

Les goûts et les odeurs dans l'eau potable : revue des composés responsables et des techniques de mesure

Tastes and odours in drinking water: a review of related compounds and measurement techniques

François Proulx, Manuel Rodriguez and Jean-Baptiste Sérodes

Volume 23, Number 3, 2010

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/044691ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/044691ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Proulx, F., Rodriguez, M. & Sérodes, J.-B. (2010). Les goûts et les odeurs dans l'eau potable : revue des composés responsables et des techniques de mesure. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 23(3), 303–323. <https://doi.org/10.7202/044691ar>

Article abstract

The assessment of drinking water quality in a distribution system is generally based on physicochemical and microbiological standards set by government regulations. Although municipalities often invest considerable amounts to comply with regulations, an increasing proportion of citizens prefer alternatives to tap water. This situation may be in part explained by the organoleptic quality of distributed water in municipal systems and, in particular, by taste and odours. However, taste and odours are rarely considered as water quality criteria by municipal water managers. Moreover, analytical methods used to analyze molecules related to taste and odours in drinking water require specialized and costly equipment. This article presents the state of the art in terms of taste and odour issues in the drinking water area. The paper focuses on the origins of taste and odours and on the methods (qualitative and quantitative) available for the analysis of the compounds from which they originate. The feasibility of applying these methods to water quality surveillance is discussed, along with their advantages and drawbacks.



LES GOÛTS ET LES ODEURS DANS L'EAU POTABLE : REVUE DES COMPOSÉS RESPONSABLES ET DES TECHNIQUES DE MESURE

Tastes and odours in drinking water: a review of related compounds and measurement techniques

FRANÇOIS PROULX^{1*}, MANUEL RODRIGUEZ², JEAN-BAPTISTE SÉRODES³

¹Ville de Québec, 210, rue Saint-Sacrement, Québec (Québec) G1N 3X6

²École supérieure d'aménagement du territoire, Pavillon Félix-Antoine Savard, Université Laval, Québec (Québec) G1K 7P4

³Département de génie civil, Pavillon Adrien Pouliot, Université Laval, Sainte-Foy (Québec) G1K 7P4

Reçu le 29 janvier 2009, accepté le 27 novembre 2009

RÉSUMÉ

L'évaluation de la qualité de l'eau potable d'un réseau de distribution est souvent faite en tenant compte des normes physico-chimiques et microbiologiques édictées par les réglementations nationales. L'approche par barrières multiples permet aussi d'assurer aux consommateurs une eau avec une sécurité sanitaire optimale. Cependant, malgré les sommes investies par les municipalités pour se conformer à ces normes, les consommateurs renoncent fréquemment à consommer l'eau du robinet.

Ce refus peut être attribué, entre autres, à la qualité organoleptique (goût, odeur) de l'eau distribuée par les réseaux

d'aqueduc. Toutefois, cet aspect est peu pris en compte par les législations actuelles et, conséquemment, est peu considéré par les gestionnaires des réseaux d'eau potable. De plus, les méthodes utilisées pour évaluer les molécules responsables des goûts et des odeurs de l'eau distribuée exigent de l'équipement spécialisé et coûteux. Cet article présente une revue de la problématique des composés responsables des goûts et des odeurs. Les aspects concernant les origines de ces composés, les méthodes quantitatives et qualitatives développées jusqu'à présent pour les analyser et la faisabilité d'application desdites méthodes, selon leurs avantages et leurs limites, seront abordés.

Mots-clés : *Goûts, odeurs, eau potable, algues, méthodes d'analyses*

*Auteur pour correspondance :

Téléphone: 418-641-6411, ext. : 2910

T.élecopieur: 418-641-4655

Courriel : francois.proulx@ville.quebec.qc.ca

ABSTRACT

The assessment of drinking water quality in a distribution system is generally based on physicochemical and microbiological standards set by government regulations. Although municipalities often invest considerable amounts to comply with regulations, an increasing proportion of citizens prefer alternatives to tap water. This situation may be in part explained by the organoleptic quality of distributed water in municipal systems and, in particular, by taste and odours. However, taste and odours are rarely considered as water quality criteria by municipal water managers. Moreover, analytical methods used to analyze molecules related to taste and odours in drinking water require specialized and costly equipment. This article presents the state of the art in terms of taste and odour issues in the drinking water area. The paper focuses on the origins of taste and odours and on the methods (qualitative and quantitative) available for the analysis of the compounds from which they originate. The feasibility of applying these methods to water quality surveillance is discussed, along with their advantages and drawbacks.

Keyword: *Taste, odours, drinking water, algae, analytical methods*

1. INTRODUCTION

Les consommateurs d'eau potable sont de plus en plus préoccupés par la sécurité de l'eau distribuée par les réseaux d'aqueduc publics. Des études réalisées au Canada ont montré qu'environ 35 % de la population consommait de l'eau du robinet (LEVALLOIS *et al.*, 1999; PROULX *et al.*, 2010; TURGEON *et al.*, 2004). Les principaux facteurs expliquant le rejet de l'eau du robinet sont la perception du risque et la satisfaction organoleptique globale (PROULX *et al.*, 2010). La première préoccupation des consommateurs concerne la contamination microbiologique (LEVALLOIS *et al.*, 1999). En seconde place, viennent les préoccupations reliées aux contaminants chimiques (KHIARI *et al.*, 2002).

Les contaminations microbiologiques sont reliées à des effets à court terme sur la santé (aigus), tandis que les contaminants chimiques sont reliés à des effets à long terme (chroniques). Les effets sur la santé reliés à la contamination microbiologique sont principalement des problèmes gastro-entériques, tandis que les maladies associées à la contamination chimique peuvent être à la source de désordres du système nerveux, de problèmes cardiovasculaires et d'hypertension, d'effets sur le système de reproduction et d'effets tératogènes et de cancers (ANADU, 1997). Ces aspects sont mesurables, mais ne comprennent toutefois pas la perception du public relativement à la qualité de

l'eau potable. Or, ce sont les qualités esthétiques de l'eau, plus spécialement celles reliées aux goûts et aux odeurs, qui peuvent constituer une part importante de la perception relative à l'eau potable (DORIA *et al.*, 2005; PROULX *et al.*, 2010).

Les composés causant des goûts et des odeurs à l'eau ont été largement étudiés dans les 20 dernières années. Jusqu'à maintenant, les recherches dans le domaine se sont concentrées sur les sources des goûts et des odeurs dans l'eau potable (BRUCHET 1999; DIETRICH *et al.*, 1999; DIETRICH *et al.*, 2004b; KHIARI *et al.*, 2002), sur la mesure des composés responsables, sur l'identification des goûts et des odeurs reliés à ces composés (CROZES *et al.*, 1999; McGUIRE et GASTON 1988; McGUIRE 1999; McGUIRE *et al.*, 2005) et sur l'enlèvement de ces composés dans l'eau distribuée.

L'approche traditionnelle pour comprendre l'origine des goûts et des odeurs dans l'eau potable consiste en une enquête systématique des sources chimiques et biologiques et des réactions chimiques qui sont réputées causer ces problèmes. Toutefois, plusieurs de ces molécules ont des seuils de goût et d'odeur inférieurs au seuil de détection des techniques utilisées pour les détecter (BRUCHET *et al.*, 1995), ce qui complique leur suivi dans un réseau de distribution.

L'identification et la quantification des composés responsables des goûts et odeurs est une étape essentielle pour identifier leur origine. Elle permet aussi d'identifier des stratégies pour les éliminer. Les composés responsables des goûts et des odeurs peuvent être analysés à l'aide de deux méthodes complémentaires : qualitatives (identification des odeurs et des goûts perçus) et quantitatives (identification des molécules responsables des goûts et des odeurs et mesure de leurs concentrations dans l'eau).

Le but de cet article est de faire une revue des connaissances concernant les composés responsables des goûts et des odeurs dans l'eau potable, leur origine et les techniques analytiques utilisées pour les mesurer qualitativement ou quantitativement.

2. MÉTHODOLOGIE

La revue de la littérature a été effectuée dans les bases de données suivantes : *ISI Web of Knowledge*, *Science Citation index* et *TheseNet*. Les recherches se sont concentrées sur les articles publiés entre 1980 et 2008. Seuls les articles écrits en anglais et en français ont été retenus. Les mots-clés utilisés pour la revue de littérature ont été les suivants : goût(s), taste(s), odeur(s), odor(s), odour(s), perception, flaveur, flavor, flavour, précurseurs, precursors, algues, algae, méthodes analytiques, analytical methods, analyses sensorielles, sensory

analyses, eau potable, *drinking water*, eau du robinet, *tap water*, eau distribuée, *distributed water*, réseau d'aqueduc et *water distribution network*. Les documents bibliographiques (articles, livres, thèses) ont été sélectionnés selon la pertinence du contenu.

3. LES GOÛTS ET LES ODEURS DANS L'EAU POTABLE

La saveur est le terme utilisé pour décrire la sensation ressentie dans la bouche lors de l'absorption de nourriture ou d'un liquide. La saveur peut être décrite comme l'addition des composantes de l'odeur, du goût d'une eau et du facteur d'impression (KHIARI, 1996). Quatre goûts de base peuvent être perçus par l'humain (GREENBERG *et al.*, 2005) : sucré, salé, aigre et amer. Les goûts salés et aigres sont occasionnés surtout par des molécules ioniques tandis que les goûts sucrés et amers sont généralement attribuables à des molécules organiques. Cependant, c'est l'odeur qui joue un plus grand rôle dans la perception des substances responsables des goûts et des odeurs. La réponse des humains aux goûts et aux odeurs est décrite de deux façons : par terme (sucré, moisi, médical, etc.) et par l'intensité (faible, modéré, fort, etc.) (DIETRICH *et al.*, 2004b). Elle est basée sur un phénomène complexe impliquant une grande variété de descripteurs et de sensations (LLORENS, 2004). L'arrière-goût est aussi un aspect important dans l'étude des goûts et odeurs. Il est décrit comme étant la sensation qui reste en bouche 15 secondes après la consommation d'un liquide ou de nourriture. Généralement, la persistance de l'arrière-goût est directement proportionnelle à la température d'un liquide ou d'un aliment.

Beaucoup d'efforts ont été déployés pour comprendre le phénomène des goûts et des odeurs dans l'eau potable. Ceux-ci ont fait l'objet de plusieurs recherches dans les deux dernières décennies. Ces recherches ont notamment porté sur les microorganismes causant les goûts et les odeurs, les molécules responsables et le lien de causalité entre la présence du microorganisme et les goûts et les odeurs produits. PERSSON (1983) a élaboré trois critères pour déterminer si un microorganisme est à l'origine d'un problème de goût et d'odeur :

- coexistence de l'odeur et du microorganisme dans le milieu étudié;
- isolation du microorganisme et preuve de la production d'une odeur en laboratoire;
- identification chimique et caractérisation sensorielle des composés odorants.

Par la suite, SUFFET *et al.* (1999) ont décrit le processus d'identification des composés responsables des goûts et des odeurs comme suit :

- isoler le microorganisme par des techniques de culture et déterminer si l'odeur produite par la culture est la même que celle décelée dans l'eau potable par un panel de dégustation;
- isoler les composés générés par la croissance microbiologique et les identifier par une technique reconnue de confirmation comme la chromatographie en phase gazeuse, couplée à un spectromètre de masse (CG/SM);
- isoler les composés à la source goûts et odeurs dans des échantillons d'eau naturelle;
- établir une relation entre la teneur en composés chimiques dans l'eau naturelle et l'intensité d'odeur déterminée par un panel de dégustation.

