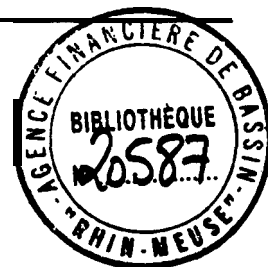


UNIVERSITE HENRI POINCARÉ - NANCY 1

1996

ECOLE DOCTORALE "BIOLOGIE ET SANTE"



# THESE

présentée et soutenue publiquement  
le 29 Mai 1996

pour obtenir le titre de

## DOCTEUR DE L'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ - NANCY 1

Mention CHIMIE ET MICROBIOLOGIE DE L'EAU

par Francis **ASTIER**

Titulaire du Diplôme d'Etudes Approfondies "Chimie et Microbiologie de l'Eau"

Sujet :

### CARACTERISATION ET CONTROLE DE LA FLAVEUR MOISIE D'UNE EAU DE DISTRIBUTION PUBLIQUE

#### MEMBRES DU JURY

<u>Président</u> :	Professeur J.-C. BLOCK	(Université NANCY 1)
<u>Rapporteurs</u> :	Professeur A. MONTIEL	(S.A.G.E.P., PARIS)
	Professeur R. VILAGINBS	(Université PARIS V)
<u>Juges</u>	Monsieur Ch. ANSELME	(Lyon. des Eaux, MONTGERON)
	Monsieur D. GATEL	(C.G.E., PARIS)
	Professeur Ph. HARTEMANN	(Université NANCY 1)

<b>CHAPITRE 1 - INTRODUCTION GENERALE</b> .....	11
<b>CHAPITRE II - ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	15
1- Notions de sapidité .....	19
1-1 Définitions .....	19
1-1-1 Le goût.....	19
1-1-2 La saveur.....	19
1-1-3 L'odeur .....	20
1-1-4 La flaveur.....	20
1-2 Perception de la sapidité .....	20
1-2- 1 Neuroanatomie de la flaveur.....	21
1-2-1-1 Le système gustatif.....	21
1-2-1-2 Le système olfactif.....	21
1-2-2 Paramètres physico-chimiques et psychiques du stimulus gustato-olfactif .....	22
1-2-2- 1 La composante qualitative .....	23
1-2-2-2 La composante quantitative .....	23
1-2-2-3 La composante hédonique .....	24
1-3 Nature des composés sapides.....	24
1-3- 1 Composés organiques .....	24
1-3-2 Composés inorganiques .....	29
1-4 Origines des composés sapides.....	31
1-4- 1 Origines anthropiques de la flaveur.....	32
1-4- 1 - 1 Les pollutions d'origines urbaines .....	32
1-4-1-2 Les pollutions d'origines agricoles.....	34
1-4-2 Origines biologiques .....	35
1-4-2- 1 Les micro-organismes saporigènes .....	36
1-4-2-2 Mécanismes en cause.....	47
2- Devenir de la flaveur de l'eau .....	50
2-1 Devenir de la flaveur lors du traitement de potabilisation.....	51
2-1-1 Introduction.....	51
2-1-2 Incidence des traitements mécaniques, physiques <b>et/ou</b> biologiques .....	52
2-1-2- 1 L'aération .....	52
2-1-2-2 La filtration sur sable.....	53

2-1-2-3 L'emploi du charbon actif.....	55
2-1-2-4 Les radiations .....	58
2-1-2-5 La filtration sur membranes .....	58
2-1-3 Incidence des traitements chimiques .....	59
2-1-3-1 La coagulation-floculation-décantation .....	59
2-1-3-2 Les oxydants-désinfectants .....	61
2-1-4 Incidence des traitements biologiques .....	70
2-2 Devenir de la flaveur lors de la distribution et du stockage .....	72
2-2-1 Introduction.. .....	72
2-2-2 Influence de la température .....	73
2-2-3 Influence du résiduel de désinfectant .....	73
2-2-4 Rôle des micro-organismes libres et fixés .....	75
2-2-5 Incidence des matériaux des conduites .....	77
2-2-6 Contaminations extérieures .....	78
3- Approche analytique de la sapidité de l'eau .....	78
3-1 Mesures sensorielles .....	78
3-1-1 Méthodes dévaluation de la flaveur .....	78
3-1-1-1 Chiffrage par une dilution de l'eau .....	80
3-1-1-2 Chiffrage sans dilution de l'eau .....	82
3-1-2 Comparaison méthodes avec dilution / sans dilution de l'eau .....	83
3-2 Mesures chimiques .....	85

### CHAPITRE III - PARAMETRES INFLUENCANT LA MESURE DE

#### LA FLAVEUR.....88

1- Problématique et objectifs .....	90
2- Matériel et méthodes .....	90
2-1 Préparation des solutions mères de composés sapides .....	90
2-1-1 Préparation de la solution <b>mère</b> de géosmine .....	91
2-1-2 Préparation de la solution mère de <b>2-</b> méthylisobornéol (MIB) .....	91
2-1-3 Préparation de la solution mère de <b>2,4,6-</b> trichloroanisole (TCA) .....	91
2-1-4 Préparation de la solution mère de <b>1,4-</b> dichlorobenzène ( <b>DCB</b> ) .....	92
2-1-5 Préparation de la solution mère de <b>1,2,4-</b> triméthylbenzène (TMB) .....	92

