



L'OFF-FLAVOR EN AQUACULTURE CONTINENTALE
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

J. ROBIN - D. VALLOD

Décembre 2001

Convention n° 063/01/C



SOMMAIRE

SOMMAIRE **2**

INTRODUCTION **3**

1. PROBLEMATIQUE GENERALE : LE PHENOMENE OFF-FLAVOR EN FRANCE **4**

- a) L'off-flavor, une notion liée au goût ou à l'odeur ? 4
- b) Prise en compte de la problématique off-flavor en France 5

2. IMPLICATIONS ECONOMIQUES DE L'OFF-FLAVOR **7**

3. APPROCHE DESCRIPTIVE DE L'OFF-FLAVOR DANS L'EAU **10**

- a) Les principales catégories d'off-flavor dans l'eau 10
- b) Origines potentielles de l'off-flavor dans l'eau 12
- c) Identification des molécules et origines potentielles 12
 - Aperçu général 12
 - Cas de l'off-flavor "terre/vase" 14
- d) Contexte réglementaire et programmes de recherches en France 16
 - Les aspects réglementaires 16
 - Les études et recherches sur l'off-flavor de l'eau en France 17

4. IDENTIFICATION DE L'OFF FLAVOR DANS LE POISSON **19**

- a) Historique 19
- b) Origine de l'off-flavor "terre/vase" dans la chair de poisson 20
- c) Autres origines des situations d'off-flavor dans le poisson 21
- d) Quantification et répartition des métabolites dans la chair de poisson 21
 - Analyse sensorielle et démarche qualité 22
 - Teneurs seuils et gammes de concentrations observées 24
 - Localisation du stockage des substances odorantes dans la chair de poisson 25
- e) Les solutions pour contrôler l'off-flavor dans le poisson 26
 - Biomanipulations 26
 - Utilisation des herbicides 28
 - Interventions sur le poisson transformé 30

5. SYNTHESE ET PERSPECTIVES **31**

- a) Synthèse sur les origines potentielles de l'off-flavor 31
- b) Approche méthodologique d'étude de l'off-flavor sur la carpe et la truite 32
 - Enquête préalable 32
 - Suivi in situ 32
 - Analyse sensorielle 33
 - Détection des composés odorants 33

CONCLUSION **34**

BIBLIOGRAPHIE **35**

INTRODUCTION

Le développement de nouveaux marchés pour les produits de l'aquaculture continentale a récemment abouti à la mise en place d'une réflexion pour l'établissement d'un certain nombre de chartes "qualité". C'est en particulier le cas pour la truite, quatrième poisson frais consommé en France par les ménages (source SECODIP 2000), pour laquelle la norme AFNOR V 45-100 précise les principes qualitatifs qui définissent la production et la transformation. Une démarche de certification analogue est en cours au sein de la filière silure. Le principe de la mise en place d'une démarche qualité est également à l'étude pour la carpe dans certaines régions d'étangs. Quelle que soit la démarche marketing engagée, le critère "goût" ou "odeur" est un point systématiquement abordé dans ces approches.

En préambule à la rédaction de ces cahiers des charges, des enquêtes menées auprès des professionnels et des consommateurs ont en effet permis de soulever les problèmes de qualité affectant les produits ; le problème prioritaire rencontré est celui de l'odeur et/ou flaveur de terre du produit, qui porte tort à l'image de marque alimentaire de la truite et de la carpe.

En France, ce problème est le plus fréquemment identifié sous le nom de "goût de vase", dénomination qui prête souvent à confusion, car orientant indirectement le phénomène vers la notion d'envasement des structures de production. Aux Etats-Unis comme dans la plupart des autres régions du globe (Asie, Océanie), l'expression utilisée est "off-flavor", donnant un champ beaucoup plus vaste au problème d'odeur ou de goût du produit, sans a priori quant à son origine. Nous utiliserons donc par la suite ce terme "off-flavor" pour désigner le problème étudié.

L'off-flavor est un phénomène qui mobilise un très grand nombre d'équipes de recherche sur les problèmes de potabilisation des eaux. La masse d'informations disponibles dans ce domaine s'avère complémentaire des connaissances portant directement sur l'off-flavor en aquaculture : elle permet de définir les origines potentielles d'off-flavor, avec dans certains cas un transfert possible dans la chair de poisson.

Après avoir exposé la problématique générale et les implications économiques du problème, nous présenterons les origines potentielles de l'off-flavor dans l'eau, puis dans le poisson. Nous discuterons ensuite de la méthodologie d'étude du problème sur le poisson, en confrontant les approches menées par les différentes équipes travaillant sur ce sujet.

1. PROBLEMATIQUE GENERALE : LE PHENOMENE OFF-FLAVOR EN FRANCE

a) L'off-flavor, une notion liée au goût ou à l'odeur ?

L'off-flavor, anglicisme utilisé ici par défaut de traduction française satisfaisante, traduit une notion de flaveur, sachant que derrière la signification du mot flaveur sont regroupées l'ensemble des sensations relatives au goût, à l'odorat et au toucher. L'off-flavor fait donc référence à une odeur ou un goût ressentis de manière plutôt négative par nos sens.

Voici quelques définitions (Office de la langue française, 1984-1990-1994-1997) qui permettent de cadrer la signification qui peut être donnée à l'off-flavor :

Flaveur : Depuis quelques années, les dégustateurs ont remis à la mode un terme tiré du vieux français, la flaveur (en anglais : flavor). Ce terme, employé techniquement, définit l'ensemble des sensations olfactives, gustatives et tactiles ressenties lors de la dégustation d'un produit alimentaire. C'est le premier sens de flavor, en dégustation. En outre, le terme flavor a un deuxième sens et se traduit alors par arôme en français, lorsqu'il s'agit d'une substance (un additif naturel ou artificiel) ajoutée à un produit pour le parfumer, l'aromatiser. C'est le terme qui est privilégié, notamment sur une étiquette. Quant au terme taste, qui est souvent confondu avec flavor dans ce sens, il se rend suivant le cas, par goût ou saveur en français. En dégustation, il est employé surtout accompagné d'un qualificatif : par exemple, goût de pomme (apple taste). Contrairement à saveur, goût marque souvent un défaut : goût de brûlé (burnt taste).

Saveur : (taste en anglais). Sensation provoquée par la propriété organoleptique perceptible par l'organe gustatif lorsqu'il est stimulé par certaines substances solubles. Elle désigne quatre sensations fondamentales :

- Le salé : type donné par le chlorure de sodium, perçu par les cellules fongiformes de la pointe et des bords de la langue, la zone centrale n'y étant pas sensible.
- Le sucré, type donné par le saccharose, perçu par la seule pointe de la langue, à peu près superposable à celle du au salé.
- L'amer, perçu à l'arrière de la langue dans la région du V lingual, où il y a de grosses papilles ; c'est pourquoi l'amertume ne se perçoit jamais en immédiat mais en arrière-goût
- L'acide, perçu dans la région moyenne et aussi sur les bords. Ce sont les cellules sensibles à l'acide qui sont les plus nombreuses, d'où la remarquable sensibilité de la plupart des dégustateurs à ce goût. L'acidité pure est désagréable, mais associée à d'autres goûts (sucré, parfums), elle est souvent très estimée, la préférence humaine tendant plus vers l'acidité que vers l'alcalinité.

Le mélange de ces quatre sensations, issu de la stimulation des récepteurs gustatifs de la langue, multiplie les effets. L'acide et le salé correspondent à des fonctions chimiques simples ; le sucré et l'amer, à des fonctions biochimiques liées imparfaitement à la nutritivité ou à la nocivité des aliments. Certains auteurs ont admis aussi comme fondamentales les saveurs alcalines.

Goût : Sens par lequel on perçoit les saveurs (taste ou flavour en anglais). La sensibilité des bourgeons gustatifs n'est cependant pas le seul facteur du goût ; l'odorat y a sa part, puisque les personnes privées de ce sens ne trouvent presque plus de saveur aux aliments qu'elles mangent. Cette sensibilité varie en outre avec les individus.

Odeur : (odour, odor, smell) Propriété organoleptique perceptible par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles. L'odeur est la qualité olfactive des aliments due à leurs constituants volatils. L'odeur s'apprécie par le nez alors que l'arôme est une sensation née après ingestion dans l'arrière-bouche. On n'a pu découvrir d'odeurs fondamentales, alors qu'on connaît les quatre saveurs indépendantes. Diverses classifications pratiques, assez grossières et arbitraires, ont été proposées. On a aussi essayé de spécifier toutes les odeurs au moyen d'un petit nombre de composantes arbitraires. En analyse sensorielle : qualité de la sensation olfactive particulière provoquée par chacune de ces substances (déf. AFNOR).

Quand on parle de goût ou d'odeur, l'objectif est souvent de pouvoir discriminer les deux notions. Ce n'est pas toujours facile, et un exemple le prouve : lorsque les papilles gustatives de la langue sont excitées (ingestion d'un aliment), en même temps sont envoyées des molécules odorantes dans la gorge. Du fait de la communication entre nez et gorge, ces molécules odorantes vont alors exciter les cellules réceptrices de l'odorat. L'information ainsi compilée est donc une association de sensations liées au goût et à l'odorat.

Pour discriminer les deux notions et savoir si l'off-flavor est une notion plutôt liée au goût ou à l'odorat, notons que le goût est avant tout une affaire d'odorat, car l'odorat est un sens plus "efficace" que le goût : les situations d'off-flavor dont nous parlerons par la suite sont donc principalement liées à des odeurs particulières.

b) Prise en compte de la problématique off-flavor en France

En France, la prise de conscience des problèmes liés aux phénomènes d'off-flavor est assez récente, même si le "fameux" goût de vase est une constante régulièrement associée à l'univers des poissons d'eau douce, accompagnant notamment la carpe dans les différentes enquêtes menées auprès des consommateurs.

Les différentes études de marché conduites sur la carpe entre 1985 et 1997 à la demande de l'ADAPRA (Association pour le Développement de la Pêche et de l'Aquaculture en Rhône-Alpes) ont en effet régulièrement soulevé ce problème, plus ou moins consciemment perçu par le consommateur qui semble avoir comme référence établie la nécessité d'un "dégorgeage en eau claire" de la carpe avant consommation.

En 1996, le Comité de Filière Aquacole a réalisé une enquête auprès des pisciculteurs français (environ 650 entreprises) pour évaluer la fréquence d'apparition de différents défauts qualitatifs de la truite. Le taux de réponse à cette enquête a été de 10%. L'odeur de terre a été le problème le plus fréquemment rencontré, à hauteur de 30% des réponses.

En l'absence de quantification et de caractérisations précises de tous ces phénomènes, les mesures mises en œuvre relèvent plus de la prévention.

Le CIPA (Comité Interprofessionnel des Produits de l'Aquaculture) a ainsi intégré dans la rédaction d'une norme française sur la truite une évaluation de l'odeur et du goût des produits après cuisson dans un four à micro-ondes, selon un plan de contrôle précis : "les produits ne doivent pas présenter d'odeur ou de goût étrangers, notamment de goût de "terre" (Norme NF V 45-100, avril 2000).

D'une manière similaire, l'ADARC (Association pour le Développement de l'Aquaculture en Région Centre) a entrepris une démarche de certification sur le silure d'élevage. Le cahier

des charges prévoit un passage des poissons en bac de jeûne au moins 48 h dans une eau dite "eau claire" renouvelée (5%/h) et un certain nombre de contrôles sur le poisson à la sortie de l'eau, et avec notamment celui de l'absence de goût ou d'odeur anormale lors de tests par un opérateur qualifié (ADARC, 1998).

Enfin, plusieurs cahiers des charges sur la carpe incluent une prise en compte préventive de ces problèmes d'off-flavor en imposant "un stockage en eau claire renouvelée en permanence, absence de toute nourriture pour une durée minimale de 3 jours (Dombes Qualité, 1996), "un affinage de 2 jours minimum en eau courante" (Pisciculteurs de Dombes, 2000). Dans les 2 cas, il n'est pas prévu de contrôle organoleptique.

La synthèse de ces différentes prises de conscience au sein des filières piscicoles françaises révèle que :

- le phénomène d'off-flavor considéré fait toujours référence à une saveur "terre/vase". Les cyanobactéries sont le plus souvent rendues responsables de l'apparition de phénomènes d'off-flavor tant dans l'eau que dans la chair des poissons, sans véritable vérification de cette hypothèse. Des travaux récents de plus en plus nombreux, et notamment aux Etats-Unis, pointent les actinomycètes ;
- les contrôles de ce problème n'existent pas, excepté dans la filière truite ;
- la gestion du problème n'est jamais étudiée en amont, mais fait plutôt appel à une mise en eau claire (notions de dégorgeage, rinçage, affinage, ...).

2. IMPLICATIONS ECONOMIQUES DE L'OFF-FLAVOR

Les conséquences économiques des phénomènes d'off-flavor ne font pas l'objet de nombreuses références et celles-ci ne concernent principalement que la production de catfish (*Ictalurus punctatus*) dans le sud des Etats-Unis. Les données sont inexistantes en France.

Afin de replacer les éléments d'ordre économique évoqués par la suite, il semble nécessaire de décrire succinctement la filière catfish aux Etats-Unis.

L'aquaculture aux Etats-Unis s'est fortement développée depuis 35 ans ; la croissance annuelle de ce secteur est encore en 1999 de 5 à 10 % (ROBINSON & AVERY, 2000), mais semble se stabiliser depuis, la production commercialisée en 2001 étant semblable à celle de 2000 (HARVEY, 2001). La surface totale exploitée est passée de 22 400 ha en 1980 à plus de 79 200 ha en 2000 (SILVA & DEAN, 2001). L'essentiel se trouve dans le Delta du Mississippi avec près de 62 000 ha (MC GEE & LAZUR, 1998) et 90 % de la production nationale (Tab. 1). L'industrie de la transformation s'est elle-aussi considérablement développée : en 1980, 21 000 tonnes de poissons vivants entraient dans les chaînes de transformation. En 2000, ce sont près de 270 000 tonnes de catfish pesant de 700 g à 1.5 kg qui ont été transformées ! La consommation représente aujourd'hui environ 500g/an/personne soit 7.5 % de la consommation des produits aquatiques (Johnson & Associates, 2001). En 2000, le chiffre d'affaires des producteurs a représenté 446 millions de dollars, avec un prix moyen de 165 cents/kg ; le chiffre d'affaires des transformateurs a atteint quant à lui 600 millions de dollars en 1999 (ROBINSON & AVERY, 2000) et plus de 708 millions de dollars en 2000 (SILVA & DEAN, 2001) pour le seul état du Mississippi. Pour les 4 principaux états producteurs de catfish, le chiffre d'affaires dépasse annuellement les 4 milliards de dollars (ROBINSON & AVERY, 2000) et cette activité génère 13000 emplois tous secteurs confondus (production, transformation, fabricants d'aliments, etc...).

On comprend que pour une telle activité économique, tout problème affectant la qualité du produit et sa commercialisation ait pu engendrer études et recherches pour le comprendre, voire le résoudre...