Toutefois, ce ne sont pas tous les microorganismes qui peuvent être cultivés (PRESCOTT *et al.*, 1995) et ceci représente une limitation importante à cette procédure.

L'eau potable est un mélange complexe de molécules qui couvrent une large gamme de structures chimiques et de caractéristiques organoleptiques. Ces composés peuvent provenir de la contamination du bassin d'eau brute par un déversement industriel ou agricole. Des sous-produits de microorganismes algaux ou bactériens, ou ceux provenant de la réaction d'une molécule du milieu avec le chlore ou l'ozone dans une unité de traitement, peuvent aussi être à l'origine de goûts et odeurs dans l'eau potable. La transformation biologique d'une molécule du milieu, lors de son interaction avec les microorganismes dans l'unité de traitement ou dans les conduites du réseau de distribution, conduit aussi à l'apparition de goûts et d'odeurs dans l'eau distribuée. Finalement, les goûts et odeurs dans l'eau du robinet sont aussi attribuables à la migration des composés constituant les conduites du réseau de distribution, à des métabolites provenant des microorganismes du biofilm des conduites du réseau, etc.

Les molécules responsables des goûts et des odeurs se retrouvent habituellement en faible concentration dans l'environnement (du $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ au $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Puisque l'odorat humain est très sensible, souvent même plus sensible que l'instrumentation de laboratoire la plus sophistiquée, il est courant qu'une odeur soit perçue sans que l'on puisse quantifier la molécule responsable.

La plupart des législations se concentrent sur les aspects sanitaires aigus et chroniques (microbiologie, métaux traces et micropolluants organiques) de l'eau potable et s'intéressent peu à la perception des goûts et des odeurs dans l'eau, car ceux-ci ne sont pas liés à des risques sanitaires (ÖMÜR, 2004). Cela explique d'ailleurs que les composés responsables des goûts

et des odeurs soient peu suivis en réseau de distribution. Le tableau 1 résume les principales normes internationales dans ce domaine.

4. LES SOURCES

4.1 L'eau brute

4.1.1 Les algues

Les composés produits par les algues à l'origine des goûts et des odeurs dans l'eau potable comprennent des aldéhydes, des alcanes, des alcènes, des alcools et des esters (DIETRICH *et al.*, 1995). La population algale peut être notamment influencée par des activités agricoles et urbaines dans le bassin versant. Durant leur cycle de vie, les algues produisent de nombreux composés, dont quelques-uns sont odorants (géosmine et méthylisobornéol) et d'autres sont non odorants (heptadécane, acides gras).

Les algues ne forment pas un groupe taxonomique formel. Les anciens systèmes de classification étaient basés sur les différences morphologiques entre les algues (pigmentation, organisation cellulaire, présence de flagelles et chimie de la paroi cellulaire et des réserves cellulaires) (KNAPPE *et al.*, 2004). Toutefois, les développements technologiques ont mis en évidence des différences génétiques et extra-structurelles parmi les algues et ceci a conduit à des changements dans les systèmes de classification. La littérature attribue aux taxons appartenant aux classes des *Cyanophycées*, communément appelés cyanobactéries (algues bleu-vert), des *Chrysophycées* (chrysophytes), des *Bacillariophycées* (diatomées) et des *Chlorophycées* (algues vertes) les algues responsables des

goûts et des odeurs de l'eau potable. L'analyse des algues est habituellement faite par observation microscopique d'une fraction d'un échantillon d'eau. La comparaison des structures observées est faite au moyen d'une clé d'identification proposée par l'*American Water Works Association* ou par d'autres auteurs (BÜDEL *et al.*, 2005; WEHR et SHEATH 2003).

4.1.2 Les cyanobactéries

Les cyanobactéries peuvent être considérées comme des algues (algues bleues ou bleu-vert), bien qu'elles fassent partie du groupe des Eubactéries (vraies bactéries). Il est à noter que, parce que leur matériel génétique n'est pas situé dans le noyau, les cyanobactéries ne sont pas toujours classifiées comme des algues, mais peuvent aussi être considérées comme des bactéries, d'où leur appellation. Cependant, contrairement aux autres groupes bactériens, elles contiennent de la chlorophylle; leur source énergétique provient donc de la lumière. Elles ont aussi une solide structure cellulaire (SATCHWILL, 2001). Le nom « algues bleues », ou « algues bleu-vert », provient des premières cyanobactéries observées. Toutefois, on en retrouve des violettes et des vert olive. Les cyanobactéries peuvent se retrouver sous forme unicellulaire, en colonies (coccoïdes) ou sous forme de filaments. À titre d'exemple, le genre *Synechococcus* est unicellulaire, le genre *Microcystis* forme des colonies et les genres *Anabaena* et *Oscillatoria* forment des filaments. Les cyanobactéries sont associées à de nombreux événements de goût et d'odeur reliés à l'eau potable. Environ 2 000 espèces et 150 genres de cyanobactéries sont actuellement répertoriés (KNAPPE *et al.*, 2004).

Certaines cyanobactéries (*Anabaena*, *Microcystis*) peuvent réguler leur position verticale grâce à des vacuoles. Durant le jour, elles se retrouvent à la surface de l'eau et produisent des hydrates de carbone grâce à la photosynthèse et ceci a pour effet d'augmenter leur densité. Elles migrent alors vers les

Tableau 1. Normes internationales pour les goûts et odeurs dans l'eau (CANADA, 1996; KHIARI, 1996; CEE, 1998; USEPA, 2009).

Table 1. International regulations concerning tastes and odours in drinking water (CANADA, 1996; KHIARI, 1996; CEE, 1998; USEPA, 2009).

Pays/Organisme	Norme
Canada	Inoffensif
États-Unis	TON ¹ <3
Organisation mondiale de la santé	Aucun goût ne doit être perceptible pour 90 % de la population
Union européenne	Acceptable pour le consommateur et aucun changement anormal

¹Concentration d'odeur au seuil (Threshold odor number) : L'analyse consiste à effectuer une série de dilutions sur un échantillon avec de l'eau sans odeur. L'analyse de l'odeur est effectuée par des panélistes entraînés. La concentration d'odeur au seuil correspond à la dilution la plus élevée pour laquelle une odeur apparaît encore détectable dans l'échantillon par la moitié des panélistes.

profondeurs durant la nuit et utilisent les hydrates de carbone lors du processus de respiration; ceci diminue leur densité et leur permet de retourner à la surface de l'eau. Le tableau 2 résume les principales molécules produites par les cyanobactéries et identifiées dans la littérature comme génératrices de goûts et d'odeurs.

La géosmine et le 2-méthylisobornéol sont produits par plusieurs espèces de cyanobactéries. Ce sont des composés associés aux goûts et aux odeurs de l'eau avec un très faible seuil d'odeur se situant entre 4 et 10 ng•L⁻¹ pour la géosmine et entre 9 et 42 ng•L⁻¹ pour le 2-méthylisobornéol (WHELTON et DIETRICH, 2004; YOUNG *et al.*, 1996). Ces molécules sont associées à des goûts terreux et de moisi et sont responsables d'un grand nombre de plaintes de goûts et d'odeurs dans les réseaux d'aqueduc alimentés par des eaux de surface (ANDERSON et QUARTERMAINE, 1998) (Tableau 2). Ces composés sont stables dans l'environnement et peuvent être transportés sur une grande distance. Les endroits affectés par leur présence peuvent donc être distants de l'endroit où ils ont été formés. Il existe des mécanismes naturels de dégradation de ces composés, surtout lorsque les cellules des algues meurent à la suite de l'augmentation de l'activité bactérienne. Toutefois,

ces procédés sont lents par rapport à leur production et à leur transport. La géosmine et le 2-méthylisobornéol sont produits durant tout le cycle de vie des cellules de cyanobactéries. Ils peuvent être accumulés dans l'espace intercellulaire ou rejetés dans l'environnement soit par bris, soit par lyse cellulaire.

4.1.3 Les chrysophytes

Les algues chrysophytes sont réparties parmi 200 genres et 1 000 espèces dont la plupart se retrouvent sous forme unicellulaire ou se regroupent en colonies (WEHR et SHEATH, 2003). Parmi ces 200 genres de chrysophytes, deux seraient à l'origine des goûts et odeurs dans l'eau potable, à savoir les genres *Synura* et *Dinobryon* (Tableau 3).

Les chrysophytes sont des algues mobiles et pourvues de deux flagelles de longueurs inégales. Elles possèdent aussi des cellules végétatives ou reproductives. Les chrysophytes tirent leur énergie et leurs nutriments de la photosynthèse et de leur caractère hétérotrophe. Elles croissent difficilement dans des environnements eutrophes, en raison de la compétition des autres algues présentes. Les eaux avec des pH élevés limitent leur croissance, car les chrysophytes requièrent du dioxyde

Tableau 2. Cyanobactéries pouvant induire des goûts et odeurs à l'eau potable (nomenclature vérifiée dans ITIS (ITIS, 2009)).
Table 2. Cyanobacteria related to taste and odours in drinking water (nomenclature verified with ITIS (ITIS, 2009)).

Famille	Genre	Substance responsable des goûts et odeurs
Chroococcales	<i>Synechococcus</i>	Geraniol, nerol, alcool diméthylallylique
	<i>Microcystis</i>	Acide linoléique, acide linoléique
Nostocales	<i>Pseudanabaena</i>	2-méthylisobornéol
Oscillatoriales	<i>Phormidium</i>	2-méthylisobornéol
	<i>Microcoleus</i>	2-méthylisobornéol, géosmine
	<i>Lyngbya</i>	2-méthylisobornéol
	<i>Anabaena</i> ¹	Géosmine, 2-méthylisobornéol, alcool diméthylallylique, β-cyclocitral, β-ionone
Hyellaceae	<i>Hyella</i>	2-méthylisobornéol

¹Ce genre est répertorié dans ITIS dans la famille Nostocales et dans Oscillatoriales dans la classification de Bold and Wynne, cette dernière a été retenue.

Tableau 3. Chrysophytes pouvant induire des goûts et odeurs à l'eau potable (nomenclature vérifiée dans ITIS (ITIS, 2009)).
Table 3. Chrysophytes related to tastes and odours in drinking water nomenclature verified with ITIS (ITIS, 2009)).

Ordre	Genre (espèce)	Substance responsable des goûts et odeurs
Ochromonadales	<i>Synura (petersenii)</i>	Acide linoléique, acide linoléique, 2t,4c,7c-decatrienal, 2t,6c-nonadienal, acide linoléique
	<i>Dinobryon (cylindricum)</i>	Acide linoléique, 2t,4c,7c-decatrienal

de carbone dissous pour leur métabolisme. Toutefois, près de 36 % des algues flagellées pigmentaires (majoritairement chrysophytes) dans des eaux oligotrophes et eutrophes sont capables d'ingérer des particules de la taille d'une bactérie. Cette adaptation leur permet de maintenir un taux élevé de reproduction durant des périodes de faible taux de nutriments (WEHR et SHEATH, 2003). Dans ce dernier cas, elles prennent leur nourriture en englobant les matières particulaires, à la manière de certaines bactéries ou d'autres protistes (phagotrophie). Elles peuvent aussi absorber des molécules complexes (osmotrophie). Certains chrysophytes (*Uroglena*, *Dinobryon*) peuvent avoir un contenu lipidique cellulaire élevé (30 % à 40 % de la masse sèche) avec un fort pourcentage d'acides gras polyinsaturés (>60 %). Ces acides gras sont utilisés pour former la bicouche lipidique de la membrane cellulaire et comme réserve d'énergie.