2-1-6 Préparation de la solution mère de naphthalène .....	92
2-2 Lavage des flacons destinés aux essais “dégustation” .....	92
2-3 Evaluation des flaveurs .....	93
2-4 Détermination du seuil de <i>flaveur</i> .....	95
2-5 Comparaison de deux seuils de <i>flaveur</i> .....	96
3- Incidence de la température de conservation des échantillons à déguster .....	96
3- 1 Protocole .....	96
3-2 Résultats .....	98
4- Incidence de la durée de stockage des échantillons à déguster .....	99
4- 1 Protocole .....	99
4-2 Résultats .....	100
4-2-1 Evolution de la <i>flaveur</i> en fonction de la durée de stockage .....	100
4-2-1- 1 Stockage du 2- méthylisoboméol (MIB) .....	100
4-2-1-2 Stockage de la géosmine .....	101
4-2-1-3 Stockage du 1,2,4- triméthylbenzène (1,2,4- TMB) .....	102
4-2-1-4 Stockage du naphthalène .....	103
4-2-1-5 Stockage du 2,4,6- trichloroanisol (2,4,6- TCA) .....	104
4-2-1-6 Stockage du 1,4- dichlorobenzène (1,4- DCB) .....	105
4-2-2 Concentrations minimales sapides des composés testés par le panel du laboratoire .....	106
5- Conclusions - discussion .....	107

## **APPROCHE *IN SITU* DE LA FLAVEUR MOISIE DE L’EAU DANS UN RESEAU DE DISTRIBUTION PUBLIQUE**

<b>CHAPITRE IV - SUIVI DE LA QUALITE DE L’EAU DE LA RESSOURCE AU RESEAU DE DISTRIBUTION : CAS DU RESEAU DE LA VILLE DE NANCY .....</b>	<b>10</b>
1- Problématique et objectifs .....	114
2- Matériel et méthodes .....	115
2-1 Description du site et des points de prélèvements .....	115
2-1-1 La ressource .....	115
2-1-2 La filière de potabilisation .....	115
2-1-3 Le réseau d’adduction d’eau .....	117

2-2 Matériel et traitement des échantillons d'eau .....	117
2-2-1 Matériel de prélèvement pour l'analyse microbiologique.. .....	117
2-2-2 Matériel de prélèvement pour l'analyse <b>sensorielle</b> .....	119
2-2-3 Matériel de prélèvement pour l'analyse chimique .....	119
2-3 Dénombrement des micro-organismes de l'eau .....	119
2-3- 1 Dénombrement des bactéries hétérotrophes aérobies .....	119
2-3-2 Dénombrement des micro-organismes saporigènes .....	120
2-4 Analyse sensorielle .....	121
2-4-1 Traitements des échantillons avant dégustation .....	<b>121</b>
2-4-2 Evaluation des saveurs .....	121
2-5 Analyses physico-chimiques .....	122
2-5-1 Dosages des composés sapides de l'eau .....	122
2-5- 1- 1 Principe .....	122
2-5-1-2 Matériel utilisé - Conditions opératoires .....	123
2-5-1-3 Performances de la méthode .....	124
2-5-1-4 Résultats obtenus sur les eaux étudiées .....	125
2-5-2 Mesure de la température de l'eau .....	125
2-5-3 Mesure du pH de l'eau .....	125
2-5-4 Mesure de la turbidité .....	126
2-5-5 Mesure de la conductivité .....	126
2-5-6 Mesure du carbone organique total et dissous (COT, <b>COD</b> ) .....	126
2-5-7 Mesure du carbone organique dissous biodégradable (CODB) .....	127
2-5-8 Mesure du chlore résiduel .....	127
2-5-9 Mesure du débit de la ressource .....	128
3- Protocole .....	128
3-1 Points de prélèvements .....	128
3-2 Calendrier et fréquence des prélèvements .....	129
3-3 Paramètres recherchés .....	129
3-4 Conservation des prélèvements .....	130
4- Résultats .....	130
4-1 Evolution de la qualité de l'eau de la ressource .....	130
4-1-1 Evolution de la saveur moisie.. .....	131

