l'intégrité des filaments intermédiaires. Cette propriété est aussi valable pour les autres microcystines qui sont également transportées par les acides biliaires à travers la muqueuse de l'iléon et qui pénètrent dans le foie, éclatant sa structure et menant à la perte de la morphologie cellulaire (14).

Toxicité chez la souris

On peut observer les phénomènes toxiques suivants : hypertrophie des hépatocytes, activation de la phosphorylase A, augmentation du Ca^{2+} cytoplasmique sans toucher à l'AMP cyclique, diminution de la protection contre les dommages des oxydants, changement des microfilaments d'actine, destruction des sinusoides du foie, hémorragie extensive et nécrose lethales intrahépatiques puis insuffisance hépatique (19, 29). La mort de l'animal arrive 1 heure après l'administration et une grande quantité d'hépatocytes libèrent des enzymes qui apparaissent dans le sérum avant la mort. De faibles doses de toxines administrées sur plusieurs semaines donnent une nécrose hépatique progressive.

Une étude faite sur des échantillons de "bloom" collectés de 1986 à 1989 au lac Kasumigaura (Japon) montrait que sur 68 clones cellulaires de *Microcystis* isolés, on observait des microcystines dans six espèces toxiques parmi lesquelles cinq produisaient des microcystines -RR, -YR, -LR. Une autre espèce produisait la 7-desméthylmicrocystine -LR (31).

D'autres toxines similaires aux microcystines ont été isolées de différentes cyanophycées : la nodularine, autre hépatotoxine est un pentapeptide cyclique produite par *Nostoc spumigena* ou *Microcystis viridis* (14, 18, 31). Cette molécule contient comme la microcystine -LR l'acide aminé ADDA (acide aminé particulier à 20 carbones). In vivo et in vitro, cette toxine partage des similitudes avec l'action des microcystines.

- La microviridine, produite par *Microcystis viridis*, serait un depsipetide tricyclique.

- Une puissante hépatotoxine distincte des microcystines ou nodularines est produite par *Cylindrospermopsis raciborskii* provoquant chez l'homme de sévères hépatoentérites nommées "the Barcoo" en Australie (33).

Toutes ces toxines ont des propriétés toxicologiques similaires et partagent quelques caractéristiques structurales avec les microcystines ; elles sont souvent produites en grande quantité (plus de 1 % du poids sec dans certaines espèces de *Microcystis*). Mais en fait, leur concentration varie beaucoup dans certains lacs et de façon temporaire.

- On signale chez les *Nostoc* des hépatotoxines ayant des activités comparables à celles des toxines de *Microcystis*.

- La toxine d'*Oscillatoria* a été identifiée à une microcystine. Dans les lacs de Sardaigne, la toxicité d'*Oscillatoria rubescens* a été mise en évidence de mars à juin. Sa DL50 correspond à l'injection intrapéritonéale d'extraits aqueux ou à l'ingestion de 800 à 1.000 mg/kg chez la souris.

⇒ LPS endotoxines (26)

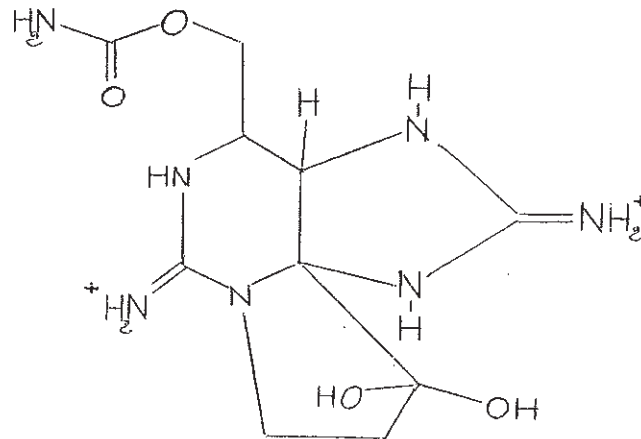
Ces toxines ont été signalées chez *Anabaena sp.* et *Schizothrix calcicola*. Ce sont des lipopolysaccharides, dérivés des parois cellulaires, à coloration de Gram négative. Ces endotoxines se trouvent au niveau des cellules viables des cyanophycées et sont relâchées après la mort de la cellule ou sa désintégration par le sulfate de cuivre (18). Ce relargage peut arriver dans l'estomac ou le rumen quand l'algue est ingérée avec de l'eau de boisson.

De nombreuses gastroentérites ont été rattachées à cette toxine. L'endotoxine isolée ne cause pas toujours de toxicité aiguë chez la souris par injection intrapéritonéale tandis que toutes les toxines polypeptidiques et alcaloïdiques le font.

⇒ Aphantoxines (16, 18, 26, 34)

Ce serait un mélange de deux toxines : saxitoxine et néosaxitoxine ; en tant que neurotoxines d'action rapide entraînant chez la souris une paralysie avec arrêt respiratoire, ces toxines agiraient sur la membrane en bloquant le potentiel d'action calcium-dépendant et en évitant le flux de sodium. On détecte également des tumeurs cutanées (41).

Chez l'homme elle n'est pas létale mais peut provoquer par contact direct des dermatites sévères ou "swimmers itch" et des pétéchies intestinales (15, 29). On parle alors d'irritant de contact (29). On les trouve principalement chez *Aphanizomenon flos-aquae* (15, 22) et *Lyngbia majuscula* mais également chez *Gloeotrichia*, *Oscillatoria*, *Anabaena*.



4 - Répartition géographique des "fleurs d'eau" toxiques

Les "fleurs d'eau" de cyanophycées toxiques touchent toutes les eaux douces stagnantes qui sont de véritables pièges à nutriments : rivières et ruisseaux de faible courant, barrages d'irrigation, mares fermières, étangs, réserves, incluant les eaux utilisées pour les loisirs de l'homme (9, 12, 14, 16, 18, 26, 34, 41).

Cependant, il existe des pullulations rapides et massives qui, bien qu'elles se produisent plus fréquemment dans des zones particulières, déjouent le plus souvent la prévision et disparaissent presque aussi vite qu'elles sont apparues (12). Les cartes d'impact laissent une France curieusement plus épargnée que les autres pays (9, 18, 22). Cela paraît surprenant vu la similitude des climats, de l'hydrologie et des pratiques agricoles avec les Etats atteints par le phénomène. Cela suggère que les conditions environnementales doivent être différentes de ce qui est rapporté (15).

"En 1980, les gouvernements de 26 Etats européens indiquaient que la distribution des "blooms" de cyanophycées toxiques en Europe était beaucoup plus large que les rapports des littératures scientifiques" (15).

Les "fleurs d'eau" de cyanophycées toxiques ont été trouvées dans les eaux douces de 16 pays européens jusqu'à 1989 (22). Ces recherches sont basées sur les rapports d'intoxications et sur les estimations de toxicité en laboratoire : (1, 7, 13, 15, 19, 20, 22).

- Allemagne
- Danemark
- Ecosse (Loch Avich, Loch Awe, Loch Insh)
- Finlande (Lac Ostra kyrksundet, Lac Aland, Lac Dragsfjord)
- Grèce
- Hongrie
- Italie (Lac Mulargia
Sicile : Perguse)
- Norvège (Lac Ostensjo, Lac Akersvatn, Stravangu, lac Gjersjoen,
lac Froylandsvatn).
- Pologne
- Portugal
- Pays-Bas
- Royaume-Uni (Wales, Leicestershire, Staffordshire).
- Suède (lac Tullingesjon, lac Finjasjon).
- URSS (lac Ladoga, Kiev, Pusch Gulf).

Autres endroits : (9, 14-16, 19, 22, 26, 29, 32, 33, 35, 37).

- Afrique : Afrique du Sud, Afrique de l'Est
- Australie : de nombreux cas recensés parmi les aborigènes.
- Amérique du Nord : USA (Pennsylvanie, Wisconsin, Washington, Ohio), Canada.
- Amérique du Sud : Brésil, Pérou.
- Asie : Inde, Israël, Bangladesh, Japon, Chine

L'empoisonnement du bétail attribué aux "fleurs d'eau" toxiques de cyanophycées d'eau douce est d'une plus grande fréquence dans l'Ouest du Canada et le Nord et Ouest des USA (26, 34). Dans les années 1966-69, sur huit lacs du Wisconsin à "fleur d'eau" de cyanophycées, cinq étaient toxiques. En 1986, on en retrouvait six (29).

Les enquêtes sur la toxicité de "fleurs d'eau" de cyanophycées dans les années 80 indiquaient que l'incidence de toxicité dans les eaux douces du Royaume-Uni était probablement la même qu'ailleurs en Europe, qu'en Australie, qu'en Amérique où les "blooms" toxiques sont plus souvent reconnus dans les événements d'empoisonnements (22).

En Australie, "The Barcoo" reste endémique limité à l'Ouest du Queensland, Ouest du New South Wales et au centre du pays (33).

II - QUELQUES EXEMPLES DE "FLEURS D'EAU" DE CYANOPHYCEES DANS LA REGION LIMOUSINE

1) - étude régionale pendant la saison 1992

Pour évaluer au mieux la situation à l'échelle régionale, une étude, demandée par la DDASS de la Haute-Vienne a été menée de juin à septembre 1992 par un étudiant (2ème année de DEUST Conseiller en Hygiène et Environnement des Collectivités Locales, Limoges) en collaboration avec M. Combrouze, Ingénieur de la société Aqua Gestion.

Cette étude portait sur la qualité de douze eaux de baignade ouvertes au public dans le Limousin et montrait alors que :

- 66,5 % des eaux avaient un pH compris entre 6 et 9. Pour plus d'un tiers des plans d'eau, la valeur limite de pH 9 a été mesurée au moins une fois au cours de la saison.

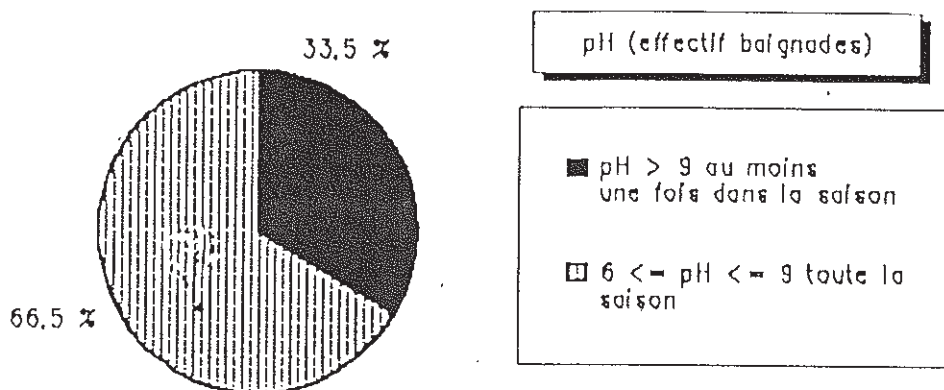


Fig 10 : pH des eaux de baignades étudiées dans le Limousin de Juin à Septembre 1992.

- 82 % des eaux ont révélé des dépassements de valeurs impératives de transparence.

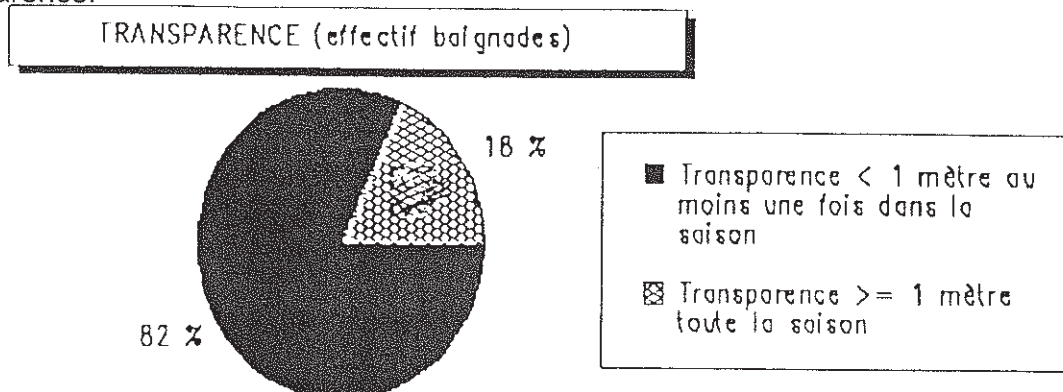


Fig 11 : Transparence des eaux de baignade étudiées dans le Limousin de juin à septembre 1992.

Quelques exemples de "fleurs d'eau" des cyanophycées vont être repris :

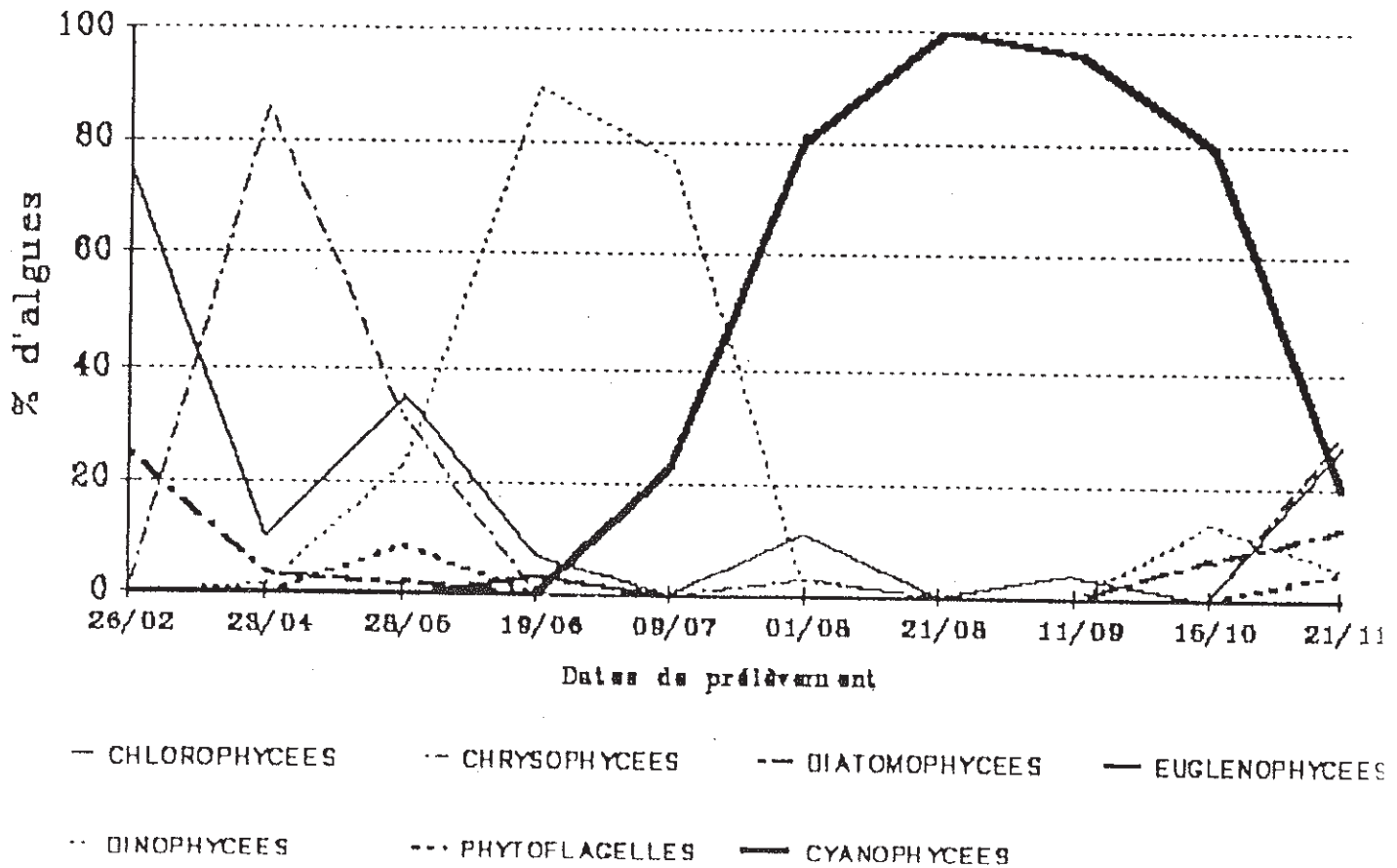
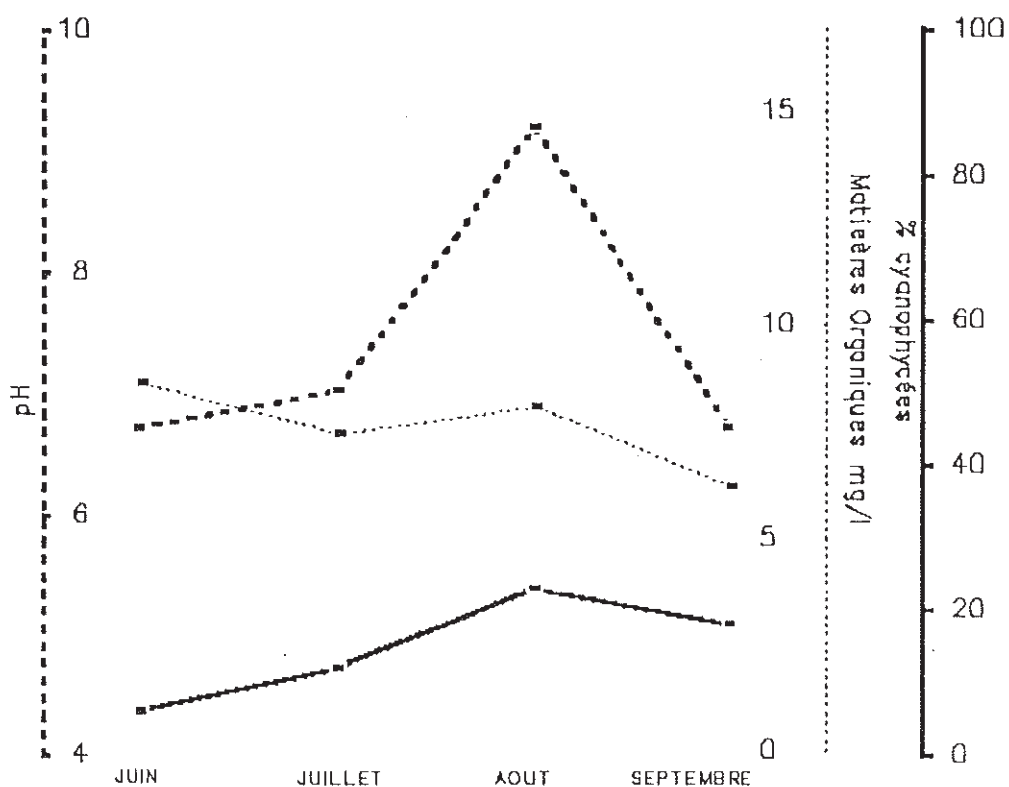


Fig 12 . Evolution des différentes classes d'algues du lac de Saint-Pardoux (Haute-Vienne), de février à novembre 1991.