4.1.4 Les diatomées

Les algues diatomées sont des algues unicellulaires possédant une paroi cellulaire constituée de dioxyde de silice. Elles sont réparties en 250 genres et plus de 100 000 espèces. De ces 250 genres de diatomées, quatre sont à l'origine des goûts et odeurs dans l'eau potable : *Asterionella*, *Synedra*, *Aulacosiera* et *Melosira* (Tableau 4).

Les diatomées les plus communes sont *Asterionella*, *Cyclotella*, *Fragilaria*, *Melosira*, *Navicola*, *Synedra* et *Tabellaria*. Elles peuvent exister sous forme unicellulaire, en chaîne de cellules pouvant être assimilées à des filaments, ou en colonies. La paroi cellulaire, ou frustule, est constituée de deux parties. Ces parties sont appelées valves, l'une des valves s'ajustant à l'intérieur de l'autre à la manière d'un plat de Pétri. Cette

structure est poreuse et permet l'échange de la cellule avec son environnement extérieur. Toutefois, elle peut nuire à la diffusion des produits métaboliques. La densité élevée des diatomées fait en sorte qu'en eau calme, elles ont tendance à sédimenter. Pour pallier à cette particularité, les diatomées ont évolué vers des formes sphériques irrégulières et plusieurs d'entre elles possèdent des épines ou des excroissances qui augmentent leur rapport volume/masse. Les diatomées peuvent aussi produire des vacuoles pour l'emmagasinage des lipides afin de réguler leur densité. Leur membrane cellulaire contient des acides gras et peut produire du mucilage, leur permettant de s'attacher à des surfaces solides.

Les diatomées sont dominantes au printemps, en raison de l'abondance de lumière et de nutriments essentiels à leur nutrition et à la photosynthèse. Elles ont un avantage compétitif sur les autres espèces d'algues en eau froide, car elles peuvent avoir une activité photosynthétique à des températures aussi basses que 5 °C. Les températures optimales pour leur croissance étant de 10 à 20 °C. Elles peuvent croître en milieu oligotrophe (*Cyclotella*) ou eutrophe (*Stephanodiscus* et *Melosira*). Les nutriments limitant la croissance des algues diatomées sont la silice (essentielle à leur structure externe), l'azote inorganique (NH_4^+ , NO_3^-), le phosphore et les métaux en trace.

4.1.5 Les chlorophycées

Les algues de la classe des *Chlorophycées* se regroupent en plus de 500 genres et 8 000 espèces (KNAPPE *et al.*, 2004). Toutefois, uniquement deux genres sont rapportés comme étant à la source de goûts et odeurs dans l'eau potable, soit *Scenedesmus* et *Chlorella* (Tableau 5) (COTSARIS *et al.*, 1995;

Tableau 4. Diatomées pouvant induire des goûts et odeurs à l'eau potable (nomenclature vérifiée dans ITIS (ITIS, 2009)).
Table 4. Diatoms related to tastes and odours in drinking water (nomenclature verified with ITIS (ITIS, 2009)).

Ordre	Genre (espèce)	Substance responsable des goûts et odeurs
Fragilariales	<i>Asterionella (formosa)</i>	Diméthyl disulphide, 3-méthoxy-2-isopropyl pyrazine, 2,6-diméthyl pyrazine, 1,3-octadiène, α -campholène aldéhyde,
	<i>Synedra (delicatissima)</i>	n-hexanal, trans 2-hexanal, 3-méthyl butanal, limonène
	<i>Aulacosiera (granulata)</i>	n-hexanal, n-heptanal, n-pentanal, diméthyl trisulphide, 6-méthyl-5-heptène-2-one, 1-pentène-3-one
Melosirales	<i>Melosira</i>	β -cyclocitral

Tableau 5. Chlorophycées pouvant induire des goûts et odeurs à l'eau potable (nomenclature vérifiée dans ITIS (ITIS, 2009)).
Table 5. Chlophycea related to tastes and odours in drinking water (nomenclature verified with ITIS (ITIS, 2009)).

Ordre	Genre	Substance responsable des goûts et odeurs
Chlorococcales	<i>Scenedesmus</i>	Trans-2-nonenal, 2,6-nonadienal, linalool, Trans 2-hexenal, cis 3-hexène-1-ol, n-hexanol, n-heptanal, 2,4-heptdienal, diméthyl trisulphide, diméthyl disulphide, 3-méthyl butanal, 1,8-cineole, 2,2,6-triméthyl cyclohexanone, camphre, α -ionone, β -ionone, β -cyclocitral, geranyl acetone, 1-pentène-3-one
	<i>Chlorella</i>	Limonène, 1,8-cinéole, guajanolidés

JÜTTNER, 1995b). Elles peuvent être unicellulaires ou former des structures coloniales de formes diverses. Les plus connues font partie des genres *Ankistrodesmus*, *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Spirogyra*, *Staurastrum* et *Volvox*. Les chlorophycées unicellulaires peuvent être flagellées ou non et être plus ou moins mobiles. Elles croissent fréquemment en milieu eutrophe durant la saison estivale. Elles peuvent aussi croître sous un couvert de glace en hiver ou lors de la fonte des neiges. Les espèces rapportées par la littérature comme pouvant générer des molécules responsables de goûts et d'odeurs dans l'eau potable font partie d'un seul ordre : *Chlorococcales*.

4.2 Sources reliées au traitement de l'eau

La chloration de l'eau potable est l'une des premières causes de plaintes reliées aux goûts et aux odeurs de l'eau potable (SUFFET *et al.*, 1996; WELTÉ et MONTIEL, 1999). Les goûts et odeurs attribuables au chlore peuvent être produits par des composés inorganiques chlorés (acide hypochloreux, ions hypochlorites ou chloramines). Ils peuvent aussi être générés par des composés organiques chlorés (chlorophénols). Le **tableau 6** résume les propriétés organoleptiques des dérivés du chlore dans l'eau potable. Ces propriétés sont exprimées

au moyen de deux descripteurs : l'odeur et la flaveur. Le dioxyde de chlore, utilisé dans certains réseaux de distribution nord-américains comme désinfectant, a pour principaux avantages de contrôler les goûts et les odeurs et de limiter l'oxydation des métaux solubles. Cependant, ce composé a été rapporté comme étant responsable de la présence d'odeurs s'apparentant au kérosène et à l'urine de chat (DIETRICH *et al.*, 1992). L'ozone, un composé utilisé pour désinfecter et éliminer les goûts et les odeurs de l'eau potable, peut provoquer la formation d'aldéhydes aliphatiques et aromatiques attribuant une odeur fruitée et parfumée à l'eau traitée (ÖMÜR, 2004).

Il est à noter que les valeurs du tableau 6 peuvent être surestimées. En effet, selon PIRIOU *et al.* (2004), les goûts de chlore perçus par un panel de dégustation peuvent surestimer la perception de la population en général. De plus, les travaux de MACKEY *et al.* (2004) et PIRIOU *et al.* (2004) ont permis de mettre en évidence que la perception des goûts de chlore varie aussi d'une personne à l'autre et d'une population à l'autre.

Des recherches ont démontré que les acides humiques présents naturellement dans les bassins versants des sources d'eau potable réagissent avec le chlore utilisé dans le

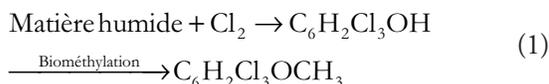
Tableau 6. Propriétés organoleptiques des composés du chlore dans l'eau potable (WELTE et MONTIEL, 1999).
Table 6. Organoleptic properties of chlorine compounds in drinking water (WELTE et MONTIEL, 1999).

Composés	Descripteur	Odeur (mg•L ⁻¹)	Flaveur (mg•L ⁻¹)
Acide hypochloreux	Chloré	0,28	0,24
Ion hypochlorite	Chloré	0,36	0,30
Monochloramine	Piscine	0,65	0,48
Dichloramine	Piscine	0,15	0,13
Trichloramine	Géranium	0,02	ND

ND : Non disponible

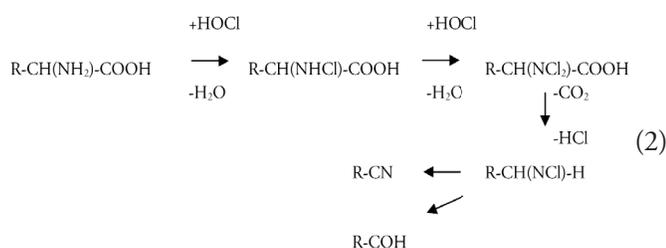
traitement pour former, entre autres, le 2,4,6-trichlorophénol (KARLSSON *et al.*, 1995). Ce dernier est dégradé par les microorganismes présents naturellement ou ceux existant dans la flore microbienne du réseau de distribution, pour former le 2,4,6-trichloroanisole selon l'équation 1. Les travaux de MONTIEL *et al.* (1999) ont mis en évidence la production des tri et des tétrachloroanisoles en réseau à la suite de la réaction du chlore avec des composés phénoliques pour former des tri et des tétrachlorophénols. Ces derniers sont ensuite biométhylés pour former l'anisole correspondant.

Biométhylation



La chloration peut aussi entraîner la formation de trihalométhanes iodés qui confèrent à l'eau un goût « médical » (CANCHO *et al.*, 2001; HANSSON *et al.*, 1987). Toutefois, ces sous-produits de chloration sont formés en présence de l'iode provenant de l'eau de mer, des infiltrations ou de saumures.

Il a aussi été rapporté que des composés odorants peuvent être produits au point de rupture de chloration (breakpoint) (KAJINO *et al.*, 1999). Ainsi, l'ammoniaque et des acides aminés (glycine, alanine, valine, leucine, arginine, proline) peuvent réagir avec le chlore pour former le nitrile et l'aldéhyde correspondant selon l'équation suivante :



KENNETH *et al.* (1999) ont aussi démontré que la réaction du chlore avec des acides aminés conduisait à la

formation de l'aldéhyde correspondant. Le tableau 7 illustre le seuil de détection des odeurs attribuables à ces aldéhydes.

4.3 Sources reliées au réseau de distribution

Le réseau de distribution peut être à l'origine de composés responsables de goûts et odeurs dans l'eau potable. Les problèmes rencontrés en réseau sont l'odeur de chlore, la croissance de microorganismes en réseau (actinomycètes et les bactéries sporulantes notamment) (ZAITLIN et WATSON, 2006), les composés émis par la tuyauterie de métal ou de plastique et les composés émis par les enduits des réservoirs (DIETRICH *et al.*, 2004a). Les sources sont nombreuses, mais peuvent être classées en quatre catégories (KHIARI *et al.*, 1999) :

- constituants des conduites et des réservoirs;
- sous-produits du traitement dont la formation se poursuit dans le réseau d'aqueduc;
- molécules libérées par l'activité biologique;
- corrosion des conduites et des réservoirs.