4-1-2 Evolution des concentrations en composés sapides .....	132
4-1-3 Evolution de la concentration en actinomycètes .....	134
4-1-4 Evolution de la concentration en champignons .....	136
4-1-5 Evolution de la concentration en algues .....	138
4-1-6 Evolution de la concentration en bactéries hétérotrophes aérobies (BHA) .....	141
4-2 Evolution de la qualité de l'eau au cours de la potabilisation .....	142
4-2-1 <b>Influence</b> des différentes étapes sur la flaveur moisie de l'eau.. .....	143
4-2-2 Influence de la filière sur les composés sapides .....	145
4-2-3 Elimination des actinomycètes .....	147
4-2-4 Elimination des champignons .....	147
4-2-5 Elimination des algues .....	148
4-2-6 Elimination des bactéries hétérotrophes aérobies ( <b>BHA</b> ).....	149
4-3 Evolution de la qualité de l'eau dans le réseau de distribution .....	151
4-3-1 Caractéristiques moyennes de l'eau distribuée sur le réseau nancéien .....	151
4-3-2 La flaveur moisie de l'eau distribuée sur Nancy : effet saison .....	152
4-3-3 La flaveur moisie dans l'eau distribuée sur Nancy : effet réseau.. .....	153
4-3-3-1 Comparaison sortie d'usine de <b>potabilisation/réseau</b> de distribution global .....	153
4-3-3-2 Comparaison en distinguant cinq zones de distribution du réseau... ..	154
4-3-4 Recherche d'un effet temps de séjour sur la flaveur moisie.. .....	156
4-3-4-1 Approche par le résiduel de chlore libre.. .....	156
4-3-4-2 Approche par le temps de résidence hydraulique des réservoirs.....	157
4-3-5 Les composés sapides de l'eau distribuée sur Nancy : effet <b>saison/effet</b> réseau .....	159
4-3-6 Les micro-organismes dans l'eau du réseau nancéien : effet <b>saison/effet</b> réseau .....	161
5- Discussion - conclusions .....	164
5-1 Caractérisation de la ressource - Effet saison .....	164
5-2 Caractérisation de la filière de potabilisation : son efficacité.. .....	165
5-3 Caractérisation du réseau - Effet réseau .....	167
5-4 Quelle est l'origine de la flaveur, moisie de l'eau au robinet du consommateur ? .....	168

<b>CHAPITRE V - ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE COMPOSES</b>	
<b>SAPIDES</b> .....	<b>170</b>
1- Problématique et objectifs .....	<b>173</b>
2- Interaction entre les composés sapides détectés dans l'eau distribuée sur l'agglomération nancéienne .....	<b>173</b>
2-1 Matériel et méthodes .....	173
2- 1- 1 Les solutions mères de composés sapides .....	173
2-1-2 Les mélanges de composés sapides .....	174
2-1-2-1 mélange DCB - TMB.. .....	174
2-1-2-2 mélange DCB - TMB - MIB .....	174
2-1-3 Evaluation des saveurs .....	174
2-2 Protocole .....	175
2-3 Résultats .....	176
2-3- 1 Mélange DCB-TMB .....	176
2-3-2 Mélange DCB-TMB-MB3 .....	176
2-3-3 Comparaison des CMS du DCB et du TMB dans les deux mélanges.. .....	<b>177</b>
3 - Influence de la <b>chloration</b> sur la saveur de l'eau .....	178
3-1 Matériel et méthodes.. .....	173
3-1-1 Les solutions mères.. .....	178
3-1-2 Les solutions de composés sapides .....	178
3-1-3 Prélèvement et caractérisation de l'eau CAG .....	179
3-1-4 Préparation de la solution de chlore et dosage du chlore .....	179
3-1-5 <b>Préparation</b> des dilutions des différentes solutions .....	179
3-1-6 Détermination des seuils de saveur et des concentrations minimales sapides .....	179
3-2 Protocole .....	180
3-3 Résultats .....	181
3-3- 1 Expérimentation avec l'eau d'Evian .....	181
3-3-2 Expérimentation avec la solution S 1 .....	181
3-3-3 Expérimentation avec la solution S2 .....	182
3-3-4 Expérimentation avec la solution S3 .....	183
3-3-5 Expérimentation avec l'eau CAG .....	184
4- Conclusions - discussion .....	186

**DEVENIR DE LA FLAVEUR MOISIE EN RESEAU  
APPROCHE EXPERIMENTALE**

<b>CHAPITRE VI - ETUDE EN PILOTE DU DEVELOPPEMENT DU GOUT DE MOISI EN FONCTION DU VIEILLISSEMENT DE L'EAU . . . . .</b>	<b>189</b>
Abstract .....	191
1-Introduction.....	192
2-Description de l'étude.....	193
3- Matériel et méthodes .....	194
3-1 Description des Pilotes.. .....	194
3-2 Paramètres Etudiés et Méthodes <b>d'Analyse</b> .....	<b>195</b>
3-3 Fréquence des Prélèvements .....	196
4- Résultats .....	197
4-1 Evolution de la Flaveur en Fonction du Temps de Séjour.....	198
4-2 Recherche de Relations entre le Seuil de Moisi et les Autres Paramètres Mesurés dans <b>l'Eau</b> .....	199
4-3 Influence du <b>Biofilm</b> sur la Flaveur Moisie .....	200
5-Discussions et conclusions .....	203
 <b>CHAPITRE VII - INCIDENCE DE LA NANOPILTRATION SUR LA FLAVEUR MOISIE .....</b>	 <b>206</b>
1 - Problématique et objectifs .....	209
2 - Matériel et méthodes .....	210
2- 1 Description du réseau pilote .....	210
2-2 Alimentation du pilote par l'eau <b>CAG</b> .....	<b>210</b>
2-3 Alimentation du pilote par l'eau nanofiltrée .....	<b>210</b>
2-3-1 Unité de microfiltration .....	210
2-3-2 Unité de <b>nanofiltration</b> .....	<b>211</b>
2-4 Matériel et traitements des échantillons .....	213
3 - Comportement d'un réseau de distribution alimenté avec une eau nanofiltrée comparativement à une eau <b>CAG</b> .....	<b>213</b>
3- 1 Protocole expérimental .....	213