Tableau 1 : Production de catfish dans les 4 principaux états producteurs et aux Etats-Unis (d'après les données du USDA Economics and Statistics System, 2001 et HARVEY, 2001)

Etat	1995		1998		2000		2001	
	S (ha)	tonnes	S (ha)	tonnes	S (ha)	tonnes	S (ha)	tonnes
Alabama					9 120	35 124	10 400	42 849
Arkansas					12 400	39 274	13 200	48 712
Louisiane					5 560	18 491	5 280	18 940
Mississippi					44 600	160 702	45 400	181 200
Total Sud USA			70 088	222 423	71 680	253 591	74 280	
Total USA	58 800	157 644		253 680	79 200	278 500		266 320

Poids de catfish transformé, chiffre d'affaire global du secteur, prix moyen annuel payé par les transformateurs aux producteurs (P1) et prix de vente transformateurs (P2) (sur l'ensemble des Etats-Unis)

	Tonnage	C.A.total (millions \$)	P1 (cents / kg)	P2 (\$ / kg)
1995	202 439	399	174	
1998	255 653	469	164	
2000	268 902	501	166	5.3
2001	266 500	660 à 675	144	5.1

C'est en été et en automne que les apparitions des problèmes d'off-flavor sont les plus fréquentes. En fin d'été, de 50 à 80 % des étangs de production commercialisable présentent des populations de poissons "off-flavor" (BROWN & BOYD, 1982 ; VAN der PLOEG & TUCKER, 1993 ; JENSEN & CREW, 1997), et près de 50 à 70 % des catfish commercialisables sont jugés off-flavor et refusés par les transformateurs (KILLIAN, 1977). Ces phénomènes peuvent avoir de graves conséquences, d'autant qu'ils peuvent persister dans les étangs de production de quelques semaines à plus d'une année (VAN der PLOEG & *al.*, 1995 ; TUCKER & *al.*, 2001). Les producteurs de catfish sont alors essentiellement affectés par le fait que les poissons ne sont plus commercialisables pour la consommation, du moins pas au prix souhaité pour une bonne rentabilité économique. De plus, les phénomènes d'off-flavor modifient les calendriers de mise en charge des étangs ainsi que les programmes de vente au repeuplement. Le pisciculteur doit stocker son poisson plus longtemps, subissant de fait un allongement de la phase à risque ; cela se traduit aussi par des problèmes de trésorerie pour les entreprises avec un allongement des délais de cash flow (MC GEE & LAZUR, 1998). Cela peut également aboutir à la production de poissons plus gros avec pour conséquences une dégradation des indices de transformation de l'aliment donc un coût de production supérieur de l'ordre de 5 à 20 % (VAN der PLOEG & *al.*, 1995) et des prix de vente plus faibles.

Il y a également des conséquences pour les transformateurs et la filière aval. En effet, après un épisode d'off-flavor, il se peut que quelques poissons présentant ces mauvais goûts partent malencontreusement sur le marché de la consommation ; les conséquences sont alors la perte de consommateurs et sur le long terme, une dégradation de l'image du produit, conduisant les professionnels à investir parfois lourdement dans des campagnes de promotion rendues nécessaires.

Globalement, pour les producteurs, le coût des pertes liées à ce problème est estimé à 16 millions de dollars par an (WEAVER-MISSICK, 2000) ; une autre estimation fait état de coûts de retard de commercialisation de près de 50 millions de dollars par an (PERSCHBACHER & *al.*, 1997). COBLENTZ (2001) cite des pertes économiques liées à l'off-flavor pour le Mississippi de 22.7 millions de dollars en 1997 et de 23.2 millions de dollars en 1998 ; en 1999, après utilisation d'un procédé pour lutter contre la prolifération des cyanobactéries (traitement au sulfate de cuivre ou avec un herbicide), ces pertes ont été estimées à 14.7 millions de dollars. L'analyse économique de l'utilisation de ce type de procédé (Tab. 2) montre des résultats positifs dans l'ensemble (TUCKER & *al.*, 2001).

Tableau 2 : Indices économiques de la production de catfish au Mississippi avant et après usage d'herbicide (Diuron) pour contrôler les cyanobactéries. (d'après Hanson, 2000) - (les calculs sont basés sur les dépenses supplémentaires : main d'œuvre, nourriture, aération, ... estimées par les pisciculteurs)

	1997	1998	1999
Coûts liés aux délais de report de pêche et donc de commercialisation	11.4 millions de \$	10.5 millions de \$	6.8 millions de \$
Coûts liés aux pertes de poissons	9.1 millions de \$	10.6 millions de \$	6.5 millions de \$
Coûts de transport pour tests	202 900 \$	246 200 \$	214 600 \$
% de tests positifs chez les transformateurs	52	52	43

Bien que les transformateurs estiment que l'emploi d'herbicides réduit de manière significative l'impact de l'off-flavor sur la production de catfish au Mississippi, ces traitements chimiques font l'objet de positions très partagées par les différents spécialistes américains.

Pour la production américaine de catfish, l'off-flavor entraîne des pertes économiques directes et indirectes très importantes, en lien avec le poids important de la filière qui tient plus de l'industrie que d'une activité de production-transformation-commercialisation telle que nous l'entendons en Europe. Néanmoins, en envisageant un transfert d'échelle à nos filières, nul doute que si l'off-flavor devenait un phénomène fréquent en France, il engendrerait des conséquences économiques importantes, directement liées à l'image du produit. Il semble donc nécessaire d'identifier le plus précisément possible les principales origines du problème, afin de proposer aux professionnels des interventions les plus adaptées possible d'un point de vue technico-économique.

3. APPROCHE DESCRIPTIVE DE L'OFF-FLAVOR DANS L'EAU

Depuis la fin des années 1970, les pratiques visant à mieux contrôler la flaveur de l'eau se sont développées dans la plupart des pays industrialisés. Ces pratiques prennent différentes formes, de l'analyse empirique qui vise à repérer sur site une éventuelle flaveur, à l'analyse sensorielle complète effectuée par un jury de goûteurs confirmés.

Afin de standardiser les différentes approches méthodologiques, une association, l'IAWQ (International Association on Water Quality) regroupant les chercheurs dans le domaine a été créée.

a) Les principales catégories d'off-flavor dans l'eau

Les multiples approches du phénomène "off-flavor" sur l'eau potable sont fréquemment discutées au sein de l'IAWQ. Cette synthèse régulière des travaux a abouti à la formalisation d'outils méthodologiques communs : connaissance générale des phénomènes d'off-flavor, définition de protocoles d'échantillonnage, de suivi, d'analyse, ... Parmi ceux-ci, figure "l'odor and taste wheel" (fig. 1), qui est considéré comme l'outil de référence pour classer les goûts et les odeurs de l'eau potable".

Cet outil, créé au début des années 1980 et mis à jour par SUFFET et *al.* (1999), référence l'ensemble des catégories d'odeurs et de goût auxquels se rapportent les phénomènes d'off-flavor dans l'eau.

Pour le goût, les quatre principales catégories sont répertoriées : acide, amer, salé, sucré et les molécules associées sont facilement identifiables, et ne sont que très rarement responsables d'épisodes d'off-flavor.

Pour les odeurs, l'étendue du problème est plus vaste. Nous pouvons distinguer huit catégories :

- **l'odeur "produits chimiques"** : cette catégorie rassemble un ensemble de composés pouvant donner à l'eau une odeur d'essence, de solvant, de pétrole, de peinture, ... ;
- **l'odeur "produits médicaux"**, caractérisée par la présence de phénols ou de composés iodés ;
- **l'odeur "poisson"**, avec la dominance de l'odeur "rancie" (poisson pourri) ;
- **l'odeur "fruit/légume/fleur"**, souvent relative à une odeur proche de celle du géranium, du concombre ou de l'orange ;
- **l'odeur "décomposition"**, avec des odeurs de sulfure, de putréfaction, ... ;
- **l'odeur "herbe/bois"**, avec dominance des odeurs liées à l'herbe ;
- **l'odeur "chlore/ozone"**, caractérisée par la typique odeur "eau de piscine" ;
- **l'odeur "terre/vase"**, qui donne globalement une flaveur de "moisi" à l'eau.

A chaque catégorie correspond un certain nombre de molécules, mais de nombreuses odeurs ne sont pas véritablement référencées, aucune association caractéristique avec un composé chimique précis n'ayant pu, à ce jour, être établie.



Figure 1 : L'odor and taste wheel ou "roue des goûts et odeurs"

L'outil "odor and taste wheel" permet donc de développer et d'employer un langage commun utilisé par l'ensemble des chercheurs travaillant sur l'analyse sensorielle des eaux de boisson. Par l'intermédiaire de l'IAWQ, il permet surtout de valider les approches scientifiques établissant et prouvant les relations de cause à effets entre l'identification sur le site d'un phénomène physique, chimique ou biologique, et la présence avérée d'off-flavor dans l'eau après analyse organoleptique.

La littérature est en effet remplie de conclusions plus ou moins contradictoires qui font un amalgame de différentes approches, et ont souvent pour conséquence de rendre le problème plus complexe pour les professionnels (distributeurs et gestionnaires). Pour replacer la notion d'off-flavor à sa juste place, SUFFET *et al.* (1999) considèrent qu'il ne faut pas nécessairement croire que la présence d'actinomycètes ou de cyanobactéries peut engendrer à elle seule un phénomène d'off-flavor dans l'eau. De la même façon, il ne faut pas penser que l'odeur "terre/vase" est due uniquement à la présence de géosmine ou de méthylisobornéol, et cela même si les cyanobactéries ou les actinomycètes sont présents ; D'autres composés peuvent intervenir, sécrétés ou non par ces organismes.

L'IAWQ, sur la base des travaux de MELLEVALLE & SUFFET (1987) et de PERSSON (1992) a donc établi une méthode scientifique comportant la procédure à suivre pour étudier un événement off-flavor sur l'eau. Le cahier des charges comporte ainsi quatre points :

1. identifier et isoler l'entité supposée responsable, afin de déterminer si l'odeur produite par cette entité est identique à celle relevée dans l'eau ;
2. isoler les métabolites produits par cette entité par chromatographie en phase gazeuse / spectrométrie de masse ou toute autre technique adaptée ;
3. isoler la(les) molécule(s) provoquant l'odeur dans l'eau ;
4. valider la similarité des molécules entre l'entité et eau, et, si possible, déterminer une relation entre la concentration de la molécule incriminée et l'intensité de l'odeur dans l'eau par analyse sensorielle.

La plupart des événements d'off-flavor dans l'eau sont désormais appréhendés par cette méthode, certes lourde, mais efficace quant à l'identification et la possible résolution du problème.

b) Origines potentielles de l'off-flavor dans l'eau

De nombreux travaux énoncent globalement les origines des épisodes d'off-flavor dans l'eau (JUTTNER, 1986 ; PERSSON, 1988 ; SKULBERG, 1988 ; WHITFIELD, 1988 ; WNOROWSKI, 1992 ; PERSSON, 1995 ; PERSCHBACHER & al., 1996). Les origines potentielles d'une situation d'off-flavor dans les réservoirs d'eau potable ou autres plans d'eau multi-usages peuvent être classées en quatre grandes catégories :

- ✓ **les processus biologiques internes à la masse d'eau.** Sont regroupés sous cette rubrique l'ensemble des organismes dont les sécrétions ou la décomposition peuvent induire une odeur particulière dans l'eau : bactéries anaérobies, actinomycètes, levures, moisissures, cyanobactéries, algues de différents groupes (chlorophytes, diatomées, dinoflagellés).
- ✓ **les processus biologiques dans l'environnement proche.** Sont en particulier fréquemment relevés les phénomènes de décomposition de végétaux (herbe, feuilles d'arbre, bois) extérieurs à la masse d'eau mais diffusés dans l'eau.
- ✓ **les phénomènes de pollution diffuse par des molécules artificielles provenant de l'industrie ou de l'agriculture.** L'odeur relevée est alors soit due à la molécule initialement synthétisée, soit à un dérivé de cette molécule obtenu après processus biochimique (méthylation, chlorination, chloramination, ...)
- ✓ **les pratiques de désinfection de l'eau en vue de leur potabilisation.** Ce sont les odeurs provenant directement des traitements préalables des eaux destinées à la consommation humaine (ozonation, traitement au chlore).

c) Identification des molécules et origines potentielles

Après un aperçu général sur l'ensemble des molécules odorantes connues à ce jour pour être responsables d'un épisode d'off-flavor dans l'eau, nous focaliserons notre étude sur la catégorie "terre/vase", qui est sans doute le type d'off-flavor le plus répandu dans les milieux naturels ou les structures de production.

→ **Aperçu général**

A partir des références bibliographiques dans le domaine, le tableau 3 présente pour les huit types d'odeur de "l'odor and taste wheel" les composés et les sources potentielles des odeurs relevées dans l'eau. Les composés identifiés ont deux origines principales, soit biologique (catégories "terre/vase", "végétation", "rancie" (poisson) et "décomposition"), soit anthropique (contamination par une molécule de synthèse issue de l'industrie, de l'agriculture, ...).

Les molécules les plus fréquemment incriminées dans les phénomènes d'off-flavor sont de loin associées aux catégories "chlore/ozone" et "terre/vase" (SUFFET & al., 1999). La totalité des travaux pris en compte signale que l'origine de l'off-flavor "chlore/ozone" est directement liée aux procédés de traitement par les entreprises de distribution d'eau potable (DIETRICH & al., 1994 ; KAJINO & al., 1999 ; WELTE & MONTIEL, 1999). L'off-flavor terre/vase aurait plutôt une origine biologique.

Tableau 3 : Identification des molécules odorantes pour chaque catégorie de l'odor and taste wheel, et précisions quant à leur origine (d'après SUFFET & al., 1999)

Composé	Source	Odeur
		TERRE/VASE
géosmine	Actinomycètes, cyanobactéries	Terre
2-méthylisobornéol	Actinomycètes, cyanobactéries	Moisi
isopropyl methoxypyrazine	Actinomycètes	Moisi/Pomme de terre
cadinène-ol	Actinomycètes	Terre/Bois
2,4,6, trichloroanisole	Chlorophénol (traitement eau)	Moisi
		FRUIT/LEGUME/FLEUR
trans,cis-2,6 nonadienal	Algues	Concombre
aldéhydes	Ozonation	Fruité
inconnu	Décomposition algale	Végétation en décomposition
		HERBE/BOIS
cis-3-hexenyl-1-ol acétate	Pollution chimique	Peu prononcé (doux)
cis-3-hexen-1-ol	Pollution chimique	Herbe
β-cyclocitral	Cyanobactéries	Herbe/Fruité/Tabac
		POISSON
n-hexanal et n-heptanal	Algues	Poisson
trans,cis-2,4-decadienal	Algues	Huile de foie de morue
2-trans,4-cis,7-cis-decatrienal	Algues	Poisson/huile de foie de morue
hepta- et deca-dienal	Algues	Poisson
trans, trans-2,4 heptadienal, trans-4 heptenal, 1-pent-3-one	Traitement eau potable	Poisson
		DECOMPOSITION
thio-alcools	Cyanobactéries	Soufre
dimethyl polysulfuré	Bactéries	Poisson pourri
sulfure d'hydrogène	Bactéries anaérobies	Œuf pourri
dérivé de methoxypyrazine	Décomposition herbe et traitement eau	Végétaux en décomposition
inconnu		
benzopyrrole	Algues	Poisson/septique
aldéhydes	Décomposition herbe et traitement eau	septique
	Chloruration d'amino-acides	Eau de piscine

Composé	Source	Odeur
chlorophénols	Chloration des phénols/chloramination	PRODUITS MEDICAUX Médical
bromophénols	Chloration des phénols/présence d'ions brome	Médical
composés iodés divers	chloramination	médical
antioxydants phénoliques	Fabrication matériaux polyéthylène	PRODUITS CHIMIQUES Plastique
inconnu	Javel	Urine de chat
2-éthyl-5-5'-diméthyl-1,3-dioxane et 2-éthyl-4-méthyl-1,3-dioxolane	Résidus aldéhydes et glycol	Légèrement sucré (tutti frutti)
méthyl-t-butyl-éther	Additifs de carburants	Térébenthine
dicyclopentadiènes	Industries de la chimie	Térébenthine
chlore	Traitement eau potable	CHLORE / OZONE Chlore
Monochloramine	Traitement eau potable	Chlore
dichloramine	Traitement eau potable	Eau de piscine

→ **Cas de l'off-flavor "terre/vase"**

Le goût de vase, de terre ou de moisi fréquemment noté dans l'eau de boisson ou dans de nombreux milieux aquatiques provient la plupart du temps de la sécrétion d'un certain nombre de métabolites par des organismes présents dans le milieu aquatique. Parmi ces organismes, les cyanobactéries et les actinomycètes sont de loin les plus fréquemment cités. Le tableau 4 présente les espèces responsables d'off-flavor et les métabolites associés.