Il a ainsi été rapporté que des enduits ajoutés aux réservoirs ou aux conduites d'eau potable pouvaient contenir des composés induisant des goûts et des odeurs à l'eau potable (KHIARI *et al.*, 1999). D'autres travaux, effectués par RIGAL et DANJOU (1999) et SCHWEITZER *et al.* (2004) ont démontré que des conduites de plastique, des enduits ou des membranes organiques et des produits utilisés pour le chemisage en époxy des conduites d'eau potable peuvent conduire à l'intrusion d'additifs, de solvants et de monomères dans le réseau. Ces composés peuvent se retrouver en réseau à la suite des événements suivants :

- Lots d'enduits à base de composite défectueux;
- Utilisation d'enduits vinyliques émettant des composés aliphatiques et des alkylbenzènes;
- Utilisation d'un polychlorure de vinyle (PVC) non inerte

Tableau 7. Seuils de détection des odeurs attribuables aux aldéhydes formés suite à la chloration d'acides aminés (KENNETH *et al.*, 1999).
Table 7. Limits of detection corresponding to odours produce by aldéhydes formed by chloration of amined acid (KENNETH *et al.*, 1999).

Acide aminé	Aldéhyde correspondant	Seuil moyen de détection d'odeur ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
Valine	Isobutyraldéhyde	1,4
Leucine	Isovaléraldéhyde	0,78
Isoleucine	2-méthylbutyraldéhyde	12,5
Phénylalanine	Phénylacétaldéhyde	4,0

pour l'enduit d'un réservoir;

- Polymérisation incomplète ou mauvaise formulation d'un époxy utilisé pour doubler une conduite de réseau.

Les travaux de SATCHWILL (1998) ont démontré que la contamination d'un système de distribution d'eau potable peut avoir lieu à la suite de branchements croisés, de bris de conduites principales, de la migration de certains contaminants provenant des joints d'étanchéité et de conduites constituées de matériaux perméables comme le polyéthylène. De plus, des sources externes de contamination, comme des fuites de réservoirs souterrains, peuvent survenir. Des normes existent dans plusieurs pays (Nouvelle-Zélande, États-Unis, Europe) pour vérifier les composés en contact avec l'eau potable. Cependant, malgré ces normes, près de 10 % des matériaux qui atteignent les exigences des normes échouent aux tests de goûts et d'odeurs (MARCHELAN et MORRAN, 2004).

Des composés à cinétique lente peuvent aussi se former dans le réseau. Le tribromophénol ou le bromoforme peuvent être formés à partir de précurseurs présents (matière organique, phénol provenant des enduits présents dans le réseau de distribution, etc.) lors de la réaction avec le chlore utilisé pour la désinfection. Le désinfectant résiduel peut aussi réagir avec de la matière organique présente dans le réseau pour former des trihalométhanes iodés et des aldéhydes (2-méthylpropanal, 3-méthylpropanal).

La réaction du chlore avec les lubrifiants utilisés pour l'insertion des conduites d'eau potable peut induire des odeurs « rances » à l'eau potable (DIETRICH *et al.*, 2004a; WIESENTHAL *et al.*, 2004) en introduisant des aldéhydes comme l'hexanal, l'heptanal et le nonanal (SCHWEITZER *et al.*, 2004).

Des goûts et des odeurs peuvent être observés dans des cas de lessivage des matériaux constituant les conduites d'eau potable et de leur réactivité subséquente dans le réseau de distribution (SCHWEITZER *et al.*, 2004). Des matériaux organiques utilisés dans les réseaux d'eau potable, en raison de leur résistance à la corrosion, peuvent être constitués de chlorure de polyvinyle (PVC), de chlorure de polyvinyle chloré (CPVC-C), de polyéthylène à haute densité (HPDE), de polyéthylène réticulé (PEX) et de polybutylène. Ces produits peuvent libérer du toluène, de l'acétone et de la méthylisobutylcétone (SCHWEITZER *et al.*, 2004; TOMBOULIAN *et al.*, 2004).

Les travaux de SKJEVRAK *et al.* (2004) ont mis en évidence la présence de composés organiques volatils produits par le biofilm présent dans des canalisations de PVC. Ces

composés volatils seraient produits par les algues présentes dans l'eau brute pour être par la suite dissous dans le biofilm des conduites du réseau de distribution. Par la suite, ces composés peuvent contribuer à générer des goûts et des odeurs à l'eau potable.

5. MÉTHODES D'ANALYSE ET D'ÉVALUATION DES GOÛTS ET DES ODEURS ET DE LEURS PRÉCURSEURS

5.1 Méthodes d'analyses microbiologiques des précurseurs des goûts et des odeurs

5.1.1 Analyses des algues microscopiques

Les algues microscopiques sont analysées par examen microscopique en utilisant des clés d'identification appropriées au type d'eau analysée (GREENBERG *et al.*, 2005). Les algues doivent d'abord être concentrées par filtration sur une membrane de 0,45 µm, par sédimentation ou par centrifugation. Par la suite, la membrane est placée sur une lamelle pour être examinée au microscope; on rend alors la membrane transparente par ajout d'huile à immersion. Lorsque l'échantillon est sédimenté ou centrifugé, seule une fraction du liquide est observée par microscopie inversée. Ces analyses permettent d'obtenir une quantification et une identification à l'espèce des algues appartenant aux genres *Cyanobactéries*, *Diatomées*, *Chrysophytes* et *Chlorohyccées*. Certains auteurs utilisent une étape de culture sur un milieu hétérotrophe (R2A) pour identifier et quantifier les algues hétérotrophes (CODONY *et al.*, 2003).

5.1.2 Analyses bactériologiques

L'analyse des bactéries hétérotrophes aérobies et anaérobies facultatives (BHAA) est réalisée par incorporation d'une partie de l'échantillon dans une gélose de type R2A, suivie d'une incubation à 35 °C durant 48 heures. Les actinomycètes sont analysés par une technique de bi-couche. Dans un premier temps, une couche de milieu amidon-caséine est formée dans un plat de Pétri. Par la suite, 5 mL d'un mélange formé par 2 mL d'échantillon, 17 mL de milieu amidon-caséine fondu (maintenu à 45 °C et 1 mL d'antibiotique antifongique, à savoir le cycloheximide, sont ajoutés en couche superficielle). Les colonies typiques sont dénombrées après six à sept jours d'incubation à 27 °C.

5.2 Méthodes d'analyses chimiques des composés responsables des goûts et des odeurs

Plusieurs méthodes sont utilisées pour quantifier les molécules responsables des goûts et des odeurs. Les plus prometteuses sont celles utilisant la technologie de la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. Les techniques d'extraction varient et, par conséquent, les limites de détection méthodologiques peuvent être variables. D'autres méthodes comme la colorimétrie (MILLER *et al.*, 1999) et l'immunologie (CHUNG *et al.*, 1991) sont en voie de développement, mais ne donnent pas encore les niveaux de précision requis pour l'analyse de l'eau potable.

5.2.1 Extraction liquide-liquide et analyse par CG/SM

Cette technique consiste en l'extraction de la molécule d'intérêt au moyen d'un solvant ayant la même polarité que celui-ci et qui est non miscible dans la matrice de départ (l'eau potable). Par la suite, le volume du liquide peut être amené à un volume minimal par évaporation, lorsque la nature du composé extrait le permet. Ainsi, pour un volume d'échantillon de 1 000 mL et un volume de solvant de 5 mL, le taux de concentration est de 200. Par la suite, une aliquote de l'extrait est injectée dans un chromatographe en phase gazeuse (CG) où les constituants sont séparés selon leur polarité et leur point d'ébullition. Finalement, les molécules ainsi séparées sont entraînées dans un spectromètre de masse (SM) où elles sont identifiées et quantifiées. Si un volume de 1 µL est injecté dans le CG/SM, le taux de concentration correspond alors à un volume analysé au départ de 0,2 mL. Étant donné les volumes concernés, cette technique est celle donnant les moins bons résultats analytiques en matière de seuil de détection.

5.2.2 Extraction par purge et piège et analyse par CG/SM

La technique par purge et piège (purge and trap) consiste à extraire les composés volatils d'un échantillon au moyen d'un débit d'hélium. Ce dernier passe à travers une colonne d'adsorbant à polarité spécifique qui piège les molécules d'intérêt. Ce passage s'effectue plusieurs fois en boucle fermée; ceci permet une concentration des composés volatils sur la colonne d'adsorbant. Par la suite, cette colonne est chauffée rapidement et les composés volatils sont désorbés dans un débit d'hélium qui est introduit dans un CG/SM. Dans le cas d'un volume d'échantillon de 25 mL, le taux de concentration correspond à un volume de 25 mL analysé (tout l'extrait du volume de 25 mL est injecté dans le CG/SM). Le taux de concentration correspond alors à un volume de 25 mL d'échantillon initial. Toutefois, le transfert des molécules volatiles de la phase aqueuse vers la phase gazeuse dépend de la constante de Henry de la molécule analysée (propre à chaque molécule), de la température d'extraction et de la matrice analysée (ÖMÜR, 2004).

5.2.3 Extraction par entraînement dans une boucle fermée et analyse par CG/SM

La méthode d'extraction par entraînement dans une boucle fermée (Closed Loop Stripping Analysis : CLSA) consiste en l'extraction en circuit fermé, par un débit de gaz inerte, des composés volatils d'un échantillon. Ce débit gazeux passe à travers l'échantillon et, par la suite, dans un piège d'adsorbant (charbon activé) où les composés volatils sont adsorbés. Ces passages s'effectuent plusieurs fois et le charbon activé s'enrichit graduellement en molécules d'intérêt. Par la suite, les molécules adsorbées sur le piège de charbon activé sont extraites avec un volume de 50 µL de disulfure de carbone (CS₂). Finalement, un volume de 1 µL est injecté dans un CG/SM pour être analysé et quantifié. Dans le cas où un litre d'échantillon est extrait, le taux de concentration correspond alors à un volume de 20 mL analysé. Encore ici, la constante de Henry de la molécule analysée joue un rôle dans la sensibilité de la méthode analytique. Cette technique est largement utilisée en raison de sa sensibilité, de sa sélectivité vis-à-vis de la fraction non polaire des composés organiques volatils et de sa disponibilité (BRUCHET *et al.*, 1995; KENEFICK *et al.*, 1995; KHIARI *et al.*, 1995b).

ZANDER et PINGERT (1997) ont développé une technique utilisant une modification de la CLSA : l'analyse par adsorption sur fibre creuse (Hollow Fiber Stripping Analysis : HFSA). Cette technique remplace le charbon activé par un ensemble de fibres creuses; ceci permet d'améliorer la technique en détectant de plus faibles quantités de composés très volatils. De leur côté, MALLERET et BRUCHET (2001) ont mis au point une technique d'injection à large volume (équivalent à 30 µL injecté) permettant d'augmenter la sensibilité de la méthode analytique.

5.2.4 Micro-extraction sur phase solide et analyse par CG/SM

La méthode par micro-extraction sur phase solide dans l'espace de tête (Headspace Solid Phase Microextraction : SPME) est relativement récente puisqu'elle est apparue dans le milieu des années 1990. Dans un premier temps, des sels sont ajoutés à un échantillon pour forcer le transfert des composés volatils d'intérêt dans la phase gazeuse en équilibre avec le liquide à analyser. Ensuite, une fibre spécifique aux composés d'intérêt est introduite dans l'interface gaz-liquide de l'échantillon. Les composés volatils libérés sont adsorbés sur la fibre et, après un certain temps d'équilibre, celle-ci est introduite dans l'injecteur d'un CG/SM. Les composés sont alors analysés et quantifiés. Dans le cas d'un volume analysé de 40 mL, le taux de concentration correspond alors à un volume de 40 mL analysé. Les deux avantages de cette méthode sont la faible quantité de solvant utilisée lors de l'analyse et un temps d'analyse réduit (HUANG *et al.*, 2004). Cependant, à l'instar des méthodes

purge et piège et CLSA, la sensibilité de la méthode dépend de la constante de Henry du composé analysé.