3-2 Résultats .....	* 214
3-2- 1 Caractéristiques bactériologiques et physico-chimiques des eaux CAG et nanofiltrée en fonction du temps de séjour en réseau pilote.....	214
3-2-2 La flaveur moisie des eaux CAG et nanofiltrée au cours de leur vieillessement .....	216
3-2-3 Les micro-organismes <b>saporigènes</b> des eaux CAG et nanofiltrée au cours de leur vieillissement .....	217
3-2-4 Les composés sapides des eaux CAG et nanofiltrée au cours de leur vieillessement .....	218
3-2-5 Densités microbiennes du <b>biofilm</b> dans le réseau pilote lors de son alimentation par une eau CAG et par une eau nanofiltrée .....	220
3-3 Conclusions .....	* 221
4 - Comportement d'un réseau de distribution alimenté avec une eau nanofiltrée chlorée comparativement à une eau CAG chlorée .....	222
4- 1 Protocole expérimental .....	<b>222</b>
4- 1- 1 Paramètres analysés sur les eaux .....	<b>222</b>
4-1-2 Prélèvements d'eau et de <b>biofilm</b> lors de l'alimentation par l'eau CAG chlorée .....	<b>222</b>
4-1-3 Caractéristiques de l'eau CAG chlorée .....	223
4-1-4 Caractéristiques de l'eau nanofiltrée chlorée .....	<b>224</b>
<b>4-2 Résultats</b> .....	<b>225</b>
4-2-1 Evolution comparée des caractéristiques des eaux CAG chlorée et nanofiltrée chlorée en fonction de leur temps de séjour en réseau pilote ..	225
4-2-2 Evolution comparée des saveurs des eaux CAG chlorée et nanofiltrée chlorée en fonction de leur temps de séjour en réseau pilote .....	226
4-3 Conclusions .....	<b>227</b>
<b>5 - Discussion</b> .....	<b>228</b>
 <b>CHAPITRE VIII - CONCLUSIONS GENERALES</b> .....	 <b>230</b>
 <b>CHAPITRE IX - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	 <b>237</b>
 <b>CHAPITRE X - ANNEXES</b> .....	 265

Dans les pays industrialisés, une bonne eau potable se caractérise comme suit : elle doit être disponible en quantité suffisante, peu coûteuse, claire, incolore et froide, dépourvue de pathogènes et de toxiques et exempte de substances lui conférant un mauvais goût **et/ou** une mauvaise odeur.

Historiquement, il faut remonter avant 1880 car, **à** cette époque, le “goût” de l’eau était le seul facteur pris en compte pour évaluer le risque **dû** à l’eau (MONTIEL, 1996). En effet, une corrélation avait été établie entre odeur de septique et maladie hydrique. Par la suite, les premiers traitements de potabilisation ont été destinés à satisfaire l’exigence microbiologique de l’eau. Ainsi, les premières filières de potabilisation utilisant la filtration lente sur sable et la **chloration**, sont apparues. Cependant, avec l’industrialisation, un risque sanitaire chimique est venu se greffer au risque microbiologique. Pour répondre **à** l’augmentation des déchets industriels et domestiques, les procédés de traitement sont devenus de plus en plus complexes. De nouveaux traitements sont apparus tels que la filtration sur charbon actif en grains, l’ozonation et plus récemment les traitements membranaires.

Parallèlement au développement des procédés de potabilisation de l’eau, les consommateurs sont devenus de plus en plus exigeants sur les qualités organoleptiques de l’eau à leur robinet, **à** savoir sa couleur, sa turbidité ainsi que son goût et son odeur regroupés sous le terme de flaveur.

Les élus locaux, les producteurs et les distributeurs d’eau potable se préoccupent de plus en plus de ses propriétés organoleptiques car, bien qu’elles soient considérées encore aujourd’hui comme secondaires par les pouvoirs publics par rapport aux exigences microbiologiques et chimiques, leur altération peut avoir des conséquences politiques et économiques importantes. La flaveur de l’eau peut même correspondre **à** un risque sanitaire indirect. En effet, une flaveur **désagréable** de l’eau distribuée peut conduire le consommateur à la rejeter au profit d’une eau non traitée, non contrôlée pouvant présenter un risque pour la santé humaine.

A l’heure actuelle, malgré nos connaissances, maîtriser les risques sanitaires (biologiques et chimiques) pour le consommateur tout en éliminant le “risque organoleptique” est un objectif encore relativement difficile à atteindre.