L'étude menée par Aqua-Gestion sur le lac confirme que la période propice à la croissance des cyanophycées s'étend du mois de juin au mois d'octobre, croissance qui s'effectue au détriment des autres espèces du phytoplancton.



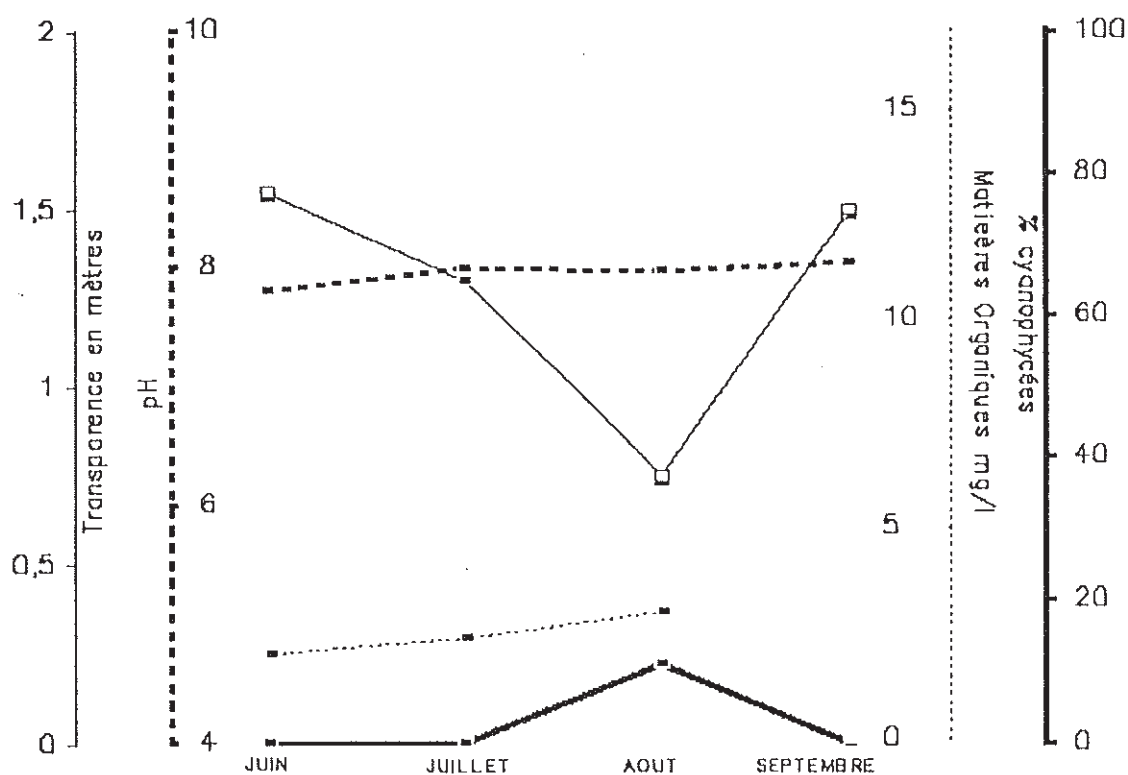
	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE
pH	6,7	7	9,2	6,7
Transparence en m		1,2		
% de cyanophycées	6	12	23	18
Matières Organiques en mg/l	8,6	7,4	8	6,2

Observations :

- zoo plancton abondant
- phytoplancton abondant à très abondant
- présence dominante de chlorophycées "Zygnematacées"
- début de bloom de cyanophycées observé lors du prélèvement fin Août.

Fig 13 : Evolution de la transparence, du pH, du pourcentage de cyanophycées et de matières organiques à Sainte-Hélène, Bujaleuf (Haute-Vienne).

La fréquentation de cette baignade peut être très importante : un camping de cent dix emplacements est situé à proximité. Des "fleurs d'eau" ont été observées ces dernières années.

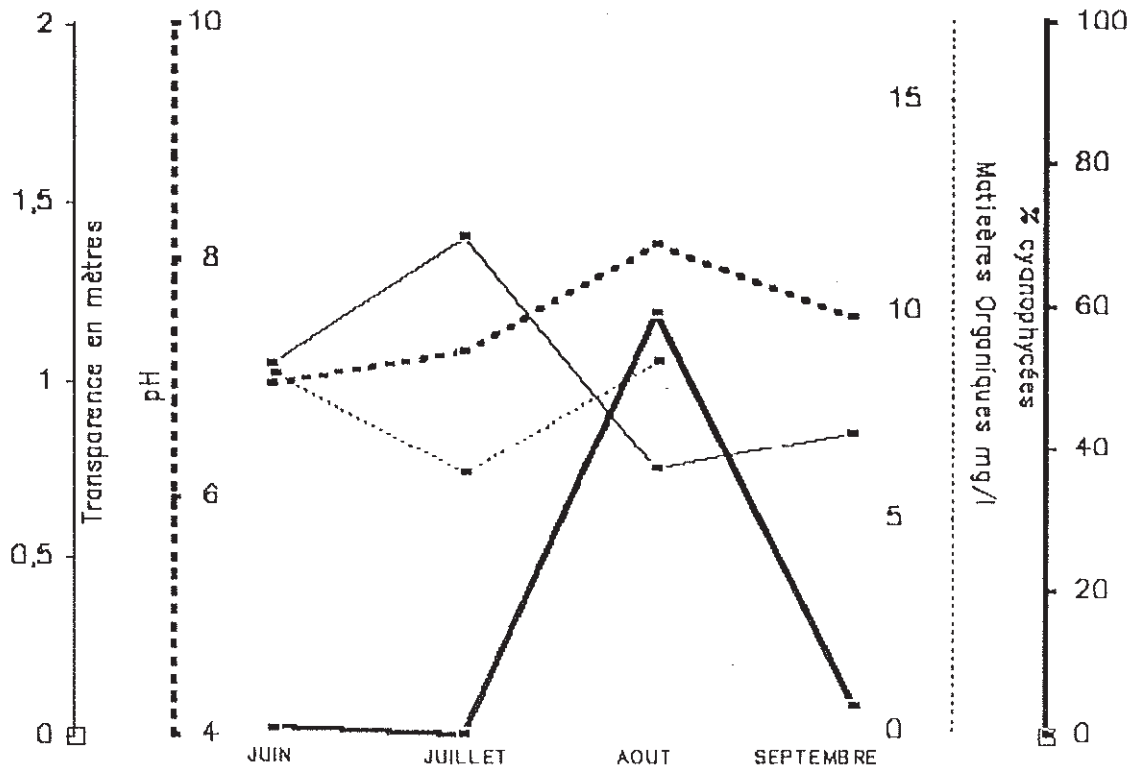


	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE
pH	7,8	7,99	7,97	8,04
Transparence en m	1,55	1,3	0,75	1,5
% Cyanophycées	0	0	11	0
Matières Organiques en mg/l	2	2,4	3,0	

- Observations :**
- zoo plancton très abondant en Juin puis peu abondant en Juillet-Août
 - phytoplancton peu abondant sauf en Août (bloom de cyanophycées)
 - présence dominante de chrysophycées "dinobryon"
 - Bloom de cyanophycées "aphanothece" en Août

Fig 14 : Evolution de la transparence, du pH, du pourcentage de cyanophycées et de matières organiques au plan d'eau de Causse, Lissac (Corrèze).

La fréquentation de cette baignade est très importante (800 à 1000 entrées/jour en Juillet-Août) en raison de la proximité de la ville de Brive.

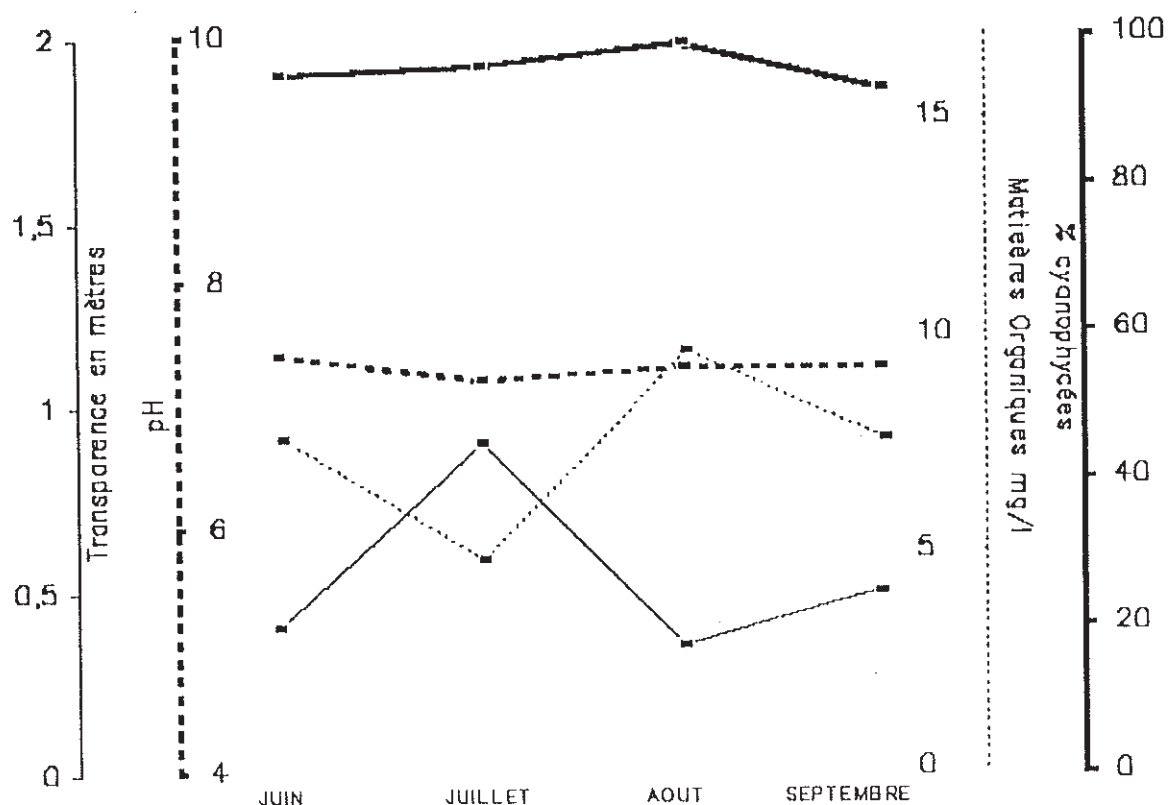


	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE
pH	6,95	7,22	8,12	7,52
Transparence en m	1,05	1,4	0,75	0,85
% de cyanophycées	1	0	59	4
Matières Organiques en mg/l	8,5	6,1	8,8	

Observations :

- zoo plancton très abondant en juin à peu abondant en fin de saison
- phytoplancton abondant à très abondant en fin de saison
- présence dominante de cyanophycées "microcystis" en Août

Fig 15 : Evolution de la transparence, du pH, du pourcentage de cyanophycées et de matières organiques à Ponty, Ussel (Corrèze).



	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE
pH	7,4	7,2	7,3	7,3
Transparence en m	0,4	0,9	0,35	0,5
% de cyanophycées	95	96	99	93
Matières Organiques en mg/l	7,6	4,8	9,6	7,6

Observations :

- zoo plancton rare durant toute la saison
- phytoplancton très abondant
- présence dominante de cyanophycées "Microcystis" et "Gomphosphaeria"
- blooms de cyanophycées observés durant toute la saison

Fig 16 : Evolution de la transparence, du pH, du pourcentage de cyanophycées et de matières organiques au plan d'eau de Courtille, Guéret (Creuse).

Les abords de ce plan d'eau ont fait l'objet d'un aménagement important en 1985: zones de baignade, école de planche à voile, camping, restaurant. La fréquentation est très importante en juillet-août.

2 - "Fleur d'eau" à Lavaud

Dans la matinée du 29 août 1993, au plan d'eau de Lavaud situé sur deux départements (Charente et Haute-Vienne), un riverain observe le "spectacle" suivant :



Fig 17: Ensemble des clichés photographiques pris au plan d'eau de Lavaud le 29 août 1993.



Des prélèvements sont alors réalisés à 15 heures à la plage de Videix (Haute-Vienne) par la CMIC 87 (Cellule Mobile d'Intervention Chimique - Service Départementale d'Incendie et de Secours de la Haute-Vienne).

L'eau contenant en surface un liquide épais de couleur bleu-vert et d'odeur particulière, a un pH de 6,4 et sa température est de 22°C.

Une recherche de substances volatiles est entreprise : acétate d'éthyle, acétate de butyle, acétone, benzène, butane, butanol, chloroforme, cyclohexane, dichloroéthane, dichlorométhane, disulfure de carbone, éther, heptane, hexane, isopropanol, méthanol, méthyléthylcétone, méthylisobutylcétone, tétrachloroéthylène, tétrachlorure de carbone, toluène, trichloroéthylène, trichloroéthane, trichloroéthanol, xylènes (o, m, p).

Ces composés ont été recherchés par chromatographie en phase gazeuse (CPG) couplée à la spectrométrie de masse après extraction des solvants par une méthode dite "d'espace de tête".

D'autre part, une recherche de pesticides a été entreprise limitée aux organochlorés, organophosphorés, phtalimides, pyréthriinoïdes, sulfamides et triazolés.

Les techniques utilisées pour la recherche de ces substances étaient une CPG couplée à une spectrométrie de masse et une CPG couplée à une détection thermoionique ou capture d'électrons après extraction.

Une deuxième série de composés : le prophame, methiocarbe, carbaryl, simazine, atrazine, méthylmetsulfuron, thirane, diuron, asulam, fénoxycarb, diflubenzuron, dithianone, flusinazole, carbendazime, primicarbe et pyrifénox a également fait l'objet d'une recherche par chromatographie en phase liquide (CPL) couplée à la spectrométrie UV à barrette de diodes.

De plus, une recherche et un dosage de métaux tels que plomb, fer, cuivre et chrome, ont été réalisés par spectrométrie d'absorption atomique avec four graphite.

Enfin, une recherche et un dosage de cyanures ont été entrepris par colorimétrie selon la méthode de König après extraction par microdiffusion.

Entre temps, une cascade journalistique "informe" :

Pollutions sur Charente et Vienne



Hier à Lavaud, pompiers et gendarmes ont tenté de contenir la pollution ■ photo CL.

Une importante pollution a été constaté hier sur le plan d'eau constant de Lavaud. Son origine serait liée au déversement d'un fongicide ou d'un pesticide (très nocif). L'acte de malveillance n'est pas écarté. Mais on attendait hier soir de connaître la composition exacte du produit. De son côté l'usine Ausseot Rey a déversé samedi dans la Vienne au moins 15 mètres cubes d'effluents de blanchiment contenant entre autre 225 kilogrammes de soude..... 4

Fig. 18 : Extrait de Presse : la Charente Libre du 30 août 1993

Lavaud touché par la pollution

Pascal HUORD ■

«Qui aurait cru que nous aurions pu connaître cela nous» grommelait hier un riverain du plan d'eau à niveau constant de Lavaud. On sait ce que peut subir la Vienne mais on ne voulait pas croire hier matin qu'une telle chose puisse arriver à Lavaud. Pourtant la couleur verdâtre et les amoncellements gluants sur les bords de la retenue ne laissent pas planer de doutes. Un acte de malveillance ou une énorme négligence avait été commis. L'alerte a été donnée vers 12h par Jean-Luc Chataignon, animateur départemental. Mais on apprenait en cours de journée que des pêcheurs avaient constaté que l'ensemble de la surface était verte.

Les premières inspections effectuées en bateau par les pompiers de Chabanais vers 13h ont permis de le confirmer, même si le vent agglutinait les effluents sur la rive gauche de l'étang. Juste en face des deux plages de Videix et Pressignac où quelques estivants profitaient de ce dernier week-end d'août. «Il y a de fortes concentrations dans certains méandres» indiquait un pompier de Chabanais. Près de la digue, elles étaient suffisantes pour observer une poudre déposée sur le sable.

Fongicide ou pesticide?

Autant d'éléments dans lesquels les hommes des cellules de dépollution de Charente et de Haute-Vienne (la retenue enjambe la frontière départementale) ont pu puiser des échantillons pour les adresser au laboratoire du CHU de Limoges. Entre-temps, les baignades avaient été interdites et le déversoir au-dessus duquel passait un trop-plein d'eau dans le grand barrage qui alimente le fleuve Charente avait été barré. «Rien n'est passé par le déversoir, il n'y a donc aucun risque» assurait le commandant Paquereau des pompiers d'Angoulême. Pour s'en assurer, l'embarcation du centre de secours de Chabanais sillonnait l'étang

Une nappe chimique verdâtre a été découverte hier matin sur l'ensemble du plan d'eau secondaire

on pomperait 95% d'eau» indique le commandant Paquereau.

Reste enfin à connaître l'origine de cette pollution. Son ampleur laisse supposer qu'une importante quantité de produit a été déversée. «Si c'est un bidon, c'est un gros bidon, au moins de 200 litres» estimait l'adjudant chef Lavauzelle, chef de la brigade de Montembœuf. Mais aucune trace matérielle n'a été repérée. L'alerte trop tardivement donnée n'a pas non plus permis de déterminer une origine géographique.

L'acte, qu'il soit accidentel ou criminel, a été vraisemblablement commis dans la nuit, ce qui laisse d'ailleurs supposer une volonté de dissimulation, donc de malveillance. «Si c'est le lindane et si l'on peut connaître l'additif utilisé, on peut savoir pour quel type précis de culture ce produit était utilisé» ajoute l'adjudant-chef. Mais dans le secteur immédiat (côté charentais) il y a peu de fermes. La nuit dernière gendarmes et pompiers ont effectué des patrouilles, mais il faudra attendre la composition exacte du produit pour éventuellement remonter la filière.

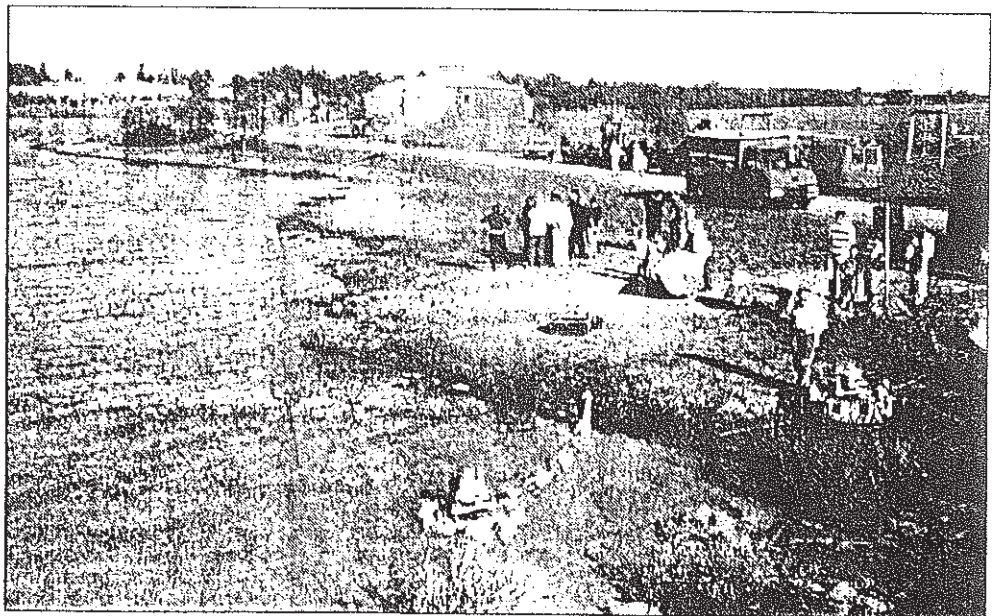
pour concentrer les effluents sur les rives.