La méthode SPME est sensible à la force ionique et au pH de la solution extraite (MALLERET *et al.*, 2003). Le temps et la température d'extraction jouent aussi un rôle prépondérant. C'est une technique peu dispendieuse requérant peu de temps de manipulation; ceci fait son attrait pour les laboratoires de contrôle de la qualité de l'eau potable (WATSON *et al.*, 1999). De plus, la comparaison de cette méthode pour l'analyse du 2-méthylisobornéol et de la géosmine dans une matrice complexe (chair de poisson) par rapport à une analyse sensorielle a démontré que la SPME était en mesure d'atteindre le même niveau de sensibilité (GRIMM *et al.*, 2004). Cette méthode est considérée comme ayant les mêmes sensibilité et reproductibilité que celles de la méthode purge et piège, une technique utilisée depuis plus de deux décennies (LLOYD *et al.*, 1998). Récemment, une méthode mettant à profit la technique CLSA et la technique SPME a été développée afin d'augmenter la sensibilité de la méthode (SUFFET *et al.*, 2006).

5.2.5 Extraction par tige agitatrice adsorbante et analyse par CG/SM

L'approche utilisée pour la technique par tige agitatrice adsorbante (Stir Bar Sorptive Extraction : SBSE) est similaire à celle utilisée pour le SPME. Toutefois, avec cette technique, des quantités plus élevées de polydiméthylsiloxane (PDMS) (entre 50 et 300 μL pour le SBSE contre 0,5 μL pour SPME) sont utilisées, ceci permet d'extraire des composés plus polaires (K_{ole}^1 10 à 500 pour SBSE et $K_{ole} > 10\,000$ pour SPME) (BENANOU *et al.*, 2004). Des tiges agitratrices adsorbantes magnétiques enduites d'une couche d'une épaisseur de 1 mm de PDMS sont mises en contact avec un volume d'échantillon d'eau variant de 1 à 250 mL. Le temps d'équilibre varie de 30 à 120 minutes. Par la suite, les molécules adsorbées sur la tige sont désorbées à des températures variant entre 150 et 300 °C durant 5 à 15 minutes. Dans le cas où une portion de 250 mL d'échantillon est extraite, le taux de concentration correspond alors à un volume de 250 mL analysé si l'on considère le transfert de la molécule vers la phase stationnaire complète.

5.2.6 Extraction simultanée par distillation et analyse par CG/SM

Avec la méthode d'extraction simultanée (Simultaneous Distillation Extraction : SDE), un certain volume d'échantillon, habituellement 2 L et 50 mL de dichlorométhane, est chauffé dans un ballon à fond rond relié à une tête de distillation-extraction de type Nickerson-Lichens. La vapeur provenant de l'échantillon d'eau se mélange à celle provenant du dichlorométhane. Les composés organiques volatils sont alors extraits dans la phase gazeuse. À la fin du procédé, l'extrait organique est récupéré, séché et concentré par évaporation

jusqu'à un volume final de 100 μL . Par la suite, 1 μL d'extrait est injecté dans un CG/SM pour analyse et quantification. Dans le cas où un volume de 2 000 mL d'échantillon est extrait, le taux de concentration correspond alors à un volume de 20 mL analysé. Cette technique peut être utilisée en complément de la méthode CLSA, car elle permet l'extraction de composés plus polaires et plus lourds (KHIARI *et al.*, 1995a).

5.3 Méthodes sensorielles pour la mesure des goûts et des odeurs

L'analyse sensorielle des goûts et des odeurs dans l'eau potable permet d'identifier un goût, une odeur, provenant d'un échantillon d'eau potable. Certaines analyses peuvent être quantitatives, c'est-à-dire qu'en plus d'identifier l'odeur ou le goût, la concentration de la molécule responsable peut être mesurée (olfactométrie-CG/SM). D'autres sont qualitatives, c'est alors l'intensité du goût ou de l'odeur qui est mesurée (Flavour Profile Analysis (FPA) par exemple).

5.3.1 Analyse par olfactométrie couplée à une analyse par CG/SM

Cette technique, utilisée depuis près de dix ans, fait appel à la technologie de la chromatographie en phase gazeuse pour effectuer la séparation des molécules présentes dans un échantillon d'eau. Elle peut aussi être considérée comme une méthode quantitative, puisqu'elle permet la quantification de la molécule responsable de l'odeur. À la sortie du chromatographe, le débit de gaz est séparé en deux. Une partie est dirigée vers le détecteur (spectromètre de masse) et l'autre vers un port olfactif. Dans cet instrument, le débit de gaz provenant du chromatographe est mélangé à de l'air humidifié dans une enceinte où une personne peut placer son visage et sentir le mélange gazeux. Lorsqu'une odeur est perçue par l'analyste, celui-ci marque le temps au chronomètre. À la fin de l'analyse, la comparaison des temps au chromatogramme obtenus par SM permet de connaître l'identité des molécules responsables des odeurs perçues (BRUCHET *et al.*, 2004; WIESENTHAL et SUFFET, 2007).

Cette technique a été la première à pouvoir établir, en une seule analyse, un lien entre l'odeur et la molécule responsable. De plus, la sensibilité du nez humain est telle que la limite de détection pour l'analyse de composés responsables des odeurs s'en trouve abaissée (HOCHEREAU et BRUCHET, 2004). Cette technique présente aussi l'avantage d'être en mesure de détecter des molécules odorantes en présence d'autres molécules.

5.3.2 Analyse de la flaveur

Les composés responsables des goûts et des odeurs de l'eau sont souvent en très faible concentration dans l'eau potable ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$). Leur identification commence d'abord

par la détection organoleptique des consommateurs dont le sens gustatif est souvent plus sensible que la technologie de laboratoire la plus sophistiquée. La roue des goûts et des odeurs, établie par SUFFET *et al.* (1999) il y a plus de dix ans, d'après des travaux effectués dans le domaine alimentaire, permet la classification des goûts et des odeurs de l'eau et de les relier à leur cause ou leur origine. Elle a été développée pour créer un langage commun pour les panels de dégustation d'eau potable. Cet outil répertorie huit classes d'odeurs, quatre classes de goûts et une dernière pour la sensation dans le nez ou la bouche. La figure 1 résume l'ensemble de ces classes (SUFFET *et al.*, 1999).

La relation entre l'intensité de l'odeur et la concentration du composé qui les cause peut être décrite par deux modèles (SUFFET *et al.*, 1999). Un premier modèle (Weber-Fechner) suggère une relation log-linéaire entre la concentration de la molécule responsable de l'odeur et l'intensité de l'odeur produite. Des coefficients (pente et ordonnée à l'origine) sont ainsi obtenus pour chacune des molécules étudiées. L'autre modèle (Stevens Power) propose une relation exponentielle entre la teneur d'une molécule donnée et l'intensité de l'odeur qu'elle produit. Une équation peut être obtenue et dont les

coefficients sont représentés par une constante (k) et l'exposant de l'équation (n). Ces deux modèles permettent d'obtenir des coefficients pour les molécules responsables des goûts et des odeurs dans l'eau potable; ceci permet d'avoir une base de comparaison entre elles.

Modèle Weber-Fechner

$$\text{Intensité} = m \log [\text{concentration}] + b \quad (3)$$

Modèle Stevens Power

$$\text{Intensité} = k [\text{concentration}]^n \quad (4)$$

À partir de l'évaluation réalisée par DIETRICH *et al.*, (2004b), des méthodes utilisées pour analyser les goûts et les odeurs de l'eau potable, nous avons élaboré le schéma présenté à la figure 2. Les méthodes d'analyses sensorielles peuvent être divisées en deux grandes catégories : analytique et affective. Les méthodes analytiques utilisent des sujets entraînés et mesurent des caractéristiques comme l'arrière-goût, des différences entre

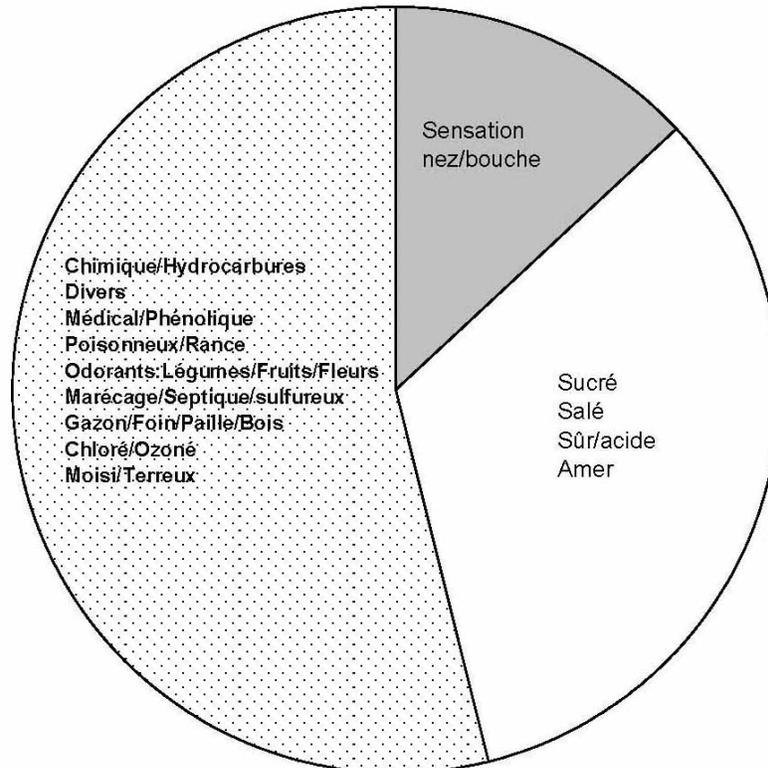


Figure 1. Catégories des goûts et odeurs dans l'eau potable (SUFFET *et al.*, 1999).
Categories of the taste and odours for drinking water (SUFFET *et al.*, 1999).