Les objectifs du présent travail sont d'une part de contribuer à apporter certains éléments de réponse concernant les phénomènes à l'origine des saveurs de l'eau de distribution publique sachant que la saveur de l'eau au robinet du consommateur peut résulter de phénomènes se passant aux trois niveaux du parcours de potabilisation de l'eau qui sont la ressource, la filière de traitement et le réseau de distribution proprement dit (**RIZET et al.**, 1990) et, d'autre part, d'étudier les moyens de réduire l'altération des propriétés organoleptiques de l'eau distribuée soit en adaptant les procédés de traitements classiques, soit en évaluant les performances d'un point de vue sanitaire de nouveaux traitements tels que la nanofiltration.

1- L'analyse bibliographique constitue le chapitre II et est consacrée à la perception, la caractérisation, les origines des saveurs de l'eau aux trois niveaux cités précédemment, ainsi qu'à une analyse critique des méthodologies utilisées pour analyser les saveurs.

2- Suite à cette analyse, une étude portant sur des problèmes méthodologiques concernant l'analyse sensorielle a été entreprise. Le travail décrit au chapitre III traite de l'influence du temps et de la température de stockage des échantillons d'eau à déguster. C'est aussi un préalable aux études présentées dans les chapitres suivants.

3- La saveur moisie de l'eau a tout d'abord été appréciée *in situ* par l'étude d'un réseau de distribution présentant un problème chronique de mauvaise saveur de l'eau : le réseau d'adduction d'eau du district de l'agglomération nancéenne.

L'étude décrite au chapitre IV est l'étude sur réseau réel proprement dite. Cette étude faisait partie d'un programme de recherche sur l'altération des propriétés organoleptiques de l'eau de distribution publique auquel étaient associés le District de l'Agglomération Nancéenne, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, le Centre International de l'Eau de Nancy, la Société Nancéenne des eaux et le Laboratoire d'Hygiène et de Recherche en Santé Publique. Les objectifs de cette étude étaient de faire un état des lieux du point de vue sanitaire du réseau de Nancy afin d'évaluer la part de responsabilité de la ressource, de la filière de traitement et du réseau proprement dit et, d'autre part, de mettre en lumière certains phénomènes pouvant être responsables de la principale saveur détectée, à savoir la saveur moisie.

Suite à cette étude, différentes conclusions et hypothèses ont été émises concernant l'origine de la saveur moisie du réseau nancéen. Parmi celles-ci, le rôle des interactions entre composés présents dans l'eau distribuée comme cause de saveur est très probable mais difficilement démontrable sur site. C'est pourquoi, dans le chapitre V est décrite l'étude réalisée au laboratoire sur des solutions synthétiques de composés sapides purs détectés dans le réseau réel qui a pour objectif de mettre en évidence des phénomènes de synergie ou d'antagonisme entre ces composés d'un point de vue sanitaire.

4- Le devenir de la flaveur moisie en réseau a été également étudié sur un réseau de distribution expérimental de taille industrielle qui, de part ses caractéristiques, permet d'appréhender certains paramètres incontrôlables *in situ*.

Ainsi, ce réseau pilote présente l'avantage de pouvoir discrétiser les temps de séjour de l'eau qui sont inconnus dans le réseau nancéien. Une première expérimentation a été entreprise sur ce réseau expérimental afin d'étudier l'influence du paramètre temps de séjour de l'eau en réseau sur l'intensité de la flaveur de l'eau. Ce travail, décrit dans le chapitre VI, a d'ailleurs fait l'objet d'une publication dans *Environmental Technology* intitulée "Etude en pilote du développement du goût de moisi en fonction du vieillissement de l'eau" (ASTIER *et al.*, 1995).

Une seconde expérimentation, décrite dans le chapitre VII, a porté sur l'élimination ou la réduction de la flaveur de l'eau par un procédé de nanofiltration. L'influence du traitement membranaire de nanofiltration sur la flaveur de l'eau au cours de son vieillissement en réseau a notamment été étudié.

5- Pour conclure, le chapitre VIII rassemble les principaux résultats mis en évidence dans les études décrites ci-dessus. Les références bibliographiques et les annexes sont regroupées respectivement dans les chapitres IX et X.

Pour le consommateur, les principaux critères d'acceptation d'une eau potable sont ses qualités organoleptiques et notamment sa saveur. C'est pourquoi, dans les pays industrialisés, les producteurs et les distributeurs d'eau leur accordent une importance grandissante. Cependant, malgré l'expérience acquise dans le domaine du traitement et de la distribution des eaux potables, la maîtrise des qualités organoleptiques des eaux distribuées est encore toute relative.

Aussi, la démarche entreprise ici a eu pour ambition en se basant sur un réseau de distribution présentant un problème de saveur moisie de l'eau, de tenter de découvrir les raisons de l'altération de la saveur de l'eau afin de proposer des actions pour y remédier.

