

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Formation des ingénieurs du
génie sanitaire
1998 - 1999**

**LE PHMB REMPLIT-IL
LES EXIGENCES DE DESINFECTION DES EAUX DE PISCINES ?
SYNTHESE DES CONNAISSANCES ACTUELLES**

Présenté par :

**Philippe ROMAC
Ingénieur Chimiste ENSCR**

Lieu du stage :

DDASS des Vosges

Accompagnant professionnel :

M. Emmanuel BRIAND

Référent pédagogique :

M. René SEUX

« L'Ecole Nationale de la Santé Publique n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans les mémoires : les opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs »

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur E. BRIAND (Ingénieur du Génie Sanitaire des Vosges) pour son accueil, sa confiance, ses conseils et sa disponibilité.

Je tiens également à remercier Monsieur PAQUIN JL. (Laboratoire d'Hygiène et de Recherche en Santé Publique) pour sa précieuse collaboration.

Je remercie aussi Monsieur R. SEUX (Professeur à l'ENSP) pour le soutien apporté à la réalisation de ce travail.

Je remercie Monsieur J. LESNE (Professeur à l'ENSP) pour sa disponibilité et ses précieux conseils.

Je remercie également Messieurs B. JUNOD et R. DEMILLAC (Professeurs à l'ENSP) pour la contribution apportée à l'orientation de ce travail.

Je remercie Monsieur J. PERNEY (DGS VS4) pour son aide essentielle.

Je remercie Mademoiselle C. LOMBARD (Stagiaire au Service Santé Environnement des Vosges) pour sa participation à ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur C. JEGOU (Directeur de la DDASS des Vosges), ainsi qu'à l'ensemble du personnel du Service Santé Environnement pour leur excellent accueil.

Je remercie également les Directeurs et les personnels techniques des piscines de Gérardmer et La Bresse pour leur collaboration.

Je remercie Messieurs LECOMTE et MARCHAL (Service technique de la mairie de Gérardmer) pour leur accueil et leur disponibilité.

Enfin je remercie Carine pour son aide précieuse.

L'emploi du PHMB a été autorisé en France pour une période probatoire de trois ans en

ABSTRACT

Title : Does PHMB meet all requirements for a satisfactory disinfection of water in swimming pools? Synthesis of knowledge accumulated over 20 years.

In order to face the public demand for increased health safety, disinfection products for swimming pools are in France subject to authorisation, so that the microbial risk is minimised. Chlorinated products, and particularly chloroisocyanurates, answer this need. They form however by-products which can prove dangerous for health. PHMB, a non-chlorinated disinfection product, may be an option to avoid this induced chemical risk.

PHMB has been temporarily authorised in France in 1989 for a period of 3 years. Since then, no formal decision has been taken regarding a permanent agreement.

This paper attempts to synthesise the knowledge accumulated over 20 years of experiments in laboratories and swimming pools. Advantages of the product are the absence of by-products and its remanence in water. However, while treated waters answer regulatory prescriptions most of the time, some germs seem to present a resistance, and PHMB is inactive against viruses. Moreover, very strict conditions of filtration are necessary for its use. Lastly, the field measuring method proves unreliable: this constitutes an important impediment for maintaining a satisfactory residual concentration.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	1
ABSTRACT	2
SOMMAIRE	3
INTRODUCTION	6
I EVALUATION ET GESTION DES RISQUES SANITAIRES MICROBIOLOGIQUES DANS LES BASSINS DE NATATION	8
I.1 Evaluation du risque microbiologique	8
I.1.1 Les principaux microorganismes pathogènes des bassins de natation.....	8
I.1.2 Exposition aux dangers microbiologiques.....	9
I.1.2.1 Contamination des bassins.....	9
I.1.2.2 Evaluation épidémique.....	9
I.2 La gestion des RSM liés à l'eau des bassins	10
I.2.1 Champ d'application de la législation et de la réglementation.....	11
I.2.2 Les moyens de limitation de la pollution introduite dans les bassins.....	11
I.2.2.1 L'information des usagers.....	11
I.2.2.2 Limitation de la fréquentation.....	11
I.2.2.3 Les équipements sanitaires et les pédiluves.....	11
I.2.2.4 La désinfection des sols et des parois.....	12
I.2.3 Les moyens d'élimination de la pollution résiduelle des bassins.....	12
I.2.3.1 L'apport d'eau neuve.....	12
I.2.3.2 L'hydraulicité.....	12
I.2.3.2.1 L'importance de l'hydraulicité.....	12
I.2.3.2.2 L'obligation de moyens en matière d'hydraulicité.....	13
I.2.3.2.3 Les insuffisances de l'obligation de moyens en matière d'hydraulicité.....	13
I.2.3.3 La filtration.....	13
I.2.3.3.1 Le rôle de la filtration.....	13
I.2.3.3.2 L'obligation de moyens en matière de filtration.....	14
I.2.3.3.3 Les insuffisances de l'obligation de moyens en matière de filtration.....	14
I.2.3.4 La désinfection de l'eau des bassins.....	15
I.2.3.4.1 Le rôle de la désinfection de l'eau.....	15
I.2.3.4.2 L'obligation de moyens en matière de désinfection de l'eau.....	15
I.2.3.4.3 Les limites de l'obligation de moyens en matière de désinfection.....	15
I.2.4 L'obligation de résultats.....	15
I.2.4.1 Les dispositions de la réglementation de 1981.....	15
I.2.4.2 A propos des indicateurs de qualité des eaux de piscine.....	16
I.2.5 L'autosurveillance de l'exploitant.....	16
I.2.6 Le contrôle sanitaire.....	17
II LES PRODUITS DE DESINFECTION	18
II.1 Les attentes vis à vis du désinfectant de piscine	18
II.1.1 Pourquoi des exigences sur le désinfectant ?.....	18
II.1.2 Les caractéristiques du désinfectant idéal.....	18
II.1.2.1 Réduire les RSM.....	18
II.1.2.2...en minimisant les risques induits.....	18
II.1.2.3...pour un coût et des conditions de mise en œuvre acceptables.....	19
II.1.2.4 Tableau synthétique.....	19
II.2 Les désinfectants de piscine autorisés en France	20
II.2.1 Les trois types de composés autorisés.....	20
II.2.1.1 Les produits chlorés.....	20
II.2.1.2 Le brome.....	21
II.2.1.3 L'ozone.....	21
II.2.2 Fréquence d'utilisation des différents désinfectants.....	21
II.2.3 Efficacité et risques induits des désinfectants autorisés.....	21
II.2.3.1 Efficacité et mode d'action.....	22
II.2.3.2 Evaluation des risques induits.....	22
II.2.3.2.1 Les risques sanitaires chimiques dans le local technique.....	22

II.2.3.2.2 Les risques sanitaires chimiques dans les bassins de natation	22
II.2.3.2.3 Les risques sanitaires chimiques dans l'atmosphère des piscines.....	23
II.2.3.3 Gestion des risques induits	24
II.3 Les composés biguanidiques.....	25
II.3.1 Structure générale	26
II.3.2 La chlorhexidine	26
II.3.2.1 Propriétés physico-chimiques et incidence sur l'activité microbicide.....	26
II.3.2.2 Mécanisme et mode d'action.....	27
II.3.2.3 Comparaison qualitative des propriétés antiseptiques de la chlorhexidine et de l'acide hypochloreux	27
II.3.3 Le PolyHexaMéthylène Biguanide (PHMB)	28
II.3.3.1 Propriétés physico-chimiques.....	28
II.3.3.1.1 Caractère acido-basique.....	28
II.3.3.1.2 Caractère chélatant	28
II.3.3.1.3 Caractère floculant.....	28
II.3.3.1.4 Incompatibilités	28
II.3.3.1.5 Toxicité.....	28
II.3.3.2 Mécanisme et mode d'action.....	28
II.3.3.3 Efficacité antimicrobienne "in vitro" du PHMB. Comparaison avec l'acide hypochloreux	29
II.3.3.3.1 Influence du pH	29
II.3.3.3.2 Action sur les bactéries	29
II.3.3.3.3 Action sur les virus	30
II.3.3.3.4 Action sur les parasites	30
II.3.3.4 Les utilisations du PHMB	32
II.3.3.4.1 Désinfection des surfaces en contact avec les denrées alimentaires	32
II.3.3.4.2 Désinfection des eaux de piscine	32
III UTILISATION DU PHMB POUR LA DESINFECTION DES EAUX DE PISCINE.....	33
III.1 Naissance d'un nouveau concept : la piscine sans chlore.....	33
III.1.1 Le monopole des désinfectants chlorés.....	33
III.1.2 Les atouts et faiblesses des désinfectants chlorés	33
III.1.2.1 Les atouts des produits chlorés non stabilisés	33
III.1.2.2 Les faiblesses des produits chlorés non stabilisés	33
III.1.2.3 L'avènement des chloroisocyanuriques	34
III.1.2.4 Les manquements des chloroisocyanuriques	34
III.1.3 Les espérances générées par l'utilisation du PHMB.....	35
III.2 Une mise sur le marché controversée.....	35
III.2.1 La situation en Grande-Bretagne	35
III.2.2 La situation en France.....	36
III.3 Mise en œuvre du PHMB pour la désinfection des eaux de piscine	37
III.3.1 Les préconisations de Zeneca pour l'emploi du Baquacil.....	37
III.3.1.1 L'utilisation proposée	37
III.3.1.2 Le traitement au Baquacil	37
III.3.1.3 Méthode de dosage de la concentration en Baquacil.....	38
III.3.1.3.1 Méthode de dosage sur le terrain.....	38
III.3.1.3.2 Méthode de dosage en laboratoire.....	38
III.3.2 Les dispositions réglementaires de l'arrêté du 28/09/89.....	38
III.4 Efficacité du PHMB en utilisation réelle	38
III.4.1 Les essais pris en compte par le DoE anglais	38
III.4.2 Efficacités comparées de HClO et du Baquacil en piscines privées	39
III.4.3 Les essais présentés dans la demande d'agrément du Baquacil.....	40
III.4.4 L'expérimentation menée en France de 1982 à 1986	41
III.4.4.1 Les essais à Vallauris et Mandelieu	41
III.4.4.2 Les essais à Cagnes-sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var.....	41
III.4.4.3 Les essais à Gérardmer	42
III.4.4.4 Les essais à Fontenay-sous-Bois.....	43
III.4.4.5 Conclusions de la première série d'essais français	43
III.4.4.6 Les essais à Saintes	44
III.4.4.7 Les essais à Saint Gilles-Croix de Vie	45
III.4.4.8 Conclusion de la deuxième série d'essais français.....	46
III.4.5 Utilisation du PHMB en France entre 1989 et 1999.....	46
III.4.5.1 Le nombre de départements concernés	47
III.4.5.2 Le nombre de piscines concernées.....	47

III.4.5.3 Les différents types de piscines recensés	48
III.4.5.4 Les résultats de l'utilisation du PHMB entre 1989 et 1999	49
III.4.5.4.1 Les principaux problèmes rencontrés	49
III.4.5.4.2 Les motifs d'abandon du procédé	49
III.4.5.4.3 La qualité microbiologique de l'eau	50
III.4.5.4.4 La qualité physico-chimique de l'eau	51
III.4.5.4.5 Les appréciations de l'administration des gérants et des usagers	51
III.4.5.4.6 Interprétations et limites de ces résultats	52
IV L'EXPERIMENTATION MENE E A GERARDMER EN 1999	53
IV.1 L'expérience du PHMB à la piscine de Gérardmer	53
IV.1.1 Seize années d'expérience	53
IV.1.2 Une mise en œuvre malaisée	53
IV.1.3 Les incertitudes sur la qualité d'eau	54
IV.2 Objectifs de l'expérimentation de 1999	54
IV.2.1 Tester un protocole de mise en œuvre	54
IV.2.2 Juger de l'efficacité du PHMB	55
IV.3 Protocole expérimental	55
IV.3.1 Caractéristiques des deux bassins	55
IV.3.2 Les eaux d'alimentation des deux piscines	56
IV.3.3 Réalisation des prélèvements et des analyses	56
IV.3.3.1 Prises d'échantillons	56
IV.3.3.2 Neutralisation des désinfectants	57
IV.3.3.3 Réalisation des analyses	57
IV.3.4 Mise en œuvre des procédés de traitement d'eau	57
IV.3.4.1 Bassin ludique de La Bresse	57
IV.3.4.2 Petit bassin de Gérardmer	57
IV.4 Résultats et discussion	58
IV.4.1 Mesure de la concentration en Baquacil	58
IV.4.2 Efficacité du procédé de traitement à Gérardmer	60
IV.4.2.1 Interaction du PHMB avec les composés métalliques	60
IV.4.2.2 Efficacité de la filtration	61
IV.4.3 Efficacité du PHMB	61
IV.5 Conclusion	62
CONCLUSION	64
ANNEXES	66
Annexe 1	67
BIBLIOGRAPHIE	68

INTRODUCTION

Les piscines sont des systèmes caractérisés par une forte concentration humaine qui est source importante de pollution.

L'approche globale d'une piscine peut amener à la définir comme un ensemble de trois milieux juxtaposés qui diffèrent par l'état chimique de la matière qui les compose : gazeuse pour l'atmosphère de la piscine, liquide pour l'eau des bassins et solide pour l'environnement des bassins. A ces trois états de la matière peuvent être associées les voies de pénétration dans l'organisme qui permettent l'interaction entre le milieu et l'individu.

Milieu	Etat de la matière	Voie d'interaction milieu-individu
Atmosphère de la piscine	Gaz	Respiratoire
Eau des bassins	Liquide	Cutanéo - muqueuse et orodigestive
Environnement des bassins (sols)	Solide	Cutanéo - muqueuse

Les trois milieux qui composent une piscine (hors local technique)

Les différences observées pour ces trois milieux tant au niveau de la voie d'interaction milieu-individu, que de la composition chimique et microbiologique conduisent à ce que chacun d'entre eux possède ses risques sanitaires spécifiques.

Dans l'évaluation des risques sanitaires encourus dans une piscine, une distinction doit également être faite au niveau des groupes d'individus exposés. En effet, il faut distinguer deux grands groupes : le personnel technique d'une part, les Maîtres Nageurs Sauveteurs (MNS) et les usagers d'autre part. Les individus du second groupe sont soumis aux mêmes dangers mais l'exposition des MNS, présents dans l'établissement sur une plus longue durée, est en général plus élevée, entraînant ainsi des risques sanitaires plus forts. Les techniciens sont exposés à des dangers spécifiques à leur fonction, liés essentiellement à la manipulation de produits chimiques dans le local technique. Le groupe des usagers peut lui même être divisé en sous groupes définis selon l'âge, le comportement ou la sensibilité aux infections.

La définition des différents risques peut donc être basée, en haut de l'arborescence, sur la nature intrinsèque du risque, à savoir physique, chimique ou microbiologique, sur le milieu concerné et sur le groupe d'exposés.

Groupe d'exposés	Milieu	Risque sanitaire chimique (RSC)	Risque sanitaire microbiologique (RSM)	Risque sanitaire physique (RSP)
Usagers et MNS	Atmosphère de la piscine	Sous-produits de la désinfection	-	-
	Eau des bassins	Désinfectant, pH acide...	Microorganismes pathogènes	Noyade
	Environnement des bassins (sols, plages...)	-	Microorganismes pathogènes	Chute
Personnel technique	Local technique	Produits chimiques	-	-

Dangers potentiels dans une piscine

Seuls certains de ces risques sont à mettre en relation avec la désinfection de l'eau (cellules grisées) ; les risques sanitaires microbiologiques, qui justifient le recours à une désinfection, et les risques sanitaires chimiques, induits par le désinfectant lui même, qui constituent l'inconvénient majeur de la désinfection. Ces risques demeurent parmi les plus importants des risques sanitaires encourus au sein d'une piscine. En effet, les agents chimiques ou microbiologiques concernés possèdent un potentiel dangereux relativement important et l'exposition des individus peut y être élevée.

Après avoir rappelé les principaux éléments de l'évaluation du risque microbiologique en piscine, la première partie de ce mémoire nous permettra de resituer la désinfection de l'eau dans la gestion de ce risque..

Nous présenterons ensuite les caractéristiques principales des produits de désinfection, en distinguant les composés actuellement autorisés en France et le Polyhexaméthylène Biguanide (PHMB) qui fit l'objet d'une autorisation entre 1989 et 1992.

La troisième partie nous permettra de faire la synthèse de vingt années d'expérimentations et d'utilisation du PHMB pour la désinfection des eaux de piscines.

Enfin, la dernière partie de ce mémoire sera consacrée à notre propre expérimentation de l'utilisation du PHMB pour la désinfection de l'eau de la piscine de Gérardmer.

I EVALUATION ET GESTION DES RISQUES SANITAIRES MICROBIOLOGIQUES DANS LES BASSINS DE NATATION

I.1 Evaluation du risque microbiologique

I.1.1 Les principaux microorganismes pathogènes des bassins de natation

A l'exception de papillomavirus, que l'on rencontre habituellement sur les sols ou sur le matériel d'animation, tous les pathogènes susceptibles d'être rencontrés en piscine peuvent être présents dans l'eau des bassins [1].

Microorganismes		Pathologies			
		Cutanées	O.R.L.	Digestives	Autres
Parasites	Amibes	-	-	Dysenterie	Méningite
	Levures (<i>candida albicans</i>)	Candidose	-	-	-
	Moisissures (<i>aspergillus</i>)	Erythèmes, pustules...	Infection de l'oreille	-	-
Bactéries	Staphylocoques	Furonculose pyodermite	Rhinite, pharyngite	-	Conjonctivite
	Streptocoques	Impétigo	Angine, otite	-	-
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Dermite folliculite	Otite	-	-
	<i>Salmonella</i>	-	-	Typhoïde, diarrhée	-
	Colibacille	-	-	-	-
	<i>Shigella</i>	-	-	Dysenterie bacillaire	-
	<i>Mycobactérium balnei</i>	Granulomes	-	-	-
	<i>Legionella</i>	-	Pneumonie	-	-
Virus	Poliovirus	-	-	-	Poliomyélite
	Autres entérovirus	-	pharyngite	Diarrhée	Méningite bénigne
	Virus de l'hépatite A	-	-	-	Hépatite virale
	Adénovirus	-	Infections respiratoires	Diarrhée	Conjonctivite épidémique

Tableau 1 : Germes pathogènes susceptibles d'être rencontrés dans les bassins de natation

L'origine de la présence de ces microorganismes dans l'eau est essentiellement humaine. En effet, au contact de l'eau, des germes d'espèces variées sont disséminés, issus de la flore cutanée, périanale, urinaire, génitale et rhinopharyngée.

Ainsi sont dispersés dans l'eau [10] :

- des germes fécaux comme les coliformes thermotolérants ou les streptocoques du groupe D qui demeurent des indicateurs de contamination, et parfois, des germes pathogènes comme les *Salmonella*, les *Shigella* et les virus entériques (entérovirus, virus de l'hépatite A et Adénovirus) ;
- les germes de la peau et des muqueuses : streptocoques, staphylocoques, mais également dermatophytes et levures (squames).

- les germes des sécrétions rhinopharyngées : streptocoques, staphylocoques, mais aussi *Pseudomonas*.

I.1.2 Exposition aux dangers microbiologiques

I.1.2.1 Contamination des bassins

Une enquête réalisée auprès des Services Santé Environnement (SSE) en 1997 sur les incidents et pollutions accidentelles en piscine semble montrer que la pollution microbiologique de l'eau des piscines devient aujourd'hui un phénomène marginal [2]. Seuls deux cas de pollution par des staphylocoques pathogènes y sont mentionnés sur un total de 102 incidents recensés par 46 SSE (2%).

Toutefois, ces résultats semblent n'être que partiellement représentatifs du risque de contamination microbiologique de l'eau des bassins. Un suivi de 16 piscines effectué en 1993 par le SSE de Haute Garonne [3] donne en effet des résultats sensiblement différents présentés dans le tableau ci-dessous ;

<i>Staphylocoques pathogènes</i>	Petit bassin		Grand bassin	
	Surface	Fond	Surface	Fond
Nombre de prélèvements positifs	4	8	5	10
Nombre total de prélèvements	29	29	29	29
% de prélèvements positifs	14	27	17	34

Tableau 2 : Proportions d'échantillons renfermant des staphylocoques pathogènes lors d'une étude réalisée sur 16 piscines par le SSE 31 en 1993.

BOUKARI M. (1995) montre par ailleurs que les valeurs observées au niveau de la surface et au niveau du fond des bassins sont significativement différentes. La présence de staphylocoques pathogènes serait en général plus importante au fond des bassins qu'en surface, ce qui s'expliquerait par des phénomènes d'adsorption de ces microorganismes sur des particules qui sédimentent.

Les prélèvements des Services Santé Environnement n'étant que très rarement réalisés dans le fond des bassins, ce résultat peut en partie expliquer la faible prévalence de staphylocoques pathogènes dans les bassins annoncée par l'enquête de LHEUREUX C. (1997).

On ne peut donc affirmer que l'exposition au danger microbiologique dans les bassins de natation est aujourd'hui parfaitement maîtrisée et réduite à sa plus faible valeur.

I.1.2.2 Evaluation épidémique

L'évaluation épidémique réelle des risques liés à la baignade en piscine est rendue difficile par la non spécificité à cette activité de nombreuses pathologies observées. Mettre en cause la baignade dans une infection rhinopharyngée contractée en hiver ou dans la survenue de troubles digestifs en été relève en effet d'une investigation délicate. Il en est de même pour les infections cutanées telles que les mycoses qui sont très courantes chez les sportifs.

On peut toutefois, à partir de la littérature récente, essayer d'apprécier la nature des pathologies qui prédominent actuellement. Cette littérature essentiellement étrangère, notamment anglo-saxonne, n'est malheureusement qu'indirectement représentative de la situation française.

Microorganismes		Pathologies	Nombre de cas	Période mise en cause	Année de publication	Réf.
Parasites	Cryptosporidium	Diarrhées	8	8 semaines été 1996	1997	[4]
Bactéries	Mycobactérium marinum	Granulomes	1	?	1997	[5]
	Pseudomonas aeruginosa	Folliculite	1	?	1999	[6]
			1	?	1998	[7]
		Otite	58	Juin à octobre 1993 et 1994	1997	[8]
Virus	Adénovirus	Conjonctivite	80	Juillet 1995	1998	[9]

Tableau 3 : Survenue d'infections liées à l'eau des piscines recensées par la littérature récente

Il est intéressant de noter que les germes mis en cause par la littérature récente l'étaient déjà par LEJEUNE B., dans un article publié en 1985, à la suite d'une recherche bibliographique similaire [10]. Il semble donc que la nature du risque microbiologique lié à l'eau des bassins ait peu évolué depuis dix ans.

Deux types de pathologie prédominent : les infections cutanées (folliculite et granulomes) et les infections oto-rhynopharyngées (otite et conjonctivite), mais ces dernières apparaissent plus virulentes que les premières si l'on s'en réfère au nombre de cas recensés.

Deux articles mettent en cause la qualité de l'eau des spas dans la survenue des folliculites. Ces bassins de faible dimension (quelques m³), que l'on qualifie également de bain bouillonnant du fait de la présence de générateurs d'air pulsé, possèdent en effet une eau à température élevée (35 à 40°C) qui constitue un habitat idéal pour le développement de certains germes pathogènes, tels que *Pseudomonas* et surtout *Legionella* [11].

Enfin, la réalité de ce risque microbiologique est également confirmée par les observations de Woerther G., médecin généraliste qui exerce depuis plus de vingt ans dans un bourg de 1500 habitants, situé dans l'Est de la France (communication personnelle). Depuis l'ouverture d'une piscine dans le camping municipal, ce praticien enregistre une augmentation significative du nombre de pathologies liées à des infections oculaires ou de la sphère ORL. Malgré la non spécificité de ces maladies à un agent pathogène, la relation de causalité entre leur survenue pendant la période d'été et la baignade dans cette piscine ne fait pour lui aucun doute.

I.2 La gestion des RSM liés à l'eau des bassins

La gestion des risques sanitaires microbiologiques (RSM) liés à l'eau des bassins est définie par un ensemble de textes législatifs et réglementaires présentés en annexe 1. Il s'agit principalement de :

- la loi du 12 juillet 1978 relative aux piscines et aux baignades aménagées ;
- le décret du 07 avril 1981 fixant les normes d'hygiène et de sécurité applicables aux piscines et aux baignades aménagées ;
- l'arrêté du 07 avril 1981 fixant les dispositions techniques applicables aux piscines, modifié par l'arrêté du 28 septembre 1989 ;

- l'arrêté du 07 avril 1981 fixant les dispositions administratives applicables aux piscines et aux baignades aménagées.

I.2.1 Champ d'application de la législation et de la réglementation

La loi du 12 juillet 1978 indique que les piscines autres que celles réservées à l'usage personnel d'une famille doivent faire l'objet avant ouverture d'une déclaration à la mairie comportant l'engagement que l'installation de la piscine satisfait aux normes d'hygiène et de sécurité fixées par le décret d'application de cette loi.