Les mécanismes de synthèse de chacun de ces métabolites, les modalités de relargage dans l'eau, et les facteurs de milieu ayant un effet sur ces deux processus diffèrent selon l'organisme producteur. Ils sont en partie précisés dans des analyses bibliographiques critiques publiées par GERBER (1979), HAYES & BURCH (1989) ou encore JUTTNER (1995).

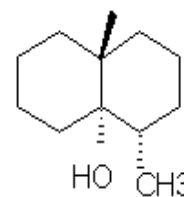
Tableau 4 : Cyanobactéries et actinomycètes recensés à ce jour comme vecteurs de l'off-flavor "terre/vase" dans l'eau

	Lieu	Espèce	Métabolite sécrété	Références
C Y A N O B A C T E R I E S	USA	<i>Oscillatoria chalybea</i>	2-méthylisobornéol	Tucker, 2000 Shrader & al.,1998 Van der Ploeg & al.,1995 Martin & al.,1988 Lovell, 1983
	Norvège	<i>Oscillatoria brevis</i>	géosmine	Berglind & al.,1983 Utkilen & al.,1992
	USA/ Japon	<i>Oscillatoria tenuis</i>	2-méthylisobornéol	Hoson, 1992 Negoro & al.,1988 Izaguirre & al.,1983
	Japon	<i>Oscillatoria limnetica</i> , <i>Oscillatoria geminata</i>	2-méthylisobornéol	Matsumoto & Tsuchiya, 1988
	Japon	<i>Oscillatoria splendida</i>	Géosmine	Matsumoto & Tsuchiya, 1988
	USA	<i>Oscillatoria limosa</i>	2-méthylisobornéol	Bafford & al.,1992
	USA	<i>Oscillatoria perornata</i>	2-méthylisobornéol	Schrader & al.,2000
	Japon	<i>Oscillatoria splendida</i>	γ-cadinene	Tsuchiya & Matsumoto, 1988
	Japon, USA	<i>Phomidium tenue</i>	2-méthylisobornéol	Izaguirre, 1992 Negoro & al.,1988 Zimmermann & al.,1995 Sugiura & al.,1997
	USA	<i>Pseudanabaena spp.</i>	2-méthylisobornéol	Izaguirre & Taylor, 1998.
	Taiwan, USA	<i>Anabaena spp.</i>	géosmine	Wu & al.,1991 Van der Ploeg & al.,1992
	Japon	<i>Anabaena macrospora</i>	géosmine/ cadinene-ol	Tsuchiya & Matsumoto, 1988 Aoyama & al.,1991
	USA, Australie	<i>Anabaena circinalis</i>	géosmine	Bowmer & al.,1992 Rosen & al.,1992
	Taiwan	<i>Nostoc spp.</i>	géosmine/ méthylisobornéol	Hu, 1994.
	USA	<i>Lyngbya spp.</i>	géosmine	Schrader & Blevins, 1993
	Japon, USA	<i>Anabaena flos-aquae</i>	géosmine	Matsumoto & Tsuchiya, 1988 Peterson & al.,1995
	Europe	<i>Aphanizomenon gracile</i>	géosmine/argosmine	Jüttner & al.,1986
A C T I N O M Y C E T E S	USA	<i>Streptomyces halstedii</i>	géosmine	Schrader & Blevins, 1993
	Royaume-Uni	<i>Streptomyces albidoflavus</i>	géosmine	Wood & al.,1985
	USA	<i>Streptomyces tendae</i>	géosmine	Dionigi & Champagne, 1995
	USA	<i>Streptomyces spp.</i>	géosmine	Lind & Katzif, 1988
	Japon	<i>Streptomyces spp.</i>	géosmine méthylisobornéol	Tsuchiya & al.,1978
	USA	<i>Streptomyces spp.</i>	géosmine, méthylisobornéol isopropylmethoxypyrazine	Gerber, 1979
	Japon	<i>Streptomyces spp.</i>	méthylisobornéol	Sugiura & al.,1994
	Japon	<i>Myxococcus spp.</i>	géosmine	Yamamoto & al.,1994
	USA	<i>Nocardia spp.</i>	géosmine, méthylisobornéol isopropylmethoxypyrazine	Gerber, 1979
	USA	<i>Actinomadura spp.</i>	géosmine, méthylisobornéol isopropylmethoxypyrazine	Gerber, 1979
	USA	<i>Microbispora rosea</i>	géosmine, méthylisobornéol isopropylmethoxypyrazine	Gerber, 1979
	Japon	<i>Actinomyces biwako</i>	géosmine méthylisobornéol	Kikuchi & al.,1973
	USA	<i>Penicillium expansum</i>	géosmine	Dionigi & Champagne, 1995

Les principaux métabolites incriminés dans l'off-flavor "terre/vase" sont donc à ce jour au nombre de quatre :

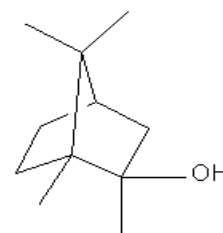
- la géosmine (trans-1,10-diméthyl-trans-9-decalol, $C_{12}H_{12}O$), sesquiterpène irrégulier issu de la dégradation d'un groupe isopropyl.

Seuil de détection par l'homme : 10-20 ng/l
Concentrations observées : 30 ng/l – 7 μ g/l



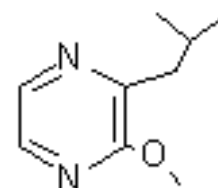
- le 2-méthylisobornéol, synthétisé par méthylation d'un monoterpène.

Seuil de détection par l'homme : 30-40 ng/l
Concentrations observées : 100 ng/l – 10 μ g/l



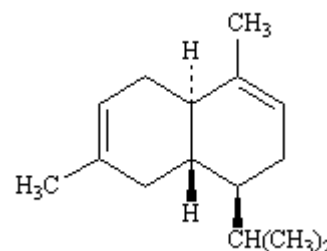
- l'isopropylmethoxy pyrazine (sous la forme 2-isopropyl-3-méthoxy pyrazine), pyrazine qui peut également se transformer en 2-isobutyl-3-méthoxy pyrazine et 2-isobutyl-6-méthoxy pyrazine;

Seuil de détection par l'homme : 10 ng/l
Concentrations observées : 10 – 100 ng/l



- le cadinène, sesquiterpène pouvant se présenter sous différentes formes stables dans l'eau (cadinène-ol, γ -cadinène, 4-cadinène,...)

Seuil de détection par l'homme : 100 pg à 1 ng/l
Concentrations observées : 1-50 ng/l



d) Contexte réglementaire et programmes de recherches en France

→ *Les aspects réglementaires*

En France, le contexte de contrôle des eaux de boisson s'impose en premier lieu chez les distributeurs d'eau potable. Mais la plupart d'entre eux procèdent au traitement pré-établi (chlore, ozone, ...) sans pour autant valider la qualité de l'eau par analyse sensorielle.

Au niveau réglementaire, les DDASS ne s'intéressent à la qualité de l'eau potable que sur les critères du décret de 1995, revu en 2000, qui fixe les normes de potabilité (Ministère Emploi et Solidarité, 2000) ; en ce qui concerne l'odeur, il est simplement précisé que l'eau potable "ne doit pas présenter d'odeur, de saveur, pour un taux de dilution de 2, à 12°C et de 3, à 25°C".

La qualification des odeurs et saveurs n'est pas déclinée dans la réglementation "eau potable". Il faut pour cela se reporter aux critères d'analyse de l'eau définis par l'AFNOR et s'adressant aux laboratoires ayant à déterminer quantitativement l'odeur et la saveur de la plupart des types d'eaux. Ces critères sont susceptibles de servir de base de référence dans la réglementation française relative à la qualité des eaux.

Une norme de 1995 décrivait une méthode pour évaluer le goût d'une eau (Tab. 5) et précisait les critères de dénomination du goût avec, dans certains cas, leur origine éventuelle (NF T90-035). Elle a été remplacée en 1997 par la norme NF EN 1622, norme européenne. Deux méthodes sont décrites :

- une méthode courte, applicable soit si l'échantillon n'a pas d'odeur ni de saveur, soit si l'odeur et la saveur doivent être comparées à un seuil spécifié,
- une méthode complète, applicable lorsque le seuil pour l'échantillon doit être déterminé.

Les deux méthodes sont utilisables pour quantifier l'odeur et la saveur de l'eau potable et/ou des eaux de migration provenant des matériaux en contact avec des eaux.

Tableau 5 : Critères de dénomination du goût de l'eau (NF T90-035)

Goût	bicarbonaté, alcalin	
	métallique	fer, manganèse, cuivre
	chloré	
	d'hydrocarbures	
	de mandarine	oxydation de traces d'hydrocarbures au cours des traitements
	pharmaceutique	produits organiques
	de chlorophénol	
	de terre	"certaines eaux de la craie"
	de vase	
	de marée	poissons, métabolites de certains organismes du plancton, certains composés organiques industriels, ...
	de moisi	moisissures, champignons inférieurs, levures et peut-être certains produits chimiques
	de noix moisie	campagne sucrière
	de bouchon moisi	herbicides et pesticides

→ **Les études et recherches sur l'off-flavor de l'eau en France**

Au niveau de la recherche en amont, les études sont plutôt rares. Les références publiées en France dans le domaine ont été financées par l'Agence de l'Eau Seine Normandie dans le cadre du programme "Alimentation en Eau Potable".

Les trois études traitant précisément des problèmes d'odeur et de goût de l'eau ont été réalisées par le centre de recherche de la Lyonnaise des Eaux, CIRSEE (Centre International de Recherche Sur l'eau et l'Environnement). Les conclusions de ces études précisent que :

- les situations d'off-flavor les plus communément rencontrées sont liées à l'ajout de chlore (odeur "chlore/ozone") ou dans une moindre proportion au goût de moisi (goût de "terre/vase"),

- le goût de moisi apparaît ou pas selon la teneur résiduelle en chlore après traitement, le chlore jouant le rôle d'agent masquant de l'odeur "terre/vase" si sa teneur est supérieure à 0,1 mg/l,
- le goût de moisi est dans certains cas associé à la présence de métabolites d'algues (géosmine et méthylisobornéol principalement), mais de nombreux épisodes d'off-flavor de ce type demeurent potentiellement attribuables à des composés dérivés des chlorophénols et chloroanisoles produits par les levures ou moisissures, et conférant à l'eau un goût de moisi intense.

Ces études amorcées en 1995 et toujours en cours permettent de préciser que l'odeur "terre/vase" est fréquemment observée dans les réseaux d'eau potable, et que dans la majorité des cas, son origine n'est pas forcément due aux algues.

Aucune phase de recherche n'a à ce jour été menée dans les structures de production ou sur les produits issus de l'aquaculture.

4. IDENTIFICATION DE L'OFF FLAVOR DANS LE POISSON

Le poisson est fréquemment touché par les épisodes d'off-flavor relevés dans l'eau, dans la mesure où les molécules odorantes causant l'off-flavor sont souvent capables de se fixer dans les tissus du poisson.

Le cas d'off-flavor dans le poisson le plus étudié reste sans conteste celui du catfish américain, en particulier dans les états du Mississippi, de Louisiane, de Floride ou d'Alabama. Dans des conditions de production intensive, jusqu'à 5 tonnes/ha, (MASSER, 1995), l'off-flavor a des conséquences économiques telles que depuis environ trente ans, les Américains étudient le problème, avec une volonté de répondre aux questions suivantes :

- Comment détecter l'off-flavor ?
- Quand cela apparaît-il ?
- Comment et combien de temps la chair de catfish retient-elle l'off-flavor ?
- Que peut-on faire contre l'off-flavor de la chair du poisson ?
- Que peut-on faire pour prévenir l'apparition des phénomènes d'off-flavor ?

A partir de l'analyse de nombreux travaux américains menés pour la filière "catfish" depuis 1970, et d'études complémentaires effectuées par ailleurs sur divers poissons, nous présenterons les principales caractéristiques des situations d'off-flavor dans les milieux étudiés (origine, fréquence, intensité, durée). Dans la mesure du possible, nous préciserons les relations existant entre le type d'off-flavor recensé (notamment l'off-flavor "terre/vase"), la nature et le mode d'action des molécules odorantes (gammes de concentrations, seuils de détection), et l'origine potentielle de ces molécules.

a) Historique

Les premières notes scientifiques relatant l'existence d'un goût plutôt répulsif du poisson datent du début du XX^e siècle (LEGER, 1910 ; HOFFMANN, 1933).

Dès les années 1930, THAYSON (1936) signale un goût terreux sur les filets de truite dans les rivières d'Ecosse. Ses recherches concluent alors que des actinomycètes se développant à la surface du sédiment synthétisent des composés non identifiés, dotés d'un goût de vase, et assimilés et fixés dans les tissus de la truite.

Au cours des années 1960, en parallèle du développement rapide de l'aquaculture en Israël, ASCHNER et *al.* (1969) mettaient en relation la présence d'une cyanobactérie, *Oscillatoria tenuis* et des épisodes répétés d'off-flavor sur des filets de carpes.

Dès le début des années 1970, sous l'impulsion de LOVELL (1971), le problème de l'off-flavor a été étudié sur le catfish. LOVELL (1972) conclut alors que plus de 50 % des étangs et bassins de production présentent une odeur de terre ou de moisi ("earthy/musty"), liées à la présence en abondance d'actinomycètes et de cyanobactéries.

A la même période, les premiers essais de culture permettent d'isoler les molécules induisant ce goût dans le catfish. GERBER & LECHEVALIER (1966), ROSEN et *al.* (1970) isolent ainsi la géosmine et le méthylisobornéol, CAMPBELL & MORRIS (1966) la mucidone à partir de cultures d'actinomycètes. SAFFERMAN & *al.* (1967) isolent la géosmine à partir d'une culture de *Symploca*, tout comme MEDAKER et *al.* (1968) pour *Oscillatoria*.