Hier soir, on ne connaissait toujours pas le résultat des analyses, mais on retenait deux hypothèses: celle d'un fongicide, produit par les laboratoires Rhône-Poulenc (un ingénieur chimiste présent sur place a téléphoné à la société), soit un pesticide, vraisemblablement du lindane.

Pas de traces matérielles

Dans l'hypothèse du fongicide, les risques, selon les

spécialistes présents sur place, sont minimes sur la faune et la flore avec une capacité de dilution importante. En revanche, si c'était du lindane, les conséquences seraient beaucoup plus graves. Le lindane est un pesticide violent utilisé pour le traitement des maladies des cultures. D'ailleurs, l'odeur légèrement piquante dégagée par le produit est caractéristique. «Cela ressemble aux produits que l'on utilisait pour sulfater sur les pommes de terre» remarquait André Soury, comme d'autres agriculteurs présents sur place. Finalement, on a renoncé à pomper l'eau pour écrémer le produit toxique. «Il est trop dilué



Pompiers de Chabanais et St-Julien et cellules de dépollution d'Angoulême et Limoges ont tenté de limiter les dégâts de cette première pollution du site de Lavaud ■ photo CL.

Pollution au barrage de Lavaud

Hier matin, le barrage de Lavaud situé sur plusieurs communes, entre Suris en Charente et Videix en Haute-Vienne, a été pollué. Dans cette étendue d'eau de 42 hectares, une grande quantité d'un produit polluant a été déversée. La pollution s'est concrétisée par l'apparition de plaques vertes sur l'eau.

Un chimiste en vacances, qui se trouvait sur les lieux, a décrit la situation à des confrères de Rhône Poulenc. D'après eux, il pourrait s'agir soit d'un fongicide soit d'un pesticide.

Le premier ne serait pas polluant mais très odorant. Le second serait en revanche dangereux.

Dans le premier cas, il n'est pas nécessaire de pomper l'eau. Dans le deuxième cas cela devient impératif.

Des échantillons ont été prélevés puis transportés au laboratoire du CHRU de Limoges.

Ce barrage, entouré de plages, a été immédiatement interdit à la baignade.

Sur place, les pompiers de Rochechouart, de Saint-Junien, de Chabanais et d'Angoulême, une cellule d'identification, une unité de dépollution de Limoges et la gendarmerie de Confolens ont fait leur possible pour maîtriser cette pollution.

Une enquête devrait déterminer les causes et l'origine de cet incident. Un acte de malveillance n'est pas exclu.

En attendant, des barrages flottants ont été installés du côté du déversoir du barrage, afin d'éviter toute propagation de la pollution.

Fig. 20 : Extrait de Presse : le Populaire du Centre du 30 août 1993.

POLLUTION

Des algues au barrage de Lavaud

La pollution survenue dimanche matin au barrage de Lavaud, situé sur plusieurs communes, entre Suris (Charente) et Videix (Haute-Vienne), serait l'œuvre d'une algue, généralement présente au Canada.

Suite au prélèvement effectué dimanche sur le plan d'eau de Lavaud, le résultat des analyses réalisées par les pharmaciens du service incendie de la Haute-Vienne font ressortir plusieurs éléments. Les plaques colorées visibles sur l'eau seraient une brusque prolifération de phytoplanctons. L'algue bleu concernée est de la famille des cyanophycées. Si elle n'est pas toxique envers la faune et la flore du barrage, elle est en revanche toxique pour le bétail et l'être humain. Les baignades sont donc interdites, tout comme la consommation de l'eau.

Fig. 21 : Extrait de Presse : le Populaire du Centre du 31 août 1993.

Le 2 septembre 1995, les résultats des prélèvements révèlent la présence de nombreuses algues bleues principalement du genre *Anabaena* (100 éléments/mm³).

Les autres résultats des recherches entreprises concluent de la façon suivante :

"il n'a pas été décelé de polluants chimiques dans la limite des substances recherchées et de la sensibilité des techniques utilisées. Il s'agit d'un phénomène biologique de "bloom algal" lié à une prolifération de cyanophycées (*Anabaena*) signé : Pharmacien du SDIS".

Le 3 septembre 1993, la presse rectifie :

BAIGNADE

Lavaud : Pas de risque

Les résultats définitifs des analyses ont été longuement étudiés au cours d'une réunion qui s'est tenue le 2 septembre à la sous-préfecture de Rochechouart et qui a permis de définir de manière très précise le phénomène constaté sur le plan d'eau de Lavaud.

Il ne s'agit pas d'une pollution chimique mais d'une prolifération d'algues bleues (cyanophycées), phénomène déjà observé dans d'autres lacs ou étangs de la région.

L'odeur constatée provenait d'une décomposition des algues.

Le phénomène est vraisemblablement dû à un apport de phosphore dans la Charente du fait d'un lessivage des terres du bassin versant par les pluies intervenues l'avant-veille.

La consommation d'eau potable et l'alimentation du bétail n'ont, à aucun moment, été concernés par ce phénomène.

Il n'y a maintenant plus de risque pour la baignade qui restera néanmoins fermée compte tenu de la fin de la saison touristique.

Fig. 22 : Extrait de Presse : le Populaire du Centre du 3 septembre 1993.

Le 8 septembre 1993, la DDASS de la Haute-Vienne annonce les résultats des prélèvements faits le 31 août 1993 au plan d'eau de "Lavaud" (Cf annexe 1 P. 40).

Annexe 1 : résultats d'analyse du 8 septembre 1993. (P. 40)



PHILIPPE COMBROUZE
Ingénieur conseil en Hydrobiologie Ichtyologie

- 40 -

REMARQUE :

Bloom caractéristique de Cyanophycées dû au genre *Microcystis*.

Prolifération très localisée sur la rive soumise au vent sur une largeur inférieure à 8 mètres.

Présence non négligeable dans l'échantillon d'algues vertes (essentiellement Zygnematales).

Présence de zooplancton assez abondante.

A mon avis, fin de bloom de Cyanophycées (*Microcystis* s'étant substitué à *Anabaena*) d'une importance significative mais modeste (faible biomasse pour un bloom et bonne diversité spécifique).

A l'endroit de la plage : - bonne transparence de l'eau
- absence de bloom
- aucun risque de toxicité algale.

PHILIPPE COMBROUZE

S.A.R.L. AQUA-GESTION
au capital de 50 000 F

Boulevard Jules-Guesde - 87120 EYMOUTIERS

Tél. 55 69 28 28

Banque Crédi Agricole - RCS 344343033 - APE 7707

Etudes et conseils en gestion piscicole de tous les milieux aquatiques.
Pathologie du poisson, pollutions, études d'impact

Durant l'été 1995, le plan d'eau de Rochechouart (Haute-Vienne) a connu le même phénomène.

SÉCURITÉ

Rochechouart : Des "algues bleues" interdisent la baignade

Pour des raisons de sécurité, les baignades et activités nautiques sont interdites depuis hier matin sur le plan d'eau de Rochechouart.

Cette interdiction temporaire, conseillée par la DDASS suite à des analyses, n'est pas liée à un problème bactériologique ou de toxicité mais à un problème de transparence de l'eau qui gêne la surveillance des baigneurs, précise-t-on à la mairie de Rochechouart.

Depuis quelques jours en effet, des algues, et notamment des « algues bleues » qui sont actuellement en phase de fleurissement, prolifèrent dans les eaux de retenue, ce qui a provoqué une forte diminution de la transparence de l'eau, celle-ci étant très inférieure aux normes en

vigueur (10 cm au lieu de 1 m).

Dès que cette phase spectaculaire de développement des algues se sera estompée, les activités de baignade pourront reprendre, du moins si les différents contrôles effectués par la DDASS s'avèrent satisfaisants.

La présence d'"algues bleues" est un phénomène assez courant dans les plans d'eau de la région, notamment pendant le mois d'août. Il y a environ deux ans, le même phénomène s'était déjà produit au plan d'eau de Rochechouart, interdisant la baignade pendant une semaine. Il est en fait consécutif aux différents rejets d'azote et de phosphore en amont du plan d'eau, éléments qui favorisent la croissance et la prolifération des algues.

Fig. 23 : Extrait de Presse : le Populaire du Centre du 12 Août 1995.

Le plan d'eau de Lavaud (Charente, Haute-Vienne) a de nouveau été touché par une "fleur d'eau" importante à la fin août 1995, ayant à l'origine trois espèces identifiées :

- *Anabaena spiroides*
- *Microcystis sp.*
- *Aphanizomenon flos-aquae*

Les riverains, ayant déjà vu le "spectacle", ne s'alarment pas autant...

Les plages sont interdites au public mais les pêcheurs oeuvrent tranquillement le long des rives.

II - TOXICOLOGIE HUMAINE

Historique

En 1825 le phénomène est observé au lac de Morat en Suisse. Les riverains voyaient là le "sang des Bourguignons". Ils faisaient ainsi le rapprochement entre ce phénomène et la très ancienne bataille de Morat qui eut lieu en 1476 sur les rives du lac et où périrent un million de soldats de l'armée de Charles le Téméraire, Duc de Bourgogne. Mais la nature vraie de cette eau rouge a été reconnue par le botaniste genevois Augustin Pyrame de Candolle : l'algue en cause était une algue bleue à corps filamenteux, appartenant à la famille des Oscillaires (*Oscillatoria rubescens*) (1, 7, 13).

1878 : l'intoxication algale d'un bétail ovin causée par l'eau de boisson d'un lac infesté a été la première décrite par G. Francis dans le Sud de l'Australie. L'auteur en était *Nodularia Spumigena* (9).

1887 - 1894 : description de l'intoxication australienne due à *Cylindrospermopsis raciborskii*, encore appelée "Barcoo-fever, Barcoo spews, Barcoo sickness" par le docteur EC. Stirling, anthropologiste (33). (Cf. p. 50).

1930 : une cyanophycée est suspectée comme agent causal de maladies d'origine aqueuse similaires, impliquant 8.000 à 10.000 personnes à Charleston, Virginie de l'Ouest (9).

1940 : *Anabaena* semble responsable des désordres gastro-intestinaux épisodiques dans le New Jersey (9).

1940 - 1950 : après une déclaration de gastro-entérites dans l'Ohio en 1930, l'Etat collecte des extraits de "fleurs d'eau" pour les tester en laboratoire : isolement des espèces toxiques, étude des propriétés chimiques et toxicologiques, développement des travaux par P.R. Gorham et ses collaborateurs (26).

1959 : *Microcystis* est la première incriminée en ce qui concerne les bouleversements gastro-intestinaux d'un nageur (9).

1960 : *Aphanizomenon* est associée pour la première fois à une gastro-entérite chez un enfant (9).

Anabaena et *Microcystis* sont considérées comme auteurs de diarrhée chez quatre étudiants ayant nagé dans une eau lourdement infestée par ces microorganismes (9).

1974 : des réactions pyrogéniques surviennent chez les patients d'un centre d'hémodialyse dues à une augmentation du niveau d'endotoxines -LPS dans le robinet d'eau utilisée pour préparer le liquide de dialyse (9, 26).

1975 : déclaration à Sewickley, Pennsylvanie, de gastro-entérites liées à *Schizothrix calcicola* qui est entrée dans les eaux par un réservoir non recouvert. L'eau de ce dernier avait été auparavant traitée. (9).

1976-1977 : "fleur d'eau" toxique d'*Anabaena flos-aquae* à Washington., Long Lake (26).

1979 : à Palm Island, Queensland, Australie, après un "bloom algal" important dans le barrage qui avait été traité par du sulfate de cuivre, 139 enfants et adultes aborigènes ont présenté des gastro-entérites (9).

1988 : dans la région de Paulo Afonso dans l'état de Bahia au Brésil, 2.000 cas de gastro-entérite ont été reportés pendant 42 jours, dont 88 ont mené à la mort après les inondations du nouveau barrage Itaparica. Les résultats ont révélé que l'eau déposée par le barrage était responsable de ces atteintes et ont montré la présence de toxines de cyanophycées (42).

1989 : Incidents importants à Rutland Water, Leicestershire (UK) et Rudyard Lake, Staffordshire (UK), deux lacs hautement attractifs pour le public. Bilan : mort de vingt moutons, quinze chiens en août, suivies d'hospitalisation en septembre de jeunes soldats canotant et nageant dans l'eau où une "fleur d'eau" de *Microcystis aeruginosa* s'était formée (14, 22, 36).

1 - "Bloom" toxique

a) Qui est touché ? Relations homme-animaux (26)

A partir des cas rapportés, une "fleur d'eau" de cyanophycées touche aussi bien l'homme que les animaux. Les différentes espèces animales diffèrent dans leur sensibilité aux différentes toxines de cyanophycées : Carmichael et Gorham rapportent que les ruminants et les animaux aquatiques sont plus sensibles à la toxicité d'*Anabaena flos-aquae* (34).

La plupart des pertes animales incluent principalement des bovins, ovins, porcs, oiseaux (domestiques et sauvages), poissons (14-16, 22, 34). Des pertes mineures sont rapportées pour les chiens, chevaux, petits mammifères sauvages, amphibiens et invertébrés (21).

La plupart des effets dramatiques se rencontrent le plus souvent chez les animaux sauvages ou domestiques qui boivent et mangent dans une "fleur d'eau" toxique (9). Le nombre de décès d'animaux ou d'animaux mourant peut être important. S'il y a plus d'une espèce toxique ou s'il y a plusieurs types de toxines dans la "fleur d'eau", on a des signes différents d'empoisonnements et de temps de survie. Faute d'informations adéquates, certains cas n'ont sans doute pas été identifiés.

Des empoisonnements humains aigus menant à la mort ont rarement été rapportés contrairement aux animaux. Cependant des troubles divers apparaissent menant quelquefois à des hospitalisations (15, 19, 22, 41). On parle alors plutôt d'accidents survenant à tout âge, les enfants étant cependant plus sensibles que les adultes, tout sexe confondu (32, 33, 41). Ceux qui sont les plus touchés sont en priorité les veliplanchistes, baigneurs, canoéistes, voyageurs, soldats (19, 22, 39, 42,43)

Avant 1989, on rapportait plutôt des cas chez les immunodéficients et les voyageurs ; depuis 1989, on parle à présent des immunocompétents (26, 44).

Une intoxication chez l'animal se révèle différente de celle de l'homme. Les différences dans le système digestif entre les herbivores et l'espèce humaine peut affecter la réponse (26). Ceci est particulièrement vrai chez le ruminant qui a une grande fermentation bactérienne dans le rumen (26). La taille de son corps influence la cinétique d'absorption des toxines à partir des intestins et le taux de transport vers les tissus (19, 26). La capacité de détoxification dans le foie peut aussi varier, dépendant de l'espèce, de la composition et de la quantité d'aliments déjà dans les intestins (19).

Le porc apparaît être l'animal le plus proche du modèle humain mais il est coûteux d'en acheter et de les entretenir pour en étudier le phénomène (19).

Il n'en reste pas moins que l'animal est plus sujet aux intoxications mortelles du fait de l'ingestion plus massive de "fleur d'eau" toxique de cyanophycées (26, 37). C'est ce qui se rencontre souvent dans les troupeaux d'ovins ou bovins qui sont obligés de boire sur les rives : normalement les animaux ne boivent pas l'eau contenant de lourdes couches de cyanophycées si l'eau plus loin paraît plus claire (15). Mais il se peut que l'eau soit vite profonde ou bien que l'animal ait particulièrement soif lors des grosses chaleurs ; ceux-ci ne vont alors pas chercher une eau très limpide et s'abreuvent près des berges où s'accumulent des couches de cyanophycées.

b - Facteurs de risque (37)

Les patients à risque incluent des personnes déjà atteintes d'hépatite, de mononucléose infectieuse ou de cirrhose éthylique : ces patients peuvent en effet être particulièrement sujets à risque pour les dommages des toxines sur le foie à cause de l'altération de leur fonction hépatique. C'est ainsi que la mort des hépatocytes pourra survenir pour de faibles concentrations en toxines.

La petite enfance, l'immunodéficiences sont également des facteurs de risque. Cependant, la gravité des incidents varie beaucoup en fonction de la quantité de toxines, de la présence d'aliments dans les intestins et des différences actuelles de sensibilité aux toxines.

Du point de vue des cyanophycées, une couche épaisse, bien concentrée en cellules toxiques à la surface de l'eau, induira des incidents plus facilement ; de la même manière, les toxines de nature alcaloïdique induisent une mort plus rapide que les polypeptides (26).

c - Conditions qui augmentent la toxicité

Certes les facteurs environnementaux influencent la production d'une "fleur d'eau" mais augmenteraient également la nocivité des cyanophycées (9).

Ces dernières grandissent, croissent massivement dans l'eau et flottent à la surface grâce à des vacuoles gazeuses localisées dans la cellule, formant une couche dense pendant les périodes calmes (26). En plus d'une forte concentration de cellules et d'un taux élevé de vacuolisation, des conditions externes s'ajoutent ; une fois ces cellules près ou à la surface de l'eau, un temps un peu plus turbulent, provoquant des vagues et des rides, modifie la répartition de lumière dans la masse d'eau et accumule la "fleur d'eau" de cellules toxiques près de la rive (7, 14-16, 19, 26). Ceci a pour conséquence de concentrer les cyanophycées en certains endroits abrités ou sous le vent, pouvant former une onde de quelques mètres tout autour d'un plan d'eau.

La direction du vent joue donc un rôle primordial pour l'accumulation au bord de l'eau, augmentant la concentration de cyanophycées et par conséquent le risque d'intoxication (22, 45).

D'après certains auteurs (Vanderwest Huizen & Eloff (1985), Bose & Carmichael (1990), Dierstein (1990) et Kirivanta (1991)), la capacité de production des toxines semble plus forte en présence de beaucoup d'azote minéral sous faible éclaircissement et entre 15° et 25° C (9, 18, 21, 41) ; les microcystines auraient une croissance optimale à 25° C (34, 35). D'un autre côté Watanabe et Oishi (Watanabe MF, Oishi S, 1985, Appl. Env. Microbiol. 49 : 1342 - 1344) disent que la toxicité de *Microcystis aeruginosa* varierait peu avec la quantité de phosphore disponible ou avec la température, mais serait en revanche plus fluctuante en fonction de l'éclaircissement (18).