Le décret du 07 avril 1981 précise que « les piscines thermales et les piscines des centres de réadaptation fonctionnelle, d'usage exclusivement médical, ne sont pas soumises aux dispositions du présent décret ». Seules les piscines de loisirs et de remise en forme recevant du public sont donc soumises à cette réglementation et font l'objet de ce mémoire.

I.2.2 Les moyens de limitation de la pollution introduite dans les bassins

I.2.2.1 L'information des usagers

La pollution microbiologique de l'eau des bassins est principalement apportée par les baigneurs. Leur information constitue donc le premier moyen de limiter la contamination de l'eau.

Cette information n'est prévue par la réglementation que sous la forme d'une obligation, pour le gérant, d'afficher un règlement intérieur comportant au minimum certaines dispositions obligeant les usagers à une hygiène élémentaire (douches obligatoires, chaussures interdites...).

Il reste que l'efficacité de cette information repose sur l'appropriation par les usagers de ces règles élémentaires d'hygiène. Les Services Santé Environnement intègrent de plus en plus cette réalité dans leur politique de gestion des RSM. Ils cherchent notamment à viser les jeunes enfants des classes de primaire en réalisant, en coopération avec l'Education Nationale, des plaquettes pédagogiques sur ce thème.

I.2.2.2 Limitation de la fréquentation

La réglementation fixe une fréquentation maximale instantanée : le nombre de baigneurs présents dans l'établissement ne doit pas dépasser trois personnes pour deux m² de plan d'eau en plein air et une personne par m² de plan d'eau couvert.

I.2.2.3 Les équipements sanitaires et les pédiluves

Les équipements sanitaires mis à disposition des baigneurs permettent à ceux-ci d'éliminer la plus grande partie possible de la pollution organique et microbiologique dont ils sont porteurs. La conception et le nombre de douches, de cabinets d'aisance, de lavabos et de lave-pieds doivent être conformes aux dispositions du décret du 07 avril 1981.

L'existence de pédiluves, qui permettent de retenir la pollution résiduelle des pieds, n'est obligatoire que dans les établissements où la superficie des bassins est supérieure ou égale à 240 m², sans spécification de la teneur en désinfectant. Ceci peut être perçu comme une faiblesse dans l'obligation de moyens fixée par ce texte. En effet, les pédiluves bien entretenus permettent de limiter significativement la contamination des sols et des bassins [12].

I.2.2.4 La désinfection des sols et des parois

Les sols et les parois peuvent constituer des supports importants de germes pathogènes [12, 13]. La contamination d'un usager par les sols induit deux risques : celui de contaminer l'eau des bassins et celui de causer une pathologie cutanée.

Le premier est limité par une obligation de résultats indirecte que constituent les normes fixées pour l'eau des bassins. Le second ne peut l'être que par une obligation de moyens et/ou de résultats concernant la désinfection des sols et des parois. Toutefois, la réglementation ne fixe aucune disposition sur ce sujet et les exploitants peuvent au mieux s'en remettre aux recommandations des autorités sanitaires.

I.2.3 Les moyens d'élimination de la pollution résiduelle des bassins

I.2.3.1 L'apport d'eau neuve

Chaque jour d'ouverture, le gérant de la piscine doit effectuer un apport d'eau neuve minimum de 30 litres d'eau de réseau par baigneur ayant fréquenté l'établissement. Le renouvellement de l'eau des bassins n'est donc que partiel pour des raisons pratiques (temps de vidange et de remplissage trop longs) et financières (chauffage et consommation d'eau onéreux). Toutefois, la réglementation impose que les bassins soient vidangés au minimum deux fois par an pour les établissements ouverts plus de six mois par an.

De fait, les installations comprennent un système de traitement de l'eau. Les techniques mises en œuvre par les gérants répondent à des obligations de moyens et de résultats définies par la réglementation applicable aux piscines et dont il sera fait état dans les paragraphes suivants.

I.2.3.2 L'hydraulicité

I.2.3.2.1 L'importance de l'hydraulicité

L'hydraulicité ou recirculation de l'eau définit le système de reprise et de refoulement de l'eau des bassins. Les dispositifs de départ et d'apport de l'eau d'un bassin doivent être positionnés de telle façon :

- qu'il n'y ait aucune zone morte et que l'eau soit renouvelée dans tout le bassin ;
- que soit évités les risques de dépôts ;
- que la pollution soit évacuée sans délai ;
- que soit assurée une diffusion rapide et homogène du désinfectant.

Une bonne hydraulicité est fondamentale dans l'élimination de la pollution microbiologique apportée par les baigneurs. Elle évite en effet des zones préférentielles d'accumulation des matières organiques qui constituent pour les microorganismes à la fois une nourriture et une protection vis à vis du désinfectant. Ainsi, le film superficiel des bassins concentre les matières organiques moins denses que l'eau et le fond des bassins reçoit les particules qui sédimentent, sur lesquelles certains microorganismes peuvent s'adsorber [3].

Trois types de recirculation sont envisageables :

- Recirculation classique : reprise de l'eau par le fond du bassin et refoulement par la surface. Ce système permet une bonne élimination des particules dont la densité est supérieure à celle de l'eau mais pas du film superficiel qui peut abriter un certain nombre de germes.
- Recirculation inversée : elle correspond à l'inverse du schéma précédent. Les dépôts au fond du bassin doivent être limités par un emplacement judicieux des bouches de refoulement et sont éliminés par une aspiration quotidienne.
- Recirculation mixte : la reprise des eaux contaminées se fait à la fois par le fond et par la surface et le refoulement en plusieurs points du bassin.

I.2.3.2.2 L'obligation de moyens en matière d'hydraulicité

Le système de recirculation classique est interdit par la réglementation de 1981, qui a imposé la mise en conformité des bassins conçus antérieurement à cette date. Cette disposition vise justement à limiter l'accumulation de matières organiques au niveau du film superficiel des bassins. Ainsi, sauf pour les pataugeoires et les bassins à vague, la couche d'eau superficielle des bassins doit être reprise en continu pour au moins 50% du débit de recyclage.

La durée de cycle de l'eau est réglementée pour les piscines dont la surface totale de plan d'eau est supérieure à 240 m², ½ h pour les pataugeoires, 8 h pour les fosses de plongée, 1 h 30 pour les parties des autres bassins de profondeur inférieure ou égale à 1,5 m et 4 h pour les autres parties.

I.2.3.2.3 Les insuffisances de l'obligation de moyens en matière d'hydraulicité

Les piscines dont la surface totale des plans d'eau est inférieure à 240 m² ne sont pas soumises aux normes concernant les débits minimum de recyclage. Elles ne sont donc soumises qu'à des obligations de résultats.

Or cela concerne essentiellement les piscines de camping et d'hôtels, ouvertes généralement uniquement pendant la saison estivale, et pour lesquelles le suivi sanitaire ne peut pas toujours être réalisé au mieux, notamment dans certains départements touristiques où leur nombre est conséquent. Dans cette situation, l'obligation de moyens pourrait donc être une garantie de résultats.

Pour les autres piscines, dans le souci de limiter l'accumulation de matières organiques au niveau du film superficiel, la réglementation privilégie clairement la reprise de l'eau par la surface des bassins, en autorisant notamment la recirculation inversée (reprise de l'eau par la surface et refoulement par le fond). Or, comme nous l'avons dit précédemment, l'étude récente de BOUKARI M. (1995) montre que le fond des bassins est également susceptible d'abriter des microorganismes tels que les staphylocoques pathogènes adsorbés sur des particules plus denses que l'eau. La recirculation mixte apparaît donc être le système le plus approprié pour limiter ces phénomènes d'accumulation.

I.2.3.3 La filtration

I.2.3.3.1 Le rôle de la filtration

La filtration a pour but d'assurer la rétention des particules en suspension et des matières colloïdales. Ce traitement se veut complémentaire de la désinfection puisque ces matières organiques constituent une protection et une source de nourriture pour les germes.

Quatre matériaux peuvent être employés pour la filtration de l'eau des bassins de natation :

- le sable (silice de qualité et de granulométrie spécifiques) ;
- l'antracite ;
- la diatomite (roche provenant de la fossilisation des diatomées) ;
- les fibres synthétiques ou végétales.

Les fibres sont utilisées pour la réalisation des filtres à cartouches, employés essentiellement dans le cas de petits bassins (piscine familiale ou d'hôtel) et qui ont l'inconvénient de se colmater rapidement et de nécessiter le remplacement fréquent des cartouches.

Les filtres à diatomite possèdent le seuil de coupure le plus bas (0,1 à 3 µm). L'emploi de ces filtres exige une vitesse de filtration très basse de quelques mètres par heure et interdit l'utilisation de coagulant qui provoquerait un colmatage très rapide.

La filtration sur sable est en général accompagnée de l'injection en amont du filtre d'un coagulant (sel d'aluminium) qui permet une finesse de filtration de 15 à 25 µm. Les filtres à sable sont généralement classés en trois catégories en fonction de leur vitesse de filtration :

- filtre lent, 10 à 20 m/h ;
- filtre semi-rapide, 20 à 40 m/h ;
- filtre rapide, > 40 m/h.

Les différentes granulométries du sable et de l'antracite permettent la conception de filtre à plusieurs couches :

- filtre à sable monocouche : sable de granulométrie uniforme (dixièmes de mm) ;
- filtre bi-couches : couche inférieure de sable et couche supérieure d'hydroanthracite ;
- filtre multicouches : sable de deux granulométries différentes et hydroanthracite.

1.2.3.3.2 L'obligation de moyens en matière de filtration

L'arrêté du 07 avril 1981 fixant les dispositions techniques applicables aux piscines précise que chaque filtre doit être muni d'un dispositif de contrôle de l'encrassement et que le débit du filtre encrassé doit être au minimum égal à 70% de celui du filtre propre.

La filtration de l'eau des bassins de natation apparaît donc peu réglementée, les exigences sont essentiellement indirectes et reposent sur une obligation de résultats au niveau de la qualité de l'eau que nous aborderons plus loin. Toutefois, un certain nombre de dispositions pourraient permettre de s'assurer de l'efficacité de cette opération de base indispensable à une désinfection satisfaisante.

1.2.3.3.3 Les insuffisances de l'obligation de moyens en matière de filtration

La réglementation ne prévoit pas de critère d'évaluation de la qualité de la filtration. Ceci tient sans doute à la difficulté d'une telle opération résultant de l'apparente très bonne qualité de l'eau qui ne peut être mesurée par les moyens traditionnels, en particulier la turbidité. Toutefois, il semble que des méthodes de mesure plus perfectionnées existent telles que le comptage particulaire qui permet d'appréhender la qualité d'une eau de très faible turbidité [14].

La vitesse de passage de l'eau sur les filtres n'est pas limitée alors qu'elle l'est aux Etats-Unis à 7,5 m/h avec une couche filtrante minimale de 0,5 m et une taille de grains de 0,4 à 0,55 mm. En Allemagne, la vitesse maximale est de 27 m/h avec une couche filtrante minimale de 1,2 m et une taille de grains de 0,5 à 3 mm.

En France, il devient ainsi courant depuis plusieurs années, que les filtres soient conçus pour des vitesses de filtration supérieures à 35 m/h, pour des raisons d'économie à l'investissement et d'encombrement. Or ces vitesses rapides exigent des filtres d'une qualité très soignée, obtenue en particulier par des lavages réguliers optimaux, sous peine de diminution significative de leur efficacité, qui peut être masquée par des apports importants de désinfectant.

La procédure de lavage des filtres n'est d'ailleurs pas réglementée alors qu'il semble que la pratique courante d'un contre lavage à l'eau suivie d'un rinçage à l'eau puisse être améliorée par un décolmatage à l'air. Un lavage mal réalisé peut être à l'origine de la formation de zones de passage préférentiel de l'eau dans la masse filtrante et ainsi d'une diminution de la rétention des particules.

En pratique, la filtration est souvent le maillon faible du traitement de l'eau des piscines. Une évolution de la réglementation serait peut-être souhaitable pour encadrer davantage cette technique, et ce, d'autant plus si l'on envisage d'autoriser l'utilisation de désinfectant particulièrement sensible à la qualité de la filtration. Comme on le verra plus loin, cet aspect revient régulièrement dans la discussion sur la mise en œuvre du PHMB.

I.2.3.4 La désinfection de l'eau des bassins

I.2.3.4.1 Le rôle de la désinfection de l'eau

L'objectif de la désinfection de l'eau est double : elle doit permettre de détruire les germes pathogènes pour éliminer les risques de contamination et d'empêcher le développement des algues pour maintenir une eau limpide. En effet, en l'absence de baigneurs, une eau de piscine se trouble rapidement en raison de la prolifération d'algues et de bactéries.

I.2.3.4.2 L'obligation de moyens en matière de désinfection de l'eau

L'eau des bassins doit être désinfectée et désinfectante. Le désinfectant doit donc permettre d'éliminer les microorganismes pathogènes au fur et à mesure de leur introduction dans l'eau. Il faut donc maintenir en permanence un excédent de désinfectant dans les bassins.

L'injection des produits chimiques ne doit pas se faire directement dans les bassins. Le dispositif d'injection doit être asservi au fonctionnement des pompes de recyclage.

L'arrêté du 07 avril 1981 modifié fixant les dispositions techniques applicables aux piscines fixe les produits ou procédés de traitement qui peuvent être employés pour la désinfection des eaux. Ce texte précise la gamme de pH de l'eau ainsi que les domaines de concentrations à respecter pour le produit désinfectant et pour les éventuels sous-produits de désinfection.

I.2.3.4.3 Les limites de l'obligation de moyens en matière de désinfection

L'obligation d'une eau désinfectée et désinfectante impose à l'exploitant de la piscine l'utilisation d'un désinfectant choisi parmi trois types de composés autorisés.

Il s'avère que ceux-ci sont tous des oxydants. En outre, l'un d'entre eux, l'ozone ne peut être utilisé sans l'un des deux autres (chlore ou brome). Si bien que cette obligation de moyens correspond en fait à une obligation d'utiliser un produit halogéné. Ces composés conviennent manifestement à la majorité des usagers, mais il peut apparaître regrettable qu'il n'existe pas en France d'alternative à ce type de produit. Par exemple, comme nous le verrons plus loin, le PHMB permet de pallier certains des inconvénients liés à l'utilisation des ces désinfectants.

I.2.4 L'obligation de résultats

I.2.4.1 Les dispositions de la réglementation de 1981

L'obligation de résultats constitue la principale contrainte de la réglementation applicable aux piscines. Le décret du 07 avril 1981 fixe les normes physico-chimiques et microbiologiques auxquelles doivent répondre les eaux des piscines et des baignades aménagées (tableau 4).

Paramètre	Norme
pH	[6,9 ; 8,2]
Nombre de bactéries revivifiables à 37°C	< 100 dans 1 mL
Nombre de coliformes totaux	< 10 dans 100 mL
Nombre de coliformes fécaux	Absence dans 100 mL
Germes pathogènes	Absence
Staphylocoques pathogènes	Absence dans 100 mL pour 90% des échantillons

Tableau 4 : Normes fixées pour les eaux des piscines et des baignades aménagées

Ces normes sont accompagnées des dispositions suivantes :

- la transparence de l'eau permet de voir parfaitement au fond les lignes de nage ou un repère sombre de 0,3 m de côté placé au point le plus profond ;
- l'eau n'est pas irritante pour les yeux, la peau et les muqueuses ;
- l'eau ne contient pas de substances dont la quantité serait susceptible de nuire à la santé des baigneurs ;
- l'oxydabilité au permanganate de potassium (KMnO_4), à chaud en milieu alcalin, ne doit pas dépasser de plus de 4 mg O_2/L la teneur de l'eau de remplissage des bassins.

1.2.4.2 A propos des indicateurs de qualité des eaux de piscine

Deux types de paramètres microbiologiques sont pris en compte par la réglementation de 1981, d'une part des indicateurs de contamination (flore à 37°C et coliformes), et d'autre part, des germes pathogènes.

La flore revivifiable à 37 °C est un indicateur de contamination bactérienne de l'eau, elle peut englober certains germes pathogènes. Ce paramètre constitue également un indicateur de traitement des eaux. Toutefois la flore revivifiable à 22 °C, composée de germes qualifiés de banaux, pourrait constituer un indicateur de traitement plus exigeant que la flore revivifiable à 37°C.

Les coliformes totaux et fécaux sont les indicateurs bactériens de contamination fécale de cette obligation de résultats. Les coliformes totaux sont désormais reconnus comme un indicateur très peu spécifique des bactéries d'origine fécale, et l'intérêt de ce paramètre devient très limité. Les coliformes fécaux correspondent en fait aux coliformes thermotolérants, ils constituent un bon indicateur de contamination bactérienne d'origine fécale. Toutefois, le suivi des streptocoques du groupe D permettrait sans doute d'améliorer l'indication d'une telle contamination.

Ces deux indicateurs de contamination fécale (coliformes thermotolérants et streptocoques du groupe D) ne sont cependant pas des indicateurs de contamination virale d'origine fécale. Plus généralement, on ne dispose actuellement pas d'indicateur de contamination virale. Le respect des normes de qualité bactériologique ne présume en rien de la qualité virologique de l'eau.

Le paramètre staphylocoques pathogènes constitue ce que l'on peut appeler un indicateur de risque sanitaire direct puisque la présence de tels germes équivaut à un risque sanitaire réel. Il semble désormais que d'autres paramètres microbiologiques pourraient bénéficier de la même considération, en particulier *Legionella* [20] et *Pseudomonas aeruginosa* [6, 7, 8], qui sont fréquemment incriminés dans des infections contractées lors des bains en piscine. Les risques associés à ces germes sont sans doute plus importants en piscine qu'en baignade, leur prise en considération pour les piscines reviendrait donc à différencier les critères de qualité des eaux de ces deux activités.

L'évolution de ces indicateurs fait actuellement l'objet de réflexions au sein du Ministère chargé de la Santé. Celles-ci devraient permettre de prendre également en compte les risques émergents comme le risque légionelles associé aux spas et jacuzzis.

1.2.5 L'autosurveillance de l'exploitant

La réglementation impose à l'exploitant la tenue d'un carnet sanitaire paginé à l'avance dans lequel sont consignées les données relatives au traitement de l'eau et à la salubrité. Ainsi, chaque établissement doit disposer d'une trousse d'analyses permettant de déterminer régulièrement (plusieurs fois par jour), avec précision, les valeurs des différents paramètres physico-chimiques

comme la teneur en désinfectant sous ses différentes formes, le pH ou encore la température de l'eau.

I.2.6 Le contrôle sanitaire

La fréquence des analyses est fixée par arrêté préfectoral ; elle est au minimum mensuelle. Les prélèvements sont réalisés à la diligence de la DDASS et analysés par un laboratoire agréé par le Ministre chargé de la Santé.

Les établissements font également l'objet de visites qui permettent aux autorités sanitaires de contrôler notamment la salubrité générale, le fonctionnement des installations techniques ou la tenue du carnet sanitaire.

Les non conformités font l'objet d'un examen approfondi par les techniciens des Services Santé Environnement qui déterminent avec l'exploitant les mesures à prendre pour y remédier sans délai. Il s'avère en pratique que ces non conformités ont souvent une origine explicable (taux de désinfectant trop faible, apport d'eau neuve insuffisant...).

Faute de moyens curatifs adaptés, la DDASS adresse au directeur de l'établissement une mise en demeure dont le non respect peut conduire le préfet à prendre un arrêté d'interdiction ou de limitation de l'utilisation du bassin concerné.

II LES PRODUITS DE DESINFECTION

II.1 Les attentes vis à vis du désinfectant de piscine

II.1.1 Pourquoi des exigences sur le désinfectant ?

L'objectif sanitaire premier de la désinfection des piscines est par définition la réduction au maximum des RSM. A cet effet, l'un des leviers majeurs de l'administration est le contrôle d'indicateurs de qualité du traitement et de l'eau. Nous avons fait au paragraphe I.2.4.2 quelques suggestions quant à l'évolution de ces paramètres.

Cependant, le contrôle ne peut suffire à garantir la meilleure réduction possible du RSM. En témoigne l'absence d'indicateur de qualité virologique de l'eau. La rigueur de la procédure d'autorisation des produits de traitement et les critères retenus sont donc fondamentaux pour pallier les insuffisances du contrôle réglementaire.

Ainsi, l'arrêté du 07 avril 1981 modifié fixe la liste des produits ou procédés de traitement qui peuvent être employés pour la désinfection des eaux. Le Ministère publie également régulièrement la liste des produits commerciaux agréés en matière de traitement des eaux de piscines.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons jugé opportun d'explicitier les caractéristiques attendues d'un désinfectant idéal. Nous espérons que la définition de ces critères pourra être reprise lors de la reconsidération de l'autorisation du PHMB.

II.1.2 Les caractéristiques du désinfectant idéal

II.1.2.1 Réduire les RSM...

Les principales exigences réglementaires pour réduire les RSM sont :

- l'eau doit être désinfectante : le maintien d'une teneur résiduelle en désinfectant dans le bassin doit permettre de détruire rapidement les microorganismes apportés par les baigneurs. Le désinfectant doit donc posséder un certain pouvoir de rémanence et une cinétique d'action antimicrobienne rapide. Le maintien d'une concentration minimale fixée par la réglementation impose par ailleurs l'existence d'une méthode de dosage fiable du désinfectant ;
- l'eau doit être désinfectée : le désinfectant doit posséder un large spectre d'action conduisant à une absence de microorganismes dans l'eau ;
- l'eau doit être limpide : le désinfectant doit permettre de lutter contre la prolifération d'algues ;
- l'eau doit posséder une faible teneur en substance oxydable ; le désinfectant doit contribuer à l'élimination des substances organiques apportées par les baigneurs.

A l'instar des agents des Services Santé Environnement, l'exploitant attend du désinfectant une excellente efficacité qui lui permette de répondre à l'obligation de résultats à laquelle il est soumis. Ce souci est particulièrement important dans un contexte croissant d'exigence de sécurité sanitaire par les usagers.

II.1.2.2...en minimisant les risques induits...

La limitation des risques induits par l'utilisation d'un désinfectant est exprimée dans la réglementation par les critères suivants :

- l'injection des produits chimiques ne doit pas se faire directement dans le bassin. Le dispositif d'injection doit être asservi au fonctionnement des pompes de recyclage de l'eau. Toutes précautions doivent être prises pour le stockage des produits et leur manipulation. Le désinfectant doit donc être d'une utilisation simple et le potentiel dangereux lié à sa manipulation aussi faible que possible ;
- la teneur maximale en désinfectant dans l'eau est fixée pour chaque type de produit. Cela permet de limiter les risques chimiques liés à la présence d'un excès de désinfectant. Cette mesure revient à exiger à nouveau que la concentration du désinfectant puisse être évaluée de façon fiable, et, indirectement, qu'il présente une très faible toxicité pour les usagers ;
- la teneur dans l'eau en d'éventuels sous-produits de désinfection potentiellement dangereux doit être suivie et limitée. Pour les désinfectants chlorés, cela correspond à la mesure du chlore combiné dans l'eau. Cette exigence, combinée à celle d'un renouvellement de l'air dans le hall de la piscine est une façon indirecte de contrôler la teneur en chlore combiné dans l'atmosphère de la piscine.

Les Maîtres Nageurs Sauveteurs (MNS) qui peuvent passer une quarantaine d'heure par semaine dans ces atmosphères sont particulièrement sensibles à ces risques induits. En effet, une exposition importante aux sous-produits de la désinfection chlorée, et notamment au trichlorure d'azote peut être à l'origine d'irritations oculaires et respiratoires [16].

II.1.2.3 ...pour un coût et des conditions de mise en œuvre acceptables.

L'exploitant attend du désinfectant une certaine facilité de mise en œuvre, ce qui signifie notamment un stockage simple et une utilisation peu astreignante. Un système d'injection du désinfectant asservi à sa concentration dans le bassin lui permet ainsi de s'assurer d'une teneur relativement stable et de se consacrer à d'autres nécessités.

La possibilité d'asservir l'injection du désinfectant à sa concentration dans le bassin ne vaut bien-sûr que pour les piscines de taille importante comme celles des municipalités. Pour les autres établissements, un tel système est peu envisageable du fait de son coût élevé. Dans ce cas, le gérant pourra exiger du désinfectant un certain pouvoir de rémanence qui lui permet de ne pas être contraint de surveiller plusieurs fois par jour sa teneur dans l'eau.

Comme dans tout autre domaine, le gérant d'une piscine municipale, et à fortiori, d'une piscine de camping ou d'hôtel, attend du produit de désinfection le meilleur rapport qualité prix qui le conduit à choisir, à performances égales, le désinfectant le moins cher.

L'exploitant d'une piscine est également attentif aux attentes de confort de la part des usagers de son établissement, qui exigent une piscine sans odeur, une eau limpide et qui n'irrite pas les yeux.