Un certain nombre de suivis sur sites de production sont alors réalisés et permettent souvent de conclure que le goût de vase présent est attribuable aux cyanobactéries et/ou aux actinomycètes, sans vraiment généraliser une origine particulière de l'off-flavor. (LOVELL, 1976). Ces études concluent que dans ces milieux de production intensive souvent hypereutrophes, les phénomènes d'off-flavor apparaissent indépendamment de la saison, de la morphologie ou de la situation géographique des sites. La corrélation entre l'apparition de l'off-flavor et l'abondance des cyanobactéries ou des actinomycètes dans le milieu donne lieu à des conclusions contradictoires, certains trouvant une corrélation positive (BROWN & BOYD, 1982), d'autres pas (LOVELL, 1983).

Par la suite, l'ensemble des travaux a eu pour but :

- d'une part de préciser l'origine, le déclenchement et les conséquences du phénomène,
- d'autre part, de tester un certain nombre de plans de gestion du problème.

b) Origine de l'off-flavor "terre/vase" dans la chair de poisson

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'essentiel des travaux effectués depuis les années 1960 relie le problème off-flavor à la présence de cyanobactéries et d'actinomycètes, producteurs de méthylisobornéol ou de géosmine, et responsables de l'off-flavor "terre/vase" dans le poisson.

Dans les eaux chaudes du Nord-Est des Etats-Unis où sont localisés la majorité des sites de production de catfish (*Ictalurus punctatus*), l'off-flavor est la plupart du temps attribué aux cyanobactéries : dans des conditions hypereutrophes et à des températures presque toujours supérieures à 20 °C, nul doute qu'elles trouvent alors des conditions optimales pour leur développement (TUCKER & BOYD, 1985 ; ARMSTRONG & *al.*, 1986).

Sur l'ensemble des structures de production de catfish, l'identification précise de la cyanobactérie à l'origine de l'off-flavor varie géographiquement. Prenons l'exemple des trois états dans lesquels la production de catfish est la plus importante :

- en Alabama, on attribue principalement les épisodes d'off-flavor au genre *Anabaena*, et plus particulièrement à l'espèce *Anabaena circinalis*, productrice de géosmine (LOVELL & *al.*, 1986 ; LELANA, 1987 ; VAN der PLOEG, 1991 ; VAN der PLOEG & *al.*, 1992 ; SCHRADER & *al.*, 1998)
- au Mississippi, l'off-flavor dans le catfish est principalement lié à la présence d'*Oscillatoria chalybea* et *Oscillatoria perornata*, capables de produire du méthylisobornéol (MARTIN & *al.*, 1987 ; MARTIN & *al.*, 1988 ; VAN der PLOEG & DENNIS, 1992 ; VAN der PLOEG, 1992 ; VAN der PLOEG & TUCKER, 1993 ; VAN der PLOEG & *al.*, 1995 ; SCHRADER & *al.*, 1998 ; SCHRADER & *al.*, 1999 ; OLSON & *al.*, 2001)
- en Louisiane, l'origine du problème est plus variable, avec une large gamme de cyanobactéries (*Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria*, *Pseudanabaena*, actinomycètes) capables de produire de la géosmine ou du méthylisobornéol (ANON, 1996 ; ZIMBA & *al.*, 2001 ; OLSON & *al.*, 2001).

Des travaux récents remettent en cause cette réduction du champ aux seules cyanobactéries et leur associent souvent les actinomycètes dont la production en géosmine ou méthylisobornéol est parfois plus importante que celle des cyanobactéries (SCHRADER & BLEVINS, 1993 ; MASSER, 1995 ; ENGLE & *al.*, 1995 ; ZIMBA & *al.*, 2001).

En dehors de l'approche catfish, un certain nombre d'études ont permis d'identifier l'origine de l'off-flavor dans la chair de différentes espèces de poisson :

- pour le tilapia en Thaïlande (*Oreochromis niloticus*), les cyanobactéries sont elles aussi incriminées, et en particulier *Anabaena* (YAMPRAYOON & NOOMHORM, 2000);
- pour la truite au Danemark (*Onchorhynchus mykiss*), une autre cyanobactérie est elle aussi incriminée, *Symploca muscorum*, produisant de la géosmine (HORLYCK, 1984 ; GAGNE & al.,1999).
- pour le saumon (*Salmo salar*) dans les rivières d'Irlande du Nord, les métabolites responsables sont la géosmine et le 2-méthylisobornéol, sans précision sur l'organisme producteur, mais avec de sérieuses présomptions quant au rôle de certains actinomycètes (FARMER & al.,1995).
- pour la brème (*Abramis brama*) et le sandre (*Stizostedion lucioperca*) en Finlande, *Oscillatoria agardhii* est à l'origine de fortes concentrations de géosmine (PERSSON, 1982).

Sur l'ensemble des cas étudiés, l'épisode peut alors durer de quelques dizaines de jours à pratiquement un an, avec une probabilité maximale d'apparition du phénomène sous nos latitudes au cours de la période juin-octobre.

c) Autres origines des situations d'off-flavor dans le poisson

Outre le goût de terre, et en éludant l'ensemble des phénomènes liés à une pollution accidentelle (off-flavor "médicament", "produits chimiques", "chlore/ozone", et "septique"), une autre catégorie d'off-flavor peut avoir des conséquences importantes sur la chair de poisson, celle liée au goût "herbe/bois" ("woody").

La substance responsable de ce goût de bois, souvent accompagné d'un arrière goût particulier astringent ou amer, n'est pas connue (TUCKER & al., 2001) ; l'apparition de ce type d'off-flavor ne semble pas répondre aux traitements par herbicides, la substance responsable de ce goût de bois ne devant pas être produite par des algues eucaryotes ou des cyanobactéries (TUCKER & al., 2001).

Aux USA, les goûts de bois sont les plus fréquents en fin d'automne et en hiver et semblent bien souvent apparaître après un épisode d'off-flavor de type méthyl-isobornéol (TUCKER & VAN der PLOEG, 1999).

Une molécule responsable du goût d'herbe ("grassy") est quant à elle bien identifiée : il s'agit du β -cyclocitral, molécule synthétisée par les cyanobactéries et pouvant donner une flaveur allant de l'herbe fraîche au tabac (SUFFET & al.,1999).

d) Quantification et répartition des métabolites dans la chair de poisson

La détermination de l'off-flavor dans la chair est basée en routine sur des analyses sensorielles développées par des jurys de testeurs sélectionnés ; toutefois, des analyses chimiques permettant d'acquérir des confirmations de la présence des molécules sont parfois réalisées en complément.

→ **Analyse sensorielle et démarche qualité**

Dès 1988, le "Catfish Institute" (TCI) a développé en collaboration avec différents départements de ministères américains un programme de contrôle basé sur le volontariat des producteurs et des transformateurs pour certifier et promouvoir la qualité du catfish mis en marché au moyen d'un logo (MC GILBERTY & *al.*, 1989). Les poissons satisfaisant la procédure décrite dans la charte qualité associée peuvent porter l'appellation "Mississippi Prime farm-raised catfish".

Les producteurs américains ont mis en place en 1992 un programme de formation à l'assurance qualité pour le catfish (BRUNSON et *al.*, 2001) incluant un double contrôle de l'off-flavor, sur le site de production et à l'entrée de l'atelier de transformation, afin de garantir au consommateur un produit "on-flavor". Des logiciels ont été développés pour accompagner et faciliter les procédures de type HACCP engagées dans les ateliers de transformation (SILVA et *al.*, 2001).

Les procédures de contrôle débutent 2 semaines avant la date fixée pour la pêche, puis sont renouvelées 3 jours avant et enfin le jour même de la pêche (JENSEN & CREW, 1997). Les phénomènes d'off-flavor peuvent apparaître très rapidement chez le poisson, en quelques heures ou même pendant les opérations de récolte. Si le poisson est détecté "off-flavor" les tests sont renouvelés chaque semaine qui suit. Les contrôles sont repris à l'arrivée des lots dans les ateliers de transformation. Les procédures appliquées sont les suivantes (JENSEN & CREW, 1997) :

- ✓ sélection d'un poisson par étang
- ✓ étêtage et éviscération
- ✓ section de la partie caudale
- ✓ cuisson sans assaisonnement selon 2 modalités au choix :
 - dans une papillote d'aluminium au four à 425 °F pendant 20 mn
 - au micro-ondes à forte puissance pendant 1 à 1.5 mn/30 g (1 ounce)
- ✓ après cuisson, appréciation de l'odeur et notification
- ✓ dégustation du poisson et notification.

Plusieurs parties du filet du poisson doivent faire l'objet de la dégustation car l'off-flavor n'est pas distribuée de manière homogène dans la chair, et tout particulièrement quand le phénomène est très léger ou que l'off-flavor appartient aux catégories "goût de poisson" ou "goût de pourriture" (VAN der PLOEG, 1991).

Les changements de goût du catfish se font plus rapidement en été qu'en hiver mais la variabilité inter poisson au sein d'un même étang de production est plus grande pendant l'hiver. L'échantillon comporte un nombre plus grand de poissons en hiver mais les échantillonnages ont lieu moins fréquemment qu'en été (VAN der PLOEG et *al.*, 1995).

Aux Etats-Unis encore, la Compagnie Southern Pride, située en Alabama, a développé un plan de contrôle du catfish avant la pêche. Des échantillonnages sont faits sur les étangs et les poissons sont testés par analyse olfactive simple dans les ateliers de transformation ; il peut arriver que près de 50 à 75 étangs soient échantillonnés chaque jour pour satisfaire les critères de qualité gustatifs retenus. Seuls les étangs dont les poissons testés auront reçu l'agrément seront mis en pêche.

Des grilles d'analyse sensorielle ont été développées et la plupart des descripteurs du goût du catfish ont été standardisés et référencés selon une terminologie communément utilisée aujourd'hui par les panels de testeurs lors des séances d'examen organoleptique de catfish. Parmi les 21 descripteurs de l'off-flavor, seuls 2 d'entre eux sont connus pour être produits par des cyanobactéries (géosmine et méthylisobornéol). Les principaux goûts et descripteurs retenus sont décrits dans le tableau 7 (VAN der PLOEG, 1992 ; TUCKER & VAN der PLOEG, 1999).

Tableau 7 : Liste des 21 descripteurs de goût utilisés en analyse sensorielle sur le catfish

"on flavor/off-flavor"	Catégorie	Descripteur (du – au + acceptable)
ON	Acceptable	Poulet Beurre Noisette Maïs
OFF	Légume	Céleri Champignon Herbe Oignon
OFF	Pourriture	Œuf pourri (H ₂ S) Effluents/vidange Végétation en décomposition Pourri Moisi
OFF	Terre	Boisé Pin Moisi/renfermé (MIB) Terre/vase (Géosmine)
OFF	Chimique	Diesel Pesticide Métal
OFF	Poisson	Carton Rance Rassis Huile de poisson Ecrevisse

L'intensité de la flaveur remarquée est quantifiée sur une échelle de 0 à 5 (Tab. 8). Le seuil a été défini comme le niveau le plus bas que la moitié de la population de testeurs peut détecter. Sa valeur pour la géosmine et le méthylisobornéol a été évaluée à 0,02 ppb et constitue la base de sélection des testeurs qui doivent en outre pouvoir séparer ces 2 substances (VAN der PLOEG, 1991).

Selon DIONIGI & *a/*. (2000), la géosmine n'est retrouvée dans la chair des poissons que lors des pêches d'automne (octobre). De plus, le temps nécessaire pour que les teneurs en MIB dans la chair atteignent une valeur seuil de 0,7 µg/l sont de 96 à 150 h en situation de rinçage dans une eau de forage (débit de 14 l/mn) ; par contre, pour que 80 % des poissons ne soient plus considérés comme "off-flavor" et que la concentration en MIB soit inférieure à ce seuil, 150 à 500 heures sont nécessaires.

Tableau 8 : Grille de notation de l'intensité de l'off-flavor par les panels de goûteurs

Absence d'off-flavor	0
Seuil	S
Très légère	1
Légère	2
Légère à distincte	3
Distincte	4
Distincte à forte	5
Forte à très forte	>5

La disparition du goût de bois de la chair de catfish prend plus de temps que pour le MIB et la géosmine : dans une eau claire de forage, à 24 °C, renouvelée, il faut 21 jours au moins pour voir apparaître une légère amélioration de la qualité de la chair de poissons touchés par le goût de bois, alors que, dans les mêmes conditions, 4 jours suffisent pour supprimer une off-flavor intense due au MIB ((TUCKER & VAN der PLOEG, 1999).

Un tri (screening) très rigoureux des poissons à l'entrée des ateliers de transformation permet de maintenir un bon niveau de qualité quant au goût des poissons, mais chaque lot de poissons rejetés doit être mis en attente, jusqu'à ce que l'off-flavor ait disparu, dans des étangs ou des bassins de rinçage/dégorgeage. Les procédures ont été décrites, notamment par VAN der PLOEG et *al.* (1995).

En France, les procédures de contrôle envisagées sur le silure reposent sur le prélèvement d'un poisson au hasard par lot, filetage, cuisson dans un four à micro-ondes permettant d'atteindre la température de 65 °C à cœur, puis dégustation avec appréciation de l'odeur et du goût (ADARC, 1998). L'eau claire destinée au stockage avant transformation est une eau présentant, outre des caractéristiques physico-chimiques aptes à la vie piscicole, la qualité bactériologique d'une eau potable et l'absence visuelle d'algues.

Pour la truite arc en ciel, la cuisson est faite aussi au four à micro-ondes pendant un laps de temps fonction du poids ou de la découpe et permettant d'atteindre une température à cœur d'au moins 65°C (T° de coagulation), sans adjonction d'agent de saveur : sel, aromates, ... Le plan d'échantillonnage retenu est fonction de la taille des lots ; il tient compte du fait que ce contrôle est destructif et que la mise en évidence d'une non-conformité sur un individu implique systématiquement que ce défaut est retrouvé sur tous les autres individus du même lot (Norme AFNOR NF V 45-100, 2000).

→ **Teneurs seuils et gammes de concentrations observées**

L'analyse quantitative dans la chair de poisson des métabolites pouvant induire l'off-flavor est la plupart du temps effectuée par GC/MS (chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse) après filetage (CONTE & *al.*,1996 ; GRIMM & *al.*,2001 ; ZIMBA, 2001) : 20 g de chair sont nécessaires.

Les résultats de concentrations mesurées dans la chair de poisson concernent uniquement les deux molécules géosmine et méthylisobornéol, qu'elles soient synthétisées par des cyanobactéries ou des actinomycètes (Tab. 6).

Tableau 6 : Concentrations en géosmine et méthylisobornéol observées dans plusieurs espèces de poisson.

molécule	concentration	référence
méthylisobornéol	Truite : 4-25 µg/kg	Yurkowski & Tabachek, 1974
	Tilapia : 5-15 µg/kg	Yamprayoon & Noomhorm, 2000
	Catfish : 10-800 µg/kg	Martin & <i>al.</i> ,1987 ; Martin, 1988
géosmine	Truite : 10-40 µg/kg	Yurkowski & Tabachek, 1974
	Catfish : 10-200 µg/kg	Lovell, 1986

Associé à des tests sensoriels effectués par un panel de goûteurs entraînés, ce type d'approche permet de définir les concentrations seuil décelables par l'homme dans la chair de poisson ; elles sont moins précises que celles relatives à l'eau. Nous retiendrons les gammes suivantes :

- 5 à 10 µg/kg pour la géosmine,
- 0.5 à 3 µg/kg pour le méthylisobornéol.