L'analyse bibliographique, dont l'objet principal est de faire le point sur les origines et les moyens de réduire la saveur de l'eau destinée potable, montre clairement que les origines de la saveur de l'eau peuvent résulter d'événements ayant lieu non seulement dans le réseau mais en amont de celui-ci, c'est à dire au niveau de la ressource et au niveau de la filière de traitement. Cette dernière a d'ailleurs une position paradoxale puisqu'elle peut, par ses différents traitements, à la fois éliminer et générer des saveurs dans l'eau. En ce qui concerne le réseau, les paramètres et les phénomènes à l'origine de saveur sont encore peu connus et peu expliqués.

La première expérimentation réalisée nous a permis de valider notre protocole de dégustation pour les différentes études envisagées. Les points importants à souligner sont :

- ◆ d'une part, que la température de stockage des échantillons d'eau à déguster ne modifie pas l'intensité de la saveur perçue par notre panel de dégustateurs,
- ◆ d'autre part, la durée de conservation des échantillons est un paramètre qui influe sur l'intensité de la saveur perçue par notre panel et qui se traduit généralement par une diminution de sensibilité lorsque la durée de stockage augmente,
- ◆ et, enfin, de montrer que notre panel de dégustateurs a une sensibilité du même ordre que les panels cités dans la littérature.

Une étude a été entreprise sur le réseau de distribution de l'agglomération nancéenne dont l'eau présente une saveur de moisie, afin de faire un état des lieux du "système" conduisant à l'altération de la saveur de l'eau distribuée sur l'agglomération nancéenne.

Pour mener cette étude, ont été examinés :

- la qualité de la ressource en eau,
- l'efficacité de la filière de traitement sur les qualités organoleptiques de l'eau,
- le rôle du réseau de distribution d'eau dans ce problème de sapidité.

Ces trois niveaux (ressource, filière et réseau) ont été caractérisés tant au niveau **physico-chimique** avec en particulier la recherche de molécules sapides d'origines biologique et anthropiques, qu'au niveau microbiologique, notamment en s'intéressant aux micro-organismes pouvant jouer un rôle dans l'altération de la flaveur de l'eau. Ces micro-organismes dits saporigènes sont soit des actinomycètes, soit des algues, soit des champignons, et sont susceptibles de produire des composés sapides.

Ainsi, un suivi bimensuel de paramètres organoleptiques (**flaveur**, turbidité), biologiques (micro-organismes saporigènes) et physico-chimiques (température, pH, molécules sapides...) a été réalisé : d'une part dans le temps (sur une période d'un an pour tenir compte d'un possible effet saison : de juin 1993 à juin 1994) et d'autre part, dans l'espace (de la ressource au robinet du consommateur).

Les principaux résultats obtenus montrent que :

- \* au niveau de la ressource, une flaveur de moisi est détectée de façon permanente et les différents types de micro-organismes recherchés sont tous présents. Sur la période étudiée, le seuil moyen de moisi est de 5 et les concentrations moyennes en actinomycètes, algues, champignons et bactéries hétérotrophes aérobies (BHA) observées dans la ressource sont respectivement de  $2,410^3$  UFC L<sup>-1</sup>,  $8,610^4$  unités L<sup>-1</sup>,  $4,110^4$  UFC L<sup>-1</sup> et  $8 \cdot 10^6$  UFC L<sup>-1</sup>. L'intensité de la flaveur et les concentrations des micro-organismes varient en fonction des saisons. Les plus fortes sapidités (seuils  $\geq 5$ ) et les plus fortes concentrations en algues ( $4,810^5$  unités L<sup>-1</sup>) sont observées en période estivale alors que les plus fortes concentrations en actinomycètes ( $5,310^3$  UFC L<sup>-1</sup>) et en champignons ( $6,610^4$  UFC L<sup>-1</sup>) sont enregistrées en automne ou suite à des épisodes de fortes pluies. Enfin, des molécules sapides d'origine biologique (géosmine et 2-méthylisobornéol) ou dues à l'activité humaine (2,4-dichlorobenzène, 1,2,4-triméthylbenzène et naphthalène) sont détectées de façon régulière. Cependant, seules les molécules d'origine biologique sont présentes à des niveaux de concentration suffisants pour conférer une flaveur moisie à l'eau et ceci seulement en période estivale.
- \* la station de potabilisation E. Imbeaux élimine efficacement les différents types de micro-organismes. La filière de potabilisation élimine les actinomycètes (de 4,3 log), les algues (de 2,6 log), les champignons (de 3,5 log) et les BHA (de 2,4 log). Certaines

étapes sont déterminantes pour éliminer ces micro-organismes : la pré-chloration (résiduel moyen de chlore total de 1 mg L<sup>-1</sup>) pour les actinomycètes (de 3,9 log), les champignons (de 2,1 log) et les BHA (de 2,3 log), la filtration sur sable pour les algues (de 2 log). La filtration sur C.A.G. en second étage de traitement entraîne une augmentation des BHA et des champignons que ne supprime que partiellement la **post-chloration** (résiduel moyen de chlore total de 0,7 mg L<sup>-1</sup>).