II.1.2.4 Tableau synthétique

Dans le tableau suivant, nous avons essayé de reproduire sous forme synthétique les critères détaillés précédemment. Nous suggérons également l'établissement d'un « barème » qui devrait permettre de « noter » les produits de désinfection. Bien entendu, les coefficients avancés ne sont qu'indicatifs. Cependant, nous espérons que le principe puisse en être retenu pour juger de l'opportunité d'autoriser le PHMB pour la désinfection des eaux des piscines recevant du public.

Réduction des RSM		Minimisation des risques induits		Gestion, coût, confort	
Critères	Coeff.	Critères	Coeff.	Critères	Coeff.
Largeur du spectre d'action : - bactéricide - virucide - antiparasitaire	15	Toxicité intrinsèque	10	Automatisation du procédé de désinfection	3
		Risques liés à la manipulation	5		
		Risques liés au stockage	5	Facilité de manipulation et de stockage	7
Cinétique d'action	15	Risques liés aux sous-produits : - dans l'eau - dans l'atmosphère	10	Coût	5
Pouvoir de rémanence	10			Confort des usagers	5
Pouvoir algicide	1				
Action sur les matières organiques	1				
Fiabilité de la méthode de dosage : - de terrain - de laboratoire	8				
Total	50		30		20

Tableau 5 : Exemple de coefficients de pondération en vue du calcul d'une note globale de qualité d'un procédé de désinfection.

II.2 Les désinfectants de piscine autorisés en France

II.2.1 Les trois types de composés autorisés

II.2.1.1 Les produits chlorés

Dans la catégorie des désinfectants chlorés, il faut distinguer deux types de composés ; les produits chlorés classiques et les chloroisocyanurates.

Les produits classiques sont le chlore gazeux, l'eau de Javel et l'hypochlorite de calcium. Le pouvoir désinfectant de ces trois produits repose sur le même principe actif : mélangés à l'eau, ils libèrent de l'acide hypochloreux (HOCl) qui constitue le chlore actif.

Sous le terme de chloroisocyanurates, on désigne : l'acide trichloroisocyanurique (ATCC), le dichloroisocyanurate de sodium (DCCNa) et le dichloroisocyanurate de potassium (DCCK), ce dernier étant beaucoup moins commercialisé que les deux autres. Mélangés à l'eau, les chloroisocyanurates subissent des réactions équilibrées d'hydrolyse et de dissociation qui conduisent, pour des pH compris entre 7 et 8, aux formes majoritaires suivantes : HCly^- , Cl_2Cy^- , H_2Cy^- et H_3Cy [17]. Cy désigne le motif isocyanurique $\text{C}_3\text{N}_3\text{O}_3$.

L'intérêt premier des chloroisocyanurates réside dans la libération de formes beaucoup moins sensibles aux ultraviolets que ne l'est HOCl. La consommation en désinfectant, surtout en piscine ouverte, se voit très nettement réduite, on parle alors de chlore stabilisé. Ainsi, l'acide cyanurique qui joue ce rôle de stabilisant peut être ajouté aux produits chlorés classiques pour obtenir le même phénomène.

II.2.1.2 Le brome

Il n'existe qu'une forme de désinfectant bromé, il s'agit de Br₂. Le brome se présente sous la forme d'un liquide brun rouge qui, mélangé à l'eau, libère de l'acide hypobromeux (HBrO). Le principe actif est donc tout à fait analogue à celui des produits chlorés classiques. Par contre, HBrO bénéficie d'une bonne stabilité en milieux aqueux et ne nécessite pas d'être stabilisé.

II.2.1.3 L'ozone

L'air enrichi en ozone à environ 20 g d'O₃ par m³ d'air constitue le troisième type de désinfectant utilisable en piscine réglementée.

L'ozone est considéré comme dangereux à respirer à partir de 0,2 mg/m³ d'air. Aussi, pour des raisons de sécurité, l'eau arrivant dans les bassins ne doit plus contenir d'ozone. La phase d'ozonation doit donc être nécessairement suivie d'une désozonation de l'eau. Or, l'eau d'une piscine doit être désinfectante. Le pouvoir désinfectant rémanent de l'eau d'une piscine publique est donc systématiquement assuré par un produit halogéné.

II.2.2 Fréquence d'utilisation des différents désinfectants

A titre indicatif, nous donnons ici la fréquence d'utilisation des différents désinfectants dans les piscines soumises au contrôle sanitaire en Lorraine. Ces chiffres ne peuvent être considérés comme parfaitement représentatifs de la situation française, mais ils permettent de donner un premier ordre de grandeur [18].

Désinfectant utilisé	Nombre de piscines	% en nombre
Chloroisocyanurates	179	62
Chlore gazeux	38	13
Chlore gazeux + acide isocyanurique	17	6
Eau de Javel	16	5
Hypochlorite de calcium + chloroisocyanurates	12	4
Hypochlorite de calcium	9	3
Ozone + chloroisocyanurates	8	3
Eau de Javel + acide isocyanurique	4	1
Autre	8	3
Total	291	100 %

Tableau 6 : Désinfectants utilisés en région Lorraine en 1996

Aucune piscine suivie en 1996 en Lorraine n'employait le brome pour la désinfection de l'eau. Ce produit très toxique et disponible sous forme liquide présente en effet des difficultés de stockage et de transport, qui freinent son choix par les gérants de piscine.

9 établissements sur un total de 291 utilisaient l'ozone. L'installation de traitement à l'ozone représente un investissement lourd, c'est pourquoi, malgré la réactivité très élevée de ce composé, son utilisation pour la désinfection de l'eau des piscines reste marginale et réservée à des établissements de grande capacité.

En 1996, les produits chlorés représentaient donc la quasi totalité des procédés de désinfection utilisés en Lorraine, avec dans trois quarts des cas le recours à des formes stabilisées.

II.2.3 Efficacité et risques induits des désinfectants autorisés

Comme nous l'avons déjà précisé précédemment, le désinfectant permet de réduire le risque sanitaire microbiologique lié à l'eau des bassins en détruisant en permanence l'ensemble des

germes pathogènes introduits par les baigneurs. Par contre, il est lui-même à l'origine de risques induits qui contrebalancent ce bénéfice.

II.2.3.1 Efficacité et mode d'action

On sait que le pouvoir désinfectant des agents chimiques mentionnés ci-dessus est directement lié à leur pouvoir d'oxydation qui leur permet de détruire les protéines structurales et enzymatiques de la cellule microbienne. Ainsi, dans les mêmes conditions, l'ozone aura une efficacité supérieure à celle de HClO lui-même plus efficace que HBrO.

Par ailleurs, SEUX et al. (1985) ont montré que, pour une concentration en chlore total donnée, les formes chloroisocyanuriques sont un peu moins oxydantes que la solution d'acide hypochloreux de même titre en chlore, mais que la différence observée n'est pas très importante [17].

Une étude comparative de l'action, en milieu réel, du chlore gazeux et des chloroisocyanurates sur les staphylocoques a été réalisée en 1993 sur les piscines de plus de 50 communes du département de Haute-Garonne [3]. Les résultats de cette étude confirment que HClO possède une efficacité légèrement supérieure à celles des formes chloroisocyanuriques, comme l'ont montré en 1978 WARREN I.C. et RIDWAY J [49].

On sait également que le spectre d'action des halogènes et de l'ozone est large, ils ont un effet létal sur l'ensemble des microorganismes : bactéries et leurs spores, champignons [19], virus nus et enveloppés [26].

Ces différents composés possèdent donc tous un pouvoir désinfectant potentiel satisfaisant. Il est bien évident que ce pouvoir désinfectant, au sein de l'eau d'une piscine, ne peut qu'être affecté par l'ensemble des impuretés qui protègent les microorganismes et favorisent leur développement.

II.2.3.2 Evaluation des risques induits

II.2.3.2.1 Les risques sanitaires chimiques dans le local technique

Le chlore (Cl₂), le brome (Br₂) et l'ozone (O₃) sont trois composés dangereux à respirer à partir d'une certaine concentration dans l'atmosphère. Ce sont des agents irritants pour le nez, la gorge et les yeux. Ainsi, les précautions de stockage et de manipulation des produits de désinfection sont définies par des dispositions réglementaires.

L'enquête réalisée par LHEUREUX C. (1997) recense 10 cas de pollution chlorée dans les locaux techniques, dont 7 sont imputables à une erreur humaine. Le mélange de produits incompatibles (acide et eau de Javel par exemple) provoquant des dégagements de chlore gazeux reste l'erreur la plus fréquente.

Par ailleurs, 5 cas d'explosion de saturateur à galets sont mentionnés dont 4 sont liés à une erreur de manipulation.

Il semble donc que les risques sanitaires liés aux produits de désinfection auxquels sont soumis les agents techniques puissent être significativement diminués avec une amélioration de l'information mise à leur disposition [46].

II.2.3.2.2 Les risques sanitaires chimiques dans les bassins de natation

Dans le cas d'une désinfection réalisée avec le brome, en dessous d'un pH de 7,5 (valeur minimale autorisée), la quantité de brome moléculaire (Br₂) dans l'eau devient suffisamment importante pour provoquer notamment des irritations oculaires.

Dans son enquête [2], LHEUREUX C. recense 14 cas de pollution chimique de l'eau par un excès d'acide hypochloreux (HOCl). Les défaillances du système d'injection automatique de désinfectant et la mauvaise utilisation des appareils de dosage en sont les causes les plus courantes. Cet excès de désinfectant peut provoquer des irritations cutanées ou oculaires chez les baigneurs.

Quelque soit le produit de désinfection employé, ce type de risque peut donc être très faible dans le cadre d'une bonne gestion de l'autosurveillance de la qualité de l'eau des bassins.

II.2.3.2.3 Les risques sanitaires chimiques dans l'atmosphère des piscines

Le risque sanitaire associé aux sous produits de désinfection apparaît comme le plus important des risques induits par les désinfectants autorisés.

L'acide hypochloreux réagit avec les composés organiques apportés par les baigneurs pour former notamment des chloramines minérales et organiques et des chloroformes. On constate une réaction similaire avec l'acide hypobromeux.

Il s'établit des réactions d'équilibre entre les produits halogénés pouvant se trouver dans l'eau et ceux susceptibles de se retrouver dans l'atmosphère.

Les eaux des piscines contiennent en général quelques centaines de µg/L d'haloformes et de chloramines (bromamines) minérales. Toutefois, plusieurs études ont permis de montrer que les concentrations en haloformes mesurées dans l'atmosphère des piscines étaient très inférieures aux valeurs limites établies en hygiène industrielle [20, 22]. Il ressort donc que l'exposition aux haloformes dans les piscines doit être considérée comme très faible, ce qui revient dans un premier temps à négliger le risque sanitaire qui leur est associé devant les autres risques [47]. Notre proposition de notation au paragraphe II.1.2.4 permet de formaliser ce constat.

Une distinction doit également être faite entre les chloramines et les bromamines, car seules les premières possèdent un réel potentiel dangereux pour la santé. Ainsi, l'utilisation des désinfectants chlorés peut être à l'origine d'une pollution de l'atmosphère des piscines dont l'essentiel est dû aux chloramines minérales.

L'examen des constantes de Henry de ces dérivés minéraux du chlore montre que c'est la trichloramine ou trichlorure d'azote (NCl₃) qui se libère le plus facilement dans l'atmosphère. Ce composé représenterait environ 90% en masse des dérivés chlorés de l'air des piscines [16]. Actuellement, il n'existe pas de valeur limite d'exposition pour le trichlorure d'azote. Or, une étude sur le pouvoir irritant du chlore et du trichlorure d'azote sur la souris a montré que le pouvoir irritant de NCl₃ est équivalent à celui de Cl₂, ce qui le classe parmi les composés très fortement irritants. Les auteurs proposent ainsi une valeur limite d'exposition à ne pas dépasser de 1,5 mg/m³ et une valeur limite moyenne d'exposition de 0,5 mg/m³ [21].

Ces valeurs recourent la valeur limite de « confort », pour laquelle les Maîtres Nageurs Sauveteurs (MNS) ne ressentent aucune gêne respiratoire ou irritation oculaire, établie par simple interrogation de ceux-ci. Il apparaît en effet que les premières plaintes sont enregistrées pour des concentrations de 0,5 mg/m³ et qu'une valeur de 0,7 mg/m³ est jugée excessive par l'ensemble des participants à l'étude [20].

Cette relation dose-réponse est complétée par une étude épidémiologique réalisée sur 334 MNS. Les auteurs constatent une faible fréquence des symptômes respiratoires chroniques tels que la bronchite chronique. En revanche, il existe un taux élevé de signes d'irritations oculaires et respiratoires qui sont significativement liés au niveau de l'exposition mesurée au trichlorure d'azote [23].

L'exposition au NCl_3 amène par ailleurs à distinguer grossièrement deux catégories de piscines couvertes, d'une part les piscines classiques (bassins réservés à l'entraînement sportif), où le taux moyen de NCl_3 a été évalué à $0,24 \pm 0,17 \text{ mg/m}^3$ (860 prélèvements) et d'autre part, les piscines ludiques (centres d'attraction nautique), pour lesquelles le taux moyen de NCl_3 a été mesuré à $0,67 \pm 0,37 \text{ mg/m}^3$ (402 prélèvements) [23].

Il semble donc que le risque sanitaire lié à la présence, dans l'atmosphère des piscines, de chloramines, et en particulier du trichlorure d'azote, concerne en premier lieu les MNS, notamment ceux travaillant dans les piscines couvertes dont certaines caractéristiques favorisent la pollution de leur atmosphère.

II.2.3.3 Gestion des risques induits

La gestion des risques induits par les désinfectants concerne donc essentiellement la réduction de la quantité de trichlorure d'azote présent dans l'atmosphère des piscines couvertes qui emploient un désinfectant chloré.

En matière de qualité de l'air des piscines, il n'existe aucune obligation de résultats. Seule la valeur de la concentration en chlore combiné (chloramines minérales et organiques) dans l'eau fait l'objet d'une valeur limite maximale à 0,6 mg/L. L'étude de l'eau paraît toutefois suffisante pour caractériser la pollution induite dans l'air ambiant. SCOTT (1985) a en effet montré que la teneur en dérivés minéraux du chlore dans l'air est une fonction linéaire de leur concentration dans l'eau [22].

Le taux de trichlorure d'azote dans l'air dépend de nombreux facteurs dont aucun ne doit être négligé si l'on veut résoudre ce problème [20, 23]. Les principaux sont :

- la température de l'eau et de l'air ;
- le taux de fréquentation ;
- l'agitation de l'eau ;
- l'hygiène des baigneurs (installations sanitaires) ;
- la ventilation ;
- le pH et le taux désinfectant dans l'eau des bassins [45] ;
- le type de désinfectant chloré [22].

Certains de ces facteurs font l'objet de prescriptions réglementaires qui constituent de fait une obligation de moyens dans la réduction de la quantité de NCl_3 présent dans l'atmosphère :

- le taux de fréquentation, la conception et le nombre d'installations sanitaires et de pédiluves sont réglementés de façon à limiter la pollution introduite par les baigneurs. Celle-ci contient en effet certains composés organiques qui constituent les précurseurs de la formation des dérivés chlorés gênants [22] ;
- les prescriptions relatives à la ventilation des piscines sont données par le Règlement Sanitaire Départemental (article 64.1). Le débit minimal d'air neuf à introduire dans le hall est fixé à 6 litres par seconde et par baigneur.

En outre, les études mentionnées ci-après ont permis de montrer que d'autres mesures étaient envisageables pour limiter la production de chloramines minérales.

Dans le cas de l'utilisation de produits chlorés non stabilisés, la réglementation impose un pH compris entre 6,9 et 7,7 et une teneur en chlore libre actif comprise entre 0,4 et 1,4 mg/L. BESSE et al. (1985) ont montré que ces domaines pouvaient être affinés afin de réduire la production de NCl_3 [45].

En effet, cette étude fait apparaître que la limitation de la concentration en NCl_3 dans l'eau nécessite une régulation du pH, qu'il est souhaitable de maintenir au voisinage de $7,3 \pm 0,2$ et

une régulation du chlore libre pour obtenir, quel que soit le niveau de fréquentation, des valeurs comprises entre 0,8 et 1,2 mg/L.

SCOTT (1985) fait par ailleurs observer que le choix de l'utilisation de désinfectants chlorés stabilisés, comme le dichloroisocyanurate de sodium, pourrait être justifié notamment par la réduction de la production de NCl_3 comparativement au chlore gazeux ou à l'eau de Javel. Ces mesures réalisées dans l'eau de dix piscines couvertes montrent en effet que le DCCNa produit nettement moins (deux à trois fois) de chlore combiné que les deux autres désinfectants dans des conditions comparables [22].

Une des explications possibles est avancée par SEUX et al (1985) qui ont montré qu'en présence d'acide isocyanurique la réactivité des formes chlorées sur la matière organique est plus faible que celle de l'acide hypochloreux [17].

Un certain nombre de mesures simples existent donc déjà pour limiter la production des formes de chlore combiné dans l'eau, ainsi que leur présence dans l'atmosphère des piscines couvertes. Le renforcement de l'éducation et de l'information des baigneurs sur l'hygiène corporelle paraît néanmoins indispensable pour limiter cette nuisance.

Enfin la mise au point de nouveaux procédés permettant d'éliminer plus efficacement les chloramines présentes dans l'eau, ainsi que leurs précurseurs, peut être une perspective intéressante dans l'évolution de la gestion de ces risques induits [48].

Ainsi, l'arrêté du 28 septembre 1989, modifiant l'arrêté du 07 avril 1981 fixant les dispositions techniques applicables aux piscines, autorise l'emploi de produits ou de procédés qui permettent de réduire la teneur en chlore combiné dans les bassins. La liste de ces produits ou procédés utilisables est établie par le ministère chargé de la santé.

II.3 Les composés biguanidiques

Dans le paragraphe précédent, nous avons présenté brièvement les désinfectants autorisés pour la désinfection des eaux de piscine. Dans tous les cas, le maintien d'une eau désinfectante nécessite l'emploi d'un désinfectant halogéné avec pour inconvénient majeur la présence dans l'atmosphère de sous-produits potentiellement dangereux. L'une des solutions pour pallier ces inconvénients est l'utilisation de produits non oxydants, comme le PHMB.

II.3.1 Structure générale

Le tableau ci-dessous regroupe les formules développées de la biguanidine et des trois familles de composés qui en sont dérivés.

$\begin{array}{c} \text{NH}_2 - \text{C} - \text{NH} - \text{C} - \text{NH}_2 \\ \parallel \quad \quad \parallel \\ \text{NH} \quad \quad \text{NH} \end{array}$ <p><u>Biguanidine</u></p>
$\begin{array}{c} \text{R}_1 \text{ R}_2 \text{N} - \text{C} - \text{NH} - \text{C} - \text{NR}_3 \text{ R}_4 \\ \parallel \quad \quad \parallel \\ \text{NH} \quad \quad \text{NH} \end{array}$ <p><u>Biguanides</u> Exemple : R1 = R2 = CH₃ et R3 = R4 = H ; diméthylbiguanide</p>
$\begin{array}{c} \text{R} - \text{NH} - \text{C} - \text{NH} - \text{C} - \text{NH} - (\text{CH}_2)_6 - \text{NH} - \text{C} - \text{NH} - \text{C} - \text{NH} - \text{R} \\ \parallel \quad \quad \parallel \quad \quad \quad \quad \parallel \quad \quad \parallel \\ \text{NH} \quad \quad \text{NH} \quad \quad \quad \quad \text{NH} \quad \quad \text{NH} \end{array}$ <p><u>Bis-biguanides</u> Exemple : R = C₆H₅Cl ; Chlorhexidine</p>
$\begin{array}{c} \text{R}_{(1 \text{ ou } 2)} - [(\text{CH}_2)_3 - \text{NH} - \text{C} - \text{NH} - \text{C} - \text{NH} - (\text{CH}_2)_3]_n - \text{R}_{(1 \text{ ou } 2)} \\ \parallel \quad \quad \parallel \\ \text{NH} \quad \quad \text{NH} \end{array}$ $\text{R}_1 = -(\text{CH}_2)_3 - \text{NH}_3^+, \text{Cl}^- \text{ et } \text{R}_2 = -(\text{CH}_2)_3 - \text{NH} - \text{C} - \text{NHCN}$ \parallel NH <p><u>Chlorhydrate de Polyhexaméthylène biguanide (PHMB)</u> Exemple : n = 3 à 6 avec n_{moy} = 5,5 ; PHMB fabriqué par Zeneca</p>

Tableau 7 : Formules développées des composés biguanidiques

II.3.2 La chlorhexidine

La chlorhexidine est le seul composé biguanidique utilisé comme antiseptique. On dispose de nombreuses informations sur ses propriétés physico-chimiques et sur son activité microbicide. Sa structure proche de celle des PHMB donne à ces informations un caractère général qui constitue la première base pour appréhender les propriétés de ces composés.

II.3.2.1 Propriétés physico-chimiques et incidence sur l'activité microbicide

La chlorhexidine se comporte comme un ammonium quaternaire ; elle est incompatible avec tous les anioniques (savons ordinaires, alginate...) et les non-ioniques comme les polysorbates, le lubrol, etc. C'est une base faible, elle nécessite d'être sous forme cationique pour être efficace, elle doit donc être utilisée à pH neutre ou légèrement alcalin.

La présence de phospholipides et de protéines réduit son activité : aussi les mélanges de lécithines et de lubrol sont-ils couramment utilisés pour la neutraliser.

II.3.2.2 Mécanisme et mode d'action

Des travaux [24, 25] ont permis de montrer que la chlorhexidine est rapidement fixée à la surface cellulaire grâce vraisemblablement à son caractère cationique. A faible dose, elle entraîne une fuite de matériel cellulaire et à forte dose elle précipite in situ les protéines cytoplasmiques et les acides nucléiques.

De façon analogue, la chlorhexidine peut détruire l'enveloppe virale des virus enveloppés. Ceci conduit à la libération de la nucléocapside intacte qui conserve son éventuel caractère infectieux. La chlorhexidine n'a de ce fait qu'une activité moyenne contre les virus enveloppés et une activité très faible voire inexistante contre les virus nus [26].

III.3.2.3 Comparaison qualitative des propriétés antiseptiques de la chlorhexidine et de l'acide hypochloreux [27]

CT = concentration désinfectant × temps de contact

	Chlorhexidine	Acide hypochloreux
Domaine d'action	Antibactérien.	Action contre les bactéries et leurs spores, les virus et les champignons.
Action sur les bactéries	Large spectre. Proteus, Pseudomonas nécessitent un CT plus élevé. Pas d'action sur les mycobactéries.	Large spectre. Mycobactéries nécessitent un CT plus élevé.
Action sur les spores	Aucune n'a été décrite.	Action difficile, nécessite un CT élevé.
Action sur les virus	Aucune sur les virus nus, notamment sur les rotavirus [67]. Activité moyenne contre les virus enveloppés [26].	Forte activité contre les virus, nus et enveloppés [26], mais nécessité d'un CT plus élevé que celui pour les bactéries.
Action sur les champignons	Légère activité vis à vis de quelques <i>Candida</i> et de certains dermatophytes. Aucune sur les moisissures.	Les champignons sont 10 à 100 fois plus résistants que les bactéries ou les virus.
Phénomène de résistance	Phénomènes de résistance acquise possibles pour les <i>Proteus</i> , les <i>Serratia</i> et les <i>Pseudomonas</i> [28] et plus généralement pour les bactéries à Gram négatif [29, 30].	Aucun n'a été décrit.

Tableau 8 : Activité antiseptique de la chlorhexidine et de l'acide hypochloreux

Il apparaît donc que l'activité antiseptique de la chlorhexidine est bien plus faible que celle de l'acide hypochloreux. Son spectre d'action se limite en effet aux bactéries, voire aux bactéries à Gram positif, compte tenu des phénomènes de résistance acquise observés dans certains cas.

II.3.3 Le PolyHexaMéthylène Biguanide (PHMB)

II.3.3.1 Propriétés physico-chimiques

II.3.3.1.1 Caractère acido-basique

Les biguanides sont des bases de force sensiblement équivalente à celle de l'ammoniaque. Par contre, la molécule de PHMB possède une légère acidité ; dans une eau légèrement tamponnée (TAC # 6 °f), l'ajout de 10 mg/L de PHMB abaisse le pH de 8,3 à 7,1 [31].

II.3.3.1.2 Caractère chélatant

Les biguanides se combinent avec de nombreux éléments de transition pour donner des complexes colorés, en général peu solubles dans l'eau, surtout en milieu alcalin [32].

Le caractère chélatant du PHMB a été mis en évidence pour des concentrations élevées en Ca^{2+} , Cu^{2+} et Al^{3+} . L'interaction conduit à la formation de particules insolubles [33].

Par ailleurs, dans les eaux dures et chargées en matière organique (telle que celle apportée par les baigneurs), le PHMB tend à favoriser la formation de CaCO_3 en formant avec la matière organique des germes de précipitation pour ce composé. Ainsi, dans ces conditions, le contrôle du pH de l'eau est une mesure fondamentale pour prévenir la précipitation de calcaire [33].