Des différences de sensibilité existent nettement entre testeurs pour ces molécules. Des jurés entraînés et particulièrement sensibles peuvent détecter aisément des teneurs en MIB < 1 µg/l (BETT & *al.*, 2000).

→ Localisation du stockage des substances odorantes dans la chair de poisson

La molécule de MIB est relativement de petite taille et passe très facilement au travers de la membrane des branchies puis dans le sang ; elle est ensuite déposée dans le muscle. Cette molécule est assez soluble dans les graisses et se fixera donc préférentiellement dans les tissus riches en graisses ; chez le catfish, on trouvera le MIB surtout dans la couche de graisse située juste en dessous de la peau (VAN der PLOEG & *al.*, 1995).

Dès lors qu'une substance odorante est disponible dans l'eau, la fixation dans l'organisme du poisson peut être très rapide selon la concentration en MIB dans l'eau :

- stockage en moins de deux heures dans la chair par les arcs branchiaux ou le tube digestif antérieur
- stockage en 5 à 7 heures dans l'estomac

Après 24 heures d'exposition, l'ensemble du poisson est contaminé et en 72 heures, les concentrations ont dépassé le seuil décelable par l'homme (JOHNSEN & LLOYD, 1992)

La vitesse d'accumulation et la répartition du stockage des molécules (géosmine et méthylisobornéol) dans la chair sont corrélées à plusieurs facteurs :

- aux facteurs de milieu tels que la température de l'eau. Plus la température de l'eau est élevée et plus la fixation sera rapide. On admet que la vitesse d'accumulation augmente nettement à partir d'une température de 20 °C (ARMSTRONG & *al.*,1986)
- à la teneur en graisse de la chair : plus le poisson sera gras, et plus les quantités fixées seront importantes (JOHNSEN & *al.*,1996 ; ZIMBA & *al.*,2001).

Une récente avancée a permis de comparer les teneurs en méthylisobornéol et en géosmine dans différentes parties du poisson. Outre le fait que les résultats confirment que

les deux substances sont particulièrement abondantes dans les parties où l'accumulation de graisse est la plus importante, l'étude permet également de penser que le foie pourrait être utilisé comme tissu standard de mesure (GRIMM & *al.*,2001 ; ZIMBA & *al.*,2001) :

- le foie est en effet un tissu beaucoup plus homogène que les parties musculaires, ce qui évite un grand nombre de biais lors de l'extraction,
- les concentrations retrouvées sont proches de celles observées dans les autres parties du poisson.

e) Les solutions pour contrôler l'off-flavor dans le poisson

Un certain nombre de solutions existent théoriquement pour contrôler l'off-flavor à différentes phases de la production. Elles sont principalement fondées sur la gestion des cyanobactéries, les actinomycètes ne faisant pas encore l'objet d'approche concrète de contrôle.

- Au cours de la période de production, différentes interventions sont pratiquées afin de limiter le potentiel de développement des organismes supposés responsables des épisodes d'off-flavor, comme les cyanobactéries. Ces interventions font le plus souvent appel à des biomanipulations ou à l'emploi d'herbicides.
- A la fin de la période de production et lors du transfert des poissons vers les structures de transformation, un suivi de contrôle par analyse sensorielle peut être mis en place, afin de déceler les poissons off-flavor, éviter la commercialisation de lots non consommables, et orienter les lots "off-flavor" vers des traitements à plus ou moins court terme, mise en eau claire notamment.

→ Biomanipulations

Les biomanipulations visent à instaurer des conditions ne favorisant pas l'implantation des cyanobactéries. Elles sont basées sur des interventions chimiques ou biologiques.

- Chaulage

Les travaux de MURPHY & PREPAS (1990) et PREPAS et *al.* (1990) effectués sur des plans d'eau hypereutrophes ont montré que des apports répétés d'oxyde ou de carbonate de calcium influencent à court et à long terme la teneur en phosphore dans le sédiment :

- un chaulage effectué précocement dans la saison provoque un relargage ponctuel d'éléments nutritifs dans l'eau et favorise l'appauvrissement du sédiment en phosphore échangeable. Il peut donc réduire les quantités relarguées en été et limiter le développement des cyanobactéries.
- Un chaulage effectué annuellement pendant une longue période favorise une augmentation du pouvoir d'adsorption de la couche superficielle du sédiment et assure un meilleur piégeage du phosphore.

Le chaulage peut cependant avoir un effet négatif sur le milieu : il peut provoquer à court terme une hausse très significative du pH qui stresse le poisson, en particulier si l'amendement est massif ou effectué pendant la période estivale.

Des travaux récents (GIRI, 2000) ont de plus montré que, dans les conditions expérimentales testées, l'apport de carbonate de calcium n'avait pas eu d'effet sur la réduction spécifique de l'abondance des cyanobactéries et ne constituait donc pas une solution efficace de gestion de ce problème.

- **Fertilisations azotées**

Du fait de la relation assez significative entre des rapports N/P bas et l'abondance des cyanobactéries, SEYMOUR (1980) a émis l'hypothèse que la fertilisation azotée dans des milieux hypereutrophes a des conséquences importantes sur la composition et la biomasse du peuplement phytoplanctonique, en limitant la dominance des Cyanobactéries.

Plusieurs auteurs ont confirmé cette hypothèse dans des milieux où l'azote devient limitant pendant la période estivale (BARICA et al, 1980 ; LEONARDSON & RIPL, 1980). Le peuplement normalement dominé par les Cyanobactéries hétérocystiques subit alors une profonde mutation : selon les conditions de milieu initiales et les doses d'azote appliquées, les taxons favorisés sont soit *Microcystis*, soit les Chlorophytes à taux de croissance et de multiplication élevés.

Une hausse du rapport N/P dans l'eau peut donc provoquer un changement dans la composition du peuplement phytoplanctonique. L'effet de la fertilisation n'est cependant pas durable, car les proliférations de Cyanobactéries surviennent à nouveau l'année suivante (BARICA et al, 1980).

SMITH (1982, 1988) précise que les fertilisations azotées appliquées en milieu eutrophe ne résolvent pas toujours les problèmes d'oxygénation de la masse d'eau, car les biomasses phytoplanctoniques restent abondantes. Néanmoins, on peut penser que les biomasses liées à une prolifération d'autres groupes phytoplanctoniques n'atteignent pas les valeurs extrêmes observées pendant un bloom de Cyanobactéries, du fait du broutage en particulier.

Sur le catfish, des travaux sont également en cours pour modifier la composition des aliments distribués de manière à diminuer les quantités de phosphore rejetées par les poissons (BUYUKATES & al., 2000) et gérer différemment le rapport N/P dans les étangs de production.

- **Contrôle biologique des Cyanobactéries**

Les maillons supérieurs de la chaîne trophique, et en particulier le peuplement piscicole, peuvent avoir des effets bénéfiques sur la dynamique phytoplanctonique saisonnière. L'impact indirect du peuplement piscicole peut être important. L'intégration dans le peuplement de la carpe argentée *Hypophthalmichthys molitrix*, dont le régime est presque exclusivement phytoplanctonophage, permet selon certains auteurs de limiter la biomasse algale, en réduisant principalement les formes de taille supérieure à 10 µm (OPUSZYNSKI, 1979 ; BURKE, 1984 ; SMITH, 1985 ; LAWS & WEISBURD, 1990). D'autres résultats prouvent clairement que la carpe argentée même introduite en quantité importante ne limite pas significativement les biomasses phytoplanctoniques, en particulier à cause d'une digestion incomplète des cellules (BODOLA, 1966 ; BITTERLICH, 1985a, 1985b). Dans le cas de biomasses importantes de cyanobactéries, il n'a pas été prouvé que la carpe argentée s'en nourrissait.

Plus récemment, des biomanipulations du peuplement piscicole ont été testées sur de nombreux lacs et plans d'eau. Ces interventions sont basées sur l'hypothèse qu'une modification des biomasses des maillons supérieurs de la chaîne alimentaire a des répercussions sur les maillons inférieurs, en particulier sur la production primaire (effet "top-down").

La plupart des essais consistant à réduire la population de poissons benthivores ou fouisseurs, tels que la brème ou la carpe, ont permis d'obtenir une nette diminution des biomasses phytoplanctoniques (ANDERSSON et al, 1978 ; SHAPIRO & WRIGHT, 1984 ; REINERSTEN & OLSEN, 1984 ; THRELKELD, 1988 ; VAN DONK, 1991 ; BREUKELAAR et al,

1994 ; CARVALHO, 1994). A l'inverse, une augmentation du peuplement de cyprinidés a tendance à stimuler la production algale, du fait d'une remise en suspension des éléments minéraux présents à la surface du sédiment, et d'une augmentation de l'excrétion azotée par les poissons (SPODNIIEWSKA & HILLBRICHT-ILKOWSKA, 1973 ; MATYAS et *al*, 1998).

D'autres essais réduisant les biomasses de poissons planctivores, ont également un effet indirect sur le peuplement algal, en limitant la pression de prédation sur le zooplancton (McQUEEN et *al*, 1986 ; SONDERGAARD et *al*, 1990).

Néanmoins, dans des milieux résolument eutrophes, l'effet de ces biomanipulations est souvent controversé, pour deux raisons :

- ⇒ BOON et *al* (1994) concluent qu'il n'est pas envisageable de résoudre de manière significative les effets d'une eutrophie importante en effectuant uniquement un remaniement du cheptel piscicole,
- ⇒ les effets des biomanipulations sont souvent difficiles à valider ou à quantifier, les interactions entre les différents compartiments du réseau trophique ayant tendance à masquer l'influence des maillons supérieurs (CROWDER, 1988 ; McQUEEN et *al*, 1989 ; De MELO et *al*, 1992).

- **Introduction de substances naturelles phytotoxiques**

Des études récentes menées sur plus d'une centaine de petits lacs (< 5 ha) ont prouvé que la décomposition de paille d'orge introduite dans la masse d'eau a un effet significatif sur le peuplement phytoplanctonique (WELCH et *al*, 1990 ; RIDGE & BARRETT, 1992). EVERALL & LEES (1996) et NEWMAN & BARRETT (1993) affirment qu'une introduction de 50 g / m³ de paille d'orge dans la masse d'eau réduit significativement la productivité phytoplanctonique et la dominance des Cyanobactéries. D'autres travaux démontrent que la paille d'orge limite le développement de l'ensemble du phytoplancton et des algues filamenteuses, sans pour autant avoir d'effets directs sur le zooplancton ou les poissons (BARRETT et *al*, 1996 ; 1998 ; CAFFREY & MONAHAN, 1998). Des essais sont également conduits en utilisant des tanins (ZHAO & *al*, 2000).

Ces effets sont dus aux propriétés phytotoxiques de certains polyphénols apparaissant en concentration significative après la décomposition de la paille (RIDGE & PILINGER, 1996). Cependant, le mode d'action de ces substances phytotoxiques n'est pas encore expliqué.

→ **Utilisation des herbicides**

Dans des milieux hypereutrophes et dans des conditions de production intensive, il a été prouvé que l'apparition de phénomènes d'off-flavor peut être considérablement réduite si les cyanobactéries ont été éliminées du milieu de production (TUCKER & VAN der PLOEG, 1999). La gestion des problèmes d'off-flavor, directement sur les sites de production, repose donc souvent sur l'utilisation d'herbicides / algicides pour tenter de contrôler le développement des populations de cyanobactéries. Le Diuron, [3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-diméthylurea], est ainsi utilisé aux Etats-Unis pour stopper la croissance des cyanobactéries dans les fermes de catfish du Mississippi (HANSON, 2001). Le sulfate de cuivre est également utilisé couramment dans le cas des eaux potables comme agent de contrôle des populations algales ; il est autorisé en aquaculture aux Etats-Unis (TUCKER & *al*, 2001), même si la marge de sécurité entre les concentrations toxiques pour les algues et dangereuses pour les poissons est faible et que la toxicité du sulfate de cuivre envers les organismes aquatiques est fortement influencée par les facteurs du milieu tels que le pH, la température de l'eau, les concentrations en calcium et la quantité de matière organique dissoute.

Les expériences menées par le Centre de recherches aquacoles de l'Université du Mississippi (TUCKER & *al.*,2001), ont consisté à suivre pendant 3 ans, 18 bassins de production de catfish, d'une surface de 0.4 ha (profondeur 1.1 m). Les grands étangs de production (3 à 5 ha) ne sont pas propices à l'utilisation d'herbicides du fait de la non-homogénéité de la qualité de l'eau pour un tel volume (physico-chimie et populations planctoniques) et de l'inefficacité des aérateurs à pâles pour améliorer cela.

Lorsque la température de l'eau a dépassé 20°C, la moitié des bassins a reçu un traitement hebdomadaire de 5.6 kg de pentahydrate de sulfate de cuivre / ha, l'autre moitié servant de témoins. Le produit est disposé dans un petit sac en toile de jute à 7 m de l'aérateur à pâles ; le courant induit par le fonctionnement de l'aérateur dissout et répartit le sulfate de cuivre dans l'ensemble du bassin. La qualité de l'eau a été suivie sur des échantillons d'eau prélevés tous les 15 jours : chlorophylle a, NH₃ total, nitrites. Des échantillons de poisson ont été prélevés tous les 15 jours durant l'été pour en déterminer la qualité organoleptique et une étude économique a été menée pour mesurer les incidences de ce type de traitement vis à vis de la maîtrise des risques d'off-flavor.

Les résultats présentés par Tucker et *al.* (2001) montrent que :

- la présence d'off-flavor a été détectée dans 40.4 % des échantillons de poissons issus des étangs témoins, dans 8.7 % de ceux issus des étangs traités au sulfate de cuivre,
- la majorité des cas d'off-flavor apparaît en fin d'été, soit avant la date de pêche finale pressentie,
- la prévalence des étangs témoins présentant une population de catfish "off-flavor" augmente au cours de l'été,
- les traitements au sulfate de cuivre diminuent la fréquence mais aussi la durée des épisodes d'off-flavor, diminuant ainsi les risques d'apparition de maladies et les mortalités, les nécessités de report de la date de pêche, etc..., et limitent par là-même les pertes économiques. Ils ont des conséquences négatives sur certains paramètres de la qualité de l'eau (NH₃, NO₂, O₂) et imposent une aération plus importante, donc des coûts supplémentaires,
- le traitement au sulfate ne résout pas tous les cas d'apparitions d'off-flavor car les substances sécrétées par les cyanobactéries ne sont pas les seules responsables de ces phénomènes,
- la production piscicole des étangs témoins est inférieure (9 %) à celle des étangs traités, surtout du fait que le délai supplémentaire nécessité par l'attente de la disparition de l'off-flavor dans les poissons entraîne des pertes par maladies, parfois très importantes (production de 300 kg/ha pour 3 000 attendus !).
- en termes d'analyse économique, le rendement net des étangs traités est supérieur à celui des étangs témoins ; les auteurs soulignent que le traitement au sulfate de cuivre permet de stabiliser les résultats, notamment en réduisant les risques de pertes dues aux maladies infectieuses,
- la production nécessaire à l'équilibre du budget est supérieure dans le cas des étangs traités au cuivre, du fait du coût du produit, des besoins supérieurs en aération et alimentation ; mais cela n'a pas été un problème dans le cas des étangs suivis puisque la marge obtenue dans les étangs traités au cuivre a dépassé de 540 dollars / ha la production nécessaire à cet équilibre. C'était donc une opération rentable, d'autant que l'apport de cuivre a aussi permis de stabiliser les résultats de production d'année en année.