La production de l'anatoxine-a serait plus forte à 22,5° C qu'à 15°C et quelle que soit l'intensité lumineuse (34) ; *Aphanizomenon flos-aquae* produirait deux fois plus de toxines à 26°C qu'à 20°C ; et à 30°C, il n'y a plus de production (34, 35).

D'une manière générale, la production des toxines baisserait fortement à 30°C et ne dépendrait des teneurs en phosphore que lorsque celles-ci sont faibles et en deviendrait indépendante aux plus fortes teneurs (18) ; la toxine d'*Oscillatoria agardhii* ne se dégraderait pas sous l'action des micro-organismes du milieu naturel tandis que celle d'*Anabaena circinalis* disparaîtrait ; l'anatoxine-a ne se dégraderait que sous l'effet direct de la lumière solaire (18).

Armstrong (Armstrong J.E. 1991 J. Appl. Phycol. 3 : 277-282) a montré que la cytotoxicité varie en fonction de la phase de croissance. Pour lui, elle est maximale au début et à la fin de la phase exponentielle (18, 35). La toxicité n'a pas non plus le même spectre d'action au cours de ces deux phases (18). Watanabe a trouvé que la toxicité de *Microcystis aeruginosa* était plus forte au début de la phase stationnaire et plus faible à la phase mi-log (35).

On parle aussi de l'importance de la profondeur de l'eau et de la concentration en CO₂, qui, au même titre que l'azote, le phosphore, la température, l'agitation de l'eau, la saison, influencent la prolifération de la nuisance des "fleurs d'eau" et la production de toxines potentielles (7, 35). Beaucoup de chercheurs ont à ce sujet des opinions différentes.

D'un autre côté, il semble que les cellules non toxiques de *Microcystis* participent à la toxicité du phénomène de "fleur d'eau" (31). Shirai et ses collaborateurs ont observé que des espèces de *Microcystis aeruginosa* non toxiques étaient capables d'induire une hypersensibilité de type retardé de la souris (31). Une telle influence peut modifier la sensibilité de l'hôte aux toxines.

De plus, il est supposé que les microbes contaminants autres que les cellules toxiques de *Microcystis* influencent la toxicité de la "fleur d'eau" et que la croissance de *Microcystis* semble plus forte en l'absence d'inhibition par les métaux lourds (26, 31).

d - Modes de contamination (26)

Deux modes de contamination importants sont retenus :

- ingestion de l'eau (15, 16, 32, 37, 41).

- contact cutané avec l'eau (9, 15, 16, 18, 19, 36, 42)

On peut citer également l'inhalation (19, 41).

Citations "... des dommages ont été rapportés chez des populations humaines qui ont bu de l'eau provenant d'une réserve contenant des cyanophycées toxiques" (41).

"des atteintes humaines rapportées sont reliées à la consommation d'une eau de boisson provenant d'une source contenant des cyanophycées toxiques..." (32).

"... la présence d'endotoxines LPS qui se trouvent dans les réserves des eaux de boisson pour l'homme est certainement la cause de quelques déclarations de gastro-entérites..." (26).

"... il y a des rapports indiquant que les toxines peuvent causer des gastro-entérites quand elles sont ingérées à partir de réserves d'eau de boisson municipales..." (26).

"... à Sewickley (Pennsylvanie 1979), 62 % de la population a contracté une maladie gastro-intestinale caractérisée par de la diarrhée et des crampes abdominales, à partir de l'eau de boisson. La déclaration de la maladie est arrivée pendant l'apparition d'une croissance lourde de filaments de *Schizothrix calcicola* dans un des réservoirs..." (34).

Nombreux sont les exemples qui montrent également que le contact direct avec l'eau pendant quelques heures et probablement l'inhalation des cellules aéroportées sont des voies possibles de contamination (19, 41).

Les premiers cas relatés ont été ceux de personnes nageant dans les lacs, vers les années 1960, incriminant *Microcystis*. Puis d'autres se sont ajoutés : soldats s'entraînant au canotage, compagnies de police utilisant l'eau pour des exercices de navigation, baigneurs nombreux à divers endroits du globe (20, 36). Il est facile malheureusement d'ingérer accidentellement de l'eau lors d'une baignade, surtout parmi les enfants qui jouent et qui boivent alors des quantités d'eau plus importantes que les adultes chez qui l'ingestion est plutôt accidentelle.

Citations : "... des cas de gastroentérite chez des enfants après avoir bu de l'eau contenant *Microcystis* et *Anabaena* pendant qu'ils se baignaient, sont arrivés aux USA..." (15).

"...le propriétaire a aussi noté que les symptômes sont arrivés un court instant après le contact avec l'eau du lac, Pennsylvanie 1979..."

"...une jeune fille qui avait nagé dans le lac a accidentellement avalé plusieurs gorgées d'eau... selon son père cette eau était très boueuse. Ses symptômes sont survenus par ingestion d'eau contenant des cyanophycées toxiques..." (26).

"...les morts d'animaux à Rutland Water ont été suivies en septembre par des maladies parmi des jeunes soldats de l'armée qui canotaient et nageaient au Lac Rudyard, Staffordshire, Angleterre. Le lac Rudyard contenait à cette période une intense "fleur d'eau" de *Microcystis aeruginosa* à partir de laquelle a été isolée la microcystine-LR. Les exercices de canotage comprenaient des tours de 360°, des exercices de natation à travers la couche de cyanophycées. Par la suite, huit soldats ont eu des symptômes "like-influenza" et l'état de deux d'entre eux a nécessité une hospitalisation. Leurs symptômes sont arrivés un jour après avoir été en contact avec la couche"..." (22)

Le rapprochement entre le contact avec l'eau et la déclaration des symptômes n'est généralement pas fait immédiatement. Il faut plusieurs cas isolés similaires ou bien des atteintes massives pour que les Autorités Sanitaires se rendent compte que l'agent unique commun est un contact récent avec l'eau. L'implication d'une "fleur d'eau" de cyanophycées est reconnue secondairement.

L'immersion complète dans l'eau n'est pas obligatoire comme on l'a déjà vu pour les enfants qui s'éclaboussent en jouant ; certaines personnes peuvent développer sur leurs membres un rash juste après qu'elles aient mis les pieds dans l'eau ou après qu'elles se soient aspergés les bras pour se rafraîchir.

La baignade incluant sports nautiques, natation, jeux reste l'activité la plus fréquemment incriminée, sachant que les toxines contenues dans l'eau ont en même temps des voies opportunistes de pénétration variables (orale, cutanée, respiratoire). C'est pourquoi les médecins observent des symptômes différents chez des personnes qui se seront baignées dans la même eau mais dont la voie de pénétration sera différente. L'interrogatoire du patient est donc nécessaire pour connaître ses dernières activités et leur localisation.

Chez les animaux, les modes de contamination sont également l'eau de boisson et le contact direct (15, 31, 32, 36). En effet, les cas les plus dramatiques sont ceux des animaux qui boivent dans des couches toxiques, au bord de l'eau ou bien par contact inévitable car il est impossible pour eux d'aller boire plus loin dans l'eau sans passer à travers la couche de cyanophycées (16, 23).

Pour les chiens, on parle du toilettage : en effet lorsqu'ils ont nagé dans une eau contenant une "fleur d'eau", ils se lèchent le pelage pour enlever tout matériel adhérent (23).

e - Relations cyanophycées - toxicologie

Avant toute chose, la question générale qui vient à l'esprit pour le lecteur est : comment peut-on affirmer que les intoxications sont reliées aux toxines des cyanophycées ?

1 - La déclaration des symptômes survient pendant l'apparition d'une "fleur d'eau" de cyanophycées alors qu'aucun symptôme n'est visible avant cette apparition. De même, l'incidence augmente brusquement au moment où les algues meurent et où les toxines sont décelables dans l'eau (26, 37).

2 - Les symptômes n'apparaissent que chez ceux qui ont eu un contact récent avec l'eau ou qui ont bu de l'eau : les symptômes ont bien une origine aqueuse (26, 32).

3 - La réintroduction de l'eau implique la réapparition des symptômes (26).

4 - Les tests viraux, parasitaires, bactériologiques des agents pathogènes sont négatifs (prélèvement de gorge, recherche dans les selles, analyse de l'eau). Les temps d'incubation pour les agents en cause sont plus courts que ceux des agents bactériens, protozoaires et viraux (22, 26, 32, 37).

5 - Des études et des observations sont faites sur des populations exposées et non exposées. Les conclusions de plusieurs études montrent que seules les populations qui sont exposés à une "fleur d'eau" massive présentent des symptômes et que celles qui habitent dans les régions voisines, alimentées par d'autres réservoirs, ne font l'objet d'aucune symptomatologie particulière (19, 32, 37).

6 - Les chercheurs ont isolé plusieurs toxines et les ont testées chez des souris qui présentent alors les mêmes symptômes que les populations humaines exposées (32).

7 - Les atteintes arrivent plus souvent dans des camps de brousse, domaines fermiers, petites implantations, lacs, réservoirs... que dans les villes où les réserves d'eau sont plus surveillées (33).

8 - Les maladies n'ont pas les caractéristiques d'infection primaire (33).

9 - Le début rapide des symptômes est dû à l'action d'un agent chimique (26).

10 - L'agent impliqué dans les déclarations est réactivé par un changement de temps récent : chute des températures, vent, pluie, baisse des pressions (26).

11 - Les taux d'enzymes sériques des populations redeviennent normaux juste après que les "fleurs d'eau" de *Microcystis* soient détruites (17, 37).

Ainsi, après toutes ces affirmations, les chercheurs concluent que les toxines de cyanophycées sont responsables des atteintes humaines et animales observées.

2 - Symptomatologie

Pour être responsable d'un empoisonnement aiguë la "fleur d'eau" a besoin d'une proportion relative en une ou plusieurs espèces toxiques qui équivaut ou excède une valeur seuil (26, 36). Mais aucune relation dose-effet n'est connue à ce jour (32).

a) Incubation (26)

Le début des symptômes chez l'homme est généralement rapide : c'est d'ailleurs une des raisons pour laquelle on exclut toute infection bactérienne ou virale. Pour la majorité des cyanophycées toxiques, l'incubation varie de 2 à 12 heures après la baignade (26).

Il arrive même que la symptomatologie survienne durant la période de baignade tel l'exemple d'une jeune fille qui a développé un rash sur ses bras et ses jambes lorsqu'elle se rafraîchissait avec l'eau du lac (Pennsylvanie 1979). Cet exemple n'est pas unique, on a relevé également des individus affectés de troubles gastro-intestinaux et allergiques survenant pendant le bain (Pike County, Pennsylvanie, 1979). Lorsqu'il s'agit simplement d'un contact avec la couche, par exemple sa traversée, la période d'incubation s'allonge à une journée (22).

On parle donc d'une courte période d'incubation probablement due à l'action rapide des substances toxiques des cyanophycées.

On note cependant des variations de la période d'incubation selon plusieurs facteurs :

- espèce d'algue
- temps de contact avec l'eau
- importance de la "fleur d'eau"

tout ceci déterminant la quantité de toxines disponibles.

Il arrive parfois que la période d'incubation s'allonge. En effet, il a été noté une durée de 4 à 5 jours chez des jeunes recrues de l'armée présentant des pneumonies dues à *Microcystis aeruginosa* et ce après avoir pris part à des exercices de canotage (42).

b - Durée des symptômes

La durée et la sévérité des symptômes persistants varient largement en fonction de la quantité de toxines, mais ne dépassent pas 5 jours (17, 26, 33).

Les troubles gastro-intestinaux durent approximativement 3-4 jours à cause des désordres électrolytiques ; parfois ils sont apaisés en 24-48 heures (17,26).

En ce qui concerne les quelques cas de pneumonies, un rétablissement complet en hôpital nécessite une semaine (22, 42).

Même si la symptomatologie rapportée n'excède pas une semaine continue, on a noté dans les années 1878, lorsque les premiers cas de "Barcoo" sont survenus en Australie, la réapparition des symptômes, entrecoupée de période de bonne santé. On parlait alors d'une semaine à un mois de diarrhée explosive accompagnée de nausées, vomissements, crampes abdominales. Puis, du jour au lendemain, sans traitement, un calme s'établissait alors pendant quelques semaines et la symptomatologie reprenait avec progressivement une perte de poids et une anorexie. On parlait alors beaucoup d'épisodes répétés dûs à la réingestion de toxines par l'eau de boisson (28). Le même scénario s'est répété à Salisbury (Rhodésie, 1966) chez des enfants durant l'été (19).

c - Symptômes - Relation avec l'espèce de cyanophycées

L'intoxication humaine longtemps suspectée n'a été que tardivement documentée. Bien que les morts soient courantes chez les expositions d'animaux, les expositions humaines donnent lieu à un éventail de symptômes.

⇒ Gastroentérite (9, 15, 19, 20, 22, 26, 32-34, 36, 41-43)

De nombreux rapports parlent d'une association entre les désordres gastro-intestinaux et l'ingestion de toxines. En effet, la sphère digestive est la plus fréquemment touchée et les signes peuvent être sévères si les hommes ingèrent les toxines en assez grande quantité.

On note également que cette atteinte arrive plus souvent chez les enfants qui ingèrent facilement de l'eau en se baignant.

Ainsi les symptômes se caractérisent par la survenue rapide de vomissements, de nausées, de diarrhée parfois explosive, aqueuse avec rarement du sang dans les selles (17), des gaz odorants, le tout plus ou moins accompagné de crampes gastriques, céphalées, douleurs abdominales, ballonnements (donnant une grande sensibilité gastrique et ombilicale) et anorexie.

La diarrhée est aiguë mais peut rester chronique chez les immunodéficients, notamment les HIV+.

Les coliques intestinales peuvent être parfois violentes lorsqu'il s'agit des hépatotoxines d'*Oscillatoria*.

Avec *Cylindrospermopsis raciborskii*, les épisodes diarrhéiques sont précédés ou entrecoupés de constipation. Dans d'autres cas, les vomissements reviennent immédiatement à la vue ou après ingestion de nourriture. Soit le patient paraît plus ou moins guéri jusqu'au prochain repas, ou bien les symptômes continuent pendant 4-5 jours avec une intensité variable ; lorsqu'il y a des attaques cycliques de ce genre, la rémission temporaire s'accompagne d'une profonde asthénie. Chez aucun sujet, il n'y a immunité acquise.

La gastro-entérite est très répertoriée au nord des USA, Canada, Royaume-Uni, Australie et se révèle immédiate lorsqu'il y a lyse de la "fleur d'eau" par du sulfate de cuivre.

"The Barcoo" (33) : the "Barcoo River" est une rivière dans le Queensland au centre de l'Australie qui a donné son nom à l'intoxication due à *Cylindrospermopsis raciborskii*. La symptomatologie se caractérise pendant plusieurs semaines de la façon suivante :

- constipation initiale et/ou continue.
- survenue brutale de vomissements à la vue d'aliments suivis de céphalées de plus en plus fortes.
- malaise considérable.
- nausées persistantes, intenses malgré une faim et une sensation de vide.
- inquiétude.
- myalgie variable.
- fièvre.
- se termine parfois par un syndrome dysentérique.

⇒ Impact sur le foie (15,32).

L'ingestion de faibles doses de toxines notamment de *Microcystis aeruginosa* entraîne des dommages progressifs des hépatocytes qui peuvent être détectés par l'élévation des enzymes sériques d'origine hépatique : phosphatases alcalines, transaminases,... conduisant parfois à de véritables hépatites (37). Même si on n'a encore décelé aucun cancer chez l'homme, il n'en reste pas moins que les hépatotoxines provoquent de manière certaine un dysfonctionnement du foie avec mort des hépatocytes et invasion des leucocytes. De nombreuses études sont actuellement en cours en ce qui concerne la cyanophycée responsable : *Microcystis*.

⇒ Cancers ? (19, 32, 34, 41)

Chez les animaux, on incrimine largement la microcystine-LR comme agent de "tumor promotion" (22). Il a été observé que l'application sur la peau de lysat d'eau de boisson contenant *Microcystis* provoque chez la souris des tumeurs cutanées, des papillomes, voire mêmes des ulcères visibles.

La consommation orale de ce même lysat provoque des cancers du foie par une profonde inhibition des phosphatases protéiques de type 1 et 2 a.

Nostoc rivulare posséderait également une activité cancérigène. Certes, même si ce ne sont que des expérimentations animales, le phénomène peut paraître inquiétant pour l'homme exposé.

⇒ Réactions allergiques -Irritation (26)

Les symptômes apparaissent être une combinaison de réponses allergiques et toxiques à la "fleur d'eau" de cyanophycées (41). En effet, les symptômes tels que l'irritation oculaire et l'otalgie peuvent être associés à des réponses allergiques mais peuvent aussi être le résultat de contact avec des irritants primaires telles que les toxines algales.

Ces réactions apparaissent plutôt chez ceux qui utilisent l'eau comme loisir, étant par conséquent en contact cutané direct avec les filaments d'algues ou les toxines libérées dans l'eau (41).

On répertorie ainsi les divers symptômes suivants :

- irritations cutanées (15, 20, 22, 36).
- rash localisé
- dermatite de contact (17, 36).
- gonflement des lèvres (22, 42, 43).
- irritation suppurative sur les membres (33).
- irritation de la gorge (15, 22, 42, 43).
- toux sèche (42).
- asthme allergique (19).
- "rhume des foins" : rhinite, éternuements.
- irritation oculaire (15, 18-20).
- épisodes de conjonctivite aiguë allergique (9, 20).

⇒ Autres symptômes

- douleur pleurale, pneumonies basales atypiques; 4 à 5 jours après avoir bu (18, 20-22, 42, 43).
- thrombose pulmonaire atypique avec formation de dépôts protéiques intramusculaires (15, 42).
- fièvre à 38-39°C parfois oscillante à intervalles réguliers avec des variations de 0,5 à 4°C, frissons (22, 33, 42, 43).
- épisodes d'hallucinations (22, 42).
- troubles du sommeil (42).
- céphalées (15, 33, 36, 42, 43).
- asthénie (33, 44).
- vertiges, malaises (33, 36, 43).

- douleurs dorsales et douleurs rénales (22, 33).
- douleurs musculaires surtout localisées en haut des membres, donnant une gêne à la marche (33, 34, 36, 42, 44).

La plupart de ces symptômes ne sont pas mentionnés systématiquement car les individus affectés ne pensent pas que leur survenue soit liée directement aux "fleurs d'eau" de cyanophycées. Il existe probablement encore d'autres signes non repertoriés.

Deux cas de morts humaines ont été relatés parmi des gardiens de bétail en Australie, en 1883, par atteinte du "Barcoo rot" ; le médecin le plus proche était à 200 miles (soit 320 kms)... Les deux hommes sont morts en une journée faute d'assistance médicale (33).

Aucun empoisonnement aigu chez l'homme menant à la mort n'a été rapporté à partir des cyanophycées, mis à part le récit australien précédent et les morts massives de 1988 au Brésil (cf historique).