II.3.3.1.3 Caractère floculant

Le PHMB présente un certain caractère floculant qui a pu être mis en évidence par plusieurs observations expérimentales en laboratoire.

En présence d'une pollution organique synthétique, le PHMB conduit à une augmentation du nombre de particules. Un traitement à 10 mg/L en PHMB de l'eau du réseau de Rennes (origine superficielle) conduit, après 24h, à un abaissement du COT de 0,3 mg/L, le microfloc formé étant visible à l'œil nu [33].

II.3.3.1.4 Incompatibilités

Tout comme la chlorhexidine, le PHMB possède de nombreuses incompatibilités chimiques. Il donne des précipités insolubles avec les tensioactifs anioniques (savons, alkylsulfates...), la soude et de nombreux phosphates.

Par ailleurs le fabricant Zeneca (anciennement ICI) précise que son produit est incompatible avec tous les composés halogénés, les algicides cuivreux, les oxydants au persulfate ou les stérilisants ioniques (cuivre, argent) [34].

II.3.3.1.5 Toxicité

Une série d'études toxicologiques complète a été présentée par la société ICI au Ministère chargé de la Santé. Les résultats sont clairement regroupés dans la référence [35]. Il en ressort, qu'aux concentrations usuelles, ce composé présente une toxicité relativement faible pour la peau, les yeux et par ingestion, ce qui est confirmé par l'US-EPA.

II.3.3.2 Mécanisme et mode d'action

Le mécanisme proposé par ICI est analogue à celui connu pour la chlorhexidine ; l'adhérence du PHMB à la surface de la cellule est suivie d'une fuite de composants cytoplasmiques puis de la

précipitation in situ des contenus de la cellule, notamment des protéines et des acides nucléiques [36].

II.3.3.3 Efficacité antimicrobienne "in vitro" du PHMB. Comparaison avec l'acide hypochloreux

II.3.3.3.1 Influence du pH

L'acide hypochloreux est un acide faible qui est partiellement dissocié dans l'eau. HClO est de ce fait en équilibre avec ClO⁻ avec une constante d'acidité de 10^{-7,43} à 25°C. A 20°C, à pH = 8, HClO ne représente plus que 20% des deux formes.

Or c'est HClO qui a le pouvoir germicide le plus important, il est donc nécessaire de réguler le pH de façon à ce qu'il ne s'écarte pas trop de la neutralité.

Au contraire des produits chlorés, l'efficacité du PHMB vis à vis des germes ne semble pas affectée par la valeur du pH. Des essais réalisés par Zeneca [37] sur une souche de collection d'*Escherichia coli* montrent une efficacité identique dans une gamme de pH de 7 à 8,5.

Il semble tout de même que l'activité maximale vis à vis de cette espèce soit obtenue à pH = 6 [38].

II.3.3.3.2 Action sur les bactéries

La source de PHMB utilisée pour la réalisation des différents essais rapportés ci-dessous est le Baquacil. Il s'agit d'une solution aqueuse fabriquée par Zeneca, et destinée à la désinfection de l'eau des piscines. Elle titre à 20% en masse de PHMB.

L'activité antibactérienne du PHMB peut être analysée à travers les résultats des trois études suivantes :

- étude réalisée par la société ICI et présentée en 1979 dans la demande d'autorisation du Baquacil [37] ;
- étude réalisée en 1985, à la demande de la société ICI, par le Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (LHVP) [31] ;
- étude réalisée en 1985, à la demande de la société ICI, par le Laboratoire d'Hygiène et de Recherche en Santé Publique (LHRSP) de Vandoeuvre-Lès-Nancy [40].

Les résultats détaillés de ces différentes études sont regroupés en annexe 2. Nous nous proposons ici de faire la synthèse des résultats obtenus.

Les résultats de ces trois études se rejoignent pour accorder au PHMB, à des concentrations usuelles, une cinétique d'action relativement rapide vis à vis des souches considérées, celles de *Pseudomonas aeruginosa* étant apparues les plus résistantes.

L'étude du LHRSP a permis de montrer que le PHMB n'est pas bactéricide à 60 minutes selon la définition AFNOR (réduction de viabilité de 5 Log sur quatre souches de collection), toutefois, pour six des huit souches testées, l'abattement obtenu avec 10 mg/L de PHMB est supérieur à 4 Log, après 15 minutes de temps de contact.

Dans une gamme de concentrations allant de 5 à 10 mg/L en PHMB, les différences d'activité observées dans les trois études sont généralement faibles, et le deviennent d'autant plus que le temps de réaction est important. Elles ne sont significatives que sur les souches les plus résistantes.

Les résultats des deux études, qui permettent de comparer les activités antibactériennes de l'acide hypochloreux et du PHMB, conduisent à des conclusions différentes selon les souches considérées.

L'étude présentée par la société ICI porte sur des souches de collection de trois espèces pathogènes. Les résultats obtenus montrent qu'il n'existe aucune différence d'activité entre le PHMB, à une concentration variant de 5 à 20 mg/L, et l'acide hypochloreux, libéré par l'hypochlorite de sodium, à 1 mg/L de chlore actif.

Les résultats de l'étude menée par le LHRSP font par contre observer des différences d'activité significatives entre les deux désinfectants. Le DCCNa, à 1 mg/L de chlore disponible avec 0,01 mg/L d'acide cyanurique (pH = 7,8), apparaît plus actif que le PHMB, à 6 ou 10 mg/L (pH = 7,5), sur l'ensemble des huit souches considérées (collection et sauvage).

II.3.3.3.3 Action sur les virus

La littérature est peu abondante à ce sujet. On ne dispose ainsi d'aucune étude de laboratoire réalisée sur l'action virucide du PHMB. Les renseignements fournis par le fabricant sont anciens et peu précis [61].

Toutefois on sait que le mécanisme d'action du PHMB sur les cellules est identique à celui de la chlorhexidine et qu'il consiste à ouvrir la membrane cytoplasmique, pour conduire ensuite à une fuite du matériel cellulaire.

On peut alors s'attendre à ce que le PHMB ait une activité virucide faible, similaire à celle de la chlorhexidine qui agit uniquement sur les virus enveloppés en détruisant l'enveloppe virale [26]. Dans l'avis rendu par la Section des Eaux du CSHPF en juillet 1987, portant sur l'agrément du Baquacil pour la désinfection des eaux des piscines, l'absence d'activité virucide de ce produit avait en effet été notifiée.

La chlorhexidine et les ammoniums quaternaires sont ainsi qualifiés, dans la littérature anglo-saxonne, de "membrane-active agents", alors que l'acide hypochloreux, qui affecte directement la capsid et l'acide nucléique viral, est souvent considéré comme un désinfectant standard contre les virus pathogènes [26].

II.3.3.3.4 Action sur les parasites

Le comportement du PHMB vis à vis des parasites semble également avoir été peu étudié. Ainsi, nous ne disposons que d'une seule étude s'y rapportant.

Ce travail a été réalisé, à la demande de sociétés commercialisant des produits chlorés, par le laboratoire de parasitologie du Professeur P. GEORGES, dans le but de comparer l'efficacité de l'acide hypochloreux et du PHMB vis à vis des amibes libres[42].

Les souches d'amibes telluriques utilisées dans cette étude sont sauvages. La concentration initiale en kystes ou en trophozoïtes est de 10^6 entités par litre.

La source d'acide hypochloreux est l'hypochlorite de calcium, deux concentrations en chlore libre sont testées ; 1,2 et 2,4 mg/L. Pour ce composé, les essais sont réalisés en milieu tamponné à pH 7,4/7,5, à 25°C.

Pour le PHMB, les essais sont réalisés dans l'eau permutée à pH 7,1 à 25°C aux concentrations de 10 et 20 mg/L pour les trophozoïtes et 10 et 40 mg/L pour les kystes. Après réaction, le désinfectant est éliminé par cinq lavages et centrifugation des suspensions de trophozoïtes ou de kystes.

Les résultats de l'étude sont présentés dans les tableaux ci-dessous. L'activité des désinfectants est exprimée par le temps nécessaire pour obtenir un abattement de deux Log (létaleté de 99 %).

Etude du laboratoire de Parasitologie (Pr. P.GEORGES)	Temps en mn nécessaire pour une létalité de 99%			
	Acide Hypochloreux (mg/L de chlore libre)		PHMB (mg/L)	
	1,2	2,4	10	20
<i>Naegleria gruberi</i> (piscine 1)	1,7	0,8	50	23
<i>Naegleria gruberi</i> MO5 (réseau de distribution)	1,2	0,6	50	36
<i>Naegleria fowleri</i> 0359 (humain)	1,0	0,5	26	17
<i>Naegleria gruberi</i> (piscine 2)	1,5	0,8	52	33
<i>Naegleria gruberi</i> 1518 (eau douce)	2,0	1,1	44	25
<i>Hartmanella vermiformis</i> (eau douce)	2,2	1,2	44	25
<i>Acanthamoeba castellanii</i> (eau douce)	2,1	1,0	50	30
<i>Acanthamoeba sp.</i> (humain)	1,9	1,0	40	20
<i>Acanthamoeba sp.</i> (piscine 1)	2,9	1,5	52	33
<i>Acanthamoeba sp.</i> MR4 (réseau de distribution)	2,2	1,2	46	25

Tableau 9 : Activité de HClO et du PHMB sur les trophozoïtes d'amibes telluriques

Etude du laboratoire de Parasitologie (Pr. P.GEORGES)	Temps en mn nécessaire pour une létalité de 99%			
	Acide Hypochloreux (mg/L de chlore libre)		PHMB (mg/L)	
	1,2	2,4	40	
<i>Naegleria fowleri</i> 0359 (humain)	26,5	12	...	
<i>Naegleria gruberi</i> 1518 (eau douce)	39	20	...	
<i>Naegleria gruberi</i> MO5 (réseau de distribution)	50	25,8	...	
<i>Naegleria gruberi</i> (piscine 2)	45	23	...	
<i>Hartmanella vermiformis</i> (eau douce)	15	7	...	
Genre <i>Acanthamoeba</i>	

Tableau 10 : Activité de HClO et du PHMB sur les kystes d'amibes telluriques

Dans les conditions ci-dessus, les auteurs observent donc que :

- l'acide hypochloreux est nettement plus efficace que le PHMB vis à vis des deux formes d'amibes ;
- le PHMB offre une activité notablement insuffisante, nulle pour les kystes et lente sur les trophozoïtes ;
- l'activité de l'acide hypochloreux est satisfaisante sur les trophozoïtes moins bonne sur les kystes et nulle sur les kystes d'*Acanthamoeba* ;
- l'activité de l'acide hypochloreux double lorsque l'on double la concentration de 1,2 à 2,4 mg/L de chlore actif.

Les kystes constituent la seule forme d'amibes capable de survivre dans le milieu extérieur. L'évaluation de l'activité d'un désinfectant contre ces parasites revient donc principalement à considérer son efficacité vis à vis de la forme kystique.

Cette expérience montre que, si le PHMB semble n'offrir aucune garantie contre le risque amibes, l'acide hypochloreux, à 1,2 mg/L de chlore libre, n'en reste pas moins trop faiblement actif pour agir de façon satisfaisante contre ce risque. Ce résultat n'est que peu surprenant dans la mesure où il est désormais usuel de considérer les kystes de parasites comme les microorganismes les plus résistants à la désinfection, même lorsqu'elle est assurée par l'ozone [43].

Ces résultats ne sont que partiellement confirmés par le fabricant ICI. Une étude, réalisée à la demande de la société, par un laboratoire australien, conclue en effet que, si le PHMB n'est certes pas efficace pour détruire les kystes de *Naegleria fowleri*, il permet néanmoins de tuer en 5 à 10 minutes 99% des trophozoïtes de cette même espèce à une concentration de 10 mg/L en PHMB. Ce résultat correspond à une efficacité de 2,5 à 5 fois supérieure à celle observée par le laboratoire de parasitologie de GEORGES P [62].

II.3.3.4 Les utilisations du PHMB

II.3.3.4.1 Désinfection des surfaces en contact avec les denrées alimentaires

L'arrêté du 27 octobre 1975 relatif aux produits de nettoyage du matériel pouvant se trouver au contact des denrées alimentaires fixe la liste des constituants autorisés en France dans les produits de nettoyage des matériaux et objets destinés à être mis au contact des denrées alimentaires.

Le chlorhydrate de polyhexaméthylène biguanide y figure dans le groupe des désinfectants au même titre que les hypochlorites alcalins ou les acides chloroisocyanuriques. Il y est précisé qu'il doit être utilisé en solution aqueuse titrant à 20% en PHMB. En France, ce désinfectant est notamment commercialisé sous le nom de Vantocil.

II.3.3.4.2 Désinfection des eaux de piscine

C'est également en solution aqueuse titrant à 20 % que le PHMB est commercialisé dans de nombreux pays pour la désinfection des eaux de piscine. Pour les piscines soumises à aucune réglementation, comme par exemple les piscines à usage familiale en France, ce désinfectant peut être employé pour le traitement des eaux. En France, il est actuellement commercialisé sous plusieurs noms comme le Baquacil, le Révacil, le Biocil ou encore le Puracil.

Pour les piscines soumises à réglementation, comme par exemple les piscines à usage non médical recevant du public en France, son utilisation doit être autorisée par les autorités sanitaires du pays. C'est ce point que nous allons aborder dans le chapitre suivant.

III UTILISATION DU PHMB POUR LA DESINFECTION DES EAUX DE PISCINE

III.1 Naissance d'un nouveau concept : la piscine sans chlore

III.1.1 Le monopole des désinfectants chlorés

Nos nombreux entretiens téléphoniques avec les techniciens sanitaires des Services Santé Environnement (voir au paragraphe III.4.5 l'enquête réalisée) ont permis de confirmer la réalité, à l'échelle de la France, de la fréquence d'utilisation des différents désinfectants donnée précédemment pour la Lorraine.

La très grande majorité des piscines soumises à réglementation emploie un désinfectant à base d'acide hypochloreux stabilisé.

III.1.2 Les atouts et faiblesses des désinfectants chlorés

Il existe deux modes d'utilisation des produits chlorés, le premier, constitué par l'emploi des produits classiques tels que le chlore gazeux et l'hypochlorite de calcium ou de sodium, qui tend à disparaître au profit du second, l'emploi de ces mêmes produits agrémentés de l'ajout d'acide isocyanurique ou l'emploi des chloroisocyanuriques, que l'on pourrait qualifier de "deux en un".

III.1.2.1 Les atouts des produits chlorés non stabilisés

L'essentiel des exigences sanitaires de l'administration est bien évidemment respecté par l'utilisation des désinfectants chlorés non stabilisés :

- il existe une méthode de dosage simple et fiable des différentes formes de chlore présentes dans l'eau [17] ;
- le spectre d'action rapide de l'acide hypochloreux est large et la prolifération d'algues est inhibée;
- la dégradation des substances organiques est assurée [44, 45] ;
- les effets sur la santé occasionnés par un excès de désinfectant sont relativement modérés [2] ;
- l'utilisation des désinfectants chlorés est simple, l'injection de désinfectant peut être parfaitement automatisée, grâce à la mesure en continu de la concentration dans les bassins des différentes formes de chlore.

Ces produits sont également bien acceptés par l'exploitant puisqu'ils lui permettent de répondre à l'obligation de résultats à laquelle il est soumis, et ce, à un prix actuellement plus avantageux que celui de l'ozone ou du brome.

III.1.2.2 Les faiblesses des produits chlorés non stabilisés

Plusieurs attentes et exigences formulées précédemment (chapitre II) ne peuvent être pleinement satisfaites par ces produits. Il s'agit de :

- la rémanence du désinfectant dans l'eau. L'acide hypochloreux est très sensible aux ultraviolets qui accélèrent fortement sa décomposition dans l'eau. Il ne peut ainsi permettre à l'eau des bassins des piscines ouvertes d'être désinfectante en permanence, sauf au prix d'une surveillance très contraignante ;

- l'absence de sous-produits de désinfection. L'acide hypochloreux réagit notamment très aisément avec la pollution organique azotée pour former des chloramines qui peuvent provoquer des irritations oculaires (présence dans l'eau et dans l'atmosphère) et respiratoires (présence dans l'atmosphère) chez les MNS. Pour les usagers, plus faiblement exposés, la présence de chloramines occasionne davantage une gêne en terme d'odeur et de légère irritation oculaire ;
- la sécurité de manipulation. Une erreur de manipulation par le personnel technique se traduit fréquemment par un dégagement de chlore gazeux, gaz à fort potentiel toxique [2].

III 1.2.3 L'avènement des chloroisocyanuriques

Le passage des produits non stabilisés aux chloroisocyanuriques s'est justement opéré afin de pallier au mieux les faiblesses liées à la première génération d'utilisation des désinfectants chlorés.

En limitant la décomposition de l'acide hypochloreux par les UV, le stabilisant introduit (acide isocyanurique) permet une régulation plus aisée de la teneur en chlore dans les bassins.

Ainsi, dès l'agrément provisoire délivré par le ministère chargé de la santé en août 1978, les piscines de plein air ont très largement expérimenté la désinfection par les chloroisocyanuriques. Cet agrément a ensuite été transformé en autorisation par la réglementation de 1981.

Très rapidement, d'autres avantages liés à l'utilisation de ces produits sont apparus aux utilisateurs :

- moindre incidence sur le pH de l'eau ;
- facilité d'emploi et de stockage de ces produits qui se présentent sous la forme solide.

Ce sont ces derniers qui ont justifié l'introduction de ces produits dans les piscines couvertes et contribué ainsi au succès actuel.

L'exigence de rémanence est donc pleinement satisfaite par l'introduction de stabilisant. La sécurité de stockage et de manipulation peut également être améliorée du fait du conditionnement solide des chloroisocyanuriques, même si le risque de dégagement de chlore gazeux lié à une mauvaise manipulation ne peut être écarté [2].

Enfin, comme nous l'avons déjà mentionné, l'emploi de ces produits semble également favoriser significativement la réduction de la quantité de chloramines présente dans les piscines en limitant leur production.

III.1.2.4 Les manquements des chloroisocyanuriques

Un certain nombre d'insatisfactions peuvent toutefois être associées à l'emploi de ces produits, il s'agit de :

- la cinétique de désinfection des formes chloroisocyanurées est en général inférieure à celle de HClO ;
- la contrainte supplémentaire de gestion de la teneur en acide isocyanurique dans l'eau ;
- un coût de fonctionnement plus élevé que les produits classiques comme le chlore gazeux ou l'eau de Javel ;
- la production de chloramines n'est pas totalement supprimée, le risque, dans certaines conditions, d'une concentration élevée en trichlorure d'azote ne peut donc être écarté.

Ces différents points constituent autant de sources possibles d'insatisfactions des exigences administratives ou des attentes de l'exploitant et des usagers.

III.1.3 Les espérances générées par l'utilisation du PHMB

La justification première de l'introduction du PHMB dans la gamme des désinfectants de piscine est l'aptitude à ne former aucun sous-produit de réaction avec les matières organiques apportées par les baigneurs. Cette caractéristique permet d'éliminer complètement le risque sanitaire encouru par les MNS dans certaines piscines couvertes dont le type de bassins est propice à la génération en quantité importante du trichlorure d'azote (bassin à forte agitation de l'eau, à température élevée...).

Cette absence de sous-produits conduit également à améliorer le confort de la baignade du fait de l'absence d'odeur dans les halls des piscines et, vraisemblablement, de picotement des yeux dans l'eau. Cette satisfaction supplémentaire des usagers peut constituer pour le gérant l'assurance d'un attrait particulier pour son établissement.

Cette possibilité d'utiliser le PHMB dans la désinfection des eaux de piscine se défend d'autant plus que les formes chloroisocyanurées apparaissent moins actives que HClO dans l'élimination des germes.

Or, au vu des connaissances sur l'activité antimicrobienne de la chlorhexidine et du PHMB, il semble difficile d'admettre que cette molécule puisse valoir d'une efficacité égale à celle de HClO.

Par contre, il apparaît, à priori, vraisemblable de s'attendre à ce qu'une désinfection avec le PHMB, qui possède une bonne stabilité dans l'eau, permette d'obtenir des résultats aussi satisfaisants que ceux obtenus avec une désinfection au chlore stabilisé.

Enfin, l'augmentation du coût de la désinfection, due à l'arrivée sur le marché des chloroisocyanurates, laissent le champ libre à des désinfectants plus chers que l'eau de Javel ou le chlore gazeux.

Ces différentes opportunités suffisent à voir, dans l'utilisation du PHMB pour la désinfection des eaux, la nouvelle voie vers une piscine sans chlore dont elle aurait les avantages sans les inconvénients.

III.2 Une mise sur le marché controversée

Le Baquacil a été le premier produit commercial à base de PHMB faisant l'objet d'une mise sur le marché international des désinfectants de piscine. Fabriqué par la société anglaise ICI, devenue Zeneca, il est composé d'une solution aqueuse titrant à 20 % en masse de PHMB [37].

III.2.1 La situation en Grande-Bretagne

En Angleterre, the Department of the Environment (DoE) établit une liste de produits recommandés pour la désinfection de l'eau des piscines recevant du public. A la différence de la France, les piscines privées des hôtels, campings etc. ne sont pas associées aux piscines publiques. Au début des années 80, le DoE s'est prononcé sur la toxicité du produit et sur son aptitude à désinfecter l'eau des piscines.

L'ensemble des constituants chimiques du Baquacil (PHMB, colorant, parfum) a été déclaré comme ne présentant aucun risque sanitaire pour les baigneurs [50], cette position étant en accord avec celle de l'US-EPA.

Dans sa publication départementale " The treatment and quality of swimming pool water", le DoE affiche, depuis 1984, une réticence très claire sur l'utilisation du PHMB pour la

désinfection de l'eau des piscines à forte fréquentation, comme les piscines municipales ou scolaires.

Se basant sur les informations fournies par le fabricant et sur les compte rendus de l'utilisation de ce produit en Grande Bretagne [51], le DoE considère que le PHMB n'est pas approprié pour ce type de piscine du fait des difficultés à maintenir une eau claire et de qualité microbiologique satisfaisante [52]. Cette position a été reconduite en 1999 [53].

En revanche, dans ces mêmes publications départementales de 1984 et de 1999, le PHMB est déclaré satisfaisant pour la désinfection de l'eau des piscines à faible fréquentation, en particulier pour les piscines familiales.

Se basant sur des compte rendus ad hoc indiquant que les standards de clarté et de qualité microbiologique peuvent être maintenus dans de telles circonstances, le DoE précise qu'une addition régulière de peroxyde d'hydrogène est requise pour prévenir la croissance d'algues.

III.2.2 La situation en France

La chronologie simplifiée de la demande d'agrément du Baquacil pour la désinfection de l'eau des piscines, soumises à la réglementation française, est présentée ci-dessous :

- **21 mai 1979** : la société ICI présente au Ministère chargé de la Santé un dossier de demande d'agrément du Baquacil pour le traitement des eaux de piscines ;
- **24 septembre 1982** : le ministère demande que soit réalisées des études en grandeur réelle sur les piscines suivantes : Saint-Laurent du Var [54], Cagnes-sur-Mer [54], Gérardmer [55], Fontenay-sous-Bois [56] ;
- **27 février 1984** : adoption d'un avis défavorable de la Section des eaux du CSHPF pour l'utilisation du Baquacil pour la désinfection des eaux de piscine ;
- **1985** : la société ICI décide de réaliser une étude expérimentale en laboratoire. Un groupe de travail accepte d'y participer, associant l'ENSP, pour ce qui concerne les aspects physico-chimiques [33] et le LHRSP pour les aspects microbiologiques [40] ;
- **1986** : le groupe de travail estime que les expérimentations en grandeur réelle peuvent être reprises sur les piscines de Saintes [57] et Saint-Gilles Croix de Vie [58] ;
- **06 juillet 1987** : la section des eaux du CSHPF donne un avis favorable à l'utilisation du Baquacil en piscine publique pour une durée de trois ans ;
- **28 septembre 1989** : un arrêté, modifiant l'arrêté du 07 avril 1981 fixant les dispositions techniques applicables aux piscines, autorise, pour une durée de trois ans, l'emploi du PHMB pour la désinfection des eaux de piscine ;
- **03 août 1992** : une circulaire demande aux préfets de département de faire parvenir au Ministère chargé de la Santé les dossiers de suivi des piscines ayant utilisé des produits comportant la molécule PHMB pendant la période probatoire de trois ans.

L'exploitation des résultats du suivi de ces piscines doit permettre au CSHPF de donner un avis sur l'utilisation du PHMB pour la désinfection des eaux de piscine et de conduire ainsi à une position réglementaire définitive. C'est l'un des objets de ce mémoire.

Actuellement, l'utilisation de produits comportant cette molécule n'est de fait pas autorisée pour la désinfection des eaux des piscines soumises à la réglementation de 1981.

III.3 Mise en œuvre du PHMB pour la désinfection des eaux de piscine

III.3.1 Les préconisations de Zeneca pour l'emploi du Baquacil

III.3.1.1 L'utilisation proposée

Dans son dossier de demande d'agrément du Baquacil présenté en France en 1979, la société ICI proposait d'utiliser le Baquacil pour le traitement des eaux de tous les types de piscines [37].