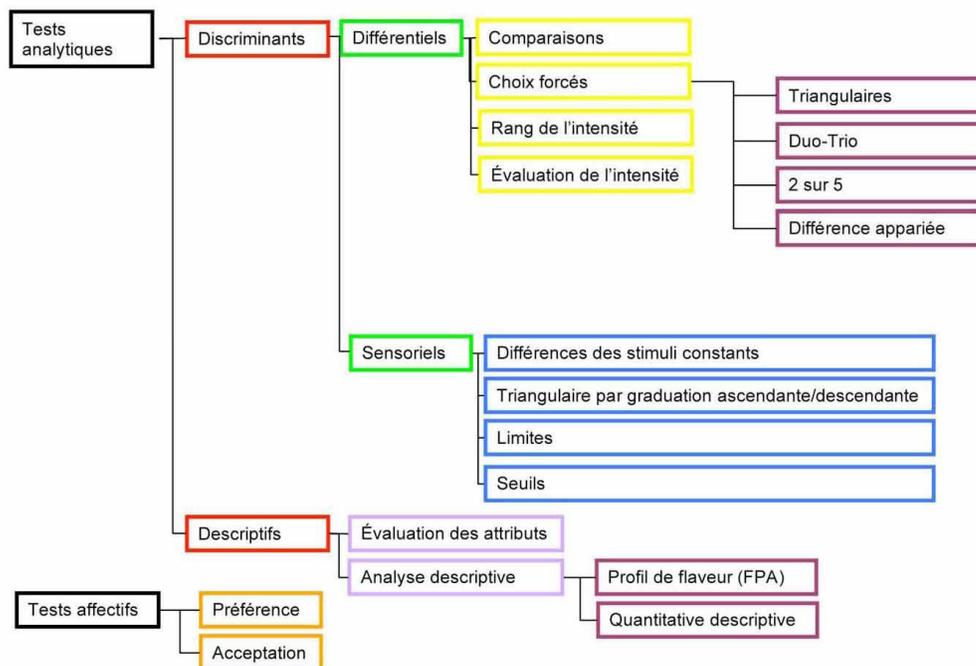


Figure 2. Méthodes d'analyses sensorielles pour l'évaluation des goûts et odeurs dans l'eau potable.
Sensory analytical methods for the evaluation of taste and odours in drinking water.

le goût et l'odeur, l'intensité des goûts et des odeurs et le rang des attributs. Ces tests nécessitent un temps de formation du personnel non négligeable (MARCHESAN et MORRAN, 2004) variant de quelques semaines à plusieurs mois. Les analyses affectives utilisent des sujets non entraînés et mesurent l'acceptation et les préférences. Les tests affectifs sont plus difficiles à appliquer, car ils requièrent une grande quantité de sujets (50 à 200) pour obtenir des données statistiquement valides. En conséquence, les tests analytiques sont les plus fréquemment utilisés pour fournir de l'information sur les goûts et les odeurs.

5.3.2.1 Tests analytiques

5.3.2.1.1 Les tests discriminants

Les tests discriminants sont conçus pour trouver des différences entre les échantillons. Ils sont utilisés pour déterminer si des échantillons ont des odeurs et des goûts perceptiblement différents. Ils requièrent au moins cinq panélistes entraînés. Des tests statistiques peuvent être appliqués sur les résultats obtenus.

a) Les tests différentiels

Les tests discriminants ont été élaborés pour repérer des différences entre des échantillons et sont utilisés pour déterminer si des échantillons sont perceptiblement différents.

Le test de comparaison appariée compare un échantillon d'eau à analyser avec un autre qui sert de contrôle (DIETRICH *et al.*, 2004a). Ce contrôle peut être l'eau à la sortie de l'usine de traitement de l'eau. Ce test est utilisé lorsque les odeurs et les goûts de l'eau sont absents de l'eau traitée et se développent en réseau. Il nécessite un entraînement de quelques heures et est souvent appliqué par les opérateurs d'usines de traitement d'eau. Il permet de distinguer de faibles variations de goûts et odeurs. La figure 3 schématise le test de la comparaison appariée.

Les tests de choix forcés (DIETRICH *et al.*, 2004b) contraignent les panélistes à choisir un « bon » et un « mauvais » échantillon parmi un minimum de trois échantillons. Les panélistes doivent obligatoirement donner une réponse, même s'ils doivent deviner. Le traitement statistique des données prend en compte ces choix pour établir les réponses correctes. En général, ces tests sont très sensibles et sont applicables à des situations où il y a de très faibles différences entre les échantillons. Le test du triangle est le plus utilisé des tests de choix forcés, il compare trois échantillons, dont deux sont identiques et un différent. Le test duo-trio est semblable au test du triangle, avec la différence qu'on y ajoute des échantillons de contrôle. Les panélistes doivent choisir, parmi une paire d'échantillons, lequel correspond le mieux à l'échantillon de contrôle. Par exemple, l'échantillon de contrôle et un des inconnus peuvent être l'eau à la sortie de l'usine de traitement et l'autre inconnu, un échantillon du réseau de distribution. Pour le test deux sur cinq, les panélistes sont mis en présence de cinq échantillons :

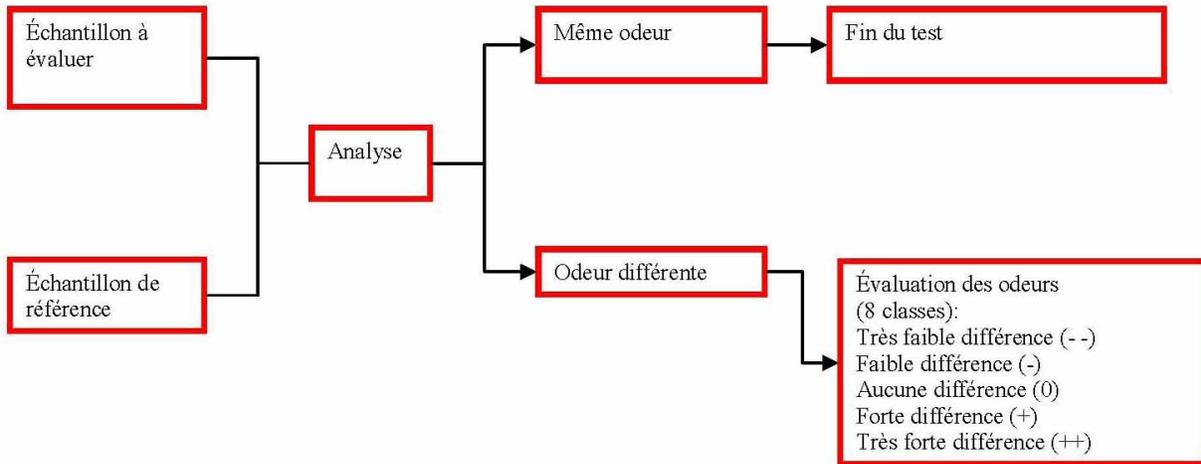


Figure 3. Procédure utilisée pour le test de la comparaison appariée.
Procedure used for the paired comparison test.

deux identiques entre eux et trois autres identiques entre eux, mais différents des deux premiers. Les panélistes doivent trier correctement les échantillons appartenant à chacun des groupes. La probabilité de trier ces échantillons adéquatement de façon aléatoire est de un sur dix. Ce test est plus puissant que les tests triangulaires et nécessite moins de panélistes pour le même niveau de confiance (GALLAGHER, 2004). Toutefois, les tests deux sur cinq entraînent une grande fatigue chez les panélistes. Finalement, le test des différences appariées utilise des étalons externes. Deux échantillons sont soumis aux panélistes et ceux-ci doivent sélectionner lequel des deux possède la caractéristique recherchée dans l'échantillon étalon. Par exemple, un étalon externe est élaboré avec de l'eau chlorée

à $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Deux échantillons seraient soumis aux panélistes pour qu'ils déterminent celui ayant une teneur en chlore similaire à celle de l'échantillon étalon. La figure 4 résume la procédure utilisée pour les tests de choix forcés.

Le test de classement des intensités relatives (DIETRICH *et al.*, 2004b) se concentre sur une seule caractéristique comme « sucré » ou « terreux » par exemple. Les panélistes sont entraînés sur la caractéristique de l'intensité. Un panéliste compare en même temps trois à dix échantillons par rapport à une seule caractéristique et les classe par intensité de la caractéristique à évaluer. Cette méthode est utilisée pour analyser rapidement des échantillons.

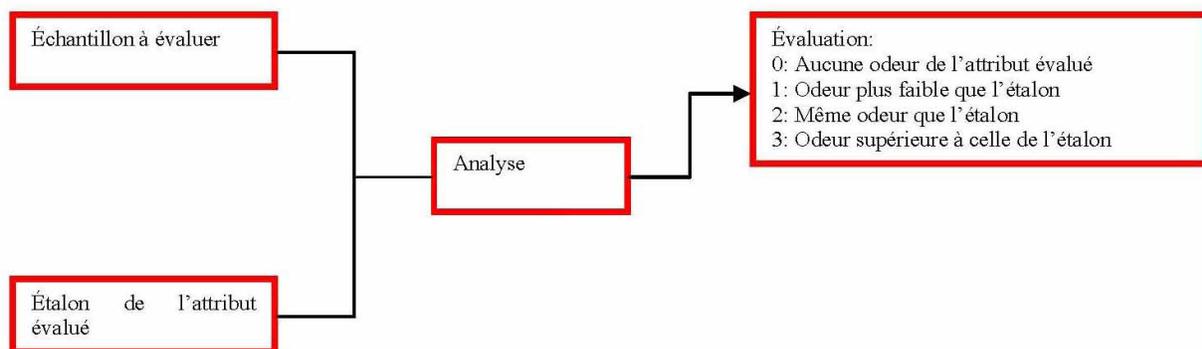


Figure 4. Procédures utilisées pour les tests de choix forcés.
Procedure used for forced choices tests.

Lors du test d'évaluation de l'intensité (DIETRICH *et al.*, 2004b), une série d'échantillons est soumise aux panélistes. Ceux-ci doivent évaluer le degré d'intensité de la caractéristique étudiée. Les panélistes doivent être entraînés à réorganiser une série d'échantillons selon une caractéristique, en utilisant une échelle d'évaluation. Cette échelle peut être numérique, graphique ou verbale; des échelles avec cinq à neuf catégories sont préférables pour ce test. Si une odeur de moisi est détectée dans de l'eau brute, une série d'échantillons d'eau traitée est soumise à des panélistes. Ceux-ci doivent alors évaluer l'odeur de moisi dans ces échantillons d'eau provenant de différents points du procédé de traitement.

b) Les analyses sensorielles

Les analyses sensorielles mesurent les seuils de détection et de reconnaissance et les seuils de dilution pour les goûts et les odeurs. Beaucoup plus de répétitions sont nécessaires pour obtenir des résultats fiables en raison de la variabilité des perceptions des panélistes entre eux et d'une journée à l'autre. Les pièces dans lesquelles se déroulent les analyses doivent être très propres et exemptes d'interférences (GREENBERG *et al.*, 2005).

Lors du test des différences des stimuli constants, chaque panéliste évalue deux échantillons : un témoin et un échantillon avec une odeur. Le panéliste doit choisir celui ayant la plus forte odeur. Chaque échantillon consécutif présente une concentration d'odeur plus forte. Lorsque 75 % des panélistes repèrent correctement les échantillons odorants, le test est arrêté. Le seuil est atteint au moment où 50 % des chances de sélection correcte sont effectuées par supposition.

Le test triangulaire par graduation ascendante/descendante est une méthode de choix forcé où les panélistes doivent choisir ou supposer quel échantillon est différent des autres pour un caractère non spécifié. Chaque panéliste reçoit deux témoins et un échantillon avec odeur. Chaque échantillon consécutif possède une odeur plus prononcée. Lorsque le panéliste choisit l'échantillon correctement trois fois dans le rang, la graduation est inversée jusqu'à ce qu'il ne puisse plus détecter l'échantillon adéquat. Le seuil devient la moyenne des points tournants dans plusieurs ascensions et descentes.

La plus simple et la moins laborieuse des méthodes sensorielles est la méthode des limites. Les échantillons sont présentés aux panélistes dans l'ordre ascendant des concentrations. À mesure que le panéliste évalue les échantillons, il rapporte « oui » ou « non » pour la détection de l'odeur. Lorsque trois échantillons de suite sont identifiés « oui », le test est arrêté. Le seuil est placé au moment où 50 % des panélistes rapportent une détection.