En revanche, l'intensité de la flaveur moisie n'est pas réduite par la filière de potabilisation : le seuil moyen de flaveur moisie étant de 6 en entrée et en sortie de filière. D'autre part, la séquence ozonation - filtration sur charbon actif en grains présente dans la filière n'a pas l'efficacité escomptée

La filière élimine les composés sapides d'origine biologique géosmine et 2-méthylisoboméol (réduction des concentrations d'un facteur 2) mais par contre génère d'autres composés sapides tels que le 1,4-dichlorobenzène, le 1,2,4-triméthylbenzène et le naphthalène, notamment par ses traitements d'oxydation-désinfection (augmentation des concentrations d'un facteur 4). Ces composés sont toutefois toujours présents à des concentrations inférieures à leurs concentrations minimales sapides respectives.

De plus, l'effet saison sur la flaveur moisie de l'eau observé au niveau de la ressource est retrouvé en sortie de station de potabilisation.

\* en réseau, les différents micro-organismes sont détectés mais à des niveaux variant selon le type. La concentration moyenne en algues dans l'eau du réseau sur la période étudiée est inférieure au seuil de détection ; celles en actinomycètes, champignons et BHA sont respectivement de  $3 \cdot 10^{-1}$ ,  $2 \cdot 10^1$  et  $3 \cdot 10^5$  UFC L<sup>-1</sup>. Les concentrations moyennes en champignons et BHA sont supérieures à celles en sortie de filière respectivement d'un facteur 3 et 30.

En revanche, d'un point de vue sapidité, aucune différence significative n'est observée entre la sortie de station et le réseau considéré dans sa **globalité**. Le seuil de moisie dans le réseau varie dans le temps de la même manière qu'en sortie de station de potabilisation. Ainsi, deux périodes sapides ont été observées : l'une allant de juin 1993 à décembre 1993 pendant laquelle l'eau distribuée présente un seuil moyen de moisie de 6, l'autre allant de janvier 1994 à juin 1994 pendant laquelle le seuil moyen de moisie est de 4. Ces seuils moyens sont tous deux non conformes à la réglementation française relative aux eaux destinées à la consommation humaine qui impose un seuil inférieur à 3 (décret n° 89-3 du 3 janvier 1989).

Les deux catégories de composés sapides biologiques et anthropiques sont détectés mais chacun à des niveaux inférieurs à leurs concentrations minimales sapides qui sont de l'ordre respectivement du nanogramme et du microgramme par litre .

De plus, pour les trois niveaux de prélèvement étudiés, la variation des résultats microbiologiques a été comparée à l'évolution de la flaveur de l'eau. Aucune relation quantitative directe et simple entre ces paramètres pris deux à deux n'a pu être établie.

En conclusion :

- ◆ la ressource a un rôle important dans l'origine de la flaveur de moisi de l'eau distribuée,
- ◆ la filière, dans le cas présent, n'élimine pas les problèmes de sapidité mais ne les amplifie pas non plus,
- ◆ si le réseau nancéien considéré dans son ensemble ne semble pas avoir **d'influence** d'un point de vue sapidité, une certaine hétérogénéité a été mise en évidence notamment entre les différentes zones de distribution définies par le passage de l'eau dans des réservoirs différents. Cette hétérogénéité n'a pu cependant être imputée à une différence de temps de résidence hydraulique de l'eau, ni à des concentrations différentes de micro-organismes ou de composés sapides.

Lors de l'étude sur le réseau de distribution d'eau de l'agglomération nancéenne, différents composés sapides ont été détectés dans l'eau distribuée, mais à des concentrations non sapides par rapport à celles données par la bibliographie ou par nos essais de laboratoire. Suite à cette observation, nous avons voulu savoir si la flaveur moisie détectée dans l'eau n'est pas, en fait, due à des interactions entre ces molécules organiques mais également à l'action du chlore. Aussi, des essais au laboratoire ont été menés avec des solutions de composés sapides purs ou en mélange, chlorées ou non. Les résultats obtenus ont permis d'avancer différentes conclusions :

- ◆ un composé sapide ne se comporte pas de la même manière si il est seul ou en mélange ; il se comporte également différemment selon la composition du mélange dans lequel il se trouve.
- ◆ il existe des relations de **dominance** entre les composés sapides et par conséquent entre les flaveurs qu'ils confèrent à l'eau. Ainsi, la flaveur moisie due au **MIB** est dominante sur celle de naphthaline due au 1,4- dichlorobenzène, elle-même dominante sur celle d'hydrocarbure due au 1,2,4- triméthylbenzène.
- ◆ il peut y avoir des phénomènes de synergie et d'antagonisme entre les composés sapides. Ainsi, le fait de mélanger le MIB et la géosmine semble augmenter leur sapidité puisque la flaveur moisie du mélange est plus intense que celle de chaque composé. En revanche, le fait de mélanger le MIB et la géosmine à d'autres



composés tels que le 1,2 dichlorobenzène, le 1,2,4- triméthylbenzène et le naphthalène entraîne une baisse de sapidité de ces deux composés.