Dans la majorité des cas l'homme est épargné, non pas par manque de sensibilité, mais par insuffisance d'ingestion de "fleur d'eau" toxique.

Tableau 1 - Symptômes en fonction de quelques espèces de cyanophycées
(10, 16-19, 26, 29, 32-35, 37, 41)

Symptômes	Espèces								
	Anabaena	Aphanizomenon	Cylindrospermopsis raciborskii	Gloeotrichia echinulata	Lyngbia	Microcystis	Nodularia	Oscillatoria	Schizothrix calcicola
nausée	X	X	X			X	X		
vomissement	X	X	X			X	X	X	X
diarrhée	X	X	X			X	X	X	X
constipation			X				X		
hépatite	X					X	X		
hémorragie du foie	X					X			
petechies intestinales	X	X		X	X				
pneumonie						X			
asthme allergique								X	
autres désordres respiratoires	X			X				X	X
irritation gorge	X				X	X			
toux sèche						X			
rhinite	X					X		X	
éternuement	X					X		X	
gonflement nez									
bouche lèvre	X				X	X		X	
otalgie	X					X			
irritation oculaire	X				X	X		X	
conjonctivite de contact	X				X				
irritation cutanée	X	X		X	X			X	X
dermatite papulo vésiculaire	X			X	X				
douleurs diverses									
tube digestif	X	X	X	X		X		X	X
articulaire	X					X			
musculaire			X	X		X			
autres :									
fièvre	X		X			X		X	
extrémités froides						X			
soif						X			
malaise			X						
céphalée	X		X			X			
tremblements musculaires	X								
piloérection				X		X			
asthénie			X			X			
activité "tumor promotion"						X			

d - Différentes formes

On distingue deux formes d'empoisonnement :

⇒ forme aiguë (26)

La toxicité aiguë ou subaiguë est évidente lorsque les toxines sont responsables des gastro-entérites et irritations de contact, chez ceux qui utilisent l'eau comme loisir (7). Les accès violents de vomissements et de diarrhée aqueuse qui durent 2 à 3 jours provoquent un déséquilibre électrolytique, une déshydratation avec une phase d'asthénie. Chez la souris, les effets aigus dûs aux peptides de *Microcystis* sont les mieux étudiés sur le foie ; ce dernier présente une lyse des hépatocytes, une perturbation de structure et une hémorragie extensive. L'animal empoisonné meurt par hémorragie.

⇒ forme chronique

Bien que la toxicité aiguë soit la plus fréquente, on parle d'un effet potentiel chronique par exposition à long terme à des "fleurs d'eau" de cyanophycées *Nostoc rivulare*, *Microcystis aeruginosa*, *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Anabaena flos-aquae*, qui se répètent au même endroit (20, 33, 34). Ainsi la population est exposée à un risque par consommation répétée d'eau (19, 20, 29, 32, 33, 39). Certaines personnes immunocompétentes qui ingèrent des petites quantités de toxines sur une longue période sont sujettes à des épisodes de nausées, vomissements et diarrhée entrecoupés d'une complète rémission sans suivi médical (19, 29, 33). Mais cette symptomatologie peut largement se prolonger chez les immunodéficients.

La forme chronique est plus délicate à mettre en évidence même par une étude épidémiologique dans une population ou par expérimentations (32). Des études sur la souris montrent, chez les survivantes, une atteinte chronique du foie et une augmentation des broncho-pneumonies (34).

Certains chercheurs essaient de démontrer que l'exposition chronique à de petites quantités de toxines dans l'eau de boisson pourrait être carcinogène (29, 32, 41, 42). Des études actuelles sont en cours : test de mutagenicité pour *Salmonella typhimurium*, test de sporulation multigène sur *Bacillus subtilis* et cassures chromosomiques utilisant des lymphocytes humains. Les cassures observées avec les hépatotoxines, anatoxines-a et néosaxitoxines, suggèrent que les toxines algales ont un effet clastogénique sur les cellules humaines in vitro.

Cette activité doit être explorée en comparant avec d'autres agents contaminants environnementaux analysés dans des tests de cassure de chromosomes sur des cellules lymphocytaires humaines (29).

Des études chez la souris montrent que l'administration continue de *Microcystis* réduit la taille du cerveau (Falconer et ses collaborateurs, 1988) et que l'ingestion d'*Anabaena* est responsable d'une tumeur cutanée d'évolution plus lente qu'avec *Microcystis* où l'augmentation du poids tumoral est significative (19, 32, 41). La consommation orale de *Microcystis* mènerait à un effet promoteur de croissance tumorale dont le mécanisme n'est pas identifié. A ce propos, l'atteinte du consommateur humain nécessite plus d'approfondissement (32).

3 - Biologie - Radiologie (15, 19, 32, 37).

Les résultats des examens enzymatiques hépatiques montrent dans le plasma humain une élévation significative des niveaux de gamma-glutamyl transférase (gamma GT) et une élévation moyenne des transaminases chez des individus qui boivent de l'eau provenant d'un réservoir contenant une "fleur d'eau" importante de *Microcystis aeruginosa*.

Ces enzymes sont relarguées après dommage du foie par l'alcool ou les toxines sur les membranes cellulaires hépatiques. Cet effet certain sur le foie entraîne également une augmentation de la bilirubinémie lors des cas sévères.

Une grande enquête a été menée en 1981 en Nouvelle Angleterre. Durant la première partie de l'année, une "fleur d'eau" importante de *Microcystis aeruginosa* est apparue au réservoir de Malpas (Armidale) et traitée par du sulfate de cuivre. Les données cliniques enzymatiques de 87 patients de la région entière ont été collectées pendant une période de :

- Cinq semaines avant les premiers signes de la "fleur d'eau" apparue.
- Trois semaines durant la "fleur d'eau".
- Deux semaines après le traitement par du sulfate de cuivre (CuSO_4)
- Cinq semaines finales.

Les données ont été examinées en comparant les résidents qui recevaient l'eau du barrage de Malpas à ceux résidant en dehors d'Armidale, ces derniers ayant des réserves d'eau indépendantes. Il est apparu une variation considérable dans les résultats d'analyse de chaque groupe. Les différences portaient surtout sur l'augmentation significative des niveaux de gamma GT chez les résidents recevant l'eau du barrage de Malpas durant la période de la "fleur d'eau" et sa lyse par du CuSO_4 , et ce, sur une grande proportion d'enfants. Le niveau de gamma GT des résidents était plus faible avant et durant la période finale de la "fleur d'eau". Chaque dossier médical a été examiné pour la mise en évidence d'hépatite d'origine virale, d'éthylisme ou de maladie donnant une atteinte du foie. En l'absence de telles pathologies, il a été conclu que la toxine de *Microcystis* était responsable de l'augmentation des enzymes du foie. L'élévation des gamma GT reste l'indicateur le plus sensible de l'atteinte hépatique. Une augmentation faible des transaminases glutamate pyruvate (TGP = ALAT) pendant la période de la "fleur d'eau" reste non significative chez la même population. Sur certains patients admis à l'hôpital pour pneumonies dues à des microcystines, on note une baisse des plaquettes qui remontent ensuite spontanément (42). Les radiographies pulmonaires révèlent une consolidation basale au poumon gauche avec des signes de pneumonie atypique (22, 33, 43).

Glycosurie, protéinurie, cétonurie et hématurie peuvent être présentes lors d'une atteinte par *Cylindrospermopsis raciborskii* (33).

4 - Toxicité indirecte (46)

Une toxicité indirecte peut se rencontrer comme celle de *Vibrio cholerae* qui pourrait persister vivant plus d'un an dans la gaine mucilagineuse d'*Anabaena variabilis* qui constitue alors un réservoir dans des zones endémiques tropicales tel le Bangladesh, mais aussi le Pérou et la Chine (18). Ceci a été observé par microscope à contraste de phase et par fluorescence plus de 15 mois après inoculation, avec une croissance simultanée exponentielle du vibron cholérique et de l'algue.

IV - MESURES PREVENTIVES-DISCUSSION

1) Prise de conscience (22)

La sensibilisation au problème a toujours été prise en compte par des accidents ayant eu un impact financier important comme par exemple une intoxication mortelle de tout ou partie d'un troupeau d'animaux domestiques (18).

La Grande-Bretagne, suite aux événements importants de Rudyard en 1989, a fait un effort considérable par le biais du NRA (National Rivers Authority) et des propriétaires, pour la surveillance des "fleurs d'eau" et toxines des cyanophycées. Ceci s'est centré à partir de 1990 sur l'identification et la quantification approximative des espèces formatrices de puissantes toxines, essais sur la souris, calcul d'incidence de toxicité des "fleurs d'eau". Des inspections à grande échelle et des échantillonnages ont été entrepris pour chaque eau. Cette étude a permis de classer les eaux en fonction du risque de contact et d'ingestion de la couche de cyanophycées par les humains et animaux domestiques. Un rappel public établi par le NRA a régulièrement publié des listes d'eaux où proliféraient massivement des cyanophycées ; un matériel publicitaire a été produit ; des avertissements appropriés ont été donnés aux propriétaires des eaux, opérateurs, officiels de la santé environnementale et de l'agriculture. La RYA (Royal Yachting Association) a tenu un séminaire le 24 mars 1990 sur le "Heading Blue Green and Deadly" après quoi elle a publié un code pratique en mai 1990 pour minimiser auprès des navigateurs les risques sur les eaux affectées.

La prise de conscience des risques liés aux "fleurs d'eau" de cyanophycées toxiques a ainsi augmenté considérablement en Angleterre par la production et la dissémination à grande échelle de dépliants, d'avertissements, par la fermeture des lacs pour les loisirs, par des travaux de spécialistes en environnement et en toxicologie. On collecte, on identifie, on recommande des mesures pour la surveillance à court et à long terme (32).

Les morts d'animaux et les problèmes de santé humaine attribués aux toxines de cyanophycées dans les pays scandinaves ont été également documentés, décrits et le niveau de la prise de conscience du public sur les risques dans ces pays est relativement haut en Europe : remarques avertissant le public, dépliants, tracts sur la mort de chiens et bovins dans les années récentes, bains interdits... Ceci contribue probablement à la diminution récente observée dans les rapports d'incidence d'empoisonnements certainement parce que les usagers avertis évitent les "fleurs d'eau" (26).

Certains pays mettent l'accent sur l'identification des besoins futurs pour le contrôle et la gestion des "fleurs d'eau" de cyanophycées toxiques.

Dans d'autres pays, bien que la prise de conscience existe, le problème n'est pas d'une ampleur suffisante pour avoir recours à de grosses dépenses pour son contrôle: de simples traitements peuvent améliorer la situation (15).

Cependant, il y a eu des cas où l'action a été nécessaire et où les pressions politiques ont été présentes (15). A ce propos l'impact des empoisonnements, de l'intérêt des médias et d'un large public, les avertissements pour éviter le contact avec les couches de cyanophycées, en particulier par les enfants, et pour empêcher les animaux de boire l'eau, ont des effets majeurs sur les activités de l'eau. Les activités affectées incluent l'annulation des événements sportifs, baignades et compétitions de pêche. Il s'en suit un déclin majeur du nombre de venues de touristes avec donc pour conséquence des pertes économiques associées (15, 19).

L'usage croissant de l'eau douce par les hommes suggèrent que des incidents liés aux "fleurs d'eau" de cyanophycées peuvent encore augmenter dans le futur si l'accès humain aux différentes eaux n'est pas restreint (15). Certaines autorités européennes ont déjà pris conscience de l'impact sur la santé humaine, surtout le nord de l'Europe.

En Australie, on ferme les réserves qui alimentent en eau de boisson les villes pour éviter toute atteinte humaine possible (32).

Aux USA, il semble que les chercheurs portent plus d'intérêt au phénomène plus fréquemment observé ; des études physiques de la région et des échantillons d'eau pris dans les lacs sont menés par le département des ressources environnementales et des décisions sont prises pour fermer les plages lorsque des flux importants de touristes sont prévus pour les week-ends. Des couvertures multimédias sont utilisées pour avertir le plus de gens possible. Des registres sont tenus dans certains clubs nautiques durant l'été pour rappeler les problèmes de santé possibles. Des panneaux sont aussi mis sur les plages par les propriétaires pour prévenir des réactions possibles lors du contact avec l'eau.

2 - Problèmes rencontrés

La connaissance sur la distribution des "fleurs d'eau" toxiques de cyanophycées en Europe est très irrégulière, incomplète et a besoin de plus d'études systématiques (17, 21, 22, 25, 26).

Lorsque le temps change, la formation et la dispersion de la "fleur d'eau" se font en quelques jours, voire quelques heures (15, 16, 25). Les vésicules de gaz disparaissent brutalement par écrasement dû à la pression osmotique interne des cellules et réapparaissent par création de novo (37). Il est donc parfois difficile de recueillir des échantillons de "fleurs d'eau" du site au moment propice (16, 25, 26).

De plus, les niveaux de toxines par unité de masse dans les dimensions horizontales et verticales des corps d'eau et les niveaux relatifs des toxines produites dans les mélanges, varient beaucoup (22, 24, 25).

On relate que les "fleurs d'eau" sont toxiques de façon intermittente, que toutes les "fleurs d'eau" ne contiennent pas de toxines (16, 29).

En effet, différents clones d'une même espèce ne possèdent pas tous la même capacité de production de toxines (27-34), et toutes les toxines ne sont pas toujours stables durant de longues périodes (15, 17, 29). Leur production peut varier de "bloom" en "bloom" même au sein d'une même espèce (39). Certains chercheurs insistent sur le fait que la toxicité varie largement, dépendant du lieu et du moment de la collecte (31, 35). Toutes ces variations composent donc la difficulté de dire si la "fleur d'eau" est toxique ou pas (15, 17, 31).

On connaît quelques informations de base sur la formation des "fleurs d'eau" de ces algues mais on manque de facteurs sûrs quant à l'induction de la toxicité (15, 17). L'isolement, la culture, l'écologie, la physiologie, la génétique des espèces toxiques et non toxiques sont encore des éléments peu élucidés (31).

Les tentatives de détermination pour voir si les cyanophycées pouvaient être l'agent causal ont été longues (9, 26). C'est pourquoi les études en cours évoluent lentement. Bien que des déclarations de maladies humaines impliquant les cyanophycées aient été reportées dans la littérature scientifique durant le siècle dernier, la plupart des membres des professions de Santé ne sont pas actuellement au courant du potentiel pathogénique de quelques-uns de ces organismes (26). D'un autre côté, les patients ne mentionnent pas systématiquement leurs dernières activités et les symptômes qui surviennent, soit par omission, soit parce qu'ils ne pensent pas que ceci peut être relié au phénomène de "fleur d'eau" (26). Certaines personnes impliquées ont même fini leurs vacances et retournent chez eux ; aucune interrogation directe ne peut donc être faite dans ce cas là (26). Beaucoup de descriptions d'empoisonnements par les toxines de cyanophycées sont incomplètes et contées après les événements ; la prise de conscience des effets de ces toxines est encore faible (22, 26). On est documenté sur la capacité de certaines cyanophycées à produire des substances toxiques pour l'homme mais les relations d'une manière générale ne sont pas toujours reconnues par les agences officielles de la Santé Publique (26). Pourtant, la plupart des "fleurs d'eau" européennes arrivent dans des eaux de loisirs attractives avec un accès facile pour le public. Il faut donc redoubler de vigilance (22).

Dans beaucoup de cas, les eaux usées sont retenues dans les marais ou les étangs d'exploitation avant leur utilisation sur les terres, favorisant ainsi la croissance des algues et contribuant ainsi à la formation de toxines (26). Des concentrations significatives d'algues peuvent être transportées par des eaux filtrant en profondeur à travers le sable, jouant le rôle de tamis, et peuvent affecter la qualité de l'eau qui recharge les aquifères (26). La contamination des nappes phréatiques peut donc arriver à partir de fuites et d'infiltrations. La nature du sol a une grande influence sur la migration des produits. Les nappes phréatiques sont une importante ressource qui doit être protégée de la contamination. Des études ont montré que 90 à 99 % des endotoxines sont enlevées après un passage des eaux usées à travers une colonne de 100 à 250 cm de terre sableuse. Quand on passe de l'eau distillée pour simuler la pluie, les endotoxines sont mobilisées et bougent en bande à travers la colonne de sol d'une manière similaire à ce qui est observé pour les bactéries et virus (26).

Actuellement aux USA, 20 % des eaux de réserve du pays et jusqu'à 46 % dans certaines régions, proviennent des sources de ces nappes (17). Leur utilisation est en train d'augmenter et d'ici l'an 2 000, on s'attend à une augmentation jusqu'à 33 % de l'eau totale utilisée dans le pays (17). Comme la demande d'une eau propre augmente et les réserves diminuent, il est évident que la recharge artificielle deviendra plus répandue (17).

De gros problèmes résident également quant au traitement des "fleurs d'eau" de cyanophycées, surtout lorsque le sulfate de cuivre est utilisé (22, 47) ; ce traitement algicide induit la lyse cellulaire des algues qui relarguent alors leurs endotoxines dans l'eau environnante (phénomène également observé avec la chloration (19)) ; les microcystines dissoutes sont détectées seulement 24 heures après la pulvérisation du produit et sont rapidement diluées par l'eau non contaminée ; elles peuvent persister à de hauts niveaux : 1 300 à 1 800 mg/l pendant une dizaine de jours avant que la dégradation ne commence ; 1 à 2 jours après le traitement par le sulfate de cuivre on observe des déclarations de gastroentérites (22, 37, 47). Les empoisonnements sont-ils dûs aux toxines libérées par la lyse algale ou par la toxicité aiguë du cuivre qui cause des diarrhées ? A ce sujet Falconer IR pose la question : est-ce que l'augmentation des gamma GT observée est due également au cuivre ? (19). Des données toxicologiques sont à étudier (33).

De plus, les traitements conventionnels de potabilisation basés sur la floculation* chimique et la filtration n'enlèvent pas les toxines de *Microcystis aeruginosa* de la solution (17, 19, 37,48). Des changements morphologiques des cellules de cette algue se produisent pendant qu'elles sont maintenues en culture de laboratoire ; il n'y a aucune différence morphologique entre les espèces isolées toxiques et non toxiques (35). Par conséquent, il est impossible d'étudier cette algue toxique en se basant uniquement sur les caractéristiques morphologiques (35).

En Australie, l'eutrophisation devient un problème significatif pour les Autorités de l'Eau car de faibles concentrations de toxines de cyanophycées sont saisonnièrement communes dans les réserves d'eau de boisson et le coût des traitements et des contrôles atteint des millions de dollars. En effet, les réservoirs couvrent des milliers de kilomètres dans ce pays semi- désertique (19, 32).

Dans les pays tempérés, les bons programmes de gestion de l'eutrophisation sont également coûteux : on estime que s'il y a peu de ressources disponibles et de structures administratives adéquates, ce programme n'a aucun intérêt (24).