Dans la version française de son guide de l'utilisateur imprimé en 1996, Zeneca précise, en introduction, que le Baquacil est idéal pour les piscines privées, mais n'est pas recommandé pour les spas, ni pour les piscines équipées d'un appareil d'aération de l'eau.

Ce guide avertit également que pour certaines piscines d'écoles, d'hôtels ou de clubs, où la fréquentation est généralement supérieure à celle des piscines privées, le traitement au Baquacil n'est peut-être pas approprié [34].

Ces recommandations désormais formulées par Zeneca correspondent exactement à celles faites par le département de l'environnement anglais depuis 1984. La prise en considération de la position anglaise correspond clairement à un revirement de l'entreprise. En effet, à l'époque de la sortie de la publication départementale du DoE, la procédure d'agrément du Baquacil en France suivait son cours, et l'entreprise avait alors déploré que ce document soit porté à la connaissance du Ministère chargé de la Santé [59].

Depuis la publication de l'arrêté du 28 septembre 1989 faisant suite à cet avis du CSHPF, aucune autre position officielle de la France n'a été formulée. Pourtant, la politique de Zeneca a donc depuis indiscutablement glissée de la position du CSHPF en 1987, vers celle actuelle du DoE.

III.3.1.2 Le traitement au Baquacil

Dans le guide de l'utilisateur, le suivi proposé par Zeneca d'une piscine traitée avec le Baquacil se décompose en deux étapes principales [34].

- Entretien hebdomadaire :

- vérification du niveau de Baquacil : faire l'appoint à 50 mg/L si le niveau est inférieur ou égal à 25 mg/L. La molécule de PHMB bénéficie en effet d'une bonne stabilité dans l'eau qui peut permettre de n'ajuster sa concentration qu'une seule fois par semaine ;
- vérification du pH : l'ajuster s'il est en dehors de la gamme 7,2 à 7,8 ;
- traitement algicide avec le Baqua Check : le principe actif de cet algicide est un ammonium quaternaire : le chlorure de didécyl diméthylammonium. La dose hebdomadaire est de 1 µg/L (ppb) de formulation.

Cette étape est complétée par des précautions générales d'entretien du filtre et des parois des bassins.

- Entretien mensuel :

- clarification de l'eau avec le Baqua Shock. Le principe actif de ce produit est le peroxyde d'hydrogène (35 % en masse). Cet additif joue plusieurs rôles : algicide, oxydant des matières organiques, anti-parasitaire et clarifiant. Il doit être utilisé en dose choc mensuelle de 100 mg/L (ppm) de formulation, soit 35 mg/L de principe actif. L'ancien nom de cette formulation est "additif P".

Zeneca préconise d'ajouter les trois produits directement dans le bassin le long des parois, ou bien, devant les buses de refoulement, il est également possible de les introduire au niveau du bac tampon.

III.3.1.3 Méthode de dosage de la concentration en Baquacil

III.3.1.3.1 Méthode de dosage sur le terrain

Le niveau de Baquacil dans le bassin est contrôlé à l'aide d'un test kit [34, 37]. Il s'agit d'un dosage par colorimétrie. Le réactif utilisé est une solution d'éosine Y 130 qui forme instantanément avec le PHMB un complexe bleu. L'évaluation de la concentration est réalisée par comparaison de l'intensité de la couleur ainsi obtenue avec celles représentées sur le test kit. Les graduations de l'échelle d'intensité permettent uniquement de faire un choix parmi quatre gammes de concentration, allant de 0 à 100 mg/L par pas de 25mg/L.

III.3.1.3.2 Méthode de dosage en laboratoire

Le principe du dosage est identique à celui décrit précédemment. La lecture de la concentration est réalisée par spectrophotométrie, le complexe formé présentant un maximum d'absorption à 545 nm [40, 60].

III.3.2 Les dispositions réglementaires de l'arrêté du 28/09/89

Cet arrêté a autorisé, pour une période de trois ans, l'emploi des produits comportant la molécule PHMB, pour la désinfection des piscines visées par le décret du 07 avril 1981. Plusieurs dispositions ont été ajoutées à l'obligation de résultats fixée par ce décret.

- Paramètres microbiologiques : les analyses microbiologiques des eaux traitées par ces produits devaient être complétées par la recherche de *Pseudomonas aeruginosa* et des dénombrements bactériens à 22 °C.
- Paramètres physico-chimiques : l'eau devait avoir une teneur en Baquacil comprise entre 30 et 45 mg/L, et un pH compris entre 6,9 et 7,5.

III.4 Efficacité du PHMB en utilisation réelle

III.4.1 Les essais pris en compte par le DoE anglais

La position du DoE, sur l'utilisation du PHMB pour la désinfection des eaux des piscines à forte fréquentation, repose, en partie, sur les résultats de deux essais réalisés en grandeur réelle qui n'ont pas été désignés et supervisés par le département. Dans sa publication départementale, le DoE relève ce manquement en précisant que l'efficacité de ce désinfectant n'a pas été étudiée de façon indépendante en Grande-Bretagne [52,53].

Nous ne pouvons présenter ici que les résultats de l'étude conduite en piscine municipale car ceux de l'essai mené sur une piscine scolaire ne nous sont pas connus dans le détail.

Cet essai a été réalisé en 1977, à Chorley, sur un bassin d'environ 80 m³, accueillant 1500 personnes par semaine. L'expérience a duré 119 jours, de la mi-juillet à la mi-novembre, période au cours de laquelle un prélèvement bactériologique était réalisé toutes les trois semaines.

Ces prélèvements ont montré un niveau constamment élevé de la flore totale, qualifié d'inacceptable par le directeur de l'établissement, alors qu'aucun coliforme fécal ne fut détecté. La seconde observation a porté sur l'impossibilité de maintenir la teneur en Baquacil dans le

bassin à 35 mg/L, malgré des apports quasi quotidiens et des réajustements à 50 mg/L. La diminution rapide de cette concentration en désinfectant constituait ainsi l'explication la plus probable à la teneur élevée en flore totale [51].

La société ICI a expliqué cette diminution de la teneur en Baquacil, par l'existence, dans l'eau d'alimentation de la piscine, d'une demande initiale en PHMB avoisinant les 25 mg/L. Cette surconsommation en PHMB a été mise en relation avec les fortes teneurs de l'eau en fer et en cuivre, dues à son agressivité vis à vis du réseau.

Les apports d'eau neuve importants réalisés à Chorley, pour compenser les lavages quotidiens du filtre, constituaient donc une consommation en Baquacil, dont la teneur ne pouvait ainsi être maintenue à une valeur recommandée par ICI pour neutraliser efficacement la flore apportée par les baigneurs [63].

Ces observations ont ainsi conduit le DoE à déconseiller l'emploi du Baquacil pour la désinfection des eaux des piscines à forte fréquentation.

III.4.2 Efficacités comparées de HClO et du Baquacil en piscines privées

L'étude présentée ici [64] a été publiée en mai 1981 dans The Medical Journal of Australia. Réalisée en collaboration avec ICI Australie (financement et moyens techniques), elle porte sur la surveillance de la qualité microbiologique de l'eau de 104 piscines privées situées à Melbourne. Les prélèvements ont été réalisés de janvier à mars 1980 (saison d'été), à la fréquence de un échantillon par piscine tous les six à huit jours, de façon à en obtenir au total huit à neuf par piscine.

Pendant toute la durée de l'étude, il a été demandé aux gérants des piscines concernées de ne pas modifier leurs habitudes de gestion. 42% de ces piscines employaient alors un désinfectant chloré, stabilisé ou non, les autres fonctionnant avec le Baquacil.

Le tableau 11 présente les résultats de ce suivi sous la forme de pourcentages de piscines positives, une piscine étant considérée comme positive, pour un paramètre microbiologique donné, lorsqu'au moins un de la totalité de ses prélèvements (8 à 9) est positif vis à vis de ce paramètre.

Proportion de piscines positives (%)	Flore totale ≅ 200/mL	Coliformes totaux Présence	<i>Escherichia coli</i> Présence	<i>Staphylococcus aureus</i> Présence	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> Présence
Désinfectant chloré	86	66	32	36	7
Baquacil	73	22	8	8	0

Tableau 11 : Proportions de piscines contaminées pour les deux types de désinfectants

Les auteurs expliquent la présence de germes dans les eaux de ces piscines par une gestion non satisfaisante qui conduit fréquemment à une concentration en désinfectant inférieure à la valeur minimale acceptable. Pour les désinfectants chlorés, celle-ci correspond à 0,4 mg/L de chlore libre, valeur fixée par the Victorian Department of Health pour les eaux des piscines publiques et, pour le Baquacil, à 25 mg/L, valeur recommandée par ICI.

Ainsi, le tableau 12 ci-dessous regroupe, pour les deux types de produits, les pourcentages de piscines présentant une concentration en désinfectant supérieure ou égale à ces valeurs minimales. La première ligne donne le pourcentage de piscines pour lesquelles 100% des prélèvements étaient conformes, la seconde celui correspondant à 75% et plus de prélèvements conformes etc.

Les auteurs font ainsi observer que la gestion de la concentration en désinfectant dans les piscines privées semble plus aisée avec le Baquacil qu'avec un désinfectant chloré. En effet, le PHMB possède une stabilité dans l'eau qui permettrait de garantir le maintien d'une concentration minimale pendant quatorze jours entre deux apports, alors que l'acide hypochloreux, sensible aux UV, peut être éliminé en quelques heures.

Proportion d'échantillons conformes (concentration en désinfectant ³ valeur minimale)	Proportion de piscines satisfaisantes (%)	
	Désinfectant chloré	Baquacil
100 %	13,6	11,7
³ 75 %	18,2	35,0
³ 50 %	50,0	68,3
³ 25 %	77,3	91,7
< 25 %	22,7	7,3

Tableau 12 : Proportions de piscines présentant une teneur en désinfectant satisfaisante

Le corollaire de cette différence de stabilité, pour une gestion identique, serait donc l'assurance d'une meilleure qualité bactériologique de l'eau avec le Baquacil, comme le suggère les résultats du tableau 11.

Cette étude met donc l'accent sur un inconvénient majeur de l'acide hypochloreux : son instabilité dans les piscines ouvertes exposées au soleil. Cette sensibilité aux UV entraîne une surconsommation lorsque l'ajout de désinfectant peut être asservi à sa concentration dans le bassin. Par contre, pour les piscines à faible fréquentation (piscines privées par exemple), où cet asservissement n'est pas envisageable en terme de coût, ce phénomène peut être à l'origine d'une désinfection non satisfaisante, comme il l'a été observé dans cette étude.

Ces résultats confirment par ailleurs que le PHMB possède cette stabilité nécessaire à la garantie d'une certaine teneur en désinfectant dans ce type de bassins, dont la gestion n'est pas toujours satisfaisante.

On peut cependant regretter que cette étude ne fasse pas la distinction entre les deux types de désinfectants chlorés, stabilisés ou non, qui aurait permis de comparer le Baquacil aux seuls chloroisocyanuriques, qui constituent aujourd'hui l'essentiel des produits utilisés en piscine ouverte.

III.4.3 Les essais présentés dans la demande d'agrément du Baquacil

Le dossier présenté par ICI en 1979, en vue de l'agrément du Baquacil pour la désinfection des piscines en France, comporte les résultats de neuf essais réalisés entre 1972 et 1978. Les essais présentés plus amplement sont ceux réalisés sur une piscine scolaire en Grande-Bretagne et sur huit piscines privées dans différents pays [37].

L'étude conduite sur la piscine d'une école primaire, d'un volume de 70 m³ pour une fréquentation de 400 à 500 enfants, donne des résultats remarquablement satisfaisants. En effet, sur un ensemble de quarante-deux prélèvements réalisés sur une période de trois mois, un seul présente un nombre de coliformes totaux et d'*Escherichia coli* non nul, tandis que six dénombrements de la flore total sont positifs.

Les résultats des essais menés sur les huit piscines privées montrent, de façon semblable, une absence totale des indicateurs bactériens et une présence exceptionnelle de *Staphylococcus*

aureus, cependant que, dans certains bassins, le dénombrement de la flore revivifiable à 37°C et/ou à 22°C peut présenter des niveaux élevés, lorsque la concentration en Baquacil se situe au dessous de 20 mg/L.

Ces informations sur l'activité du Baquacil en milieu réel ont été complétées, en décembre 1981, par un ensemble de renseignements annexés à cette demande d'agrément, annexes destinées à apporter diverses précisions attendues par le CSHPF [65].

Pour conclure, on peut rappeler que les essais relatés par ICI, sur piscines privées ou publiques, ont été considérés comme insuffisants par le CSHPF, pour se faire une idée objective des avantages et inconvénients éventuels du produit, en terme de mise en œuvre, d'efficacité et de surveillance ou contrôle.

Ainsi, sur proposition du CSHPF, le Ministère chargé de la Santé a demandé que soit réalisée une expérience en grandeur réelle sur plusieurs piscines ouvertes au public.

III.4.4 L'expérimentation menée en France de 1982 à 1986

Ce paragraphe rappelle (dans l'ordre chronologique) les principaux enseignements de chaque expérimentation menée en France pendant la période 1982 – 1986. L'accent est volontairement mis sur les observations faites par le CSHPF et par les Services Santé Environnement concernés, celles-ci portant essentiellement sur la qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau. Les caractéristiques techniques des installations sont regroupées dans le tableau présenté en annexe 3.

III.4.4.1 Les essais à Vallauris et Mandelieu

Après examen du dossier présenté par ICI, le CSHPF a demandé, en date du 22 octobre 1979, la réalisation d'essais en piscines. La première phase d'essais en France a été réalisée sur deux installations proposées par ICI : il s'agit de deux piscines collectives de résidences privées, situées dans le département des Alpes-Maritimes (villes de Vallauris et Mandelieu).

Qualité physico-chimique de l'eau : elle n'a jamais été transparente.

Qualité microbiologique de l'eau : les résultats bactériologiques ont été satisfaisants, malgré des imprécisions concernant les systèmes de filtration. Cependant les piscines ont observé une fréquentation relativement faible (quelques dizaines d'usagers par jour).

Mesure de la concentration en Baquacil : la valeur mesurée sur le terrain a manqué de précision, elle différait très nettement de celle déterminée par le laboratoire.

A l'issue de ces premiers essais, le CSHPF a proposé, en date du 25 octobre 1982, de réaliser des essais sur les piscines publiques de Cagnes-sur-Mer, Saint-Laurent-du-Var, Gérardmer et Fontenay-sous-Bois.

III.4.4.2 Les essais à Cagnes-sur-Mer et Saint-Laurent-du-Var

[54]

Très rapidement, l'expérience sur la piscine de Cagnes-sur-Mer a dû être abandonnée par suite d'une forte floculation dans le bassin. Cette réaction semblait due à des incompatibilités mal maîtrisées du Baquacil avec d'autres produits utilisés ou résiduels dans l'établissement.

Les observations principales faites par le Service Santé Environnement et par le CSHPF à la suite des essais sur la piscine de Saint Laurent du Var sont les suivantes :

Qualité physico-chimique de l'eau : il a été constaté une dégradation de la transparence due à des phénomènes de floculation dans le bassin.

Des doses choc d'additif P n'ont permis de remédier que temporairement à ces problèmes, l'eau ne restant limpide que pendant 48 heures avant de se troubler à nouveau, malgré une régulation du pH à 7,2 - 7,4. L'ajout d'un flocculant tel que le sulfate d'aluminium ne fut pas une solution satisfaisante.

Ces problèmes de turbidité étaient liés à plusieurs paramètres difficilement conciliables avec ce type de désinfectant : forte fréquentation, filtration sous-dimensionnée et eau d'alimentation très minéralisée.

L'addition de Baquacil dans l'eau de la piscine a nécessité une régulation du pH par l'ajout d'acide chlorhydrique, sans lequel la valeur pouvait dépasser 8.

Qualité microbiologique de l'eau : aucun germe n'a été mis en évidence durant ces essais (témoins de contamination fécale, *Staphylocoques*, *Pseudomonas aeruginosa*), la teneur en Baquacil ayant varié entre 20 et 50 mg/L.

Mesure de la concentration en Baquacil : la méthode de mesure sur le terrain a manqué de précision, d'importants écarts ont été observés avec les valeurs obtenues en laboratoire.

Confort d'utilisation : facilité de manipulation, pas de dégagement gazeux, produit non corrosif pour les tuyauteries. Absence d'odeur dans la piscine mais des cas d'irritation oculaire ont été notés pour des concentrations supérieures à 35 mg/L.

Filtration : le Baquacil semble être un facteur de consommation de diatomées plus important que les halogènes. La consommation moyenne observée dans ces essais a été de 25 kg pour 48 heures.

III.4.4.3 Les essais à Gérardmer

Le suivi de l'expérience a été assuré par le service santé Environnement de la DDASS des Vosges. On dispose des observations faites par le CSHPF, par l'Ingénieur du Génie Sanitaire des Vosges [55] et par le directeur de la piscine [66].

Qualité physico-chimique de l'eau : l'introduction du Baquacil a provoqué des réactions de floculation dans le bassin.

Difficilement filtrables, les particules ainsi formées ont suggéré l'utilisation d'un flocculant tel que le sulfate d'aluminium (filtre à sable). Ce trouble a néanmoins persisté, malgré la mise en place d'une régulation du pH avec de l'acide chlorhydrique et des essais de minéralisation de l'eau.

Le changement de flocculant (utilisation du WAC) a permis une relative amélioration de la transparence, mais le lavage des filtres est resté difficile, la consommation de réactifs importante et le maintien d'un pH d'équilibre incompatible avec la minéralisation [66].

Qualité microbiologique de l'eau : elle a été globalement satisfaisante avec une concentration en Baquacil variant entre 20 et 50 mg/L. L'eau a été presque systématiquement conforme aux dispositions du décret de 1981. En outre, *Pseudomonas aeruginosa* n'a jamais pu être mis en évidence au cours de l'expérience.

Par contre, la flore revivifiable à 22°C a été très souvent rencontrée à des niveaux supérieurs à 300 germes par mL [55, 40].

La flore prédominante présente à 22 °C a été identifiée par le LHRSP de Nancy. Il s'agissait en fait de bacilles Gram négatif, aérobies stricts, oxydase positive, apparentés au groupe CDC VE 1 (groupe proche de *Pseudomonas* et *Xanthomonas*). PAQUIN J.L. (1985) a alors montré que le PHMB semblait avoir une réactivité plus faible vis à vis de cette flore que vis à vis d'autres souches habituellement rencontrées en piscine [40].

Cette différence de réactivité peut ainsi être une explication possible à la présence inopportune de cette flore dans les eaux de la piscine de Gérardmer, d'autant que le PHMB semble plus vulnérable à ce phénomène que l'acide hypochloreux :

Souche (10 ⁵ à 10 ⁶ germes)	Désinfectant	Abattement moyen (en Log) en fonction du temps (mn)			
		5	15	30	60
Bacille CDC groupe VE 1 Gram – (piscine de Gérardmer)	DCCNa 1 mg/L de chlore, disponible, 0,01 mg/L d'acide cyanurique	2,4	5,0	5,0	5,0
	Baquacil 30 mg/L	2,8	2,9	3,4	4,2
	Baquacil 50 mg/L	2,9	3,3	3,8	4,4

Tableau 13 : Comparaison de l'efficacité "in vitro" du PHMB et de HClO sur la flore dominante de la piscine de Gérardmer (labo LHRSP)

Dans ces conditions expérimentales, le PHMB semble agir plus rapidement que l'acide hypochloreux en début de réaction, mais son efficacité apparaît ensuite plus faible, voire insuffisante pour une élimination complète des germes présents.

Mesure de la concentration en Baquacil : la trousse fournie par ICI, pour la mesure sur le terrain, a été considérée comme insuffisante en terme de précision.

Confort d'utilisation : l'absence d'odeurs est remarquable et la mise en œuvre facile. L'additif P n'a jamais été utilisé. Par contre, quelques picotements des yeux et des irritations cutanéomuqueuses ont été décelés au delà de 35 mg/L de Baquacil, et une amertume de l'eau au dessus de 50 mg/L.

III.4.4.4 Les essais à Fontenay-sous-Bois

Cette expérimentation doit permettre de compléter les résultats obtenus à Gérardmer, dans la mesure où cette piscine municipale est également équipée d'un filtre à sable, mais cette fois alimentée par une eau de dureté et de minéralisation plus élevées.

Nous disposons des observations faites par le CSHPF et par l'Ingénieur du Génie sanitaire du Val de Marne [56].

Qualité physico-chimique de l'eau : l'introduction du Baquacil a entraîné l'augmentation de la turbidité de l'eau conduisant à une transparence insuffisante. La stabilisation du pH à 7,4 n'a pas toujours été possible, malgré d'importantes quantités d'acide chlorhydrique ajoutées. Les analyses ont également montré que le TAC de l'eau des bassins avait chuté de 20 à 12 °f.

Qualité microbiologique de l'eau : avec une concentration en Baquacil comprise entre 30 et 60 mg/L, les critères de qualité réglementaires ont généralement été respectés, avec toutefois une présence de *Pseudomonas aeruginosa* dans neuf échantillons sur un total de soixante-neuf. Une présence permanente, à des teneurs élevées, de la flore revivifiable à 22°C a été relevée.

III.4.4.5 Conclusions de la première série d'essais français

Qualité physico-chimique de l'eau : une mauvaise transparence de l'eau des bassins peut être observée quelque soit la dureté de l'eau d'alimentation, et le type de filtre utilisé (diatomée ou

sable à vitesse modérée). Ces problèmes de turbidité peuvent trouver leur origine dans les propriétés chélatantes et floculantes du PHMB.

Ainsi, le maintien du pH à une valeur inférieure à 7,5, l'utilisation d'un coagulant avec les filtres à sable et l'ajout de doses chocs de peroxyde d'hydrogène peuvent s'avérer nécessaires mais pas toujours suffisants pour conserver une eau claire.

Qualité microbiologique de l'eau : la qualité microbiologique de l'eau désinfectée avec le Baquacil apparaît conforme aux dispositions du décret de 1981, mais le niveau de la flore revivifiable à 22°C peut être anormalement élevé. Il ne semble pas y avoir de différence d'efficacité dans une gamme de concentration en Baquacil allant de 20 à 50 mg/L.

Mesure de la concentration en Baquacil : la méthode de dosage in situ apparaît insuffisamment précise, des écarts importants peuvent être observés entre la valeur de l'autocontrôle et celle du laboratoire.

Confort d'utilisation : le produit n'est pas dangereux à manipuler et son conditionnement en bidons de quelques litres rend son utilisation aisée. L'absence d'odeurs dans le hall des piscines est remarquable. Le maintien d'une concentration inférieure à 35 mg/L semble toutefois nécessaire pour éviter les problèmes d'irritations dans l'eau.

Ainsi, en 1984, le CSHPF a estimé que l'agrément ne pouvait être donné en l'état au procédé Baquacil en raison de plusieurs incertitudes :

- l'efficacité du produit, variable selon les caractéristiques des eaux ;
- des incidents de transparence ;
- des critères de qualité bactériologique pas toujours satisfaisants : flore globale à 22°C et, surtout, présence de *Pseudomonas aeruginosa* ;
- des contraintes de mise en œuvre (modifications chimiques apportées à l'eau) contrastant avec la facilité apparente d'emploi (caractère rémanent du produit).

Face à cette situation, la société ICI a décidé de réaliser une étude expérimentale en laboratoire (études de PAQUIN J.L. [40] et de ZMIROU J. [33]), dont nous avons déjà évoqué certains résultats, et qui a permis d'autoriser la poursuite des essais en piscines publiques sur deux sites : Saintes et Saint Gilles-Croix de Vie.

III.4.4.6 Les essais à Saintes

Nous disposons des observations faites par le CSHPF et par le Service Santé Environnement de la DDASS de la Charente-Maritime [57].

Qualité physico-chimique de l'eau : l'enregistrement en continu de la turbidité de l'eau a pu difficilement être exploité du fait de différents incidents ne mettant pas en cause le Baquacil. En dehors de ces incidents, la clarté de l'eau est restée relativement bonne.

Par contre, le personnel a constaté que lorsque l'eau de la piscine a tourné, lors d'une panne électrique notamment, la qualité de l'eau s'est détériorée plus vite qu'avec l'eau de Javel (ancien traitement), et, surtout, qu'il a été plus difficile de la clarifier à nouveau.

Le pH de l'eau a été maintenu entre 7,3 et 7,5 par l'ajout d'acide chlorhydrique. Avec le Baquacil, la consommation en acide a été diminuée par rapport au traitement à l'eau de Javel.

Qualité microbiologique de l'eau : le traitement au Baquacil a permis de respecter les dispositions réglementaires du décret de 1981, avec une concentration variant de 30 à 40 mg/L. La numération à 22°C a été observée à des teneurs élevées pendant le premier mois d'essai, puis inférieures à 10 germes par mL pendant le second mois.