Le test du seuil de dilution est utilisé pour déterminer la force relative ou la persistance de l'odeur d'un échantillon en rapport avec un contrôle. L'échantillon initial est dilué jusqu'à ce qu'il soit semblable au contrôle. Dans le domaine de l'eau potable, le test de concentration d'odeur au seuil (COS ou TON : Threshold Odor Number) est utilisé pour évaluer l'eau dans une perspective réglementaire (OMS, 1986; SANTÉ CANADA, 1996).

5.3.2.1.2 Les tests descriptifs

Les tests descriptifs sont des méthodes plus élaborées et peuvent être utilisés pour évaluer les plaintes en réseau d'aqueduc et pour établir des corrélations avec les mesures analytiques. De façon générale, cinq à quinze panélistes doivent être entraînés pour évaluer les caractéristiques d'un échantillon. Il y a deux types de tests descriptifs : l'évaluation des attributs et l'analyse descriptive (profil de flaveur et quantitatif-descriptif).

a) Évaluation des attributs

Le test d'évaluation des attributs (DIETRICH *et al.*, 2004c) évalue la différence entre un échantillon et un échantillon étalon pour un seul attribut (moisi, chloré ou métallique par exemple). Les résultats peuvent être analysés de façon statistique. Les analystes déterminent si un échantillon a plus, autant ou moins d'attributs comparé à un étalon. Le schéma du test est décrit à la figure 5.

b) Analyses descriptives

Les tests descriptifs sont élaborés pour décrire complètement un échantillon. Ce sont des méthodes impliquant des panels et permettant de différencier et de décrire les caractéristiques d'un échantillon. Lors de ces analyses, l'intensité de chaque caractéristique est évaluée.

L'analyse du profil de flaveur (FPA : Flavor Profile Analysis) consiste à former un panel de cinq à sept personnes entraînées pour évaluer les caractéristiques de goûts et d'odeurs d'un échantillon. Les panélistes décrivent qualitativement le type de goût (sucré, salé, amer, sûr) et le type d'odeur (fruitée, moisie, chlorée, etc.) et classent leur intensité selon une échelle en sept points. Des discussions entre les panélistes sont encouragées afin d'obtenir un consensus sur les descripteurs et leur intensité. L'entraînement des panélistes nécessite plusieurs jours et une calibration constante est requise. Un panel peut prendre plusieurs mois pour devenir cohérent dans la description des caractéristiques et dans l'évaluation de leur intensité. Toutefois, cela n'empêche pas cette technique d'être utilisée dans le suivi systématique des plaintes en réseau d'eau potable (DEVESA *et al.* 2004; FABRELLAS *et al.*, 2004). Le test FPA est particulièrement approprié lorsqu'il faut discerner

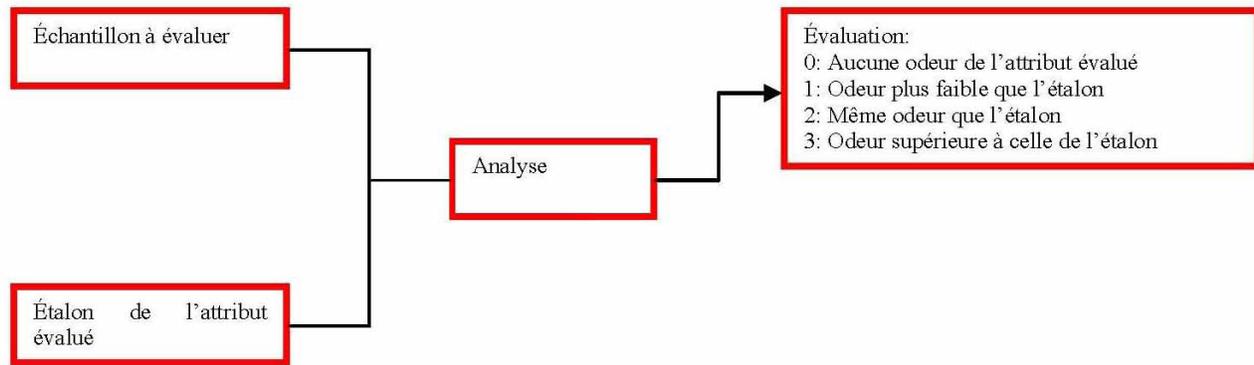


Figure 5. Procédure utilisée pour le test d'évaluation des attributs.
Procedure used for attribute evaluation test.

de faibles différences dans les goûts et les odeurs (OESTMAN *et al.*, 2004).

L'analyse quantitative descriptive est semblable à celle du profil de flaveur. Dans cette analyse, les panélistes sont entraînés à un nombre limité de goûts et d'odeurs. Les données de chaque panéliste sont mises en commun et une moyenne et un écart-type sont calculés; le consensus n'est pas requis. Les avantages de la méthode d'analyse quantitative descriptive par rapport au profil de flaveur sont : une durée d'entraînement plus courte (quelques semaines) et un traitement statistique possible des données obtenues.

5.3.2.2 Analyses affectives

Les tests affectifs sont liés à l'acceptation ou aux préférences des consommateurs. Ce sont des tests nécessitant un très grand nombre de personnes (plus de 500). Il existe deux types de tests affectifs : la préférence et l'acceptation (DIETRICH *et al.*, 2004b).

Dans les tests de préférence, les consommateurs sont interrogés sur leurs préférences. Ils peuvent être soumis à des comparaisons appariées utilisant deux échantillons ou plus. Des tests statistiques peuvent être utilisés pour traiter les données. Ces tests sont souvent utilisés pour évaluer des produits commerciaux.

Les tests d'acceptation doivent être effectués avant les tests de préférence. Ils requièrent toujours des étalons de référence. Ainsi, un consommateur peut accepter les qualités d'un produit, mais peut exprimer une préférence pour un autre produit ayant

des qualités semblables. Normalement, deux échantillons sont présentés en même temps, mais le nombre peut varier entre un et cinq. L'échelle des attributs peut être constituée de neuf points allant de « parfaitement d'accord » à « complètement en désaccord ». Des tests statistiques peuvent être utilisés pour traiter les données.

6. APPLICATIONS PRATIQUES DES DIVERSES MÉTHODES

L'étude des goûts et des odeurs dans un réseau de distribution d'eau potable comporte deux aspects fondamentaux. D'une part, il faut identifier les goûts et odeurs et leur intensité. Ceci permet d'évaluer leur évolution dans le réseau et leur influence sur la perception des consommateurs. Ces analyses permettent d'évaluer la perception des consommateurs, mais intègrent l'ensemble des molécules composant le goût et l'odeur de l'eau. D'autre part, il est nécessaire d'identifier les molécules responsables des goûts et des odeurs. Ceci permet d'identifier la source des goûts et odeurs et d'élaborer une stratégie de traitement en vue de les éliminer de l'eau distribuée. Cela implique l'utilisation de méthodes analytiques permettant l'atteinte d'un seuil de quantification voisin du seuil de perception humain pour un composé donné. Le seuil de quantification peut être défini comme étant la concentration minimale pouvant être quantifiée à l'aide d'une méthode d'analyse avec une fiabilité définie. L'objectif ultime est donc d'identifier et de quantifier les molécules responsables des goûts et des odeurs et de relier les résultats obtenus à ce qui est

perçu par le consommateur. Cependant, les analyses chimiques ne prennent pas en compte les interactions qu'il peut y avoir entre les composés générant des goûts et des odeurs dans l'eau potable. Ainsi, une molécule comme le 2-méthylisobornéol peut être présente à une concentration constante dans le réseau, mais la présence de chlore, plus forte en début de réseau, peut masquer sa présence et laisser percevoir une augmentation de sa teneur le long du réseau d'aqueduc, puisque la concentration en chlore diminue.

De façon générale, les méthodes analytiques requièrent de l'instrumentation coûteuse et de la main-d'œuvre spécialisée. Cependant, la technologie actuelle comprend une certaine automatisation permettant d'abaisser le coût d'analyse par échantillon à long terme. Ces techniques analysent les molécules une à une sans tenir compte de l'effet masquant, synergique (amplification) ou antagoniste (réduction) des autres composés présents dans l'échantillon analysé.

Le nombre de techniques d'évaluation des composés responsables des goûts et des odeurs étant élevé, il est essentiel de faire un choix approprié adapté au problème vécu. Les méthodes analytiques et sensorielles décrites dans les sections 5.2 et 5.3 ont donc été évaluées. Dans un premier temps, les avantages et les inconvénients de chaque méthode sont énumérés. Ensuite, la spécificité de chacune des méthodes, c'est-à-dire la possibilité d'identification des molécules, a été évaluée. La sensibilité de la méthode a aussi été estimée, celle-ci peut être définie comme étant la possibilité de faire la distinction entre deux résultats analytiques. Finalement, nous avons fait une évaluation sommaire des coûts analytiques; cette évaluation comprend l'achat de l'équipement analytique, la formation et l'opération ou la mise en application de la méthode.

En général, plus une méthode d'analyse sensorielle procure des informations, plus elle est coûteuse et plus la complexité d'application augmente. Cela se vérifie notamment pour les méthodes sensorielles où les tests descriptifs donnent le plus d'information. Toutefois, pour les appliquer, il faut former un panel et lui faire subir une formation s'échelonnant sur plusieurs semaines. Peu d'échantillons peuvent être analysés par ces méthodes, car une fatigue sensorielle s'installe très rapidement (environ dix échantillons peuvent être analysés au cours d'une même séance). De plus, la réunion d'un panel peut être difficile à organiser dans un contexte de gestion d'eau potable.

Les coûts reliés aux méthodes sensorielles sont plus faibles que ceux des analyses quantitatives. Toutefois, alors que l'odeur et le goût sont identifiés et quantifiés, ces méthodes ne permettent pas d'identifier avec certitude la ou les molécules responsables. Cela pose un obstacle dans l'identification de la source.

Une méthode optimale de suivi des goûts et des odeurs devrait combiner une méthode d'analyse sensorielle facile d'application permettant de soulever un problème en réseau avec un bon degré de certitude. Cette méthode devrait par la suite être complétée par une technique d'analyse sensible et spécifique. Conséquemment, un suivi adéquat peut être réalisé au moyen d'une analyse sensorielle différentielle : la comparaison appariée, par exemple. Cette technique peut être appliquée par le personnel responsable du suivi de la qualité de l'eau en réseau d'aqueduc pour l'échantillonnage et une personne seule est requise pour effectuer l'analyse. Elle requiert peu de formation et permet de déceler un problème potentiel de dégradation de l'eau distribuée. Elle peut être complétée par une technique d'analyse faisant appel à l'analyse par olfactométrie couplée à une analyse par CG/SM. Cette technique permet de préciser la source du problème mis en évidence par l'analyse sensorielle en identifiant le ou les composés responsables de la flaveur.

7. CONCLUSION

Les composés responsables des goûts et des odeurs peuvent être générés à l'eau brute par des algues microscopiques. Parmi toutes les familles d'algues naturellement présentes dans les bassins d'eau brute, ce sont principalement les algues de la famille des cyanobactéries, des diatomées, des chrysophytes et des chlorophycées qui peuvent être à l'origine de goûts et odeurs dans l'eau potable. Cependant, parmi plus de 1 100 genres d'algues appartenant à ces familles, seulement 16 seraient responsables des goûts et odeurs dans l'eau potable. Lors du traitement, la réaction des désinfectants avec les molécules organiques présentes dans l'eau brute peut faire apparaître d'autres molécules odoriférantes. Dans le réseau de distribution, la présence de chlore résiduel, la recroissance microbienne, les matériaux constituant les conduites, les réactions secondaires avec les désinfectants utilisés lors du traitement et les interventions en réseau peuvent apporter des molécules générant des goûts et des odeurs.