3 - Solutions

La survenue d'une "fleur d'eau" de cyanophycées toxiques et les risques que les toxines présentent pour la santé publique et animale, justifient les mesures de reconnaissance et de prévention.

a - Prévention (24)

On insistera beaucoup dans ce paragraphe sur la réduction de l'apport des nutriments en sachant que les composés phosphorés et azotés sont les seuls éléments indispensables à la croissance de l'algue et que d'autre part les phosphates sont les seuls nutriments facilement contrôlables au point de les rendre limitant à la formation d'une "fleur d'eau" (26 , 29).

1 - Il faut donc diminuer les écoulements de nutriments des bassins versants provenant des exploitations agricoles, des eaux usées, des sites de construction, des villes et banlieues, industries (15, 16, 17, 22) même si cette réduction des apports externes n'est pas toujours suffisante à cause du relargage à partir des sédiments :

- raccorder les réseaux autonomes d'eaux usées (fosse septique) à des sites de traitement locaux.

- diminuer l'usage excessif des engrais et pesticides et leur préférer des fertilisants d'origine animale ou des engrais verts.

- contrôler les écoulements des aires d'ensilage et de laiteries.

- déphosphater les effluents des stations d'épuration car, à la sortie, les phosphates sont à 75-90 % biodisponibles: précipitation chimique par le chlorure d'aluminium ou de fer, la chaux, aération, passage sur un lit de filtration après le traitement chimique.

- diminuer la quantité de phosphore dans les détergents (en Allemagne, une étude sur l'emploi d'un substitut du phosphate, le NTA ou acide nitrilotriacétique, est en cours). Certains pays ont une réglementation suivie du pourcentage de phosphates par poids de détergent :Allemagne, Canada, USA, Suisse.

- construire des prébarrages, des sortes de réacteurs biologiques où les phosphates seraient retenus pendant une courte durée et piégés dans des sédiments puis fixés par des algues. L'expérience a été faite en Europe Centrale : en été, il y a eu réduction de 70 à 90 % des orthophosphates et de 0 à 30 % en hiver.

- ajouter du sulfate de fer (produit de précipitation) au point d'arrivée des eaux.

- faire passer les eaux tributaires de faibles flux sur des filtres d'oxydes d'aluminium : filtres de durée de vie longue, faciles d'entretien, fonctionnant été comme hiver, sans électricité.

- dériver les eaux usées.

- inactiver ou neutraliser les nutriments directement dans le plan d'eau : sels de fer ou d'aluminium. Le problème est que leur usage est temporaire et cela entraîne une intoxication des organismes vivants.

- augmenter l'écoulement : transporter de l'eau peu nutritive sur le plan d'eau pour accélérer le taux de renouvellement ce qui correspond à une dilution des nutriments et diminution de l'accumulation algale.

- aérer l'hypolimnion pour éviter le relargage des phosphates soit en introduisant de l'oxygène, soit en créant un environnement oxydant autour des sédiments ou bien encore en injectant des pigments (les vases anaérobies fourniront de l'oxygène).

- activer régulièrement la circulation par brassage général des eaux d'où destratification (22).

- si le lac est petit, évacuer les eaux hypolimniques par des systèmes de vanne.

- abaisser le niveau d'eau pour exposer les sédiments à l'atmosphère. L'inconvénient est que ce procédé détruit les organismes fragiles.

- pour les petits plans d'eau : recouvrir les sédiments par des bâches plastiques ou des matériaux particuliers (cendres volantes provenant des centrales électriques). Ces dernières sont cependant toxiques et ce nappage est coûteux.

- draguer les sédiments : procédé également coûteux.

- se servir de la biomanipulation : utiliser des micro-organismes pour contrôler la croissance des algues mais attention cela peut perturber l'équilibre écologique.

- l'activité piscicole : la moitié du stock total de phosphore peut-être contenu dans les poissons car ils utilisent les éléments nutritifs d'un milieu eutrophe. Il faut donc les pêcher pour éviter leurs déjections et leurs cadavres ou bien réduire la pisciculture. On peut aussi limiter les animaux qui libèrent les phosphates à partir des sédiments (larves d'insectes, vers, carpes).

- siphonner dans les lacs profonds les eaux situées juste au-dessus des sédiments.

- réduire la pénétration de lumière dans l'eau (couvrir en surface par des bâches opaques ou des flotteurs, ajouter des pigments qui absorbent la lumière, étendre des billes plastique ou de la suie). Ceci n'est valable que pour des petits lacs, et de plus certaines cyanophycées résistent à l'obscurité (22).

- utiliser des produits pour changer le pH.

- faire des bandes de végétation sur les bassins versants pour réduire l'érosion et le ruissellement en surface.

- labourer suivant les courbes de niveau et en travers de la pente.

- procéder à une reforestation.

- faire une rotation des cultures.

- réduire l'utilisation de croquettes alimentaires comme appât de poissons car elles sont riches en matières nutritives.

- tenter de manipuler le rapport TN/TP pour améliorer la qualité des populations algales. Si $TN/TP > 30$, il n'y a pas de cyanophycées selon Smith (1983).

Cette liste de suggestions peut paraître longue pour limiter les facteurs à l'origine d'une "fleur d'eau" de cyanophycées. Cependant il existe certains points que l'on ne peut réguler : climat, hydrologie, géologie, topographie.

De plus, il faut, en diminuant ces nutriments, faire attention au changement de limite TN/TP.

2 - Les contrôles : la présence même faible de cyanophycées dans un plan d'eau doit être prise en compte. Cet indice doit déclencher toute une démarche d'identification des causes et amélioration de la qualité de l'eau.

Des contrôles doivent être faits régulièrement en analysant le coût et le bénéfice pour les différentes stratégies utilisées (20, 22). L'idéal est une campagne d'échantillonnage étendue sur toute l'année pour un suivi dynamique de la biomasse avec relevés de la température, Q_10 , pH, conductivité et transparence.

Fréquence d'échantillonnage :

Climat tempéré : de novembre → mars : une fois par mois
d'avril → octobre : 2 fois par semaine

Climat tropical, subtropical :

du début → 3 mois après la fin : 2 fois par semaine
de la saison des pluies
reste de l'année : une fois par mois.

3 - Mieux définir les limites des "fleurs d'eau" : où et quand cela arrive ou peut arriver (26).

4 - Surveiller les espèces du zooplancton présent qui est régulé par la composition du phytoplancton (26). Par exemple, les daphnies* sont capables de détecter la présence de toxines et cessent alors de s'alimenter (18).

5 - En France, il faut réunir les efforts du secteur public (DDASS, DRASS, Agences de l'Eau, DIREN, ...) et du secteur privé en maintenant une communication entre les chercheurs et les officiels de la Santé Publique. Ainsi à chaque problème ou solution trouvés, les personnes nécessaires seront rapidement informées et les implications vite déterminées (17, 26, 28).

6 - La présence des toxines de cyanophycées doit être étudiée particulièrement pour l'ouverture des eaux de réserve municipale et de loisir : contrôle systématique avec échantillons envoyés en culture algale (26).

7 - Les baignades en eau douce doivent être surveillées et quand une "fleur d'eau" se produit, ces lieux doivent être fermés au public (9, 22, 26, 32).

8 - Il faut éviter tout contact avec les couches des "fleurs d'eau" de cyanophycées et l'absorption de cette eau. Ceci est valable également pour les animaux qui viennent s'abreuver (22, 39).

9 - Eviter que la population ne boive l'eau quand il y a altération des caractères organoleptiques : odeur, couleur, saveur (32).

10 - Dans les pays tropicaux, les fermiers doivent récupérer l'eau de pluie des toits pour la boisson et la stocker dans des citernes. Les voyageurs doivent si possible emmener leur eau (9, 33).

11 - Une attention particulière doit être prise pour garantir la sécurité en prévenant la contamination par des bactéries accumulées dans les cyanophycées (17).

12 - Les législateurs et officiels de la Santé Publique doivent informer rapidement et correctement le public et les partis concernés des risques : comptes rendus réguliers, diffusion de tracts, dépliants, panneaux sur les lieux-mêmes, utilisation des médias, (TV, presse, radio) en proclamant des avertissements sévères, informant des réactions possibles (26) le tout bien sûr avec peu de "jargon" technique mais avec des documents bien illustrés. Il est important de bien informer le public car une fois averti, celui-ci peut contribuer au succès d'un programme (26).

13 - Les médecins doivent interroger les patients pour tout contact avec de telles couches à la surface de l'eau et spécialement le long des rives. Des échantillons de sang, de fécès, et des prélèvements de gorge doivent être faits pour éliminer toute autre cause de maladie (20, 26, 33).

b) Etudes épidémiologiques et de recherche

Une simple reconnaissance d'un agent de maladie humaine n'est pas suffisante. Le premier but est de prévenir la maladie. Plus d'enquêtes épidémiologique sur les déclarations seraient donc intéressantes pour mieux utiliser cette connaissance par la suite (26).

Il faut donc réunir les efforts des Autorités, Agences d'Environnement, professionnels de la Santé et du public lui même. (32). Ces enquêtes aideraient à insister sur la relation exposition-effets (15). Il suffit pour cela d'envoyer un questionnaire avec observations pour contrôler les usagers de l'eau exposés avant et après une "fleur d'eau" (36).

Une grande enquête a été menée en 1990 dans le Sud de l'Angleterre pour identifier n'importe quel risque associé aux expositions de "fleur d'eau" de *Microcystis* (Réservoir de Cheddar) ; un protocole d'études et un questionnaire ont été préparés en collaboration avec les propriétaires des eaux, les membres des clubs de navigation.

(Cf annexe 2-4 des pages 64-66)

PHILIPP AND BATES ON

Appendix 1

BRISTOL WATER

BRISTOL CORINTHIANS YACHT CLUB

CHEW VALLEY SAILING CLUB

September 1990

PUBLIC HEALTH AND RECREATIONAL WATER EXPOSURE

Thank you for taking part in this survey. In it, the health of people who have taken part in different water-based activities in Summer 1990 is being compared with people who had no such contact with water. The findings will help us to determine if some people experience health effects in the days following recreational water exposure and if such effects should be attributed to water.

WHETHER OR NOT YOU WERE IN CONTACT WITH RECREATIONAL WATER DURING THE TWO WEEKS BEFORE YOU RECEIVED THIS QUESTIONNAIRE, WE WOULD BE GRATEFUL IF YOU WOULD COMPLETE AND RETURN IT IN THE ACCOMPANYING PRE-PAID ENVELOPE AS SOON AS POSSIBLE.

YOUR REPLY IS EQUALLY IMPORTANT WHETHER OR NOT YOU BECAME ILL AFTER THE WATER BASED ACTIVITY. The more people who respond the more accurately we will be able to compare patterns of health between different groups who have/have not taken part in such activities.

Results of the study will be made available to all groups who take part. Personal details will however be kept in strict confidence.

This study is being undertaken jointly by:

Bristol Water;

Bristol Corinthian Yacht Club, Cheddar;

Chew Valley Sailing Club;

Institution of Environmental Health Offices, London;

WHO Collaborating Centre for Environmental Health Promotion and Ecology, University of Bristol.

THESE LOCAL STUDIES ARE PART OF A NATIONAL SURVEY BEING UNDERTAKEN FROM THE UNIVERSITY OF BRISTOL.

Please return the completed questionnaire as soon as possible using the pre-paid envelope enclosed.

PLEASE ANSWER EACH QUESTION BELOW by writing on the dotted lines or ticking appropriate boxes:

1. Are you male or female?

2. How old are you? (Please state in years)

3. Does your work involve contact with untreated water? (eg. commercial fishing or diving, watersports instruction, waterworks, canal, river, or harbour maintenance): YES NO

4. Which of the following activities best describes your closest contact with untreated recreational water during the past 14 days? (i.e. public swimming pools are excluded):

- a) DID NOT GO NEAR THE WATER
- b) Diving
- c) Snorkelling
- d) Swimming
- e) Paddling
- f) Beach/Waterside walking
- g) Fishing
- h) Canoeing:
 - (no roll/capsize)
 - (with roll/capsize)
- i) Boating/Sailing:
 - (no capsizes)
 - (with capsizes)
- j) Water Skiing
- k) Windsurfing
- l) Board/Body Surfing
- m) OTHER
(Please give details)
.....

HEALTH-RISKS ASSESSMENT OF DINGHY SAILING IN AVON AND EXPOSURE TO CYANOBACTERIA

5. Which of the following aquatic visual/breathing aids did you use?

- | | | | |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| a) NONE – DID NOT GO NEAR WATER | <input type="checkbox"/> | d) Swimming goggles | <input type="checkbox"/> |
| b) NONE – BUT WENT IN WATER | <input type="checkbox"/> | e) Snorkel | <input type="checkbox"/> |
| c) Facemask | <input type="checkbox"/> | f) Aqua lung | <input type="checkbox"/> |
| | | g) OTHER AID | <input type="checkbox"/> |
| | | (Please specify) | |

6. IF YOU ENTERED THE WATER, did you wear –

- | | | | | |
|---|--------------------------|-----|--------------------------|----|
| (a) a long sleeved wet suit | <input type="checkbox"/> | YES | <input type="checkbox"/> | NO |
| (b) a short/sleeveless wet suit? | <input type="checkbox"/> | YES | <input type="checkbox"/> | NO |
| (c) a part wet suit? | <input type="checkbox"/> | YES | <input type="checkbox"/> | NO |
| (d) any other cold insulation/protective clothing | <input type="checkbox"/> | YES | <input type="checkbox"/> | NO |
| (Please specify): | | | | |

7. Did you have any health problems/illnesses/allergies/cuts/abrasions IN THE TWO WEEKS BEFORE these last 14 days?

YES NO

If YES, please briefly describe the details:

8. REGARDLESS OF WHETHER OR NOT YOU HAD UNTREATED RECREATIONAL WATER CONTACT, have you in the last 14 days suffered from any of the following symptoms?

PLEASE TICK APPROPRIATE BOX/BOXES

- | | | | |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| <i>CONSTITUTIONAL:</i> | | n) Chest wheezing | <input type="checkbox"/> |
| a) Fever | <input type="checkbox"/> | <i>EAR:</i> | |
| b) Joint pains | <input type="checkbox"/> | o) Ear itching | <input type="checkbox"/> |
| c) Muscle pains | <input type="checkbox"/> | p) Ear pain | <input type="checkbox"/> |
| <i>GASTROINTESTINAL:</i> | | q) Ear discharge | <input type="checkbox"/> |
| d) Abdominal pain/Stomach cramps | <input type="checkbox"/> | <i>SKIN:</i> | |
| e) Nausea | <input type="checkbox"/> | r) Blistering around mouth | <input type="checkbox"/> |
| f) Vomiting | <input type="checkbox"/> | s) Skin blisters | <input type="checkbox"/> |
| g) Diarrhoea | <input type="checkbox"/> | t) Skin rashes | <input type="checkbox"/> |
| <i>UPPER RESPIRATORY:</i> | | u) Skin itching | <input type="checkbox"/> |
| h) Sore throat | <input type="checkbox"/> | <i>EYE:</i> | |
| i) Cough | <input type="checkbox"/> | v) Eye redness | <input type="checkbox"/> |
| j) Sneezing | <input type="checkbox"/> | w) Eye itching | <input type="checkbox"/> |
| k) Sinus problems | <input type="checkbox"/> | x) Eye pain | <input type="checkbox"/> |
| <i>LOWER RESPIRATORY:</i> | | y) Eye swelling | <input type="checkbox"/> |
| l) Chest pain | <input type="checkbox"/> | z) Any OTHER health problems? | <input type="checkbox"/> |
| m) Chest tightness | <input type="checkbox"/> | (If so, please give details below) | |

NO HEALTH PROBLEMS IN THE LAST 14 DAYS

If YES for any symptoms in question 8:

(i) When did the main symptoms begin? (Please give the date)

HEALTH-RISKS ASSESSMENT OF DINGHY SAILING IN AVON AND EXPOSURE TO CYANOBACTERIA

(ii) How long did the main symptoms last days hours

(iii) (a) Did you feel unable to leave your home on one or more days because of these symptoms? YES NO

(b) If YES, how many days were you confined to home? (Please state)

(iv) Did you need to visit your GP about these symptoms? YES NO

9. Do you have any reason to believe that your symptoms were due to food poisoning or alcohol consumption?

YES NO NOT SURE

If YES/NOT SURE, please explain:

.....
.....

10. Have you eaten any FRESH fish/shellfish in the last 14 days? YES NO

If YES, please state below the species of fish/shellfish and the locality/ies where they were obtained:

.....

11. APART FROM THE PLACE WHERE YOU WERE GIVEN THIS QUESTIONNAIRE, HAVE YOU BEEN TO ANY OTHER WATER EDGE OR TAKEN PART IN WATER-BASED ACTIVITIES ELSEWHERE during the last 14 days: YES NO

(i) If YES, was it a:

- | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| a) Marine coast | <input type="checkbox"/> | e) Freshwater Reservoir | <input type="checkbox"/> |
| b) Harbour | <input type="checkbox"/> | f) Freshwater Lake | <input type="checkbox"/> |
| c) Estuary | <input type="checkbox"/> | g) River | <input type="checkbox"/> |
| d) Inland Canal/Waterway | <input type="checkbox"/> | h) OTHER | <input type="checkbox"/> |
- (Please give details)

(ii) Please write below the *names and localities* of these other areas and the *dates* you were there:

Names and Localities

Dates

.....
.....
.....
.....
.....

12. In the last 14 days, has anyone else in your household:

- | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------|
| a) had close contact with untreated recreational water? | <input type="checkbox"/> YES | <input type="checkbox"/> NO |
| b) suffered similar symptoms of (a-z) in Question 8? | <input type="checkbox"/> YES | <input type="checkbox"/> NO |

If YES, please list the symptoms and number of people experiencing them:

.....
.....

THANKYOU VERY MUCH ONCE AGAIN FOR TAKING PART IN THIS STUDY.

Les indications du WHO (World Health Organization) pour les études épidémiologiques, les recommandations sur les activités de surveillance de la Santé, les expériences anglaises ainsi que les observations des risques assurés aux expositions à l'eau, toutes ont été utilisées pour désigner le protocole et adapter le questionnaire. Le but était d'étudier les contacts avec l'eau sur une période de deux semaines commençant après le pic de *Microcystis*.

Le questionnaire a été envoyé à 680 membres de clubs de navigation ; ces derniers ont eu trois semaines pour le remplir et le retourner : 56 % des membres l'ont renvoyé. A ce stade là une remarque peut être apportée : une telle entreprise est possible et sera significative, mais à condition que l'on soit sûr de la toxicité de la "fleur d'eau" (31).

La coopération de chacun est nécessaire.