En conclusion, les auteurs préconisent l'utilisation de sulfate de cuivre dans les cas où les poissons sont destinés à une pêche en fin d'été et si il y a suspicion d'off-flavor ; le cuivre

est déconseillé dans les étangs de fingerlings et de géniteurs car l'off-flavor n'est pas un problème pour ces poissons.

→ ***Interventions sur le poisson transformé***

De récentes études financées par l'USDA (United States Department of Agriculture) ont montré que l'off-flavor "terre/vase" fréquemment repéré dans le catfish pouvait être dissimulé en ajoutant des agents de sapidité aux produits filetés destinés à la consommation. Les essais réalisés montrent en effet qu'en pratiquant un assaisonnement à la Cajun (assaisonnement typique de la cuisine cajun et qui est à base de sel, de sucre, d'épices, de poudre d'oignon, de shortening d'huile végétale, de poudre d'ail, de fécule de pomme de terre, de protéine végétale hydrolysée, de constituants du lait, d'arôme, d'extrait de levure hydrolysée et de persil déshydraté) ou un assaisonnement basé sur un mélange citron/poivre, la notion d'off-flavor n'était plus perceptible par un panel de goûteurs entraînés. Les agents de sapidité jouent alors un rôle masquant, en permettant le développement d'une saveur qui interfère avec la perception de la géosmine ou du méthylisobornéol (BETT & *al.*, 2000). Ces recherches se poursuivent actuellement : elles permettraient de valoriser les catfish "off-flavor" en produits transformés.

Des travaux de recherche basés sur l'utilisation de l'ozone sont en cours pour supprimer la géosmine et le 2-MIB de la chair du catfish ou au moins réduire leur niveau à une valeur inférieure au seuil de détection de 0.07 ppb (XI & KING, 2001). Les premiers résultats sont encourageants.

5. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Comme on peut donc le voir, les phénomènes d'off-flavor sont difficiles à gérer dans les sites de production aquacole car ils cachent le plus souvent une variété de problèmes à cause parfois unique, mais aussi parfois non connue... Il est donc quasi impossible d'éliminer tout problème d'off-flavor avec une stratégie unique de gestion. Les essais de contrôle du problème effectués aux Etats-Unis sont donc basés sur un panel d'interventions multiples :

- développement d'unités de production optimisées, constituées de suffisamment de bassins pour pouvoir travailler en conditions de mise en charge plus faibles, avec des poissons de taille différentes et en faisant des pêches commerciales sélectives tout au long de la saison de production. La rentabilité économique peut être totalement remise en cause lors de phases aiguës d'off-flavor, ce qui fait que cette pratique n'est pas fortement utilisée.
- utilisation de méthodes de contrôle des cyanobactéries par utilisation de sulfate de cuivre ou par biomanipulations, ceci ne pouvant être pratiqué dans certaines conditions de qualité d'eau sans risques pour les poissons.
- développement en routine de programmes de contrôle de la qualité organoleptique des poissons directement sur les fermes de production pour optimiser les opportunités de commercialisation.
- gestion de la disparition de l'off-flavor dans les poissons en les laissant dans l'étang et en attendant la disparition du peuplement algal incriminé, en les stockant dans un autre bassin d'eau claire pendant le temps nécessaire à la disparition du phénomène, ...
- utilisation de process d'accompagnement de la transformation pour masquer l'off-flavor dans la chair du poisson, ...

Si les éléments compilés dans ce travail sur le thème de l'off-flavor nous renseignent sur les origines générales du problème, sur son déclenchement, sur les solutions diverses utilisées pour contrôler le phénomène par des méthodes préventives ou curatives, l'information concernant la méthodologie d'étude du problème (suivis *in situ*, analyses sensorielles, recherche des composés odorants) est beaucoup plus limitée. Ceci peut sans doute être lié au fait que la recherche américaine est très orientée par la mise en cause de peu de composés et de cyanobactéries, et concerne un élevage monospécifique (catfish).

En Europe, les enjeux commerciaux liés à ce problème de goût sont significatifs mais l'état des lieux du problème, en France notamment, n'a pas été encore réalisé.

A partir d'une analyse critique des informations recensées, la synthèse qui va suivre vise donc à élaborer une approche méthodologique de l'étude de l'off-flavor. Elle prendra en compte, à partir des origines potentielles du problème, les modalités de suivi et d'analyse à envisager afin de mettre au point une approche pertinente pour les filières de production impliquées.

a) Synthèse sur les origines potentielles de l'off-flavor

Si l'on tient compte des études menées sur l'eau, l'off-flavor prend une dimension très large, avec de multiples origines potentielles, biologiques, chimiques ou physiques. En recentrant le problème sur la catégorie "terre/vase", qui est de loin la plus fréquemment citée pour le poisson, les origines se limitent alors davantage aux phénomènes biologiques, avec la mise en cause de deux groupes, les cyanobactéries et les actinomycètes, et de

quatre molécules identifiées (géosmine, méthylisobornéol, cadinène, isopropyl-méthoxy-pyrazine). Ces molécules peuvent être élaborées par de nombreux taxons appartenant aux deux groupes cités.

En France, il n'existe à ce jour aucune étude sur l'off-flavor dans le poisson menée au sein des filières truite et carpe.

En analysant les suivis phytoplanctoniques effectués régulièrement sur les étangs de Dombes, du Forez, de Lorraine ou de la Région Centre, il semble envisageable d'émettre l'hypothèse d'un problème "cyanobactéries" sur les sites de production de pisciculture extensive, sans pour autant connaître précisément les processus les plus fréquents (espèce cyanobactérienne et molécule incriminées).

Les sites de salmoniculture, du fait de la température de l'eau limitée (< 15 °C) ne présentent pas les conditions favorables au développement des cyanobactéries. Il semble alors difficile d'émettre quelque hypothèse plausible pour réduire le champ d'investigation. Il apparaît donc nécessaire, au niveau d'un suivi *in situ*, de prospecter assez largement par rapport aux origines potentielles identifiées dans la bibliographie, et prendre ainsi en compte des composantes intrinsèques des élevages (nature des bassins, itinéraires techniques d'élevage, ...).

b) Approche méthodologique d'étude de l'off-flavor sur la carpe et la truite

L'approche méthodologique souvent choisie par les chercheurs américains est basée sur le choix de sites "à risque", connus pour être plus ou moins fréquemment touchés par des épisodes d'off-flavor. Dès lors que ces sites sont identifiés, trois phases de suivis se succèdent : un suivi physico-chimique et biologique, une phase de tests sensoriels, et enfin une identification et quantification des composés odorants pouvant être présents dans la chair de poisson.

→ Enquête préalable

Un certain nombre de sites de polyculture extensive (carpe) sont d'ores et déjà identifiés, car ils sont régulièrement touchés par des proliférations de cyanobactéries, et/ou les poissons récoltés présentent régulièrement un "goût de vase".

Il semble par contre nécessaire d'engager une enquête au sein de la filière salmonicole, afin de retenir quelques sites "truite" à risque. Cette enquête permettrait aussi de compiler des informations complémentaires ayant pour objectif de quantifier l'ampleur du problème et d'identifier éventuellement d'autres pistes que celles déjà connues (matières en suspension, régime alimentaire,...). Elle sera réalisée via un questionnaire simple diffusé à l'ensemble des professionnels et comprendra notamment les points suivants : observation passée ou actuelle de poissons présentant de l'off-flavor, nature de la prise d'eau et de l'alimentation en eau des bassins, type des bassins de production, densité d'élevage, aliment distribué, ...

→ Suivi *in situ*

Le suivi *in situ* est la plupart du temps basé sur :

- un diagnostic physico-chimique de base : oxygène, température, teneurs en nutriments (azote, phosphore), matières en suspension... ;
- une quantification de certains paramètres biologiques : abondance des taxons cyanobactériens, densité d'actinomycètes,...

Un échantillon d'eau supplémentaire peut également être intégré pour une recherche et éventuellement une quantification des composés odorants dans l'eau.

Cette phase d'étude permet souvent d'avancer des hypothèses plus précises quant à l'origine de l'off-flavor.

→ **Analyse sensorielle**

Les tests sensoriels sont souvent effectués sur des poissons prélevés à deux périodes. Les premiers prélèvements sont effectués lorsque le facteur supposé responsable de l'off-flavor est le plus prépondérant, les seconds lors de la phase d'exportation du poisson à la pêche.

Le protocole peut être adapté à partir des expériences menées sur le catfish, en particulier en ce qui concerne la pré-sélection des goûteurs, leur entraînement, et les grilles de qualification et de notation de l'odeur.

Ces tests sensoriels auront pour objectif d'identifier la nature de l'off-flavor (goût de "terre/vase" ?), et si possible d'en préciser l'intensité. Associée au suivi physico-chimique, la démarche d'analyse sensorielle devrait permettre d'aboutir à une identification des composés odorants responsables.

L'utilisation de nez électronique pourrait également être envisagée, car cette nouvelle approche limite les biais liés au panel de goûteurs.

Les analyses sensorielles seront réalisées en préalable aux analyses quantitatives qui ne seront mises en œuvre que sur les lots de poissons ayant été confirmés comme étant "off-flavor".

→ **Détection des composés odorants**

La démarche analytique d'identification et de quantification des composés odorants est assez bien connue, nécessitant souvent des moyens lourds (spectrométrie de masse, chromatographie en phase gazeuse). Dans le cas où seulement quelques molécules seraient désignées comme responsables des phénomènes d'off-flavor sur le poisson, la standardisation de méthodes simplifiées d'analyse "de routine" pourraient être proposées, de façon à augmenter le nombre d'analyses envisageables.

Par ailleurs, la standardisation d'une telle analyse nécessite obligatoirement le choix d'un échantillon de chair dans un tissu qui pourrait servir de référence de mesure. Une approche entre les régions antérieure, centrale, postérieure et des essais sur des tissus facilitant l'extraction de telles molécules (foie) doivent être réalisés.

A l'issue de cette première approche, et selon les résultats obtenus, des pistes seront proposées pour résoudre le problème "off-flavor" dans les sites concernés. D'une manière plus générale, nous devrions aboutir, en concertation avec la filière d'aquaculture continentale française, à la proposition d'un plan de gestion et de contrôle à intégrer dans les différentes démarches qualité en cours ou à venir.

CONCLUSION

Les problèmes d'off-flavor touchant le poisson restent d'une manière générale peu étudiés. Si l'on excepte les recherches importantes menées dans la filière catfish, seuls quelques autres travaux ponctuels alimentent les connaissances sur le sujet. Des études ont très récemment été engagées au sein de la communauté européenne, afin de mieux appréhender le problème (PEKAR, 2001). Les démarches de qualité élaborées dans différentes filières aquicoles françaises justifient que des études soient conduites dans ce sens : l'image de marque des produits auprès du consommateur et le développement de nouveaux marchés peuvent en dépendre.

Cette synthèse des travaux existants est la première phase d'une approche méthodologique de l'off-flavor dans les filières "truite" et "carpe", qui vise à répondre à un certain nombre d'interrogations :

- Quelle est l'ampleur du problème dans ces deux filières ?
- Quels outils (suivis in situ, analyse sensorielle, analyse biochimique) et quels protocoles adapter pour obtenir un contrôle efficace ?
- Quel plan de gestion faut-il adapter au sein de ces filières afin de proposer au consommateur un poisson au goût irréprochable ?

BIBLIOGRAPHIE

- ADARC, 1998. Cahier des charges de la certification de la production de silure, 24 p. + Ann.
- ANDERSSON G., BERGGREN H., CRONBERG G., GELIN C., 1978. Effects of planktivorous and benthivorous fish on organisms and water chemistry in eutrophic lakes. *Hydrobiol.*, 59 : 9-15.
- ANONYME, 1996. Catfish off-flavor. *Water farm.*, 11(7) : 3.
- AOYAMA K., TOMITA B., CHAYA K., SAITO M., 1991. Isolation and geosmin production of bacteria-free *Anabaena macrospora*. *Eisei Kagaku*, 37(2) : 132-136.
- ARMSTRONG M.S., BOYD C.E., LOVELL R.T., 1986. Environmental factors affecting flavor of channel catfish from production ponds. *Prog. Fish-Cult.*, 48(2) : 113-119.
- ASCHNER M., LAVENTER C., CHORIN-KIRSCH I., 1969. Off-flavor in carp from fish ponds of the coastal plain and the Gelid. *Bamidgeh*, 19 : 23-25.
- BAFFORD R.A., SEAGULL R.W., CHUNG Si-Y, MILLIE D.F., 1992. Intracellular localization of the taste/odor metabolite, 2-methylisoborneol, in *Oscillatoria limosa* (cyanophyta). *J. Phycol.*, 28(3) : 11.
- BARICA J., KLING H., GIBSON J., 1980. Experimental manipulation of algal bloom composition by nitrogen addition. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37 : 1175-1183.
- BARRETT P.R.F., CURNOW J.C., LITTLEJOHN J.W., 1996. The control of diatom and cyanobacterial blooms in reservoirs using barley straw. *Hydrobiol.*, 340 : 307-311.
- BARRETT P.R.F., LITTLEJOHN J.W., CURNOW J.C., 1998. The long-term control of diatom and cyanobacterial blooms in reservoirs using barley straw. In Proceedings 10th EWRS Symposium on Aquatic Weeds, 21-25 september 1998, Lisbon : 311-314.
- BERGLIND L., JOHNSEN I.J., ORMEROD K., SKULBERG O.M., 1983. *Oscillatoria brevis* (Kutz.) Gom. And some other especially odouriferous benthic cyanophytes in Nowegian inland waters. *Wat. Sci. Tech.*, 15(6-7) : 241-246.
- BETT G.K.L., INGRAM D.A., GRIMM C.C., VINYARD B.T., BOYETTE K., DIONIGI C.P.D., 2000. Alteration of the human sensory perception of the muddy/earthy odorant 2-methylisoborneol in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) fillet tissues by addition of seasonings. *J. Sensory. Stud.*, 15(4) : 459-472.
- BETT K., INGRAM D., GRIMM C., VINYARD B., BOYETTE K., DIONIGI C., 2000. Alteration of the sensory perception of the muddy/earthy odorant 2-methylisoborneol in channel catfish *Ictalurus punctatus* fillet tissues by addition of seasonings, *J. Sensory Stud.*, 15 : 459-472.
- BITTERLICH G., 1985 a. The nutrition of stomachless phytoplanktivorous fish in comparison with tilapia. *Hydrobiol.*, 121 : 173-179.
- BITTERLICH G., 1985 b. Digestive enzyme pattern of two stomachless filter feeders, silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix* Val., and bighead carp *Aristichthys nobilis* Rich. *J. Fish Biol.*, 27 : 103-112.
- BODOLA A., 1966. Life history of the gizzard shad, *Dorosoma cepedianum*, in Western Lake Erie. *Fish. Bull.*, 65 : 391-425.