- ◆ les conséquences sapides de la chloration d'une eau dépendent de sa composition, en particulier de la quantité et la qualité de matière organique présente. Ainsi la chloration d'une eau pauvre en matière organique (dans notre expérimentation, l'eau d'Evian) confère une saveur chlorée à l'eau. En revanche, la chloration d'une eau riche en matière organique (dans notre expérimentation, l'eau CAG) entraîne d'une part, de manière rapide, un masquage de la saveur moisi par la saveur chlorée et, d'autre part, l'apparition, à plus ou moins long terme, d'une saveur moisi par interaction entre le chlore et la matière organique.

Ne connaissant pas les temps de séjour de l'eau dans le réseau de distribution nancéien et d'autre part, comme nos différentes approches de ses temps de séjour lors de l'étude *in situ* se sont avérées infructueuses, l'influence du temps de séjour de l'eau sur le développement de la saveur de moisi a été étudiée sur un réseau pilote dans lequel il est possible de maîtriser ce paramètre. Les résultats sont les suivants :

- ◆ le temps de séjour de l'eau dans le réseau expérimental a une influence sur la qualité de l'eau notamment sur sa saveur. Dans nos conditions d'expérience, plus l'eau vieillit, plus elle devient sapide : après trois jours dans le réseau pilote, l'eau distribuée passe d'un seuil de moisi de 4 à un seuil de 50 très supérieur au seuil maximal admissible.
- ◆ l'origine biologique de la saveur de moisi dans le réseau de distribution expérimental est certainement la plus vraisemblable puisque la qualité sapide de l'eau se dégrade dans le réseau parallèlement à la détérioration de la qualité microbiologique. Cependant, aucune relation quantitative simple n'ayant pu être mise en évidence entre le nombre des micro-organismes et le seuil de saveur de l'eau, l'hypothèse d'une relation entre la saveur de l'eau et l'activité métabolique des micro-organismes peut être formulée. Dans nos conditions expérimentales, l'origine de la saveur de moisi de l'eau au cours de la distribution pourrait provenir de la bioproduction de composés sapides **et/ou** d'une biotransformation de certaines molécules présentes dans l'eau distribuée par la biomasse en suspension et fixée. A titre d'exemple, la présence de TCA dans l'eau du réseau de distribution pourrait être liée à la transformation des TCP par des micro-organismes même si ce composé n'a pu être détecté dans l'eau des boucles après 72h de temps de séjour. Les TCA sont des composés hautement sapides dont le seuil de détection analytique est très supérieur au seuil de détection organoleptique.

Enfin, sur le même réseau expérimental a été menée une étude concernant l'amélioration de la flaveur de l'eau par la nanofiltration. Les conclusions concernant l'efficacité de ce procédé vis-à-vis de la flaveur moisie sont les suivantes :

- ◆ la nanofiltration réduit d'un facteur 2 la flaveur moisie d'une eau CAG non chlorée.
- ◆ dans le réseau pilote, l'intensification de la flaveur moisie d'une eau nanofiltrée au fur et à mesure de son vieillissement est plus lente que celle d'une eau CAG non chlorée. De plus, l'eau nanofiltrée conserve pendant 48 heures un seuil de flaveur moisie de 3 répondant aux exigences de la Commission Européenne de Normalisation (prEN 1622, 1995)) et présente, après 72 heures de temps de séjour en réseau pilote, un seuil de moisi deux fois moins élevé que l'eau CAG non chlorée (seuil de 4,5 dans l'eau nanofiltrée contre 8 dans l'eau CAG).
- ◆ une séquence "nanofiltration-chloration" en post-traitement apparaît comme un moyen séduisant de réduire la flaveur moisie de l'eau avant sa distribution tout en assurant une qualité microbiologique semblable à celle obtenue par simple chloration. De plus, la dose de chlore à appliquer à une eau nanofiltrée est moins forte que celle à appliquer à une eau CAG (d'un facteur 1,5).
- ◆ si le fait de nanofiltrer une eau avant de la chlorer n'empêche pas l'apparition d'une flaveur moisie dans cette eau nanofiltrée chlorée lors de son vieillissement en réseau, il ralentit toutefois son intensification. Ainsi, après 24 heures de temps de séjour en réseau pilote, cette eau ne présente qu'un seuil de moisi de 2 alors que la même eau seulement chlorée présente un seuil de 5 après seulement 12 heures de temps de séjour.
- ◆ en revanche, la chloration d'une eau pauvre en matière organique comme l'eau nanofiltrée conduit à une flaveur chlorée qui persiste après 24 heures dans l'eau nanofiltrée chlorée alors qu'elle n'est plus détectée dans l'eau CAG chlorée.

Ainsi, si pour de multiples raisons, l'idée de l'eau sans chlore a été abandonnée, pour d'autres considérations, notamment organoleptiques, l'idée développée actuellement s'oriente vers une diminution de la matière organique de l'eau et, en conséquence, une réduction des doses de chlores appliquées.