Plus de recherches sont donc à entreprendre sur la toxicologie, la biochimie, la physiologie et la génétique des toxines de cyanophycées pour aider les perspectives de contrôle de leur formation et de leur suppression de l'eau, pour corrélérer la concentration de toxines disponibles et la production de symptômes (15, 26, 39). Pour cela il faut recueillir des échantillons de "fleur d'eau" au lieu exact et rapidement, (les filtrer si le délai entre la récolte et l'analyse dépasse quelques heures en les maintenant à l'obscurité dans une glacière), développer des moyens simples d'identification de "fleurs d'eau" toxiques avant que ces dernières n'atteignent des niveaux critiques, déterminer combien de temps ces substances restent toxiques sous des conditions variées à la fois dans l'eau et les sédiments, définir distinctement pourquoi les "fleurs d'eau" toxiques arrivent et éliminer si possible les causes (16, 26, 29).

Quand les patients présentent des symptômes, il devrait y avoir un examen des sources de boisson et les échantillons devraient être envoyés en culture (14, 16).

Actuellement, beaucoup de recherches sont en cours quant à l'atteinte chronique de certaines toxines. Des cultures cellulaires de mammifères (thymocytes, hépatocytes, réticulocytes) sont testées. Leurs réponses sont moins nettes que celles de la souris vivante. Cependant Armstrong (1991, J. Appl. Phycol. 3 : 277-282) a utilisé avec succès la souche de cellules de la leucémie murine P-388 pour mettre en évidence l'activité cytotoxique (18). Trois tests déjà cités dans le paragraphe des formes chroniques sont basées sur la mise en évidence de l'activité cytotoxique :

⇒ Test de Ames : test de mutagénicité pour *Salmonella typhimurium*. Ce test a détecté comme carcinogènes 83 % des souches toxiques pour la souris et donne très peu de faux positifs (18, 29).

⇒ Test de "cassure de la chromatide" du lymphocyte humain (18, 29).

⇒ Test de "sporulation multigène" de *Bacillus subtilis* : il permet de détecter des mutagènes non identifiés par le test *Salmonella* de Ames et présente donc un meilleur accord avec la souris. Il apparaît le plus simple à mettre en oeuvre. Il ne paraît malheureusement pas connu dans les laboratoires français (18, 29).

Les réponses positives à ces tests introduisent la notion de toxicité chronique des cyanophycées et mettent en évidence leur cancérogénicité potentielle.

c - Action sur la "fleur d'eau" ? (17)

Plusieurs initiatives ont été entreprises pour s'opposer dès le départ à la prolifération des "fleurs d'eau" de cyanophycées. Les plans sont variables ; ils dépendent des circonstances particulières, de l'espèce de cyanophycées, de la densité et des toxines. Le devenir des toxines doit être l'intérêt central du traitement pour les ingénieurs (15, 20). Le traitement mécanique ou physique de l'eau pour enlever les cellules algales sans les endommager est souvent préférable au traitement chimique dans lequel les cellules relarguent leur contenu.

La rétention des toxines dans les cellules viables offre une meilleure perspective pour le retrait par filtration conventionnelle (15, 22). Les filtres lents "à sable" * enlèvent les solides suspendus, les bactéries mais aussi les substances organiques en solution dans des épaisseurs de surface très biologiquement active.

La filtration rapide par gravité * n'a pas d'activité biologique sauf si les algues pénètrent efficacement dans les filtres.

Quelques retraits de toxines sont observés, mais en fait l'efficacité des filtres dans l'enlèvement des cellules algales et des produits varie considérablement (notamment avec *Microcystis aeruginosa*) (37). De lourdes "fleurs d'eau" de cyanophycées peuvent donc causer des problèmes opérationnels significatifs.

Quand les autorités y ont accès, deux formes de charbon activé peuvent être utilisées comme adsorbants (32). C'est plus économique et plus effectif que les résines échangeuses d'ions (19).

En premier, il existe le charbon activé en poudre (PAC) qui est dosé par intermittence et enlevé dans la floculation *. Une haute dose en plus de la filtration et floculation est effective sur l'enlèvement des composés telles que les hépatotoxines et les neurotoxines dans la phase aqueuse (48). Cependant son efficacité est limitée dans les traitements pratiques à haute concentration de corps malodorants ou si le charbon activé est utilisé en petites quantités notamment avec les microcystines -LR (49).

Dans un deuxième temps, le charbon activé granulaire (GAC) est utilisé comme un filtre moyen au dernier stade du processus du traitement et peut aussi développer une activité biologique ; il peut être régénéré. Les toxines produites sont peu enlevées par la filtration ordinaire. Cependant, elles le sont dans une certaine mesure par PAC et beaucoup plus largement par GAC car elles s'adsorbent de manière irréversible.

La cassure des cyanophycées à travers les filtres peut contribuer à la turbidité et favoriser la croissance des cyanophycées : c'est un problème particulier avec les espèces telles qu'*Oscillatoria* qui peut croître à faible lumière ou peut utiliser le carbone organique assimilable pour se développer en absence de lumière.

La floculation a été utilisée en premier pour enlever les solides suspendus. La température, le pH, la dose et le type d'agent de floculation ont tous une influence majeure sur l'efficacité du traitement. Les agents floculants les plus communément utilisés sont l'aluminium et les sels de fer. Cependant, les cyanophycées interfèrent avec la clarifloculation parce qu'elles contiennent des vacuoles gazeuses intracellulaires qui les font flotter, entourées d'un matériel mucilagineux et produisant des polysaccharides et des mucopolysaccharides qui peuvent séquestrer les ions métalliques de l'agent floculant. De plus, seulement un tiers des mucopolysaccharides produits ou relargués par la lyse peuvent être enlevés par ce traitement : tous les autres deviennent facilement du carbone organique assimilable qui peut stimuler de nouveau la croissance des algues.

Parmi les autres traitements chimiques, le chlore, à des concentrations de 1 mg/l et au-dessus, peut causer la destruction de la chlorophylle-a et ainsi la mort de la cellule. Par contre, des faibles concentrations causent la suspension temporaire de la photosynthèse.

Les eaux eutrophiques avec de lourdes "fleurs d'eau" de cyanophycées peuvent bénéficier d'une désinfection par des oxydants autre que le chlore. Dans quelques pays, l'ozone (O_3) peut-être préférée mais aussi le dioxyde de chlore (ClO_2) qui est une autre alternative au chlore. Les cyanophycées sont enlevées à des doses d'ozone de 0,5 à 2 mg/l tandis que 2,2 mg/l tuent également des petits invertébrés. De longs contacts allant au delà de 30 minutes sont nécessaires pour enlever complètement les algues. L'ozone est très efficace contre les procaryotes telles que les cyanophycées car leur chlorophylle n'est pas protégée. Ce gaz peut même enlever de 65 jusqu'à 75 % des *Oscillatoria*. L'avantage, en plus, est que l'ozone détruit les produits qui induisent mauvais goût et odeur, sources de plaintes de la part des consommateurs (49).

L'oxydation peut également être faite par $CuSO_4$, très utilisé en Australie dans les réserves d'eau ou par le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) (32). Les cyanophycées sont plus sensibles que les autres algues du phytoplancton aux effets du H_2O_2 (19) : *Oscillatoria* et *Microcystis* sont éliminés avec 1, 7 mg/l et *Anabaena* avec 5 à 9,8 mg/l.

La permanganate de potassium ($KMnO_4$) est un bon oxydant à différents pH mais reste plus actif à pH acide. A côté de son action oxydante, il stimule l'efficacité de filtration parce que son produit de réduction MnO_2 agit comme un filtre additionnel quand il se dépose dans le lit du filtre. Le $KMnO_4$ est actif contre les algues en général et peut être utilisé pour déterminer des biomasses non identifiées. Il a l'avantage d'être exceptionnellement soluble, n'altère par le pH, n'augmente pas les odeurs et il est compatible avec d'autres traitements tels que la chloration, le traitement avec la chaux et autres coagulants.

- paraquat : il peut être utilisé comme toxique et lytique mais il existe des résistances à cet herbicide (50).

- métaux lourds : ils suppriment la croissance d'*Anabaena flos-aquae* (26).

Tous ces traitements directs des "fleurs d'eau" sont très difficiles à entreprendre car l'utilisation de tout produit chimique doit être étudiée quant aux conséquences de toxicité sur les autres organismes vivants : la perturbation de l'équilibre écologique est inévitable et c'est un résultat à ne pas négliger.

Il est également difficile de concevoir des traitements lorsque les plans d'eau ont une grande superficie.

D'autres points sont également à prendre en compte :

- le coût
- l'utilisation pratique
- les conséquences
- le temps d'efficacité des produits
- le caractère esthétique (KMnO₄...).

d) Tests-Essais-Détections (16, 26, 29, 34, 35)

Lorsqu'une "fleur d'eau" de cyanophycées se déclare, des tests peuvent être réalisés pour détecter une toxicité éventuelle.

⇒ Le test "souris" reste la référence (18). Il a été introduit le premier et reste largement utilisé dans tous les travaux. Il permet de détecter et de vérifier la présence de cyanophycées toxiques dans un échantillon de "fleur d'eau". Après une filtration grossière pour enlever les débris, le lysat des cellules supposées toxiques est injecté intrapéritonéalement à des souris de laboratoire (en parallèle à des injections de NaCl seul à 0,9 %). Des injections de 0,5 ml permettent de mettre en évidence :

- mort de la souris dans les 2 à 10 minutes avec des signes caractéristiques (15) (tremblements musculaires, stupeur, étourdissement, prostration, hyperesthésie au toucher, incontinence urinaire, défécation, convulsions, respiration sifflante et difficile, asthénie, nausée, halètement, mousse au nez et à la bouche, chute de l'animal, ataxie cyanosée, température subnormale, coma et mort).

La mort est due à la paralysie respiratoire par l'accumulation excessive d'acétylcholine aux jonctions neuromusculaires des muscles respiratoires. Les lésions internes montrent une congestion du cordon spinal et des méninges, du sang dans les poumons et la cavité thoracique, des dépôts de mousse dans les poumons. Tout ceci indique la présence d'alcaloïdes neurotoxiques.

- mort de la souris de 1 à 3 heures avec des signes caractéristiques (15). Du point de vue gastro-intestinal : nausée, anorexie, vomissement, mouvement de déglutition, hypersalivation, diarrhée sévère, fèces colorés de sang, léthargie, abdomen distendu. On note aussi : écoulement oculaire, piloerection. Les lésions internes montrent des hémorragies étendues touchant la muqueuse gastrique, le palais, le petit et gros intestins. On note également un liquide jaune oedémateux dans les cavités du corps.

Du point de vue hépatique, on note un ictère des extrémités froides, une anémie, de la pâleur et des douleurs abdominales. De manière grossière, le foie est distendu (jusqu'à trois fois sa taille normale), tacheté, sombre, friable ou mou. Au microscope, on peut observer une nécrose autour des acini, hémorragies, perte de l'architecture, rupture des cordons cellulaires hépatiques, une surface grasse et pâle, une cirrhose chez les survivantes avec des enzymes hépatiques qui apparaissent dans le sérum avant la mort (TGO, TGP, LDH, PAL) ainsi qu'une thrombocytopénie.

Du point de vue cardiovasculaire, le pouls est rapide et faible avec défaillance myocardique. Le coeur est dilaté, rempli de sang, flasque. Des pétéchies hémorragiques de l'endocarde et du myocarde ainsi que du liquide sanguin péricardique sont également observés.

L'hyperthermie est variable. L'ensemble de ces symptômes est relié à la présence de toxines peptidiques. Des rapports récents de thrombose pulmonaire et de toxicité sur des cellules de plusieurs organes indique un mode d'action général possible par action sur les membranes cellulaires.

- mort de la souris en 24-36 heures : ceci indique que les cyanophycées ne sont pas toxiques mais qu'il reste un effet de la part de ces algues. S'il n'y a aucun signe de toxicité, le test est considéré comme négatif.

L'usage de 0,5 ml d'échantillon est une overdose dans la plupart des cas où la "fleur d'eau" est hautement toxique mais est utilisé pour détecter des bas niveaux de toxines provenant des mélanges d'espèces toxiques et non toxiques.

La méthode d'injection permet donc de reconnaître les toxicités : atteinte du système nerveux pendant l'intoxication (essentiellement un blocage de la respiration) imputable à la neurotoxine, atteinte du foie qui montre une augmentation du poids de la souris de plus de 50 % et des saignements, provoqués par la toxine hémorragique, visibles à l'autopsie. Elle permet également de déterminer les doses léthales DL50 et DL100. Celles-ci sont exprimés en microgramme ou milligramme de toxine ou d'algues par kilogramme de masse corporelle de l'animal et calculées sur le nombre de morts dans les trois heures (32, 51, 52, 53).

	Doses léthales 50	
Par injection intrapéritonéale :		
<i>Anabaena</i>	10 à 60	mg/kg
<i>Nodularia spumigena</i>	70	µg/kg
<i>Gloeotrichia echinulata</i>	110 à 1.500	mg/kg
<i>Microcystis aeruginosa</i>	5 à 15	mg/kg
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	64 +/- 5	mg/kg
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	0,05 - 0,1	mg/kg
Par voie orale :		
<i>Microcystis aeruginosa</i>	650	mg/kg

Le test "souris" peut-être mis à profit pour les contrôles à long terme, par la consommation d'extraits de "fleurs d'eau" à faible concentration. La conception de l'expérience est d'explorer l'exposition à la toxine (40).

⇒ Le test poisson est envisageable et a déjà été tenté puisque ces animaux sont souvent victimes d'intoxications naturelles (18).

⇒ L'immunologie (sous la forme de test ELISA) et une méthode fluorométrique sont utilisées pour détecter la saxitoxine dans les coquillages marins. Appliquée aux toxines d'eau douce, l'immunologie n'est pas parfaitement maîtrisée et donne des réponses encore erratiques (18).

⇒ Test de luminescence de *Photobacterium phosphoreum*. C'est le "système Microtox" utilisable pour n'importe quel effet toxique. Des extraits de cyanophycées contenant l'hépatotoxine abaissent la luminescence de lyophilisats rehydratés de la bactérie.

Les autres toxines n'ont pas encore été testées. Ce test n'est pas spécifique, mais adapté pour un screening préliminaire des "fleurs d'eau" à *Microcystis* (18).

⇒ Lincoln et ses collaborateurs (1990, J. Appl. Phycol. 2 : 83-88) ont utilisé la modification de la réponse du muscle iléon du cochon d'Inde au choc électrique pour détecter la présence de toxines de cyanophycées. Comme le précédent, ce test n'est pas spécifique (18).

⇒ Méthodes d'analyse et de quantification (18, 22, 31)

La chromatographie liquide sous haute pression reste une méthode de référence. Elle est appliquée à l'analyse de toxines peptidiques issues de *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Nodularia* et *Anabaena*. Les spectres d'absorption des produits sont ensuite analysés par comparaison avec ceux qui sont déjà publiés. D'autres toxines peuvent être isolées par cette méthode : le pentapeptide cyclique toxique de *Nodularia spumigena*, la toxine de *Nostoc*, l'anatoxine-a d'*Anabaena flos-aquae* et les microcystines des Oscillaires. Les échantillons sont fixés sur place par congélation.

La chromatographie sur couche mince (CCM ou TLC) est récemment appliquée sous la forme dite à haute performance (CCMHP ou HPTLC). Elle utilise simplement des plaques minces de 10 x 10 cm de gel de silice ; un densitomètre spécial améliore la précision des lectures directes de ces plaques. La technique est appliquée à *Anabaena flos-aquae*. Des auteurs ont pu mettre en évidence dans les mêmes extraits, mais sur deux plaques développées différemment, l'alkaloïde neurotoxique et l'hépatotoxine peptidique. La reprise des spots par de l'eau donne une solution permettant de vérifier leur toxicité par le "test souris" et d'enregistrer par la méthode classique les spectres d'absorption des éluats des spots "toxiques". Par la même technique, on peut séparer les toxines peptidiques de *Microcystis aeruginosa*, celles de *Nodularia spumigena*, *Oscillatoria agardhii* et *Oscillatoria rubescens*.

⇒ Les spectres infra-rouge et UV sont généralement caractéristiques des produits, ils sont utilisés pour les identifier et donnent les premiers renseignements.

⇒ Résonance magnétique nucléaire (RMN).

Cette méthode est utilisée pour la caractérisation des toxines (22).

⇒ La spectrométrie de masse des produits préalablement purifiés donne des informations plus précises pour reconnaître les structures moléculaires (18, 22).

⇒ La constatation des décès d'animaux et des animaux mourants restent les meilleures méthodes sachant que l'hépatotoxicose reste le plus commun des empoisonnements par les cyanophycées parmi les ovins et bovins (26).

⇒ Zooplancton (18) L'effet sur le zooplancton en général peut être pris en considération par une approche écologique : le zooplancton meurt beaucoup plus vite en présence de cyanophycées toxiques qu'en absence de toute nourriture. Pour cet effet, il serait possible de l'utiliser comme un organisme d'essai pour déceler l'apparition d'une "fleur d'eau" toxique (26). Cependant, les résultats des derniers travaux, concluant à une sensibilité très différente de celle des homéothermes, rendent l'interprétation de ces tests très douteuse. En effet, si toutes les souches d'une même cyanophycées ont une toxicité variable, il en va de même pour la sensibilité du zooplancton. Certains chercheurs ont étudié l'alternative possible par les Cladocères* qui peuvent ingérer les cyanophycées filamenteuses de grande taille et coloniales après les avoir désagrégées par leurs mandibules. Ceci n'est valable que lorsque la densité des algues est faible, c'est à dire avant que la "fleur d'eau" ne se déclenche, car les daphnies * sont très sensibles aux cyanophycées filamenteuses massives qui inhibent alors le broutage des crustacés (18).

CONCLUSION

La fréquence des "fleurs d'eau" de Cyanophycées augmente dans le monde. Une prise de conscience des risques potentiels pour la Santé Publique, un contrôle du phénomène et sa prévention sont nécessaires afin d'éviter des intoxications collectives animales ou humaines toujours possibles.

En France comme ailleurs, il est devenu nécessaire d'approfondir ce sujet d'étude.

Nombre de plans d'eau sont sujets à ce phénomène de "fleur d'eau" et en l'absence de mesures curatives et préventives, la situation ne peut que s'aggraver au cours du temps. A long terme, notre manque d'attention risquerait d'entraîner un surcoût important quant aux contrôles et usages de l'eau.

Du côté de la biochimie moléculaire, les chercheurs commencent à traquer les gènes responsables de la toxicité et abordent bientôt les conditions de leur expression.

Une nouvelle voie est en même temps ouverte : il a été montré que certaines toxines pouvaient jouer un rôle protecteur contre d'autres, notamment contre les substances à activité néoplasique, limitant ainsi la prolifération d'un cancer établi.

Comme tout produit actif, les toxines des Cyanophycées pourraient être valorisées sur le plan pharmacologique car il semble que ces algues produisent d'autres substances antibiotiques, antifongiques, antivirales en plus de celles antitumorales.

Profitions donc de la toxicité des Cyanophycées pour élargir l'éventail de nos connaissances médicales.

LEXIQUE

Archethalle (4) cellule unique ou cellules toutes semblables en paquet, se reproduisant par bipartition végétative ou transformation en sporocystes en émettant des spores.