La recherche de *Pseudomonas* n'a été effectuée que pendant le premier mois d'étude, mais elle a révélé principalement la présence de *Pseudomonas acidovorans* dans six échantillons sur sept.

Confort d'utilisation : le conditionnement en bidons de 5 litres facilite la manipulation du Baquacil. L'absence d'odeurs dans le hall de la piscine est appréciable. Toutefois, les baigneurs ont trouvé un goût désagréable à l'eau et se sont plaints d'irritations oculaires. Le personnel a également observé une moins bonne efficacité des produits de nettoyage des plages avec les produits compatibles imposés.

Filtration : la fréquence de lavage du filtre a été de trois par semaine, contre deux avec l'ancien procédé de désinfection à l'eau de Javel. La diminution de trois à deux s'est révélée inintéressante pour l'exploitant car le filtre, très encrassé, nécessitait alors davantage d'eau pour être décolmaté.

III.4.4.7 Les essais à Saint Gilles-Croix de Vie

Les essais sur la piscine municipale de Saint Gilles se sont déroulés du 21 mai 1986 au 05 février 1987, la période d'essais officielle s'étalant du 21 mai au 12 novembre 1986. Nous disposons des observations faites par le CSHPF et par le Service Santé Environnement de la Vendée [58].

Qualité physico-chimique de l'eau : au début des essais, la quantité de flocculant a dû être ajustée pour améliorer la clarté de l'eau. Ensuite la turbidité a été plutôt moyenne, oscillant autour de 0,5 NTU, en dehors des nombreux incidents. L'utilisation du Baquacil n'a pas nécessité de régulation du pH pendant la période d'essais officiels.

Les essais officiels menés par le personnel technique ont montré que la transparence de l'eau pouvait être améliorée par l'utilisation de sulfate d'aluminium (remplaçant le WAC), avec une régulation de pH à 7,2 – 7,3.

Qualité microbiologique de l'eau : elle a été plutôt bonne pendant les huit mois (22 analyses), avec absence de *Pseudomonas aeruginosa* et de *Staphylococcus aureus*, pour une concentration comprise entre 20 et 50 mg/L. Par contre, neuf des onze dernières analyses, faites pendant la période d'essais officiels, montrent une présence importante de la flore revivifiable à 22 °C, avec plus de 500 germes par mL. L'identification de ces germes a donné les résultats présentés dans le tableau 14 ci-dessous.

Flore à 22°C		Eau du bassin		Eau d'alimentation	
Date	UFC/ mL	Germes identifiés		UFC/ mL	Germes identifiés
26/08	690	1) <i>Aeromonas hydrophila</i> 2) <i>Flavobacterium meningosepticum</i> CDC groupe IIa		-	-
07/10	6320	<i>Bacillus</i> Sp		29	<i>Serratia rubidaea</i>
17/10	336	1) <i>Bacillus</i> Sp 2) <i>Flavobacterium</i> SR II B		-	-
23/10	2720	<i>Flavobacterium</i> SR II B		34	1) <i>Serratia plymuthica</i> 2) <i>Aeromonas</i> 3) <i>Pseudomonas</i> <i>putrifasciens</i> et <i>stutzeri</i> 4) <i>Plesiomonas shigelloïdes</i>
28/10	8640	<i>Flavobacterium</i> SR II B		-	-

Tableau 14 : Identification de la flore à 22°C présente dans la piscine de Saint Gilles

La flore la plus fréquemment rencontrée dans le bassin appartient au genre *Flavobacterium*, ce qui rejoint les résultats de PAQUIN J.L. (1985) obtenus sur la piscine de Gérardmer, puisque les flores identifiées dans les deux piscines appartiennent à des genres proches de *Pseudomonas*. Il

s'agit de bactéries Gram négatif dont la résistance vis à vis du PHMB serait à rapprocher de celle connue vis à vis de la chlorhexidine [28, 29, 30].

L'explication donnée au moment du suivi des essais porte sur la structure de ces germes, qui révélerait la présence d'une épaisse gaine de polysaccharide à caractère anionique. Cette gaine assurerait ainsi une protection vis à vis des agents à caractère cationique comme le Baquacil.

Confort d'utilisation : l'expérimentation à Saint Gilles a été l'occasion de réaliser un sondage des usagers sur l'éventuelle amélioration ou détérioration des conditions de baignade, résultant du changement de désinfectant.

L'ancien produit utilisé étant le brome, ce sondage permet donc, à priori, de comparer ce désinfectant au Baquacil en terme d'irritations, de goût de l'eau, de transparence ou d'odeur dans le hall.

47% des réponses obtenues constatent une amélioration, 22% une détérioration et 30% aucun changement, pour un total de 685 personnes interrogées. Les usagers semblaient donc plutôt favorables à ce changement, même si l'amélioration de l'odeur de l'atmosphère de la piscine, constatée par 58 % d'entre eux (résultat le plus favorable au Baquacil), peut sembler manquer de pertinence pour discréditer le brome. Les résultats détaillés de ce sondage sont présentés en annexe 4.

Filtration : la volonté d'augmenter la puissance de contre lavage des filtres s'est soldée par une perte de sable importante qui a occasionné une mauvaise transparence de l'eau pendant quinze jours.

III.4.4.8 Conclusion de la deuxième série d'essais français

A la suite de l'expérimentation réalisée en laboratoire en 1985 [33,40] et de ces deux derniers essais effectués in situ en 1986, les experts ont estimé que les principales incertitudes concernant la turbidité et la bactériologie des eaux, la mise en œuvre du produit et le confort des usagers ont été levées.

Ainsi, le CSHPF a donné, en date du 06 juillet 1987, un agrément provisoire de trois ans à l'utilisation du Baquacil pour le traitement désinfectant des eaux des piscines ouvertes au public.

Cet avis a été accompagné d'une réserve concernant l'absence d'activité virucide du PHMB. Enfin, deux observations ont été formulées : informer les gérants des conditions d'utilisation du produit, plus malaisée qu'il y paraît à première vue (surveillance du pH et de la transparence de l'eau, système de dosage in situ à améliorer) et nécessité d'une surveillance sanitaire étroite des piscines traitées par le Baquacil (dénombrements bactériens à 22°C, recherche de *Pseudomonas aeruginosa*).

III.4.5 Utilisation du PHMB en France entre 1989 et 1999

L'avis favorable du CSHPF a donc été suivi par la parution de l'arrêté du 28 septembre 1989 autorisant, pour trois ans à dater du 28/09/89, les produits comportant la molécule PHMB et figurant sur la liste établie par le Ministère chargé de la Santé, pour la désinfection des eaux des piscines ouvertes au public.

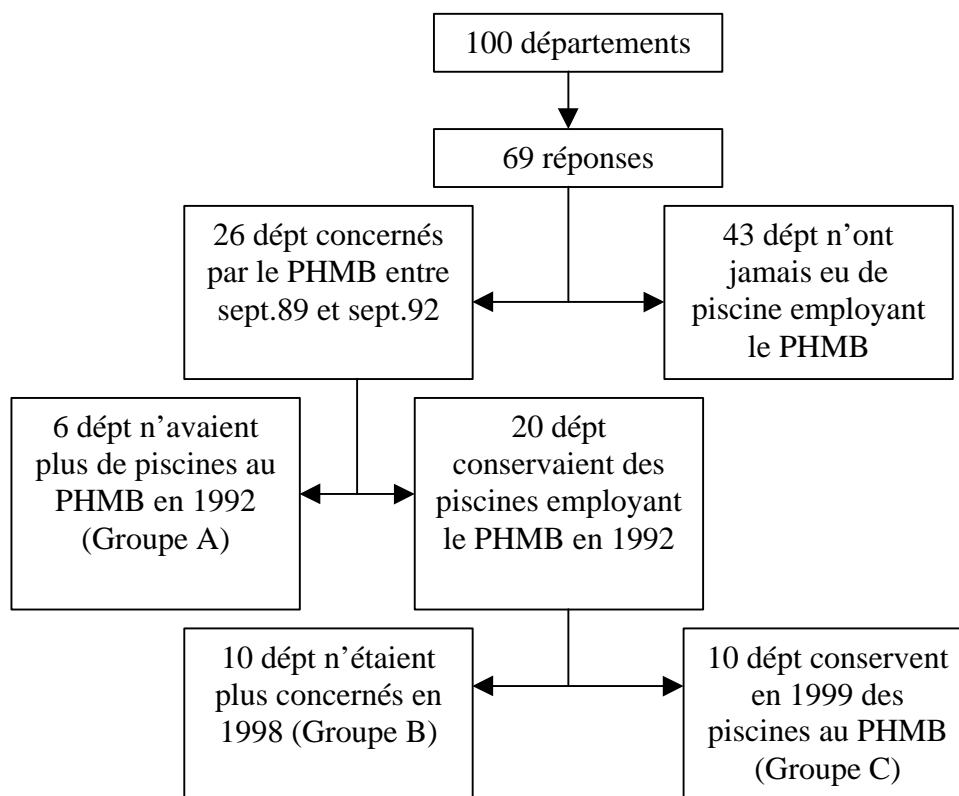
Par circulaire du 06 octobre 1989, les autorités sanitaires locales ont été informées du suivi particulier des installations faisant le choix d'employer le PHMB. Ce suivi a ensuite été concrétisé par un bilan, réalisé en 1992, par chaque Service Santé Environnement concerné, selon le canevas proposé par la circulaire du 03 août 1992 (cf. annexe 5). Ces bilans départementaux, retournés au Ministère, nous permettent, aujourd'hui, d'élaborer une synthèse nationale de l'utilisation du PHMB pendant ces trois ans.

Entre 1993 et 1999, aucune position officielle du Ministère n'ayant été rendue, l'utilisation du PHMB n'a pas été complètement abandonnée en France. Une enquête téléphonique, réalisée en mai et juin 1999, sur le même canevas que celui proposé par le Ministère en 1992, nous a permis d'obtenir les renseignements concernant cette période, afin de compléter les bilans départementaux de 1992, et de réaliser ainsi une synthèse nationale sur dix ans d'utilisation du PHMB en France.

III.4.5.1 Le nombre de départements concernés

Soixante-neuf des cent départements français ont retourné au Ministère, au cours du second semestre 1992, leur bilan sur l'utilisation du PHMB dans les piscines suivis par leur Service santé Environnement pendant les trois ans d'autorisation provisoire. Ce taux de réponse est satisfaisant, dans la mesure où on peut supposer que, les trente-et-un départements n'ayant pas répondu à cette enquête, ne recensaient pas d'établissement ayant fait le choix d'utiliser ce produit.

Parmi les 69 départements ayant répondu à l'enquête du Ministère, 26 ont été concernés par l'utilisation du PHMB entre septembre 89 et septembre 92, et 20 conservaient, en 1992, au moins une piscine employant ce désinfectant. Ce sont ces 20 Services santé Environnement qui ont fait l'objet de notre enquête téléphonique.



Répartition des départements face à l'utilisation du PHMB entre 1989 et 1999

III.4.5.2 Le nombre de piscines concernées

L'évolution globale, entre 1989 et 1999, du nombre d'établissements employant le PHMB est présentée dans le tableau 15 ci-dessous. Pour chaque année, nous y avons fait figurer, par rapport à l'année précédente, le nombre de piscines ayant abandonné l'utilisation du Baquacil et le nombre ayant fait le choix de commencer à utiliser ce produit. Aucun établissement recensé n'a réemployé le PHMB après l'avoir abandonné. Ainsi, le nombre d'établissements employant le PHMB, pour une année donnée, est égale au nombre de l'année précédente, diminué du nombre d'abandons, et augmenté du nombre de démarrages survenus entre les deux années.

Année	Bilans 1992			Enquête tél. 1999			Total de la ligne
	1990	1991	1992	1997	1998	1999	
Nombre d'abandons par rapport à l'année précédente	-	15	1	43	3	1	63 abandons
Nombre de démarrages par rapport à l'année précédente	51	9	13	4	0	1	78 démarrages
Nombre de piscines employant le PHMB	51	45	57	18	15	15	15 piscines en 1999

Tableau 15 : Nombre de piscines ouvertes au public employant le PHMB entre 1989 et 1999

Le nombre total de piscines ouvertes au public employant le PHMB dépend très clairement de la période concernée ; pendant l'autorisation provisoire, une cinquantaine de piscines a été recensée chaque année, alors qu'entre 1997 et 1999, ce nombre est descendu à quinze.

Sur l'ensemble de la France, entre 1989 et 1999, 78 établissements ont utilisé le PHMB, sur une durée variant de quelques semaines à plusieurs années.

III.4.5.3 Les différents types de piscines recensés

Les deux enquêtes révèlent que les piscines, ayant utilisé le PHMB entre 1989 et 1999, sont essentiellement des établissements privés recevant du public, comme le montre le tableau 16 ci-dessous.

Dans la majorité des cas, ces piscines se différencient des piscines municipales - comme celles qui ont fait l'objet des essais expérimentaux en France - par un volume de bassin plus petit et par une fréquentation moyenne journalière plus faible, ne dépassant que rarement quelques dizaines de baigneurs.

Type de piscine	Nombre de piscines	Proportion (en %)
Piscine d'hôtel (restaurant)	32	41
Piscine de camping, gîte et centre de vacances	20	26
Piscine de résidence, copropriété et foyer	7	9
Piscine de centre de sport, détente et loisirs	6	8
Piscine publique, municipale	4	5
Autre	4	5
Non communiqué	5	6
Total	78 piscines	100 %

Tableau 16 : Les différents types de piscines ayant employé le PHMB entre 1989 et 1999

Les piscines d'hôtels et des centres d'hébergement de vacances représentent les deux tiers des installations ayant utilisé le PHMB entre 1989 et 1999.

Les renseignements contenus dans cette consultation nationale constituent donc une seconde expérimentation en grandeur réelle, complémentaire de celle réalisée entre 1982 et 1986, sur la désinfection des eaux des piscines par le PHMB. Ils vont notamment nous permettre de juger de l'efficacité du produit sur le type d'installation pour lesquelles l'efficacité du PHMB est jugée satisfaisante par le DoE [52,53].

III.4.5.4 Les résultats de l'utilisation du PHMB entre 1989 et 1999

III.4.5.4.1 Les principaux problèmes rencontrés

Le canevas proposé aux Services Santé Environnement en 1992, par le Ministère chargé de la Santé, appelait à répondre à la question « Avez-vous relevé des problèmes liés à l'utilisation du PHMB ? Si oui, de quels ordres ? ». Les problèmes les plus fréquemment mentionnés dans les deux enquêtes (1992 et 1999) sont présentés dans le tableau 17 ci-dessous.

Problème éventuel	Départements ayant été confrontés à ce problème	Nbre de dépt.	Nbre de piscines
Imprécision du dosage in situ de la concentration en PHMB, concentration régulièrement hors norme	06 ;15 ;2A ;26 ;33 ;41 ;45 ; 56 ;68 ;71 ;78 ;86 ;88 ;972	14 (54%)	28 (36%)
Eau turbide, mauvaise transparence	06 ;09 ;13 ;21 ;33 ;41 ;45 ; 68 ;74 ;78 ;88	11 (42%)	19 (24%)
Qualité microbiologique non satisfaisante, vis à vis des dispositions de 81, de la flore à 22°C ou des <i>Pseudomonas</i>	06 ;09 ;17 ;2B ;29 ;33 ;35 ; 41 ;45 ;78 ;86 ;88 ;972	13 (50%)	32 (41%)
Nombre de départements (ou de piscines) ayant rencontré au moins l'un des trois problèmes ci-dessus		22 (85%)	49 (63%)

Tableau 17 : Les problèmes les plus fréquemment rencontrés avec l'utilisation du Baquacil

Cette première analyse montre que 22 des 26 départements et 49 des 78 piscines concernés par l'utilisation du PHMB entre 1989 et 1999 ont été confrontés à au moins l'un des trois problèmes cités précédemment, problèmes qui ont tous déjà été rencontrés lors des expérimentations menées en France entre 1982 et 1986. La nouveauté réside dans le fait que ces problèmes sont ici observés pour des piscines à faible fréquentation, ce que ne laissait pas penser les préconisations de Zeneca [34] et les recommandations du DoE [52, 53].

III.4.5.4.2 Les motifs d'abandon du procédé

Pendant ces dix années d'utilisation du PHMB, 63 piscines sur 78 ont renoncé à l'emploi de ce produit.

Le tableau 15 permet de distinguer clairement deux vagues de renoncement : entre 1990 et 1992, alors que le PHMB était autorisé, seize piscines ont abandonné son utilisation, alors que, entre 1992 et 1999, après la fin de la période probatoire, on en a dénombré quarante-sept. Nous proposons ici quelques explications à ces revirements.

L'enquête montre très clairement que les problèmes de transparence de l'eau, de turbidité élevée constituent le principal motif de désapprobation du PHMB pendant la période probatoire de trois ans.

Par contre, après 1992, les raisons invoquées sont plus partagées. Pour un tiers des piscines, l'abandon du PHMB est justifié par la fin de la période d'autorisation. Les deux autres motifs les plus cités sont d'une part, la difficulté à doser in situ la concentration en PHMB, ce qui rend difficile la gestion de sa teneur dans la piscine, et, d'autre part, la mauvaise qualité microbiologique de l'eau.

Motifs de renoncement à l'utilisation du PHMB	Nombre de piscines pour lesquelles cette raison est invoquée		
	1990-1992	1992-1999	1990-1999
Nombre total de piscines ayant abandonné l'utilisation du PHMB	16	47	63
Aucun motif	2	6	8
Fin de la période réglementaire	-	16	16
Qualité microbiologique non satisfaisante	5	13	18
Eau turbide, mauvaise transparence	12	3	15
Imprécision du dosage in situ de la concentration en PHMB, concentration difficile à ajuster	2	7	9
Coût de fonctionnement élevé	1	4	5
Mauvaise odeur	1	1	2
Autre	0	3	3

Tableau 18 : Les principaux motifs de renoncement à l'utilisation du PHMB

III.4.5.4.3 La qualité microbiologique de l'eau

Vingt-six des trente-deux piscines recensées dans le tableau 17 pour une qualité microbiologique non satisfaisante ont constaté dans leurs bassins des niveaux de flores aérobies revivifiables fréquemment élevés.

Ce résultat a été jugé suffisamment grave dans de nombreux cas pour qu'il contribue à l'abandon du procédé.

Ainsi, parmi les dix-huit piscines ayant évoqué une qualité microbiologique de l'eau non satisfaisante pour justifier de l'abandon du procédé, quatre seulement n'ont pas explicitement mis en cause le niveau de la flore aérobie revivifiable.

Pour illustrer ce résultat, nous disposons des analyses effectuées, pendant la période d'essai, sur la piscine du Domaine de Châteaugiron en Ille-et-Vilaine (bassin de 75 m³ et filtration sur sable). L'expérimentation a débuté en mai 1990, après la vidange du bassin effectuée en avril, et s'est achevée en août de la même année. Nous disposons des relevés analytiques mensuels qui ont été joints au bilan départemental envoyé au Ministère en 1992. Les résultats sont regroupés dans le tableau 19 :

Date	27 juin 1990	10 juillet 1990	22 août 1990
Concentration en Baquacil	40	45	40
pH	7,3	7,4	7,5
Flore revivifiable à 22°C (UFC / mL)	240 000	49 000	8 300 000
Flore revivifiable à 37°C (UFC / mL)	130 000	10 000	5 600 000
Germes prédominants	<i>Pseudomonas acidovorans</i>	<i>Pseudomonas acidovorans</i>	<i>Flavobacterium</i>
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (UFC/ 100 mL)	0	0	0

Tableau 19 : Qualité microbiologique de l'eau de la piscine du Domaine de Châteaugiron pendant les essais de désinfection au Baquacil

Lors des trois prélèvements réalisés, la flore aérobie revivifiable présentait donc un niveau très élevé, avec la prédominance de germes déjà rencontrés lors des essais effectués à Saintes ou à Saint Gilles-Croix de Vie. Ici encore, les résultats laissent à penser que le PHMB favorise la sélection de bactéries Gram négatif aérobies de la famille *Pseudomonadaceae*.

Par contre *Pseudomonas aeruginosa* n'a été que très rarement mentionné dans les résultats des deux enquêtes, ce qui confirme également les observations des expérimentations menées entre

1982 et 1986. La désinfection de l'eau avec le PHMB semble donc être satisfaisante vis à vis de ce germe.

Enfin, les dispositions réglementaires microbiologiques du décret de 1981 (exception faite de la flore revivifiable à 37°C) ont également été assez bien respectées pendant ces dix années d'utilisation, ce qui rejoint là encore les conclusions expérimentales. Cependant, dans un contexte croissant d'exigence de sécurité sanitaire de la part du public, la persistance d'une flore revivifiable à 22°C à des teneurs élevées, explique aisément les nombreux abandons du PHMB par les gestionnaires.

III.4.5.4.4 La qualité physico-chimique de l'eau

Dix neuf piscines ont été confrontées à des problèmes de transparence de l'eau, qui ont été suffisamment sérieux pour contribuer à l'abandon du PHMB pour quinze d'entre elles.

Ces problèmes de turbidité peuvent trouver leur origine dans les propriétés chélatantes et floculantes du PHMB. Toutefois, si l'interaction avec les éléments de transition semble ne pouvoir se produire que dans des conditions plutôt rares en piscine [33], l'interaction avec la pollution organique n'y est en rien limitée. Il semble donc que ce soit davantage ce second phénomène qui a été majoritairement responsable du trouble de l'eau des bassins.

Les expérimentations réalisées à Saint Laurent du Var en 1983 ont montré que l'éclaircissement de l'eau pouvait être favorisé par l'ajout de dose choc de peroxyde d'hydrogène. L'enquête confirme que cette disposition n'est pas toujours suffisante. En effet, sept Services Santé Environnement ont été confrontés à des problèmes de transparence malgré l'emploi de cet oxydant.

L'élimination de ce trouble doit donc être assurée pour une grande partie par la filtration de l'eau. Or, dans de nombreux cas, cette opération s'est avérée insuffisante pour conserver une eau claire. Le PHMB semble donc exiger l'utilisation d'un filtre spécifique dont les caractéristiques (matériau, hauteur de la couche filtrante, nombre de couches...) restent encore à définir.

III.4.5.4.5 Les appréciations de l'administration des gérants et des usagers

Le canevas de l'enquête de 1992 prévoyait également une page sur laquelle devait être consignées les appréciations de l'administration, des gérants et des usagers des piscines. Hormis celles se rapportant à la qualité de l'eau et à la mesure de la concentration en PHMB, les appréciations les plus fréquemment mentionnées sont présentées dans le tableau 20 ci-dessous.

	Appréciations	Départements mentionnant l'appréciation
Administration	Absence de dispositifs d'injection des produits (PHMB et H ₂ O ₂), ajout directement dans le bassin	17/45/68/972
Gérants des piscines	Facilité d'emploi	15/17/2B/30/38/68/74/86/88/89
	Coût de fonctionnement élevé	15/16/17/2A/2B/30/74/78/972
	Caractère rémanent du PHMB dans l'eau facilite la surveillance	15/30/74/89
	Le colmatage du filtre est rapide	17/86/88
Usagers	Absence d'odeurs dans le hall	16/17/30/38/41/56/86/88/89
	Absence d'irritations des yeux et des muqueuses	16/17/30/38/41/56/74/86/88/89/972

Tableau 20 : Les appréciations concernant la mise en œuvre, la gestion et le confort

Les appréciations des usagers portent exclusivement sur le confort de la baignade et sont unanimement positives.

Les commentaires des gérants sont partagés entre la facilité d'emploi (conditionnement en bidon de 5 litres, ajout directement dans le bassin sans utiliser de pompe doseuse) et son coût, jugé plus élevé que celui des produits de désinfection habituels.

Plusieurs Services Santé Environnement ont justement fait observer que, l'ajout du désinfectant, ou de la solution de peroxyde d'hydrogène, directement dans le bassin, constitue une entorse à la réglementation actuelle. Ce mode d'utilisation, préconisé par le fabricant, se justifie par la faible fréquence avec laquelle les produits doivent être ajoutés.

III 4.5.4.6 Interprétations et limites de ces résultats

La limite à cette consultation nationale porte sur la représentativité des résultats analytiques disponibles. Les piscines suivies entre 1989 et 1999 sont essentiellement des piscines d'hôtels et de centres de vacances. Or celles-ci ne sont généralement ouvertes que pendant la période d'été et ne font l'objet que d'un prélèvement par mois. Ainsi, le nombre d'analyses donné pour chacune d'entre elle n'a été que très rarement supérieur à dix. Cet état de fait marque bien la différence entre une expérimentation, comme celle réalisée entre 1982 et 1986, et une simple utilisation. Toutefois, les conclusions tirées de l'utilisation du PHMB entre 1989 et 1999 rejoignent relativement bien celles des essais réalisés entre 1982 et 1986.