- BOON P.I., BUNN S.E., GREEN J.D., SHIEL R.J., 1994. Consumption of cyanobacteria by freshwater zooplankton : implications for the success of the "top-down" control of cyanobacterial blooms in Australia. *Australian J. Marin. and Fresh. Res.*, 45 : 875-887.
- BOWMER K.H., PADOVAN A., OLIVER R.L., KORTH W., GANF G.G., 1992. Physiology of geosmin production by *Anabaena circinalis* isolated from the Murrumbidgee River, Australia. *Water Sci. Tech.* 25(2) : 259-267.
- BREUKELAAR A.W., LAMMENS E.H.R.R., KLEIN BRETELER J.G.P., TATRAI I., 1994. Effects of benthivorous bream (*Abramis brama*) and carp (*Cyprinus carpio*) on sediment resuspension and concentrations of nutrients and chlorophyll a. *Fresh. Biol.*, 32 : 113-121.
- BROWN S., BOYD C., 1982. Off-flavor in channel catfish from commercial ponds. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 111 : 379-383.
- BROWN S.W., BOYD C.E., 1982. Off-flavor in channel catfish from commercial ponds. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 111 : 379-385.
- BRUNSON M. & col., 2001. Catfish quality assurance. An educational program designed to maintain the consumer love affair with farm-raised catfish. Publ. of Extension Service of Mississippi State University 18 p.
- BURKE J.S., 1984. Influence of planktivorous fishes on zooplankton of catfish culture ponds. Master's thesis. Auburn University, Alabama : 335 p.
- BUYUKATES Y., RAWLES S.D., GATLIN III D.M., 2000. Phosphorus fractions of various feedstuffs and apparent phosphorus availability to channel catfish. *North Am. J. Aquacult.*, 62 : 184-188.
- CAFFREY J.M., MONAHAN C., 1998. The control of filamentous algae in recreational canal using barley straw. In *Proceedings 10th EWRS Symposium on Aquatic Weeds*, 21-25 September 1998, Lisbon : 327-330.
- CARVALHO L. R., 1994. Top down control of phytoplankton in a shallow hypertrophic lake : Little Mere (England). *Hydrobiol.*, 275/276 : 53-63.
- COBLENTZ B., 2001. Off-flavor catfish shift bottom lines, Publ. Office of Agricultural Communications Mississippi State University, 2 p. (Doc. Internet)
- CONTE E.D., CONWAY S.C., MILLER D.W., PERSCHBACHER P.W., 1996. Determination of methylisoborneol in channel catfish pond water by solid phase extraction followed by gas chromatography – mass spectrometry. *Wat. Res.*, 30(9) : 2125-2127.
- CROWDER L.B., 1988. Food web interaction in lakes. In *Carpenter S.R., complex interactions in lake community*. Springer, New York : 141-160.
- DECRET N° 89-3 du 3 janvier 1989 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine à l'exclusion des eaux minérales naturelles, J.O. du 4 janvier 1989.
- DECRETS N° 90-330 du 10 avril 1990 (J.O. du 13 avril 1990), n° 91-257 du 7 mars 97-503 du 21 mai 1997 (J.O. du 22 mai 1997), n° 98-1090 du 4 décembre 1998 (J.O. du 5 décembre 1998), n° 99-242 du 26 mars 1999 (J.O. du 28 mars 1999).
- De MELO R., FRANCE R., McQUEEN D.J., 1992. Biomanipulation : hit or myth ? *Limnol and Ocean.*, 37(1) : 192-207.
- DIETRICH A.M., HOEHN R.C., DUFRESNE L.C., BUFFIN L.W., RASHASH D.M.C., PARKER B.C., 1995. Oxidation of odorous and non-odorous algal metabolites by permanganate, chlorine, and chlorine dioxide. *Wat. Sci. Tech.*, 31(11) : 223-236.

- DIONIGI C.P., CHAMPAGNE E.T., 1995. Copper-containing aquatic herbicides increase geosmin biosynthesis by *Streptomyces tendae* and *Penicillium expansum*. *Weed Sci.*, 43(2) : 196-200.
- DIONIGI C.P., JOHNSEN P.B., VINYARD B.T., 2000. The recovery of flavor quality by channel catfish. *North Am. J. Aquacult.*, 62 : 189-194.
- DOMBES QUALITE, 1996. Cahier des charges "Production de carpes de Dombes", 7 p.
- DOUGHERTY J.D., CAMPBELL R.D., MORRIS R.L., 1966. Actinomycetes : isolation and identification of agent responsible for musty odors. *Science*, 152 : 1372.
- ENGLE C.R., POUNDS G.L., VAN der PLOEG M., 1995. The cost of off-flavor. *J. World Aquacult. Soc.*, 26(3) : 297-306.
- EVERALL N.C., LEES D.R., 1996. The use of barley straw to control general and blue-green algal growth in a Derbyshire reservoir. *Wat. Res.*, 30(2) : 269-276.
- FARMER L.J., McCONNELL J.M., HAGAN T.D.J., HARPER D.B., 1995. Flavour and off-flavour in wild and farmed Atlantic salmon (from locations around Northern Ireland. *Wat. Sci. Tech.*, 31(11) : 259-264.
- GAGNE F., RIDAL J., BLAISE C., BROWNLEE B., 1999. Toxicological effects of geosmin and 2-methylisoborneol on rainbow trout hepatocytes. *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.*, 63(2) : 174-180.
- GERBER N.N., 1979. Odorous substances from actinomycetes. *Dev. Ind. Microbiol.*, 20 : 225-238.
- GERBER N.N., LECHEVALIER H.A., 1966. Geosmin and earthy-smelling substance isolated from actinomycetes. *Appl. Microbiol.*, 13 : 935.
- GIRI B.J., BOYD C.E., 2000. Effects of frequent, small doses of calcium carbonate on water quality and phytoplankton in channel catfish ponds. *North Am. J. Aquacult.*, 62 : 225-228.
- GRIMM C.C., BATISTA R., CHATAM M.A., DIONIGI C.P., BRASHEAR S.S., ZIMBA P.V., 2001. Determining off-flavor in catfish by analysis of the liver. In *World Aquaculture Society (Ed.), Proc. Aquaculture 2001, Lake Buena Vista* : 261.
- HANSON T., 2001. Impact of Diuron usage on the Mississippi catfish industry. *Bull. Mississippi Agricultural Forestry Experiment Station*, n° 1101, 26 p.
- HARVEY D.J., 2001. Aquaculture outlook. Imports provide competition for domestic production. Electronic outlook report from the economic research service. 18 p. URL : usda.mannlib.cornell.edu/reports/nassr/other/pcf-bbc/2001/
- HAYES K.P., BURCH M.D., 1989. Odorous compounds associated with algal blooms in south australian waters. *Wat. Res.*, 23(1) : 115-121.
- HOFFMANN B., 1933. Versuche mit Moderfischen. *Der Angelsport*, 8 : 187-188.
- HORLYCK V., 1984. Sites of uptake of geosmin, a cause of earthy-flavor, in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41(8) : 1224-1226.
- HOSON T., 1992. Growth characteristics of the musty odor producing alga, *Oscillatoria tenuis*. *Wat. Sci. Tech.*, 25(2) : 177-184.
- HU T.L., 1994. Odorous problem associated with *Nostoc sp.* In water supply system of central Taiwan. In Kean & Leong (Ed.), *Aqua Tech Asia. International Conference on Asian Water Technology '94* : 100-110.

- IREDALE D.G., SHAYKEWICH K.J., 1973. Masking muddy flavor in rainbow *trout* (*Salmo gairdneri*) by smoking and canning process. J. Fish. Res. Board Can., 30 : 1235-1239.
- IZAGUIRRE G., HWANG C.J., KRASNER S.W., McGUIRE M.J., 1983. Production of 2-methylisoborneol by two benthic cyanophyta. Wat. Sci. Tech., 15 (6-7) : 211-220.
- IZAGUIRRE G., 1992. A copper-tolerant *Phormidium* species from Lake Mathews, California, that produces 2-methylisoborneol and geosmin. Wat. Sci. Tech., 25(2) : 17-31.
- IZAGUIRRE G., TAYLOR W.D., 1998. A *Pseudanabaena* species from Castaic Lake, California, that produces 2-methyl-isoborneol. Wat. Res., 32(5) : 1673-1677.
- JENSEN J., CREWS J. 1997. Channel catfish production in ponds. Publ. Alabama Cooperative Extension System, 44 p.
- JOHNSEN P.B., LLOYD S.W., 1992. Influence of fat content on uptake and depuration of the off-flavor 2-methylisoborneol by channel catfish (*Ictalurus punctatus*). Can. J. Fish. Aquat. Sci., 49(11) : 2406-2411.
- JOHNSEN P.B., LLOYD S.W., VINYARD B.T., DIONIGI C.P., 1996. Effects of temperature on the uptake and depuration of 2-methylisoborneol (MIB) in channel catfish *Ictalurus punctatus*. J. WORLD AQUACULT. SOC., 27(1) : 15-20
- JOHNSON H.M. & ASSOCIATES, 2001. Seafood Marketing Information and Analysis for Decision-Makers. The Annual Report on the United States Seafood Industry, Newest edition available September 15, 2001. URL <http://www.hmj.com/report.html>.
- JUTTNER F. HOEFLACHER B., WURSTER K., 1986. Seasonal analysis of volatile organic biogenic substances (VOBS) in freshwater phytoplankton populations dominated by *Dinobryon*, *Microcystis* et *Aphanizomenon*. J. Phycol., 22(2) : 169-175.
- JUTTNER F., 1995. Physiology and biochemistry of odorous compounds from freshwater cyanobacteria and algae. Wat. Sci. Tech., 31(11) : 69-78.
- KAJINO M., MORIZANE K., UMETANI T., TERASHIMA K., 1999. Odors arising from ammonia and amino acids with chlorine during water treatment. Wat. Sci. Tech., 40(6) : 107-114.
- KIKUCHI T., MIMURA T., ITOH Y., MORIWAKI Y., NEGORO K., MASADA Y., INOUE, T., 1973. Odorous metabolites of Actinomyces Biwako-C and -D strain isolated from the bottom deposits of Lake Biwa. Identification of geosmin, 2-methylisoborneol, and furfural. Chem. Pharm. Bull, 21(10) : 2339-2341.
- KILLIAN S., 1977. Off-flavor (Catfish). Publ. Cooperative Extension Service University of Arkansas, 2p. (doc. Internet)
- LAWS E.A., WEISBURD R.S.J., 1990. Use of silver carp to control algal biomass in aquaculture ponds. Prog. Fish-Cult., 52 : 1-8.
- LEGER L., 1910. Le goût de vase chez les poissons d'eau douce. Trav. Lab. Pisc. Univ. Grenoble, 2 : 1-4.
- LELANA I.Y.B., 1987. Geosmin and off-flavor in channel catfish. Diss. Abst. Int. – Sci. Eng., 48(2) : 86 p.
- LEONARDSON L., RIPL W., 1980. Control of undesirable algae and induction of algal successions in hypertrophic lake ecosystems. In Barica J., Mur L.R., Hypertrophic ecosystems. Developments in Hydrobiology, 2 : 57-65.
- LIND O.T., KATZIF S.D., 1988. Nitrogen and the threshold odor number produced by an actinomycete isolated from lake sediments. Wat. Sci. Tech., 20 : 8-9

- LOVELL R.T., 1971. The earthy-musty flavor in intensively-cultured catfish. Proc. Assoc. South Agric. Workers, 67 : 102.
- LOVELL R.T., 1971. The earthy-musty flavor in intensively-cultured catfish. In Proc. Association. South Agriculture Workers, 67th Annual Meeting : 102.
- LOVELL R.T., 1972. Pond-related off-flavors in commercially cultured catfish. In Proc. Third Annual Meeting of Catfish Farmers of America, Dallas (Texas) : 23-27.
- LOVELL R.T., 1976. Flavour problems in fish culture. In Pillay & Dill (Ed.), Advances in Aquaculture, Kyoto : 186-190.
- LOVELL R.T., 1983. New off-flavors in pond-cultured channel catfish. Aquacult., 30 : 329-334.
- LOVELL R.T., 1983. New off-flavors in pond-cultured channel catfish. Aquacult., 30 : 329-334.
- LOVELL R.T., LELANA I.Y., BOYD C.E., ARMSTRONG M.S., 1986. Geosmin and musty-muddy flavors in pond-raised channel catfish. Trans. Am. Fish. Soc., 115 : 485-489.
- MARTIN J, IZAGUIRRE G., WATERSTRAT P., 1991. A planktonic *Oscillatoria* species from Mississippi catfish ponds that produces the off-flavor compound 2-methylisoborneol. Water Res., 25 : 1447-1451
- MARTIN J.F., McCOY C.P., GREENLEAF W., BENNETT L., 1987. Analysis of 2-methylisoborneol in water, mud, and channel catfish (*Ictalurus punctatus*) from commercial culture ponds in Mississippi. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 44 : 909-912.
- MARTIN J.F., McCOY C.P., TUCKER C.S., BENNETT L., 1988. 2-methylisoborneol implicated as a cause of off-flavour in channel catfish, *Ictalurus punctatus* (Rafinesque), from commercial culture ponds in Mississippi. Aquacult. Fish. Manag., 19 : 151-157.
- MASSER M.P., 1995. Intensive catfish systems. World Aquacul., 26(3) : 60-64.
- MATSUMOTO A., TSUCHIYA Y., 1988. Earthy-musty odor-producing cyanophytes isolated from five water areas in Tokyo. Wat. Sci. Tech., 20(8-9) : 179-183.
- MATYAS K., TATRAI I., PAULOVITS G., KORPONAI J., 1998. Effect of different fish stock level on the phytoplankton biomass and size composition - pond experiment. Internat. Rev. Gesam. Hydrobiol., 83 : 451-454.
- MC GEE M., LAZUR A., 1998. Alternative opportunities for small farms : catfish production review. Publ. Cooperative Extension Service University of Florida, Fact Sheet RF-AC011, 4 p. (Doc Internet)
- MC GILBERTY J, CULVER V., BROOKS G., DEAN K., LA BRUYERE D., 1989. Processed catfish. SRAC publ. 185, 4 p.
- McQUEEN D.J., JOHANNES M.R.S., POST J.R., STEWART T.J., LEAN D.R.S., 1989. Bottom-up and top-down impacts on freshwater pelagic community structure. Ecol. Monogr., 59 : 289-309.
- McQUEEN D.J., POST J.R., MILLS E.L., 1986. Trophic relationships in freshwater pelagic systems. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 43 : 1571-1581.
- MEDAKER L.L., JENKINS D., THOMAS J.F., 1968. Odorous compounds in natural waters : an earth smelling compound associated with blue-green algae and actinomycetes. Environ. Sci. Tech., 2 : 461-464.