Benthique (54) désigne les parties d'un écosystème aquatique constitué par la couche d'eau immédiatement au contact avec le substrat, la surface de ce dernier et les sédiments. Ce milieu correspond donc à l'interface eau-lithosphère.

Cladocères (54) : crustacés branchiopodes dont les représentants les plus communs sont les daphnies.

Daphnie (54-55) : petit crustacé d'eau douce, aussi appelé "puce d'eau" qui constitue le groupe dominant du zooplancton des eaux douces ; elle est fréquemment utilisée lors d'études toxicologiques.

Endémique (55) : se dit d'une espèce vivante qui est confinée dans une aire particulière.

Eutrophique ou eutrophe (55) : en limnologie, se dit des eaux riches en matières nutritives et peu oxygénées en profondeur.

Facteur limitant (27) : élément nutritif le moins disponible par rapport à la demande de la biomasse

Filtration par gravité (55) : filtration utilisant un filtre ouvert, et dont le fonctionnement repose sur la gravité.

Filtre lent à sable (55) : filtre caractérisé par une action à la fois mécanique et biologique sur l'eau à purifier et dans lequel un sable est utilisé comme agent filtrant.

Floculation (55) : processus d'épuration consistant à provoquer à l'aide d'un flocculant, l'agglomération en un floc de matières solides en suspension dans un liquide.

Hétérocyste (9, 11) : cellules particulières non photosynthétiques à contenu cellulaire homogène clair, possédant un ou deux pores, provenant d'une cellule grossie et différenciée qu'enveloppe une épaisse membrane. La division de son contenu donne naissance à de nouveaux filaments. Il possède une grande activité respiratoire, fixant l'azote atmosphérique et le transformant grâce à une nitrogénase. Il meurt par vacuolisation de son contenu.

Hétérotrophe (54, 55) : se dit d'un organisme vivant qui se nourrit de substances organiques déjà synthétisées pour produire son énergie cellulaire et assurer l'édification de sa propre substance vivante.

Synonyme : producteur secondaire, consommateur.

Limnion (54, 55) : terme désignant l'ensemble des écosystèmes aquatiques d'eaux calmes continentales : lacs, étangs...

On le divise en plusieurs couches.

- épilimnion : couche superficielle, riche en oxygène.
- métalimnion : couche de transition au niveau de laquelle la température décroît rapidement en fonction de la profondeur.
- hypolimnion : couche profonde constituée d'eaux plus froides ne circulant pas verticalement, pauvre en oxygène.

Limnoplanton (55) : ensemble des organismes planctoniques des lacs et étangs.

Phototrophe (55) : se dit des organismes capables d'assurer leur nutrition à partir d'éléments minéraux grâce à l'utilisation de l'énergie lumineuse.

Photosynthèse ou assimilation chlorophyllienne (55) : ensemble des phénomènes physiologiques qui permettent aux plantes chlorophylliennes de produire des molécules organiques glucidiques à partir des molécules de gaz carbonique atmosphérique et d'eau, en présence d'énergie lumineuse.

Planctonique (54, 55) : qui se rapporte à l'ensemble des organismes aquatiques autotrophes ou hétérotrophes, peu mobiles, qui vivent dans les masses d'eaux libres, lacustres ou marines et qui dépendent des mouvements de courants pour leur distribution.

Protothalle (4) : système filamenteux dont les cellules se multiplient par bipartition végétative et pouvant évoluer en sporocystes.

Sporocyste (55) : chez les champignons et les algues, cellule présore donnant naissance à des spores.

Thalle (54) : organe végétatif de forme souvent aplatie et foliacé dépourvu de racine ou de tige et propre aux lichens et végétaux inférieurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. NAEGELE E., NAEGELE A.
Les Algues
Presses Universitaires de France ; Paris, 1967.
2. BOURRELY P.
Les algues d'eau douce
Tome I, Boubée N ; Paris, 1990.
3. GAYRAL P.
Les Algues : morphologie, cytologie, reproduction, écologie
Doin ; Paris 1975.
4. CHADEFAUD M.
Les végétaux non vasculaires, Cryptogamie
Tome I, Masson ; Paris, 1960.
5. CHAMPAGNAT P., OZENOA P., BAILLAUD L.
Biologie végétale, croissance, morphogénèse, reproduction
Tome III. Masson ; Paris, 1969.
6. HELLER R.
Biologie végétale. Nutrition et métabolisme
Tome III. Masson ; Paris, 1969.
7. DUSSART B.
Limnologie, l'étude des eaux continentales
Boubée N. ; Paris, 1992.
8. DES ABBAYES H., CHADEFAUD N., DE FERRE Y.,
FELDMANN J. CAUSSEN H., GRASSE P.P., LEREDDE
M.C., OZENDA P., PREVOT A.R.
Botanique, Masson ; Paris, 1963.
9. BOURKE ATC, HAWES R.B.
Freshwater cyanobacteria (blue-green algae) and human health.
Med. J. Aust.; 1983, 1 (11), 491- 492.
10. GORENFLOT R, GUERN M.
Organisation et biologie des thallophytes.
Doin ; Paris 1989.
11. BOURRELY P.
Algues d'eau douce bleues et rouges.
Boubée N. ; Paris, 1995
12. BOUGIS P.
Le plancton.
Presses Universitaires de France ; Paris, 1967.

13. VIVIER P.
La vie dans les eaux douces.
Presses Universitaires de France ; Paris, 1961.
14. SHORT S.B, EDWARDS W.C.
Bue green algae toxicoses in Oklahoma.
Vet. Human Toxicol. ; 1990, 6, 558-560.
15. CODD G.A, BELL S.G.
Eutrophication and toxic cyanobacteria in freshwaters.
Water Pollution control; 1985, 84, 225-232.
16. CODD GA
Cyanobacterial poisoning hazard in British freshwater.
Vet. Rec. ; 1983, 113, 223-224.
17. VOLTERRA L.
Sanitary implications associated with use of eutrophic freshwater.
Ann. Inst. Super Sanita. ; 1993, 29 (2), 327-333.
18. FEUILLADE J.
Les toxines des Cyanobactéries.
Revue des Sciences de l'eau ; 1992, 5 - 489-508.
19. FALCONER IR
Effects on human health of some toxic cyanobacteria (blue green algae) in reservoirs, lakes and rivers.
Toxicity Assessment ; 1989, 4, 175-184.
20. ELDER G.H, HUNTER P.R, CODD G.A.
Hazardous freshwater cyanobacteria (blue green algae).
Lancet ; 1993, 341 (8859), 1519-1520.
21. CORKILL N.
Poisoning at Rutland Water.
Vet. Rec. ; 1989, 125, 356.
22. LAWTON L.A., CODD G.A.
Cyanobacterial (blue green algae) toxins and their significance in UK and European waters.
J. Inst. Wat. Env. Man.; 1991, 514, 460-465.
23. CODD G.A., EDWARDS C., BEATTLE K.A., BARR W.M., GUNN G.J.
Fatal attraction to Cyanobacteria.
Nature ; 1992, 359 (6391), 110-111.
24. RYDING S.O., RAST W.
Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et réservoirs.
Masson ; Paris 1994.

- 25 - RAMADE F.
Eléments d'Ecologie.
Ediscience International ; Paris, 1992, 267-272, 307-308.
- 26 - CARMICHAEL W.W.
The water environment, Algal toxins and Health.
Plenum Press, New-York et London, 1982.
- 27 - POURRIOT R., MEYBECK M.
Limnologie générale.
Masson ; Paris, 1995.
- 28 - FRONTIER S., PICHOD VIALE D.
Ecosystème-structure-fonctionnement-évolution.
Masson ; Paris, 1993
- 29 - REPAVICH W.M., SONZOGNI W.C., STANDRIDGE J.H.,
WEDEPOHL R.E., MEISNER L.F.
Cyanobacteria (blue green algae) in Wisconsin waters : acute and
chronic toxicity.
Water Research ; 1990, 24, 225-231.
30. VILLEY F.
L'eau en Loire-Bretagne.
UJJEF, SOFIC Tours.
Décembre 93 N° 52, P.7, 8, 12.
31. SHIRAI M., OHTAKE A., SANO T., MATSUMOTO S.,
SAKAMOTO T., SATO A., AIDA T., HARADA K.,
SHIMADA T., SUZUKI M., NAKANO M.
Toxicity and toxins of natural blooms and isolated strains of
Microcystis sp. and improved procedure for purification of cultures.
Appl. Environ. Microbiol.; 1991, 57 (4), 1241-1245.
32. FALCONER IR
Tumor promotion and liver injury caused by oral consumption of
Cyanobacteria.
Env. Toxicol. and Water quality ; 1991, 6, 177-184.
33. HAYAM J.
Beyond the Barcoo : probable human tropical cyanobacterial poisoning in outback
Australia.
Med. J. Aust. ; 1992, 157, 794-796.
34. COLLINS M.
Algal toxins.
Microbiol. Rev. ; 1978, 42, 725-746.

35. OHTAKE A., SHIRAI M., AIDA T., MORI N., HARADA K.
MATSUURA K., SUZUKI M., NAKANO M.
Toxicity of *Microcystis* species from natural blooms and
purification of the toxin.
Appl. Environ. Microbiol. ; 1989, 55 (12), 3202-3207
36. PHILIPP R., BATES A.J.
Health risks assessment of dinghy sailing in Avon and exposure to
Cyanobacteria (Blue green-algae).
J. Inst. Wat. Env. Man. ; 1992, 6, 613-620.
37. FALCONNER I.R., BERESFORD A.M., RUNNEGAR M.T.C.
Evidence of liver damage by toxin from a bloom of the blue green alga,
Microcystis aeruginosa.
Med. J. Aust. ; 1983, 1 (11), 511-514.
38. SIVONEN K.
Effects of light, temperature, nitrate, orthophosphate on
growth of bacteria and hepatotoxin production by
Oscillatoria agardhii strains.
Appl. Env. Microbiol. ; 1990, 56, 2558-2666.
39. DUNLOP J.M.
Blooming algae.
B.M.J. ; 1991, 302 (6778), 671-672.
40. KOFUJIP., ARACAVA Y., SWANSON K.L., ARONSTAM R.S.,
RAPÓPORT H., ALBUQUERQUE E.X.
Activation and blockade of the acetylcholine receptor ion channel by the
agonists (+) - Anatoxine-A, the N-Methyl derivative and the
enantiomer.
J. Pharm. Exp. Ther. ; 1990, 252, 517-525.
41. FALCONER I.R.
Tumour promotion by *Microcystis* sp, a blue-green algae occurring in
water supplies
Med. J. Aust. ; 1989, 150-351.
42. TEIXEIRA M. da G., COSTA M. da C., DE-CARVALHO V.L.,
PEREIRA M. dos S., HAHE E.
Gastroenteritis epidemic in the area of the Itaparica Dam Bahia, Brazil.
Bul. Pan. Am. Health. Organ. 1993, 27 (3), 244-253.
43. TURNER P.C., GAMMIE A.J., HOLLINRAKE K., CODD G.A.
Pneumonia associated with contact with cyanobacteria.
B.M.J. ; 1990, 300 (6737), 1440-1441.
44. HALE D., ALDEEN W., CARROLL K.
Diarrhea associated with Cyanobacteria like bodies in an
immunocompetent host.
JAMA ; 1994, 271 (2), 144-145.

45. ODRIOZOLAS E., BALLABEN N., SALAMANCO A.,
Poisoning in cattle caused by blue-green algae.
Rev. Argent. Microbiol. ; 1984, 16 (4), 219-224.
46. ISLAM M.S., DRASAR B.S., BRADLEY D.J.
Long term persistence of toxigenique *Vibrio cholera* 01 in the mulaginous sheath of a blue-green algae, *Anabaena variabilis*.
J. Trop. Med. Hyg. ; 1990, 93 (2), 133-139.
47. JONES C.J., ORR P.T.
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 ; 1994, 28, 871-876.
48. LAHTI K., HIISVIRTA L.
Removal of cyanobacterial toxins in water treatment processes : review of studies conducted in Finland.
Water Supply ; 1989, 714, 149-154.
49. ANDO A., MIWA M., KAJINOM., TATSUMI S.
Removal of musty odorous compounds in water and retrained in algal cells though water purification processes.
Water Sci. Technol. ; 1992, 25/2, 299-306.
50. VAISHAMPAYAN A.
Powerful mutagenicity of a bipyridilium herbicide in a nitrogen - fixing - blue green alga *Nostoc muscorum*.
Mutat. Res. ; 1984, 138 (1) 39-46.
51. RUNNEGAR M.T., JACKSON A.R., FALCONER I.R.
Toxicity of the Cyanobacterium *Nodularia spumigena* Mutens.
Toxicol. ; 1988, 26 (2), 143-151.
52. HAWKINS P.R., RUNNEGAR M.J., JACKSON A.R., FALCONER I.R.
Severe hepatotoxicity caused by the tropical cyanobacterium (blue-green alga *Cylindrospermopsis raciborskii* seenaya and subba Raju isolated from a domestic water supply reservoir.
Appl. Environ. Microbiol. ; 1985, 50 (5) 1992-1995.
53. GALEY F.D., BEASLEY V.R., CARMICHAEL W.W., KLEPPE G., GOOSER, G., HOSSER S.B., HASCHEK W.M.
Blue-green algae (*Microcystis aeruginosa*) hepatotoxicosis in dairy cows.
Am. J. Vet. Res. ; 1987, 48 (9), 1415-1420.
54. RAMADE F.
Dictionnaire encyclopédique de l'Ecologie et des Sciences de l'Environnement.
Ediscience international : Paris 1993.

55. PARENT S.
Dictionnaire des Sciences de l'Environnement.
Hatier-Rageot Editeur ; Paris, 1991.

TABLE DES MATIERES

pages

INTRODUCTION.....	5
I) - GENERALITES SUR LES "FLEURS D'EAU"	6
1) Classification des Cyanophycées-Notions générales.....	6
2) La "fleur d'eau"	9
a) Définition-Développement.....	9
b) Cyanophycées mises en cause	10
c) Conditions.....	10
d) Caractères organoleptiques	16
e) Période	17
3) Espèces toxiques-toxines	18
a) Espèces toxiques	18
b) Les toxines	20
4) Répartition géographique des "fleurs d'eau" toxiques.....	25
II) - QUELQUES EXEMPLES DE "FLEURS D'EAU" DE CYANOPHYCEES DANS LA REGION LIMOUSINE	25
1) Etude régionale pendant la saison 1992	27
2) "Fleur d'eau" à Lavaud.....	33
III) - TOXICOLOGIE HUMAINE	42
Historique	42
1) "Bloom" toxique	43
a) Qui est touché ? Relations homme-animaux.....	43
b) Facteurs de risque.....	44
c) Conditions qui augmentent la toxicité.....	44
d) Modes de contamination.....	46
e) Relations cyanophycées-toxicologie.....	47
2) Symptomatologie	48
a) Incubation.....	48
b) Durée des symptômes	49
c) Symptômes-Relation avec l'espèce de cyanophycées.....	49
d) Différentes formes.....	54
3) Biologie-Radiologie	55
4) Toxicité indirecte	55

IV) MESURES PREVENTIVES - DISCUSSION.....	56
1) Prise de conscience	56
2) Problèmes rencontrés	57
3) Solutions	59
a) Prévention	60
b) Etudes épidémiologiques et de recherche.....	63
c) Action sur la "fleur d'eau" ?	68
d) Tests - Essais - Détections	70
CONCLUSION.....	74
LEXIQUE.....	75
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	77
TABLEAU 1 : Symptômes en fonction de quelques espèces de cyanophycées	53
ANNEXE 1 : Résultats d'analyses du 8 septembre 1993	39
ANNEXE 2-4 : Extrait du Journal "the Institution of Water and Environmental Management" du 6 octobre 1992	64
Fig 1 : Classification générale des cyanophycées	8
Fig 2 : Phénomène de la "fleur d'eau".....	11
Fig 3 : Cycle du phosphore dans un lac.....	12
Fig 4 : Cycle de l'azote dans un lac	13
Fig 5 : Stratification thermique des eaux dans un lac eutrophique en situation estivale	15
Fig 6 : Destratification thermique des eaux dans un lac eutrophique en situation automnale.....	16
Fig 7 : Répartition des "fleurs d'eau" dans l'année en fonction de certains pays et de certaines espèces	18
Fig 8 : Structure chimique de l'anatoxine-a isolée d'un clone toxique <i>d'Anabaena flos-aquae</i>	21
Fig 9 : Structure chimique de la saxitoxine	24
Fig 10 : pH des eaux de baignade étudiées dans le Limousin, de juin à septembre 1992.....	27
Fig 11 : Transparence des eaux de baignade étudiées dans le Limousin, de juin à septembre 1992	27
Fig 12 : Evolution des différentes classes d'algues du Lac de Saint-Pardoux (Haute-Vienne), de février à novembre 1991.....	28

Fig 13 :	Evolution de la transparence, du pH, du pourcentage de cyanophycées et de matières organiques à Sainte-Hélène, Bujaleuf (Haute-Vienne).....	29
Fig 14 :	Evolution de la transparence, du pH, du pourcentage de cyanophycées et de matières organiques au plan d'eau de Causse, Lissac (Corrèze).....	30
Fig 15 :	Evolution de la transparence, du pH, du pourcentage de cyanophycées et de matières organiques à Ponty, Ussel (Corrèze).....	31
Fig 16 :	Evolution de la transparence, du pH, du pourcentage de cyanophycées et de matières organiques au plan d'eau de Courtille, Guéret (Creuse).....	32
Fig 17 :	Ensemble des clichés photographiques pris au plan d'eau de Lavaud le 29 août 1993.....	33
Fig 18 :	Extrait de Presse : la Charente Libre du 30 août 1993.....	36
Fig 19 :	Page 4 de la couverture figure 18.....	37
Fig 20 :	Extrait de Presse : le Populaire du Centre du 30 août 1993	38
Fig 21 :	Extrait de Presse : le Populaire du Centre du 31 août 1993	38
Fig 22 :	Extrait de Presse : le Populaire du Centre du 3 septembre 1993	39
Fig 23 :	Extrait de Presse : le Populaire du Centre du 12 août 1995.....	41

MOTS CLES :

Cyanobactérie - Toxicité - Intoxications - Neurotoxines - Hépatotoxines

RESUME :

Les Cyanophycées ou Algues Bleues peuvent, dans des conditions environnementales et climatiques particulières, former à la surface de l'eau, une « fleur d'eau » ou « bloom algal ». Certaines espèces produisent des endo ou exotoxines responsables d'intoxications humaines et animales parfois mortelles. En s'appuyant sur des faits réels, cette thèse relate toute la symptomatologie associée aux « fleurs d'eau » de cyanophycées en eau douce. Les chercheurs sont sûrs de leur toxicité et étudient encore la capacité de production des toxines. Mais la prise de conscience de certains pays et les études restent lentes et malgré des traitements contre la « fleur d'eau » encore discutables, la meilleure solution pour éviter toute atteinte humaine possible reste la prévention.