Ainsi les avantages et inconvénients du procédé qui ressortent de cette double enquête sont les suivants :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● Respect des dispositions du décret de 1981 ● Efficacité vis à vis de <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ● Facilité d'emploi ● Rémanence importante dans l'eau ● Confort des usagers 	<ul style="list-style-type: none"> ● Résistance de la flore revivifiable à 22°C ● Problèmes de transparence de l'eau, procédé exigeant en matière de filtration ● Méthode de dosage sur le terrain non fiable ● Absence de dispositif d'injection des produits ● Coût élevé

Tableau 21 : Synthèse des avantages et inconvénients du procédé de désinfection au PHMB, ressortant de son utilisation entre 1989 et 1999

IV L'EXPERIMENTATION MENE E A GERARDMER EN 1999

IV.1 L'expérience du PHMB à la piscine de Gérardmer

IV.1.1 Seize années d'expérience

Le PHMB (Baquacil) est actuellement utilisé pour la désinfection des eaux de la piscine municipale de Gérardmer et l'a été sans discontinuité depuis décembre 1982. Initialement, cette piscine constitua un site expérimental, puis, après l'avis favorable du CSHPF en juillet 1987, la municipalité décida de conserver ce procédé jusqu'à nouvel ordre.

La piscine de Gérardmer fait partie des 78 piscines recensées par les enquêtes de 1992 et de 1999 et demeure actuellement la seule piscine publique employant le PHMB, les quatorze autres étant des piscines privées recevant du public.

IV.1.2 Une mise en œuvre malaisée

Le rapport fourni par le directeur de l'établissement en mai 1999 [66], sur les seize années d'expérimentation du PHMB pour la désinfection de l'eau, permet de juger des efforts accomplis pour mettre en œuvre ce procédé avec le souci de maintenir une qualité d'eau satisfaisante.

En effet, dès les premiers jours d'utilisation du PHMB, l'eau de la piscine (eau douce) est devenue trouble. C'est essentiellement pour pallier ces problèmes de turbidité que le personnel technique a essayé différentes solutions au cours de ces seize années.

De 1982 à 1986, les différentes solutions sont envisagées avec l'assistance des autorités sanitaires. Elles permettent de conclure sur la nécessité d'employer un coagulant, le WAC étant préférable au sulfate d'aluminium. Ce procédé s'avère toutefois insuffisant et la clarté de l'eau est améliorée par l'augmentation de sa minéralisation, réalisée par l'ajout de carbonate de sodium et de chlorure de calcium.

Les problèmes qui se posent sont alors les suivants :

- la consommation de réactifs est importante ;
- l'eau devient turbide après chaque remise en service d'un filtre lavé, celui-ci relâchant des particules non évacuées lors du lavage ;
- le pH de l'eau est élevé avec une valeur oscillant autour de 8,4.

A partir de 1987, les nouvelles solutions sont mises en œuvre avec l'assistance du personnel technique de la municipalité. Après la réalisation d'essais infructueux sur la nature du coagulant employé, le personnel procède à l'introduction de soude en retour de bassin après chaque lavage. Les résultats obtenus sur la clarté de l'eau sont excellents.

L'ajustement du pH à 7,6 est ensuite obtenu grâce à l'injection de gaz carbonique qui permet également d'abandonner l'utilisation des réactifs de minéralisation.

En 1997, la mise en œuvre du procédé de désinfection / clarification est alors la suivante : injection de PHMB et de WAC chaque soir, acidification par le gaz carbonique, lavage de filtre complété par l'injection de soude en retour de bassin. Cette solution donne satisfaction en terme de clarté et de qualité microbiologique de l'eau, exception faite de la flore revivifiable à 22°C.

Elle présente cependant des inconvénients d'ordre pratique :

- l'ajout de CO₂ est trop coûteux pour être maintenu et il est ainsi décidé de ne plus intervenir sur le pH et la minéralisation de l'eau ;

- la soude, jugée trop dangereuse à manipuler, est abandonnée au profit du peroxyde d'hydrogène. Cependant, la clarté de l'eau ne redevient satisfaisante qu'avec l'ajout quotidien d'hypochlorite de calcium qui constitue en quelque sorte la touche finale apportée au procédé de désinfection / clarification mis en œuvre à Gérardmer.

Le procédé actuellement mis en œuvre à la piscine de Gérardmer est donc le suivant :

- ajout quotidien de PHMB, de WAC et d'hypochlorite de calcium ;
- lavage des filtres avec de l'eau de piscine préalablement chlorée, et injection, après remise en service du filtre, de peroxyde d'hydrogène.

Cette solution complexe permet, depuis avril 1997, de maintenir une eau de clarté très satisfaisante, mais ne correspond aucunement aux conditions d'usage du PHMB prescrites par le fabricant. En particulier, elle associe des produits antagonistes (PHMB et hypochlorite de calcium). Il semble donc qu'une solution simple et reproductible de mise en œuvre du PHMB, ainsi que les caractéristiques d'un filtre adéquat, restent à définir.

IV.1.3 Les incertitudes sur la qualité d'eau

Tout au long des seize années d'utilisation du PHMB, la qualité microbiologique de l'eau, malgré ces problèmes de turbidité, a été globalement conforme aux dispositions du décret de 1981, y compris pour la flore revivifiable à 37 °C. *Pseudomonas aeruginosa* n'a, en outre, jamais été détecté dans les eaux de la piscine, la concentration en Baquacil étant généralement comprise entre 15 et 50 mg/L.

Ces observations positives sont contrebalancées par le niveau de la flore revivifiable à 22°C qui a été très souvent (environ trois quarts des prélèvements) mesuré à plus de 300 germes par mL. Ce résultat apparaît inquiétant dans la mesure où l'on peut soupçonner, depuis l'étude de PAQUIN J.L. en 1985 [40] et les expérimentations à Saint-Gilles et à Châteaugiron, la sélection d'une flore résistante au PHMB.

IV.2 Objectifs de l'expérimentation de 1999

IV.2.1 Tester un protocole de mise en œuvre

L'expérimentation devait permettre de tester une mise en œuvre du PHMB qui prenne en compte l'analyse de la littérature et des résultats des expériences menées depuis 20 ans. De cette analyse, nous pouvons dégager quatre principaux préalables qui ont formé la base du protocole d'expérience :

- la mise en œuvre préconisée par Zeneca dans son guide de l'utilisateur [34] associe le PHMB au didécyl diméthylammonium (algicide) et au peroxyde d'hydrogène (oxydant) ;
- les différentes expérimentations réalisées sur des piscines à forte fréquentation ont montré que l'emploi d'un coagulant pouvait diminuer les problèmes de turbidité ;
- la régulation du pH autour d'une valeur de 7,5 est une condition nécessaire pour une bonne floculation ;
- l'efficacité du PHMB ne semble pas être affectée par une variation de sa concentration entre 25 et 50 mg/L en Baquacil.

La faisabilité d'une telle mise en œuvre devait pouvoir notamment être jugée sur la transparence de l'eau et sur la durée du cycle de filtration.

IV.2.2 Juger de l'efficacité du PHMB

L'expérimentation devait également permettre de juger de l'efficacité du PHMB à une concentration voisine de 25 mg/L, vis à vis de germes pathogènes, comme *Staphylococcus aureus* et *Pseudomonas aeruginosa*.

Enfin, en comparant la qualité microbiologique de l'eau de Gérardmer à celle d'une autre piscine, nos essais devaient permettre d'évaluer l'efficacité du PHMB vis à vis de la flore à 22°C et de juger de son aptitude à favoriser ou non la sélection d'une certaine flore.

IV.3 Protocole expérimental

IV.3.1 Caractéristiques des deux bassins

La qualité microbiologique des eaux du petit bassin de la piscine de Gérardmer a été comparée à celle du bassin ludique de la piscine municipale de La Bresse. Les caractéristiques techniques de ces deux bassins sont présentées dans le tableau 22.

	Petit bassin Gérardmer	Bassin ludique La Bresse
Type de piscine	Municipale, couverte, baies ouvrantes	Municipale, couverte, baies ouvrantes
Fréquentation annuelle de la piscine	90 000	71 000
Date de mise en service	Avril 1980	Mai 1994
Surface (m ²)	156	90
Volume (m ³)	156	76
Temps de renouvellement	1 h 55	1 h 30
Hydraulicité	Inversée	Inversée
Matériau filtrant	Sable	Sable
Masse de matériau	8 tonnes	4,8 tonnes
Nombre de couches	bi-couches	quatre couches
Hauteur de filtration	1,15 m	1,0 m
Vitesse de filtration	20 m/h	47 m/h
Fréquence de lavage	2 / semaine	1 / 4 à 6 jours
Type de lavage	eau	eau
Volume de lavage / rinçage	30 / 15 m ³	15 / 3 m ³
Age du matériau filtrant	octobre 1998	mai 1994
Correction du pH	Aucune	HCl
Désinfectant	PHMB	Hypochlorite de calcium stabilisé et DCCNa
Floculation	WAC	WAC
Apport d'eau neuve hors jour de lavage	30 L / baigneur / jour	30 L / baigneur / jour

Tableau 22 : Caractéristiques techniques des deux bassins expérimentaux

Le bassin de la Bresse a été choisi pour sa proximité par rapport à celui de Gérardmer, pour sa désinfection au chlore stabilisé, qui constitue actuellement le type de désinfection le plus courant en France et, enfin, pour ses caractéristiques techniques, telles que la nature du matériau filtrant, le type de coagulant ou le mode d'hydraulicité, qui sont très similaires à celles du bassin de Gérardmer.

En effet, ces éléments ont tous une influence sur la qualité de l'eau de la piscine. Ainsi, les différences de qualité microbiologique des deux eaux de bassin sont d'autant plus liées à la différence de désinfection que ces caractéristiques techniques sont semblables.

IV.3.2 Les eaux d'alimentation des deux piscines

Les caractéristiques de l'eau d'alimentation ne sont pas non plus sans influence sur la qualité de l'eau des piscines. Ainsi, le choix du bassin de La Bresse a également été guidé en partie par la nature de l'eau de réseau de La Bresse, qui est assez proche de celle du réseau de Gérardmer. Nous nous en sommes assurés en réalisant, pour chaque eau d'alimentation, cinq prélèvements échelonnés sur les cinq semaines d'expérimentation. Les résultats des analyses effectuées par le Laboratoire d'Hygiène et de Recherche en Santé Publique (LHRSP) sont regroupés dans le tableau 23 ci-dessous.

Paramètres	Eau d'alimentation du bassin de Gérardmer		Eau d'alimentation du bassin de La Bresse		
	Gamme	Moyenne	Gamme	Moyenne	
pH	7,6 à 8,0	7,8	7,4 à 7,8	7,6	
TAC (°f)	6,8 à 7,7	7,3	4,4 à 6,1	5,2	
TH (°f)	7,6 à 9,2	8,5	5,7 à 7,3	6,6	
Ca ²⁺ (°f)	6,4 à 7,5	7,2	4,8 à 6,0	5,4	
Conductivité (µS/cm)	182 à 209	193	181 à 206	193	
Aluminium total (µg Al/L)	24 à 57	40	-	-	
Bactéries aérobies revivifiables à 22°C 72H en UFC/mL (Flore prédominante)	Prél. 1	Prél. 2	Prél. 3	Prél. 4	Prél. 5
Gérardmer	8 (Pf)	5	0	380 (Ci)	0
La Bresse	0	8 (Pf)	2 (Pf)	6 (Pf)	0

Tableau 23 : Caractéristiques principales des eaux d'alimentation des deux piscines pendant la période expérimentale

Les deux eaux d'alimentation sont donc deux eaux douces, peu minéralisées, dont les caractéristiques physico-chimiques, peu variables dans le temps, ont été assez proches pendant notre période expérimentale.

La seule différence notable a été observée sur la qualité microbiologique de ces eaux puisque l'un des cinq échantillons de l'eau alimentant la piscine de Gérardmer présentait, pour la flore revivifiable à 22 °C, une concentration de 380 UFC / mL (CMA = 100), avec une prédominance de *Chryseobacterium indologenes* (i.e. *Flavobacterium indologenes*). Pour le réseau de La Bresse, les teneurs relevées ont toujours été inférieures à 10 UFC / mL avec une prédominance de *Pseudomonas fluorescens*.

IV.3.3 Réalisation des prélèvements et des analyses

IV.3.3.1 Prises d'échantillons

L'expérimentation s'est déroulée du mardi 22 juin au vendredi 23 juillet 1999. Les prélèvements ont été effectués à raison de un par jour ouvrable, soit au total 23 pour chacun des deux bassins.

Tous les prélèvements ont été réalisés le matin entre 9h et 10h, à un moment où la fréquentation journalière de chaque bassin était encore nulle. Cette précaution nous a permis de nous affranchir des perturbations de la qualité de l'eau de piscine, liées à la présence de baigneurs avant ou pendant la prise d'eau.

L'ensemble des flacons utilisés pour les prises d'échantillons a été fourni par le LHRSP. Les prélèvements ont été réalisés au sein même de chaque bassin, à l'aide d'une canne, à environ un

mètre du bord et un mètre de profondeur (fond du bassin). Les précautions nécessaires à la stérilité des échantillons destinés aux analyses microbiologiques ont été respectées (flacon stérile et proximité d'une flamme).

IV.3.3.2 Neutralisation des désinfectants

Pour la piscine de La Bresse, les flacons étaient imbibés de thiosulfate, destiné à neutraliser le désinfectant chloré.

Pour le PHMB, le neutralisant habituel a été utilisé, à savoir une solution à 3% de lécithine de soja et à 20 % de polysorbate 20. PAQUIN J.L. (1985) a montré que cette formule, proposée par ICI, ne présente pas de pouvoir toxique vis à vis des bactéries pendant au moins 6 heures [40].

Pour le besoin de notre expérimentation, la non-toxicité de ce neutralisant a été testée pour un temps de 24 heures par le LHRSP. Les résultats obtenus ont montré que la diminution observée ne correspondait pas à un effet toxique du neutralisant, puisque le nombre de germes revivifiables à 22°C après 24 H était supérieur ou égal à la moitié du nombre initial, dans trois essais sur quatre (normes AFNOR).

Chaque échantillon a ainsi pu être analysé 24 heures après avoir été prélevé, délai qui nous a été nécessaire pour des raisons liées au transport de ces échantillons de Gérardmer à Nancy.

IV.3.3.3 Réalisation des analyses

L'ensemble des analyses physico-chimiques et microbiologiques a été réalisé par le Laboratoire d'Hygiène et de Recherche en Santé Publique de Vandoeuvre-Lès-Nancy, laboratoire agréé par le Ministère chargé de la Santé. Les analyses de la surveillance sanitaire de la qualité des eaux de la piscine de Gérardmer sont effectuées par ce laboratoire depuis 1982.

Notre travail a pu être réalisé en parfaite collaboration avec Monsieur J.L. PAQUIN (responsable du département microbiologie du LHRSP), qui a notamment pu nous faire bénéficier de son expérience sur le procédé de désinfection au PHMB.

IV.3.4 Mise en œuvre des procédés de traitement d'eau

IV.3.4.1 Bassin ludique de La Bresse

Pendant les cinq semaines de prélèvement, aucune modification n'a été apportée au procédé de traitement de l'eau du bassin ludique de la piscine de La Bresse.

Cet établissement possède un circuit hydraulique commun à l'ensemble de ses quatre bassins (grand bassin, bassin ludique, pataugeoire et fosse toboggan), le volume d'eau total (616 m³) passe ainsi sur les deux mêmes filtres disposés en parallèle. L'injection de WAC est réalisée en continu, en amont des deux filtres.

Par contre, les injections de désinfectant et d'acide chlorhydrique dans le bassin ludique sont indépendantes et asservies uniquement à la qualité de l'eau de ce bassin. Chaque dimanche soir est réalisée une chloration choc par ajout de 3 à 4 kg d'hypochlorite de calcium pour les 616 m³ d'eau.

IV.3.4.2 Petit bassin de Gérardmer

Le circuit hydraulique du petit bassin est totalement indépendant de celui du grand bassin, et possède en particulier son propre filtre.

La mise en œuvre du procédé de traitement de l'eau du petit bassin, pratiquée pendant notre expérimentation, a dû tenir compte à la fois de nos objectifs et de la situation existante. Ainsi, les caractéristiques du traitement ont été les suivantes :

- régulation du pH à 7,5 avec l'apport de gaz carbonique ;
- maintien de l'injection quotidienne, étalée sur quelques heures en soirée (pompe doseuse), du PHMB, de façon à conserver une concentration voisine de 25 mg/L en Baquacil. Cette valeur correspond à la moyenne des concentrations observées entre janvier 1998 et juin 1999. Le point d'injection du PHMB en aval du filtre n'est pas non plus modifié. Il faut noter que la méthode de dosage par colorimétrie n'autorise pas l'asservissement de l'injection de Baquacil à sa concentration dans le bassin ;
- maintien de l'injection quotidienne, étalée sur plusieurs heures en soirée (pompe doseuse), de 0,5 litres de la solution de WAC en amont du filtre. Cette quantité correspond à la valeur minimale préconisée par le fabricant (Bayrol) ;
- maintien du lavage du filtre, chaque mercredi et samedi soir. Le lavage a été réalisé avec 15 m³ d'eau de bassin, puis 15 m³ d'eau de réseau et le rinçage avec 15 m³ d'eau de réseau. Le personnel a pu avoir recours à un décolmatage à l'air s'il l'a jugé souhaitable ;
- maintien de l'ajout, après le lavage du filtre du samedi, de 30 litres de Baqua Shock (solution à 35 % en masse de peroxyde d'hydrogène). Cet ajout a pu être également réalisé après le lavage du mercredi, s'il en a été jugé nécessaire par le personnel technique. Ce volume de 30 litres correspond à la dose choc recommandée par Zeneca (35 mg H₂O₂ / L), mais à une fréquence hebdomadaire et non mensuelle;
- ajout de 2 litres de Baqua Check (algicide à base d'ammonium quaternaire) chaque lundi soir, directement dans le bassin, cette quantité correspondant à celle préconisée par Zeneca ;
- le recours à l'ajout quotidien d'hypochlorite de calcium a été supprimé, toutefois, en cas de problème de transparence de l'eau, le personnel technique a pu faire appel à ce produit s'il l'a jugé nécessaire.

IV.4 Résultats et discussion

IV.4.1 Mesure de la concentration en Baquacil

Au cours des cinq semaines d'expérimentation, la concentration en Baquacil dans le bassin de Gérardmer a varié entre 10 et 50 mg/L.

Il a été très difficile, pour le personnel de la piscine, de maintenir une concentration constante du fait des imprécisions de mesure observées avec la méthode de dosage de terrain, utilisée à Gérardmer depuis 1982 (cf. paragraphe IV.3.1.3).

Les valeurs lues par le personnel technique peuvent être comparées avec celles obtenues par le laboratoire dans le tableau 24 ci-dessous.

Jour	mar	mer	jeu	ven	lun	mar	mer	jeu	ven
Date	22/06	23/06	24/06	25/06	28/06	29/06	30/06	01/07	02/07
[Baquacil] terrain (mg/L)	30	30	30	30	25	30	35	30	30
[Baquacil] labo (mg/L)	35	35	31,5	19,5	24	48	50	34	38
Jour	lun	mar	mer	jeu	ven	lun	mar	jeu	ven
Date	05/07	06/07	07/07	08/07	09/07	12/07	13/07	15/07	16/07
[Baquacil] terrain (mg/L)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
[Baquacil] labo (mg/L)	20	36	32	22	27	32	25	16	19
Jour	lun	mar	mer	jeu	ven				
Date	19/07	20/07	21/07	22/07	23/07				
[Baquacil] terrain (mg/L)	30	30	30	30	30				
[Baquacil] labo (mg/L)	15	13	10	13	11,5				

Tableau 24 : Comparaison de la concentration en Baquacil obtenue avec les méthodes de dosage de terrain et de laboratoire

Les différences de valeurs obtenues avec les deux méthodes de dosage sont donc flagrantes. Ces différences s'expliquent par la difficulté, sur le terrain, malgré l'expérience du technicien, d'apprécier l'intensité de la couleur bleue développée. Ainsi l'opérateur ne peut guère faire de distinction entre 25 et 50 mg/L.

La méthode de terrain par comparaison de couleurs ne semble donc pas satisfaisante et il apparaît nécessaire de se munir d'un spectrophotomètre pour garantir une concentration minimale en Baquacil dans le bassin.

Les mesures effectuées par le laboratoire montrent que la concentration en Baquacil a été assez variable pendant l'expérimentation. Cette variabilité n'a pas été uniquement liée à la modification de la quantité de Baquacil ajoutée quotidiennement.

En effet, nous avons pu montrer qu'il existe, dans la méthode de dosage du Baquacil, une interférence entre le PHMB et l'ammonium quaternaire ajouté les lundis 28/06, 05/07 et 12/07. Pour cela, nous avons effectué deux prélèvements de 1 litre dans le grand bassin de la piscine de Gérardmer, en ajoutant dans l'un des deux échantillons deux gouttes de la solution d'algicide, dose correspondant approximativement au traitement recommandé de 1 litre d'algicide pour 100 m³ d'eau.

La mesure de la concentration en Baquacil effectuée par le laboratoire a donné 98 mg/L pour l'échantillon contenant l'algicide et 22 mg/L pour l'échantillon non modifié.

L'existence de cette interférence entre les deux composés explique ainsi les différences de valeurs observées entre les lundis et les mardis, les échantillons étant prélevés les matins et l'algicide ajouté le lundi soir.

Ce manque de spécificité de la méthode de dosage avait déjà été mis en évidence en 1985 par ZMIROU J., qui observait alors une interférence avec l'ion ammonium, ce phénomène semblant pouvoir être expliqué par la propriété qu'a l'éosine de former un complexe coloré avec l'ensemble des composés ammoniacés [33].

IV.4.2 Efficacité du procédé de traitement à Gérardmer

IV.4.2.1 Interaction du PHMB avec les composés métalliques

Pendant la première semaine d'expérimentation, le personnel de la piscine a observé, le jeudi et le dimanche matin, l'apparition d'un trouble blanc dans l'eau du bassin. Comme en 1997, ce phénomène s'est donc produit après le lavage du filtre, celui-ci relâchant des particules après sa remise en service.

Des phénomènes d'interaction du PHMB avec les éléments métalliques, et notamment l'aluminium, ayant été mis en évidence par ZMIROU J. (1985), nous avons choisi d'arrêter temporairement l'ajout de coagulant, ce qui nous a permis de vérifier si cet ajout avait un lien avec la teneur en aluminium de l'eau du bassin (tableau 25).

Période	Ajout de WAC	Teneur en aluminium total dans le bassin ($\mu\text{g Al / L}$)	
		Domaine de variation	Moyenne
22 juin au 28 juin	Oui	7 à 49	32
29 juin au 13 juillet	Non	14 à 178	68
15 juillet au 23 juillet	Oui	58 à 96	75

Tableau 25 : Teneur en aluminium dans le bassin, lien éventuel avec l'ajout de WAC

La teneur en aluminium total dans le bassin semble donc légèrement supérieure à celle observée dans l'eau de réseau (24 à 57 $\mu\text{g/L}$ avec une moyenne de 40 $\mu\text{g/L}$), sans pour autant être liée à l'ajout de coagulant. Il apparaît donc que la quantité d'aluminium libérée dans l'eau par le WAC est très faible, ce à quoi s'engage d'ailleurs le fabricant.

Selon ZMIROU J.[33], ces faibles teneurs sont suffisantes pour engager une interaction entre Al^{3+} et le PHMB, toutefois le suivi de la turbidité de l'eau nous permet de montrer qu'il n'y a pas eu de lien apparent entre les problèmes de transparence et la teneur en aluminium total de l'eau (tableau 26).

Date	22/6	23/6	24/6	25/6	28/6	29/6	30/6	01/7	02/7	05/7	06/7	07/7
Jour	mar	mer	jeu	ven	lun	mar	mer	jeu	ven	lun	mar	mer
Turbidité (NTU)	1,31	0,47	0,56	0,35	0,6	1,9	1,86	0,94	0,92	0,77	0,86	1,6
Al total ($\mu\text{g/L}$)	47	49	7	22	21	22	14	54	62	68	52	48
Date	08/7	09/7	12/7	13/7	15/7	16/7	19/7	20/7	21/7	22/7	23/7	
Jour	jeu	ven	lun	mar	jeu	ven	lun	mar	mer	jeu	ven	
Turbidité (NTU)	0,76	0,65	0,47	0,76	0,38	0,37	0,22	0,93	0,41	0,27	0,39	
Al total ($\mu\text{g/L}$)	81	75	178	98	94	96	92	72	66	58	60	

Tableau 26 : Evolution de la turbidité et de la teneur en aluminium

Ce suivi analytique montre notamment que les pics de turbidité ne correspondent pas à une teneur relativement élevée en aluminium, et plus généralement qu'il n'y pas de lien apparent entre ces deux paramètres de l'eau du bassin.