- MINISTERE EMPLOI ET SOLIDARITE, 2000. Eaux destinées à la consommation humaine. Code de la santé publique, Livre III, Titre 1.
- MINISTERE SANTE PUBLIQUE ET ASSURANCE MALADIE, 1995. Eaux destinées à la consommation humaine. Code de la santé publique, 1ère partie, Livre 1er, Titre 1er.
- MURPHY T.P., PREPAS E.E., 1990. Lime treatment of hardwater to reduce eutrophication. *Verein. Theor. Angew. Limnol.*, 24 : 327-334.
- NEGORO T., ANDO M., ICHIKAWA N., 1988. Blue-green algae in Lake Biwa which produce earthy-musty odors. *Wat. Sci. Tech.*, 20(8-9) : 117-123.
- NEWMAN J.R., BARRETT P.R.F., 1993. Control of *Microcystis aeruginosa* by decomposing barley straw. *J. Aquat. Plant Manag.*, 31 : 203-206.
- NORME AFNOR NF V 45-100, 2000. Aquaculture – Truite : Production, transformation et spécifications. 28 p.
- OFFICE DE LA LANGUE FRANÇAISE, 1984-1990-1994-1997. In "Le grand dictionnaire terminologique"
site Internet : www.granddictionnaire.com
- OLSON T.D., WEIRICH C.R., GRIMM C.C., 2001. Seasonal trends in 2-methylisoborneol levels of fresh and brackish water channel catfish *Ictalurus punctatus* ponds. In World Aquaculture Society (Ed.), Proc. Aquaculture 2001, Lake Buena Vista : 495.
- OPUSZYNSKI K., 1979. Silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix* (Val.) in carp ponds. III. Influence on ecosystem. *Ekol. Pol.*, 27 : 117-133
- PEKAR F., 2001. Le "mauvais goût" des poissons d'eau douce. Aqua-Flow: TL2001-010
- PERSCHBACHER P.W., MILLER D., CONTE E.D., 1996. Algal off-flavors in reservoirs. In American Fisheries Society Symposium : Multidimensional approaches to reservoir fisheries management, 67-72.
- PERSCHBACHER P.W., WHITE J.L., BURKS R.A., 1997 Patterns of infestation of the off-flavor alga, *Oscillatoria* cf. *Chalybea*, on a north delta commercial channel catfish farm. Publ. Department Aquaculture and Fisheries University of Arkansas, 2 p. (Doc. Internet)
- PERSSON P.E., 1982. Muddy Odour: A Problem Associated with Extreme Eutrophication. *Hydrobiol.*, 86(1-2) : 161-164.
- PERSSON P.E., 1988. Aquatic off-flavours – Past, present and future. *Wat. Sci. Tech.*, 20(8) : 283-288.
- PERSSON P.E., 1995. 19th century and early 20th century studies on aquatic off-flavours – a historical review. *Wat. Sci. Tech.*, 31(11) : 9-14.
- PETERSON H.G., HRUDEY S.E., CANTIN I.A., PERLEY T.R., KENEFICK S.L., 1995. Physiological toxicity, cell membrane damage and the release of dissolved organic carbon and geosmin by *Aphanizomenon flos-aquae* after exposure to water treatment chemicals. *Wat. Res.*, 29(6) : 1515-1523.
- PISCICULTEURS DE DOMBES, 2000. Proposition de cahier des charges pour une production de carpes en Dombes sous A.O.C., 3p.
- PREPAS E.E., MURPHY T.P., CROSBY J.M., WALTY D.T., LIM J.T., BABIN J., CHAMBERS P.A., 1990. Reduction of phosphorus and chlorophyll a concentration following CaCO₃ and Ca(OH)₂ additions to hypereutrophic Figure Eight Lake, Alberta. *Environ. Sci. Tech.*, 24 : 1252-1258.

- REINERSTEN H., OLSEN Y., 1984. Effects of fish elimination on the phytoplankton community of a eutrophic lake. *Verhandlungen der Internationale Verein Theor. Angewan. Limnol.*, 22 : 649-657.
- RIDGE I., BARRETT P.R.F., 1992. Algal control with barley straw. *Asp. Appl. Biol.*, 29 : 457-462.
- RIDGE I., PILINGER J.M., 1996. Towards understanding the nature of algal inhibitors from barley straw. *Hydrobiol.*, 340 : 301-305.
- ROBINSON E., AVERY J., 2000. Farm-raised catfish. Publ. Thad Cochran National Warmwater Aquaculture Center, Mississippi State University, Fact Sheet 005, 2 p. (Doc Internet)
- ROSEN A.A., MASHNI C.I., SAFFERMAN R.S., 1970. Earthy-smelling substances from a blue green alga. *Environ. Sci. Tech.*, 1 : 429-430.
- ROSEN B.H., McLEOD B.W., SIMPSON M.R., 1992. Accumulation and release of geosmin during the growth phases of *Anabaena circinalis* (Kutz.) *Rabenhorst*. *Wat. Sci. Tech.*, 25(2) : 185-190.
- SCHRADER K.K., DUKE S.O., KINGSBURY S.K., TUCKER C.S., DUKE M.V., DIONIGI C.P., MILLIE D.F., ZIMBA P.V., 2000. Evaluation of ferulic acid for controlling the musty-odor cyanobacterium, *Oscillatoria perornata*, in aquaculture ponds. *J. Appl. Aquacult.*, 10(1) : 1-16.
- SCHRADER K.K., BLEVINS W.T., 1993. Geosmin-producing species of *Streptomyces* and *Lyngbya* from aquaculture ponds. *Can. J. Microbiol.*, 39(9) : 834-840.
- SCHRADER K.K., De REGT M.Q., TIDWELL P.D., TUCKER C.S., DUKE S.O., 1998. Compounds with selective toxicity towards the off-flavor metabolite-producing cyanobacterium *Oscillatoria* cf. *chalybea*. *Aquacult.*, 163(1-2) : 85-99.
- SCHRADER K.K., De REGT M.Q., TIDWELL P.R., TUCKER C.S., DUKE S.O., 1998. Selective growth inhibition of the musty-odor producing cyanobacterium *Oscillatoria* cf. *chalybea* by natural compounds. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 60(4) : 651-658.
- SEYMOUR E.A., 1980. The effects and control of algal blooms in fish ponds. *Aquacult.*, 19 : 55-74.
- SHAPIRO J., WRIGHT D.I., 1984. Lake restoration by biomanipulation : Round Lake, Minnesota – the first two years. *Fresh. Biol.*, 14 : 371-383.
- SILVA J., AMMERMAN G., DEAN S., 2001. Processing channel catfish. SRAC publ. 183, 8 p.
- SILVA J., DEAN S., 2001. Processed catfish : product forms, packaging, yields and product mix.
- SKULBERG O.M., 1988. Chemical ecology and off-flavour substances. *Wat. Sci. Tech.*, 20(8) : 167-178.
- SMITH D.W., 1985. The feeding ecology of silver carp. In Proceedings of the second international conference on warm water aquaculture – finfish. Brigham Young University press, Laie, Hawaii : 12-20.
- SMITH D.W., 1988. Phytoplankton and catfish culture : a review. *Aquacult.*, 74 : 167-189.
- SMITH V.H., 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes : an empirical and theoretical analysis. *Limnol. Ocean.*, 27(6) : 1101-1112.

- SONDERGAARD M., JEPPESEN E., MORTENSEN E., DALL E., KRISTENSEN P., SORTKJAER O., 1990. Phytoplankton biomass reduction after planktivorous fish reduction in a shallow eutrophic lake : a combined effect of reduced P-loading and increased plankton grazing. *Hydrobiol.*, 200-201 : 229-240.
- SPODNIIEWSKA I., HILLBRICHT-ILKOWSKA A., 1973. Experimentally increased fish stock in the pond type Lake Warniak. VI. Biomass and production of phytoplankton. *Ekol. Pol.*, 21 : 519-532.
- SUFFET I.H., KHIARI D.K., BRUCHET A., 1999. The drinking water taste and odor wheel for the millenium : beyond geosmin and 2-methylisoborneol. *Wat. Sci. Tech.*, 40(6) : 1-13.
- SUGIURA N., INAMORI Y., HOSAKA Y., SUDO R., TAKAHASHI G., 1994. Algae enhancing musty odor production by actinomycetes in Lake Kasumigaura. *Hydrobiol.*, 288(1) : 57-64.
- SUGIURA N., NISHIMURA O., INAMORI Y., OUCHIYAMA T., SUDO R., 1997. Grazing characteristics of musty-odor-compound-producing *Phormidium tenue* by a microflagellate, *Monas guttula*. *Wat? Res.*, 31(11) : 2792-2796.
- THAYSON A.C., 1936. The origin of an earthy or muddy taint in fish. *Ann. Appl. Biol.*, 23 : 99-109.
- THRELKELD S. T., 1988. Planktivory and planktivore biomass effects on zooplankton, phytoplankton and the trophic cascade. *Limnol. and Oceanog.*, 33 : 1364-1377.
- TSUCHIYA Y., MATSUMOTO A., 1988. Identification of volatile metabolites produced by blue-green algae. *Wat. Sci. Tech.*, 20(8-9) : 149-155.
- TSUCHIYA Y., MATSUMOTO A., OKAMOTO T., 1978. Volatile metabolites produced by actinomycetes, isolated from Lake Tairo at Miyakejima. *J. Pharm. Soc. Jap.*, 98(4), 545-550.
- TUCKER C., VAN der PLOEG M., 1999. Managing off-flavor problems in pond-raised catfish. *SRAC Publ.* 192, 8 p.
- TUCKER C.S., 2000. Off-flavor problems in aquaculture. *Crit. Rev. Fish. Sci.*, 8(1) : 1-44.
- TUCKER C.S., BOYD C.E., 1985. Water quality (channel catfish culture ponds). *Dev. Aquacult. Fish. Sci. (channel catfish culture)* : 135-227.
- TUCKER C.S., HANSON T., KINGSBURY S., 2001. Management of off-flavors in pond-cultured channel catfish with weekly applications of copper sulfate. *North Am. J. Aquacult.*, 63 : 118-130.
- USDA Economics and Statistics System, 2001. Aquaculture Outlook (LDP-AQS) : the U.S. aquaculture industry (production, inventory, sales, prices, inputs, and trade of catfish, trout, tilapia, salmon, mollusks, crawfish, shrimp, ornamental fish and new species) adresse Internet : <http://usda.mannlib.cornell.edu/reports/nassr/other/pcf-bbc>
- UTKILEN H.C., FROESHAUG M., 1992. Geosmin production and excretion in a planktonic and benthic *Oscillatoria*. *Wat. Sci. Tech.*, 25(2) : 199-206.
- VAN der PLOEG M., TUCKER C.S., 1993. Seasonal trends in flavor quality of channel catfish, *Ictalurus punctatus*, from commercial ponds in Mississippi. *J. Appl. Aquacult.*, 3(1-2) : 121-140.
- VAN der PLOEG M., DENNIS M.E., De REGT M.Q., 1995. Biology of *Oscillatoria* cf. *chalybea*, a 2-methylisoborneol producing blue-green alga of Mississippi catfish ponds. *Wat. Sci. Tech.*, 31(11) : 173-180.

- VAN der PLOEG M., 1991. Studies of cause and control of off-flavor in water and pond-raised fish. Diss. Abst. Int. Sci. Eng., 51(11) : 112 p.
- VAN der PLOEG M., 1991. Testing flavor quality of preharvest channel catfish. SRAC publ. 431, 8p.
- VAN der PLOEG M., 1992. Causes of off-flavor in pond-raised Mississippi channel catfish. In Proc. Aquaculture 92' : growing toward the 21st century : 222.
- VAN der PLOEG M., DENNIS M.E., 1992. Taxonomy of blue-green algae responsible for off-flavor in pond-raised channel catfish. In Proc. Aquaculture 92' : growing toward the 21st century : 223.
- VAN der PLOEG M., DENNIS M.E., De REGT M.Q., 1995. Biology of *Oscillatoria* cf. *chalybea*, a 2-methylisoborneol producing blue-green alga of Mississippi catfish ponds. Wat. Sci. Tech., 31(11) : 173-180.
- VAN der PLOEG M., TUCKER C., 1993. Seasonal trends in flavor quality of channel catfish, *Ictalurus punctatus*, from commercial ponds in Mississippi. J. Appl. Aquacult., 3(1/2) : 121-140.
- VAN der PLOEG M., TUCKER C., STEEBY J., WEIRICH C., 1995. Management plan for blue-green off-flavors in Mississippi pond-raised catfish. Publ. 2001, Mississippi State University Extension Service, 10 p.
- VAN der PLOEG M., TUCKER C.S., BOYD C.E., 1992. Geosmin and 2-methylisoborneol production by cyanobacteria in fish ponds in the southeastern United States. Wat. Sci. Tech., 25(2) : 283-290.
- VAN der PLOEG M., TUCKER C.S., BOYD C.E., 1992. Geosmin and 2-methylisoborneol production by cyanobacteria in fish ponds in the southeastern United States. Wat. Sci. Tech., 25(2) : 283-290.
- VAN DONK E., 1991. Changes in community structure and growth limitation of phytoplankton due to top-down food web manipulation. Verhandlungen der Internationale Verein Theor. Angewan. Limnol., 24 : 773-778.
- WEAVER-MISSICK T., 2000. Partnership could oust off-flavor in fish. Agricultural Research Service News & Information, sept. 2000, 1 p. (Doc. Internet)
- WELCH I.M., BARRETT P.R.F., GIBSON M.T., RIDGE I., 1990. Barley straw as an inhibitor of algal growth : studies in the Chesterfield Canal. J. Appl. Phycol., 2 : 231-239.
- WELTE B., MONTIEL A., 1999. Study of the possible origins of chlorinous taste and odour episodes in a distribution network. Wat. Sci. Tech., 40(6) : 257-263.
- WHITFIELD F.B., 1988. Chemistry of off-flavours in marine environment. Wat. Sci. Tech., 20(8) : 63-74.
- WNOROWSKI, A.U., 1992. Tastes and odours in the aquatic environment : a review. Water S.A., 18(3) : 203-214.
- WOOD S., WILLIAMS S.T., WHITE W.R., 1985. Potential sites of geosmin production by streptomycetes in and around reservoirs. J. Appl. Bacteriol., 58(3) : 319-326.
- WU J.T., MA P.I., CHOU T.L., 1991. Variation of geosmin content in *Anabaena* cells and its relation to nitrogen utilization.
- XI H., KING J.M., 2001. Use of ozone to reduce the off-flavor of catfish fillets. Poster presented to Technical Session of Institute of Food Technologists, 2002 Annual Meeting, California, USA.

- YAMAMOTO Y., TANAKA K., KOMORI N., 1994. Volatile compounds excreted by myxobacteria isolated from lake water and sediments. *Jap. J. Limnol.*, 55(4) : 241-245.
- YAMPRAYOON J., NOOMHORM A, 2000. Effects of preservation methods on geosmin content and off-Flavor in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) *J. Aquat. Food Prod. Technol.*, 9(4) : 95-107.
- YURKOWSKI M., TABACHEK J.L., 1975. Identification, analysis and removal of geosmin in muddy flavoured trout. *J. Fish. Res. Board Can.*, 31(12) : 1851-1858.
- ZHAO G., JAITEH A.A., WANG W., STEVENS S.E., 2000. Effects of selected water quality variables on the persistence of tannic acid and related compounds under simulated aquaculture conditions. *North Am. J. Aquacult.*, 61 : 304-309.
- ZIMBA P.V., GRIMM C.C., DIONIGI C.P., WEIRICH C.R., 2001. Phytoplankton community structure, biomass and off-flavor : pond size relationships in Louisiana catfish ponds. *J. World Aquacult. Sco.*, 32(1) : 96-104.
- ZIMMERMANN W.J., SOLIMAN C.M., ROSEN B.H., 1995. Growth and 2-methylisoborneol production by the cyanobacterium *Phormidium* LM689. *Wat. Sci. Tech.*, 31(11) : 181-186.