L'interaction entre le PHMB et le calcium semble encore moins probable dans l'eau douce de la piscine de Gérardmer. En effet, la teneur en cet élément a été comprise, pendant

l'expérimentation, entre 5,8 et 8,6 °f, ce qui selon les résultats de ZMIROU J. laisse peu de chance d'observer une réaction de complexation entre les deux composés.

Il semble donc, au vu de ces résultats, que le trouble observé, dès la première semaine d'expérimentation, ne soit pas dû à une interaction du PHMB avec les cations métalliques présents dans l'eau du bassin, et que sa nature soit davantage organique que minérale.

IV.4.2.2 Efficacité de la filtration

Le procédé de traitement décrit précédemment (paragraphe IV.3.4.2) a été expérimenté avec et sans l'apport quotidien de WAC. Cela nous a permis notamment de vérifier la pertinence de l'emploi à Gérardmer d'un coagulant dans le procédé Baquacil, qui est présenté, par Zeneca, comme la seule combinaison de trois produits principaux que sont le PHMB, le peroxyde d'hydrogène et le didécyl diméthylammonium.

Le suivi de la turbidité nous a permis d'observer fort logiquement l'importance de l'acidification (en présence de WAC) et du lavage du filtre dans l'efficacité du procédé de traitement.

Ainsi, comme le montrent les valeurs du tableau 26, pour une semaine donnée, le maximum de la turbidité a systématiquement été observé le mardi ou le mercredi matin, à la fin du cycle de filtration (défini comme la durée entre deux lavages). L'acidification, qui a démarré le matin du mercredi 23 juin, a eu pour conséquence une chute de la turbidité qui est passée de 1,31 à 0,47.

L'observation quotidienne de la qualité de l'eau par le personnel de la piscine nous a permis de constater que l'absence de coagulant dans le procédé de traitement se traduit, à la piscine de Gérardmer, par l'obligation de réduire le cycle de filtration. En effet, pendant les deux semaines de fonctionnement sans WAC, le personnel a observé, à trois reprises, des problèmes aigus de transparence de l'eau, qui sont survenus environ 48 heures après un lavage.

Après cette durée de fonctionnement, le filtre semble en effet être encrassé sur toute la hauteur du massif filtrant et il s'en suit une évacuation dans le bassin des particules retenues. A chaque fois, le personnel a réussi à reprendre l'eau en ajoutant 100 grammes d'hypochlorite de calcium (0,04 °f de Ca^{2+} et 0,4 mg/L de chlore libre).

L'utilisation de WAC en dehors de ces deux semaines a permis d'éviter ces phénomènes de percement du filtre, mais la transparence de l'eau n'a pas été toujours satisfaisante, notamment après la remise en service du filtre suivant un lavage, et ce, malgré l'ajout de peroxyde d'hydrogène à 35 mg/L.

L'utilisation du PHMB, selon la mise en œuvre définie précédemment et avec le type de filtre existant à Gérardmer, nécessite donc la définition précise d'une procédure de lavage, qui malgré les efforts déjà consentis (volume d'eau important, fréquence élevée...) ne semble pas suffisante pour garantir une régénération satisfaisante du massif filtrant.

IV.4.3 Efficacité du PHMB

Notre suivi analytique nous a permis enfin de mener une comparaison de la qualité microbiologique de l'eau de la piscine de Gérardmer à celle de La Bresse.

L'objectif était, tout en tenant compte des incertitudes liées à une expérimentation en grandeur réelle, de comparer, dans des conditions de fonctionnement similaires (installation technique et eau d'alimentation), le niveau de la flore revivifiable à 22°C et les phénomènes éventuels de sélection, dont la différence ou la similitude pouvaient être vraisemblablement imputables au type de désinfectant employé. Les résultats analytiques sont les suivants :

- petit bassin de la piscine de Gérardmer :
 - flore revivifiable à 22°C : pour 16 échantillons sur 23 (70%), la concentration est supérieure à 600 UFC / mL et seuls trois échantillons (13%) possèdent une concentration nulle. *Chryseobacterium indologenes* (*Flavobacterium indologenes*) et *Sphingomonas paucimobilis* ont été identifiées respectivement dans 17 et 6 échantillons ;
 - germes pathogènes : un seul échantillon présentait 3 staphylocoques pathogènes dans 100 mL, *Pseudomonas aeruginosa* n'ayant jamais été mis en évidence ;
- bassin ludique de la piscine de La Bresse :
 - flore revivifiable à 22°C : cette flore est absente pour 70% des échantillons, et sa concentration dans les 7 échantillons restants est comprise entre 1 et 50 UFC / mL. La flore prédominante identifiée est *Pseudomonas fluorescens* ;
 - germes pathogènes : un seul échantillon présentait un staphylocoque pathogène pour 100 mL et *Pseudomonas aeruginosa* n'a jamais été mis en évidence.

Les résultats obtenus pour les deux germes pathogènes recherchés sont tout à fait similaires et confirment les observations formulées précédemment sur l'efficacité satisfaisante du PHMB vis à vis des staphylocoques pathogènes et de *Pseudomonas aeruginosa*.

Par contre au vu des résultats de cette expérimentation et de ceux du suivi sanitaire, il semble que la flore revivifiable à 22°C soit, presque en permanence, présente à des niveaux très élevés dans les eaux du petit bassin de Gérardmer.

Ces concentrations importantes semblent pouvoir être expliquées par des phénomènes de résistance de certains germes composants cette flore. En effet, l'identification a permis de retrouver les germes pour lesquels une sélection avait déjà été mise en évidence dans les expérimentations précédentes. Ainsi, *Sphingomonas paucimobilis* est la même souche que celle identifiée à Gérardmer entre 1982 et 1985 par PAQUIN J.L. [40], et *Chryseobacterium indologenes* correspond à *Flavobacterium indologenes*, mis en évidence dans les eaux de la piscine de Saint Gilles en 1986 (cf. paragraphe IV.4.4.7). Ces bactéries appartiennent à des genres proches, apparentés au genre *Pseudomonas*.

Ces genres semblent particulièrement résistants à la désinfection en piscine puisque *Pseudomonas fluorescens* a été identifiée dans trois échantillons de l'eau du bassin ludique de La Bresse.

IV.5 Conclusion

L'expérience de l'emploi du PHMB à Gérardmer et de l'hypochlorite de calcium stabilisé à La Bresse, dans des conditions de fonctionnement et d'alimentation en eau comparables, permet de tirer les conclusions suivantes :

- sur le plan sanitaire, les deux produits semblent satisfaisants quant à l'abattement de la flore pathogène. En revanche, la persistance à Gérardmer, d'une flore aérobie revivifiable à 22°C importante, et l'identification de bactéries apparemment résistantes au PHMB, proches du genre *Pseudomonas*, incitent à penser que ce désinfectant ne remplit pas un rôle antibactérien global satisfaisant ;
- sur le plan de la mise en œuvre, malgré des conditions de filtration favorables, le maintien d'une eau limpide traitée au PHMB semble difficile à obtenir, malgré l'utilisation de WAC et de peroxyde d'hydrogène. Enfin, le défaut de fiabilité de la méthode de dosage sur le terrain est un obstacle important au maintien d'une concentration résiduelle en PHMB satisfaisante ;

- sur le plan du contrôle, l'interférence dans la méthode de dosage colorimétrique, entre le PHMB et les substances ammoniacales apparaît préoccupante.

CONCLUSION

Ce mémoire a permis de faire la synthèse des connaissances actuelles sur le procédé de désinfection au PHMB. Ces connaissances reposent sur quatre expériences complémentaires du composé :

- des essais de laboratoire sur son comportement et son efficacité antimicrobienne ;
- les expérimentations en grandeur réelle menées en Grande Bretagne en 1977 et en France entre 1982 et 1986 ;
- les bilans départementaux de son utilisation en France entre 1989 et 1999 ;
- l'expérimentation à la piscine de Gérardmer entre 1982 et 1999.

La synthèse de ces résultats, acquis sur plus de vingt ans, permet de tirer les conclusions suivantes sur le PHMB :

- **sur son efficacité antimicrobienne :**

- il permet de respecter les normes microbiologiques actuellement applicables aux piscines recevant du public ;
- il semble être efficace vis à vis de *Pseudomonas aeruginosa* ;
- certains germes aérobies revivifiables à 22°C semblent lui être résistants ;
- il n'est pas virucide ;

- **sur les risques induits par son utilisation :**

- sa toxicité intrinsèque est faible ;
- il ne génère pas de sous produits, ce qui constitue une satisfaction sur le plan sanitaire (absence de risque chimique), et sur celui du confort des usagers (absence d'odeurs et d'irritations oculaires) ;
- les risques liés à sa manipulation et à son stockage sont minimes ;

- **sur sa mise en œuvre :**

- il présente un bon caractère rémanent dans l'eau ;
- sa manipulation et son stockage sont simples ;
- sa méthode de dosage sur le terrain n'est pas fiable et constitue un obstacle important au maintien d'une concentration résiduelle satisfaisante ;
- sa méthode de dosage en laboratoire n'est pas satisfaisante du fait de l'existence d'interférences avec les composés azotés tels que NH_4^+ et l'algicide proposé par le fabricant ;
- son dosage par colorimétrie ne permet pas de concevoir un système d'injection asservi à sa concentration dans le bassin ;
- son caractère flocculant le rend exigeant en matière de filtration, il reste à définir les caractéristiques d'un filtre adéquat, permettant d'éviter les problèmes de transparence qui peuvent être liés à son utilisation.

Avant de conclure, il paraît utile de rappeler les enjeux d'une décision éventuelle concernant l'autorisation du PHMB :

- d'évidence, le contexte est beaucoup plus à la sécurité sanitaire aujourd'hui qu'il y a dix ans. En particulier, la municipalité de Gérardmer a manifesté une volonté forte de mettre fin à une

situation d'incertitudes quant au risque sanitaire encouru par les usagers de la piscine municipale. C'est cette volonté qui a conduit à la commande par la Direction Générale de la Santé et la DDASS des Vosges d'un rapport de synthèse des connaissances ;

- d'autre part, il paraît acquis que Zeneca ne semble pas considérer le marché des piscines publiques comme porteur pour le PHMB. L'analyse de leur brochure et un échange récent de messages électroniques avec le siège de cette société confirme cette position. En outre, les responsables de Zeneca ne semblent pas prêts à conduire des expérimentations supplémentaires en vue de l'autorisation d'un produit générique.

Nous espérons que les éléments avancés dans ce mémoire seront de nature à aider le CSHPF à se prononcer sur l'autorisation du PHMB pour la désinfection des eaux de piscine en France.

ANNEXES

Annexe 1 : Principaux textes législatifs et réglementaires français relatifs aux piscines de loisirs et de remise en forme recevant du public.

Annexe 2 : Résultats détaillés de trois études de laboratoire portant sur l'activité antibactérienne du PHMB.

Annexe 3 : Caractéristiques techniques des piscines choisies pour l'expérimentation du Baquacil en France entre 1982 et 1986.

Annexe 4 : Résultats du sondage des usagers de la piscine de Saint Gilles Croix de Vie, effectué en 1986, et portant sur les changements apportés par l'utilisation du Baquacil.

Annexe 5 : Canevas proposé par le Ministère chargé de la Santé à l'ensemble des départements français, pour la réalisation des bilans départementaux de l'utilisation du PHMB entre 1989 et 1992.

Annexe 1

Principaux textes législatifs et réglementaires français relatifs aux piscines de loisirs et de remise en forme recevant du public

- Articles L.25.2 à L.25.5 du code de la Santé Publique (loi du 12 juillet 1978).
- Décret du 07 avril 1981 modifié fixant les normes d'hygiène et de sécurité applicables aux piscines et aux baignades aménagées.
- Arrêté du 07 avril 1981 fixant les dispositions administratives applicables aux piscines et aux baignades aménagées.
- Arrêté du 07 avril 1981 fixant les dispositions techniques applicables aux piscines.
- Arrêté du 28 septembre 1989 modifiant l'arrêté du 07 avril 1981 fixant les dispositions techniques applicables aux piscines.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MINISTERE CHARGE DE LA SANTE : Piscines, Hygiène et Santé. Association Régionale d'Auvergne pour la Promotion de l'Hygiène (ARAPH), DDASS-DRASS Auvergne, 3^{ème} édition, mai 1997, 122 p.
- [2] LHEUREUX C. : Enquête nationale sur les incidents et pollutions accidentelles en piscines. Mémoire de fin d'études, formation des ingénieurs du génie sanitaire, ENSP, 1997, 92 p.
- [3] BOUKARI M. : Pollution des bassins de natation : modalités pour améliorer leur fonctionnement. INSA de Toulouse, Université Paul Sabatier, 1995, 164 p. (thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, spécialité : Physique et Chimie de l'Environnement).
- [4] SUNDKVIST T., DRYDEN M., GABB R., SOLTANPOOR N., CASEMORE D., STUART J. (Nov. 1997) : Outbreak of cryptosporidiosis associated with a swimming pool in Andover. *Commun. Dis. Rep. CDR Rev.*, 14 ; 7 (12), R 190-2.
- [5] BYG KE., MILMAN N., CLAUSEN PP., RADULESCU B. (sep. 1997) : *Mycobacterium marinum*. A rare cause of infection of the skin and joints. *Ugeskr. Laeger* 1 ; 159 (36), 5384-6.
- [6] CORBETT R. (fév. 1999) : Pseudomonas folliculitis from a spa pool in an immunocompromised patient. *N. Z. Med. J.* 26 ; 112 (1082), 59.
- [7] SHIRTCLIFFE P., ROBINSON GM. (oct. 1998) : A case of severe Pseudomonas folliculitis from a spa pool. *N. Z. Med. J.* 9 ; 111 (1075), 389.
- [8] HANSEN UD. (juil. 1997) : Otitis externa among users of private swimming pools. *Ugeskr. Laeger* 7 ; 159 (28), 4383-8.
- [9] PAPAPETROPOULOU M., VANTARAKIS AC. (jan 1998) : Detection of adenovirus outbreak at a municipal swimming pool by nested PCR amplification. *J. Infect.* ; 36 (1), 101-3.
- [10] LEJEUNE B. : Intérêt de la surveillance microbiologique des eaux récréatives. Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.
- [11] GOETZ ML., VAUTRAVERS MJ., VAUTRAVERS PH., HARTEMANN PH. : L'hygiène des piscines de rééducation. Pathologie rencontrée dans les piscines de rééducation, 1991, pp. 11-14.
- [12] BONJOUR D. : Etude de la contamination des sols et du film superficiel des bassins de natation. Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.
- [13] CHASLES F., PAYEN G. : Biocontamination des plages et du matériel d'animation utilisé en piscine couverte. Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.
- [14] POULIQUEN C., SAUNIER B. : Mise au pont d'une procédure de contrôle de la filtration des eaux de piscine. Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.

- [15] DECLUDT B., PERROCHEAU A., CERASE-FEURRA V : Les légionelloses déclarées en France en 1997. Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire N°6/1999, 9 février 1999.
- [16] MASSIN N., BOHADANA AB., WILD P., HERY M., TOAMAIN JP., HUBERT G. (1998) : Respiratory symptoms and bronchial responsiveness in lifeguards exposed to nitrogen trichloride in indoor swimming pools. *Occup. Environ. Med.* ; 55, 258-63.
- [17] SEUX R., BATTO M., CLEMENT M., BEAUDUCEL B. : Evolution des chloroisocyanurates en solution aqueuse et comportement des formes chlorées vis à vis de la diéthylparaphénylènediamine (D.P.D.). Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.
- [18] DRASS et DDASS de Lorraine – BMH de la ville de Metz : Etude des piscines soumises au contrôle sanitaire, décembre 1996, 23 p.
- [19] DUVAL J.(1978) : Activité bactéricide des principales familles d'antiseptiques. Synthèse des résultats obtenus par le groupe « antiseptiques ». *Rev. Inst. Pasteur Lyon*, 11, 457-68.
- [20] HERY M., HECHT G., GERBER JM., GENDRE JC., HUBERT G., BLACHERE V., REBUFFAUD J., DOROTTE M. (1993) : Exposition aux chloramines dans les atmosphères dans les halls de piscine. Cahiers de notes documentaires n° 156, 3^{ème} trimestre 1994, INRS.
- [21] GAGNAIRE F., AZIM S., BONNET P., HECHT G., HERY M. (1993) : Pouvoir irritant du chlore et du trichlorure d'azote chez la souris. Cahiers de notes documentaires n° 156, 3^{ème} trimestre 1994, INRS.
- [22] SCOTT P. : Evolutions comparées de la formation d'organochlorés volatils en piscine, pour divers désinfectants. Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.
- [23] HERY M., HECHT G., GERBER JM., GENDRE JC., HUBERT G., REBUFFAUD J. (1995) : Exposure to chloramines in the atmosphere of indoor swimming pools. *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 39, n°4, 427-39.
- [24] FRANKLIN TJ., SHOW GA. : Biochemistry of antimicrobial action. London : Chapman et Hall, 1975.
- [25] LONGWORTH AR. : Chlorhexidine. In : Inhibition and destruction of the bacteria cell, Hugo WB., Academic Press, 1971.
- [26] MAILLARD JY., RUSSEL AD. (1997) : Viricidal activity mechanisms action biocides. *Science Progress*, 80 (4), 287-315.
- [27] CREMIEUX A., FLEURETTE J., FOURTILLAN JB., JOLY B., SOUSSY CJ. : Les antiseptiques. Editions SARGET, 1982, 179 p.
- [28] PRINCE HN., NONEMAKER WS., NORGDARD RC., PRINCE DL. (1978) : Drug resistance studies with topical antiseptics. *J. Pharm. Sci.*, 67, 1629-31.
- [29] ALYR R., MAIBACH HI. (1976) : Effect of antimicrobial soap containing chlorhexidine on the microbial flora of the skin. *Appl. Environ. Microbiol.*, 31, 931-35.
- [30] CREMIEUX A., CAZAC JL., GUIRAUD-DAURIAC H., DUMENIL G. (1981) : Modifications de flore suite à l'usage d'antiseptiques cutanés. *J. Pharm. Belg.*, 36, 380-88.

- [31] E.N.S.P. et Société Imperial Chemical Industries : Pouvoir désinfectant et comportement du Baquacil (PHMB) en solution aqueuse (compléments d'informations en vue d'une demande d'agrément d'utilisation en piscine publique), novembre 1985, 22 p.
- [32] RAY P. (1960) : Complex compounds of Biguanides and guanylureas with metallic elements. *Chemical Reviews*, 61, 313-59.
- [33] Zmirou J. : Etude physico-chimique du comportement d'un produit désinfectant non chloré vis à vis des principaux constituants des eaux de piscine. Mémoire de fin d'études, formation des ingénieurs du génie sanitaire, ENSP, 1985, 104 p.
- [34] Zeneca : Baquacil, désinfectant sans chlore pour piscines ; guide de l'utilisateur. Brochure, publiée par Zeneca Biocides, 1996, 26 p.
- [35] I.C.I. France : Résumé synoptique des essais effectués sur le PHMB ; toxicologie et environnement. Annexe 35 de l'additif à la demande d'autorisation pour l'emploi du Baquacil pour le traitement des eaux de piscines, décembre 1981.
- [36] I.C.I. France : Baquacil, complément à notre dossier de demande d'autorisation en piscines publiques suite aux essais effectués en 1983. Rapport d'expérimentations, janvier 1984, 41 p.
- [37] I.C.I. France : Demande d'autorisation du Baquacil SB, chlorhydrate de polyhexaméthylène biguanide, pour le traitement des eaux de piscines. Rapport de présentation, 1979.
- [38] BROXTON P., WOODCOCK PM., GILBERT P. (1984) : Binding of some polyhexamethylene biguanides to the cell envelope of *Escherichia coli* ATCC 8739. *Microbios.*, 41 (163), 15-22.
- [39] DYCHOALA GR. : Chlorine et chlorine compounds. In : Disinfection, sterilization and preservation / Block SS., 2nd édition, Philadelphia : Lea and Febiger, 1977.
- [40] PAQUIN JL. : Contribution à l'étude d'un nouveau désinfectant pour eaux de piscines : le chlorhydrate de polyhexaméthylène biguanide. Université de Nancy I, 1985, 32 p. (DEA de Nutrition, option Médicaments, Microorganismes et Nutrition).
- [41] A.F.N.O.R. : Guide de présentation des normes pour l'utilisateur de désinfectants dans les secteurs hospitalier, médical et dentaire. Fascicule de documentation publié par l'AFNOR, référence T 72-102, 1997, 11 p.
- [42] PERRINE D. : Activité comparée, chlore, surchlor et Baquacil sur les amibes. Rapport d'expérimentations réalisées au laboratoire de Parasitologie de Georges P.
- [43] BLOCK JC. : Inactivation des microorganismes de l'eau par l'ozone. Dans : Ozone et Ozonation des Eaux, Masschelein WJ. (coordonnateur), éditions Lavoisier Tec et Doc, 381 p. (2^{ème} édition).
- [44] SEUX R., WEICHERDING J., BESSE P., ALOUINI Z. : Etude qualitative et quantitative de la pollution apportée par les baigneurs. Réactions globales avec le chlore. Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.
- [45] BESSE P., ALOUINI Z., SEUX R. : Devenir de l'urée dans les eaux de piscines. Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.

- [46] LE GUENNIC A., BRILLET B. : Action d'information et de formation des exploitants de piscine en matière d'hygiène. Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.
- [47] LAFARGUE G., PENVERNE Y. : Les systèmes d'aération dans les piscines. Leurs incidences sur le confort thermique des baigneurs et des maîtres-nageurs. Recueil des actes du Colloque National de Rennes : Piscine et Santé, ENSP, 1985.
- [48] BEAULIEU R. : Influence du couplage ozone / charbon actif sur la qualité des eaux de piscine. Mémoire de fin d'études, formation assistants de génie sanitaire, ENSP, 1991.
- [49] WARREN IC., RIDGWAY J. : Swimming pool disinfection. W.R.C. Technical Report, 1978.
- [50] DoE : Baquacil as a swimming pool water disinfectant. Correspondance avec le Ministère chargé de la Santé, décembre 1986, 2 p.
- [51] MEAD J.B. : Trial of Baquacil SB at Chorley baths. Rapport d'expérimentations, 1977, 1 p.
- [52] DoE : The treatment and quality of swimming pool water. Departmental Publication, 1984 p. 26.
- [53] DoE : The treatment and quality of swimming pool water. Departmental Publication, 1999.
- [54] DDASS des Alpes Maritimes (Service Santé Environnement) : Essais d'un nouvel agent désinfectant pour piscines : le Baquacil. Rapport de synthèse, 1983, 55 p.
- [55] DDASS des Vosges (Service Santé Environnement) : Compte-rendu de l'expérience du produit Baquacil à la piscine de Gérardmer. Rapport de synthèse, 1986, 29 p.
- [56] DDASS du Val de Marne (Service Santé Environnement) ; Rapport sur l'expérimentation du produit Baquacil à la piscine de Fontenay sous Bois. Rapport de synthèse, 1984.
- [57] DDASS de la Charente Maritime (Service Santé Environnement) : Expérimentation de désinfection au Baquacil, piscine municipale de Saintes. Rapport de synthèse, 1986, 15 p.
- [58] DDASS de la Vendée (Service Santé Environnement) : Essais de désinfection par le Baquacil, piscine municipale de Saint Gilles Croix de Vie. Rapport de synthèse, 1987, 18 p.
- [59] I.C.I : Baquacil. Correspondance avec le DoE, octobre 1986, 3 p.
- [60] I.C.I France : Dosages recommandés et maximum pour le Baquacil et l'additif. Annexe 41 de l'additif à la demande d'autorisation pour l'emploi du Baquacil pour le traitement des eaux de piscines, décembre 1981.
- [61] I.C.I France : Efficacité sur les virus. Annexe 39 de l'additif à la demande d'autorisation pour l'emploi du Baquacil pour le traitement des eaux de piscines, décembre 1981.
- [62] I.C.I France : Efficacité sur les amibes. Annexe 38 de l'additif à la demande d'autorisation pour l'emploi du Baquacil pour le traitement des eaux de piscines, décembre 1981.
- [63] I.C.I. : Baquacil, essai à Chorley, 1977. Correspondance avec le Ministère chargé de la Santé, décembre 1986, 2 p.

[64] MILLIS NF., EAGER E., HAY AJ., KASIAN PA., PICKERING WJ., TAN MA. (1981) : Survey of bacteria in private swimming pools. *Med. J. Aust.*, 1, 573-75.

[65] I.C.I France : Additif à la demande d'autorisation pour l'emploi du Baquacil pour le traitement des eaux de piscines, annexes 32 à 43. Rapport d'annexes, décembre 1981.

[66] BRAULT JY. : Rapport sur l'expérimentation du chlorhydrate de polyhexaméthylène biguanide pour la désinfection de l'eau de la piscine municipale de Gérardmer. Rapport d'expérimentations, mai 1999, 30 p.

[67] SPRINGTHORPE S., GRENIER JL., LLOYD-EVANS N., SATTAR SA. (1986) : Chemical disinfection of human rotaviruses : efficacy of commercially-available products in suspension tests. *J. Hyg. Camb.*, 97, 139-61.