Les molécules odoriférantes sont souvent présentes à de très faibles teneurs dans l'eau potable. Des méthodes analytiques ont donc été mises au point pour pouvoir identifier et quantifier ces composés. Alors que la méthode CLSA était, jusqu'à ce jour, la plus populaire pour analyser les molécules responsables des goûts et des odeurs, des méthodes émergentes, comme le SPME et le SBSE, montrent de bons potentiels analytiques.

Les méthodes qualitatives sont nombreuses et variées et permettent de décrire les profils de saveurs des eaux de consommation. Ces méthodes impliquent la formation et la spécialisation de panels de dégustation et peuvent entraîner un

certain biais dans l'estimation des goûts et des odeurs de l'eau, notamment en ce qui a trait à la détermination de l'intensité de la flaveur. Une méthode alternative, plus aisée d'application, telle la comparaison appariée, permet la détection d'un problème de goût et d'odeur avec une bonne assurance.

Toutes ces connaissances contribuent à mieux comprendre la cause les goûts et les odeurs dans l'eau potable. Toutefois, la perception du consommateur face à l'eau du robinet reste encore un domaine à explorer, car peu de liens ont été établis entre les qualités organoleptiques de l'eau du robinet et le refus d'un consommateur de boire l'eau du robinet.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANADU, E.C. (1997). *Factors affecting risk perception about drinking water and response to public notification*. Thèse de Doctorat, Oregon State University, USA, 160 p.
- ANDERSON, B.C. et L.-K. QUARTERMAINE (1998). Tastes and odors in Kingston's municipal drinking water: A case study of the problem and appropriate solutions. *J. Great Lakes Res.*, 24, 859-867.
- BENANOU, D., F. ACOBAS et M.R. DE ROUBIN (2004). Optimization of stir bar sorptive extraction applied to the determination of odorous compounds in drinking water. *Water Sci. Technol.*, 49, 161-170.
- BRUCHET, A. (1999). Solved and unsolved cases of taste and odor episodes in the files of inspector Cluzeau. *Water Sci. Technol.*, 40, 15-21.
- BRUCHET, A., C. ANSELME, C. JAMMES et J. MALLEVIALLE (1995). Development of taste and odor expert system: present state, strengths, limitations and possible future evolution. *Water Sci. Technol.*, 31, 243-250.
- BRUCHET, A., C. HOCHEREAU et C. CAMPOS (2004). An acute taste and odour episode solved by olfactory-GC/MS. Dans : *Water Quality and Technologies Conference*, San Antonio, TX, novembre 2004, Compte rendu.
- BÜDEL, B., G. GÄRTNER, L. KRIENITZ et M. SCHARGEL (2005). *Cyanoprokaryota, Oscillatoriales*. ELSEVIER (Éditeur), Munich, Germany, 759 p.
- CANCHO, B., C. FABRELLAS, A. DIAZ, F. VENTURA et M.T. GALCERAN (2001). Determination of the odor threshold concentrations of iodinated trihalomethanes in drinking water. *J. Agric. Food Chem.*, 49, 1881-1884.
- CEE (1998). Directive 98/83 du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. *J. Officiel Commun. Europ.*, 1998-12-05, Vol. L330, 32-54.
- CHUNG, S.Y., J.R. VERCELLOTTI, P.B. JOHNSEN et P. KLESZIUS (1991). Development of an elisa for geosmin. *J. Agric. Food Chem.*, 39, 764-769.
- CODONY, F., A.M. MIRANDA et J. MAS (2003). Persistence and proliferation of some unicellular algae in drinking water systems as result of their heterotrophic metabolism. *Water SA*, 29, 113-116.
- COTSARIS, E., A. BRUCHET, J. MALLEVIALLE et D.B. BURSILL (1995). The identification of odorous metabolites produced from algal monocultures. *Water Sci. Technol.*, 31, 251-258.
- CROZES, G., J. HAGSTROM, I.H. SUFFET et C. YOUNG (1999). Bench-scale evaluation of adsorptive processes for taste and odors control using rapid small-scale column tests and flavor profile analysis. *Water Sci. Technol.*, 40, 39-44.
- DORIA, M.F., N. PIDGEON et P. HUNTER (2005). Perception of tap water risks and quality: a structural equation model approach. *Water Sci. Technol.*, 52, 143-149.
- DEVESA, R., C. FABRELLAS, R. CARDENOSO, L. MATIA, F. VENTURA et N. SALVATELLA (2004). The panel of Aigües de Barcelona: 15 years of history. *Water Sci. Technol.*, 49, 145-151.
- DIETRICH, A.M., G.A. BURLINGAME, C. VEST et P. HOPKINS (2004a). Rating method for evaluating distribution-system odors compared with a control. *Water Sci. Technol.*, 49, 55-60.
- DIETRICH, A.M., R.C. HOEHN, G.A. BURLINGAME et T. GITTELMAN (2004b). *Practical taste-and-odor methods for routine operations: decision tree*. AWWA Research Foundation (Éditeur), Denver, CO, USA, 133 p.
- DIETRICH, A.M., R.C. HOEHN, L.C. DUFRESNE, L.W. BUFFIN, D.M.C. RASHASH et B.C. PARKER (1995). Oxidation of odorous and nonodorous algal metabolites by permanganate, chlorine, and chlorine dioxide. *Water Sci. Technol.*, 31, 223-228.
- DIETRICH, A.M., S. MIRLOHI, W.F. DACOSTA, J.P. DODD, R. SAUER, M. HOMAN et J. SCHULTZ (1999). Flavor profile analysis and GC/MS detection of phenolic iodinated disinfection byproducts in drinking

- water for the USA space program. *Water Sci. Technol.*, 40, 45-52.
- DIETRICH, A.M., M.P. ORR, D.L. GALLAGHER et R.C. HOEHN (1992). Tastes and odors associated with chlorine dioxide. *JAWWA*, 84, 82-88.
- DIETRICH, A.M., A.J. WHELTON, R.C. HOEHN, R. ANDERSON et M. WILLE (2004c). The attribute rating test for sensory analysis. *Water Sci. Technol.*, 49, 61-67.
- FABRELLAS, C., R. CARDENOSO, R. DEVESA, J. FLORES et L. MATIA (2004). Taste and odor profiles (off-flavors) in the drinking waters of the Barcelona area (1996-2000). *Water Sci. Technol.*, 49, 129-135.
- GALLAGHER, D.L. (2004). Statistical comparison of the triangle test and the two-of-five test for taste and odor evaluation. *Water Sci. Technol.*, 49, 107-114.
- GREENBERG, A.E., L.S. CLESCERI et A.D. EATON (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. APHA-AWWA-WEF (Éditeurs), Washington, DC, USA, 1368 p.
- GRIMM, C.C., S.W. LLOYD et P.V. ZIMBA (2004). Instrumental versus sensory detection of off-flavors in farm-raised channel catfish. *Aquaculture*, 236, 309-319.
- HANSSON, R.C., M.J. HENDERSON, P. JACK et R.D. TAYLOR (1987). Iodoform taste complaints in chloramination. *Water Res.*, 21, 1265-1271.
- HOCHEREAU, C. et A. BRUCHET (2004). Design and application of a GC-SNIFF/MS system for solving taste and odour episodes in drinking water. *Water Sci. Technol.*, 49, 81-87.
- HUANG, Y., L. ORTIZ, J. GARCIA, P. AGUIRRE, R. MUJERIEGO et J.M. BAYONA (2004). Use of headspace solid-phase microextraction to characterize odour compounds in subsurface flow constructed wetland of wastewater treatment. *Water Sci. Technol.*, 49, 89-98.
- ITIS (INTEGRATED TAXONOMIC INFORMATION SYSTEM) (2009). <http://www.itis.gov/> (consultation le 25 janvier 2009).
- JÜTTNER, F. (1995b). Physiology and biochemistry of odorous compounds from freshwater cyanobacteria and algae. *Water Sci. Technol.*, 31, 69-78.
- KAJINO, M., K. MORIZANE, T. UMETANI et K. TERASHIMA (1999). Odors arising from ammonia and amino acids with chlorine during water treatment. *Water Sci. Technol.*, 40, 107-114.
- KARLSSON, S., S. KAUGARE, A. GRIMVALL, H. BOREN et R. SAVENHED (1995). Formation of 2,4,6-trichlorophenol and 2,4,6-trichloroanisole during treatment and distribution of drinking-water. *Water Sci. Technol.*, 31, 99-103.
- KENEFICK, S.L., B.G. BROWNLEE, T.R. PERLEY et S.E. HRUDEY (1995). A chemical and sensory study of odor compounds in the Athabasca River, Alberta, Canada. *Water Sci. Technol.*, 31, 15-21.
- KENNETH, L., K.L. FROESE, A. WOLANSKI et S.E. HRUDEY (1999). Factors governing odorous aldehyde formation as disinfection by-products in drinking water. *Water Res.*, 33, 1355-1364.
- KHIARI, D. (1996). *Identification of taste-and-odor compounds in drinking water*. Thèse de Doctorat, Université Drexel, Pennsylvanie, États-Unis, 111 p.
- KHIARI, D., S. BARRETT, R. CHINN, A. BRUCHET, P. PIRIOU, L. MATIA, F. VENTURA, I.H. SUFFET, T. GITTELMAN et P. LEUTWEILER (2002). *Distribution generated taste-and-odor phenomena*. AWWA Research Foundation, Denver, CO, USA, 264 p.
- KHIARI, D., A. BRUCHET, T. GITTELMAN, L. MATIA, S. BARRETT, I.H. SUFFET et R. HUND (1999). Distribution-generated taste-and-odor phenomena. *Water Sci. Technol.*, 40, 129-134.
- KHIARI, D., I.H. SUFFET et S.E. BARRETT (1995a). The determination of compounds causing fishy/swampy odors in drinking-water supplies. *Water Sci. Technol.*, 31, 105-112.
- KHIARI, D., I.H. SUFFET et S.E. BARRETT (1995b). Extraction and identification of chemicals causing grassy odors in flavor profile analysis (FPA) reference-standards. *Water Sci. Technol.*, 31, 93-98.
- KNAPPE, D.R.U., R.C. BELK, D.S. BRILEY, S.R. GANDY, N. RASTOGY et A.H. RIKE (2004). *Algae detection and removal strategies for drinking water treatments plants*. AWWA Research Foundation, Denver, CO, 465 p.
- LEVALLOIS, P., J. GRONDIN et S. GINGRAS (1999). Evaluation of consumer attitudes on taste and tap water alternatives in Quebec. *Water Sci. Technol.*, 40, 135-140.

- LLORENS, J. (2004). The physiology of taste and smell: how why we sense flavors. *Water Sci. Technol.*, 49, 1-10.
- LLOYD, S.W., J.M. LEA, P.V. ZIMBA et C.C. GRIMM (1998). Rapid analysis of geosmin and 2-methylisoborneol in water using solid phase micro extraction procedures. *Water Res.*, 32, 2140-2146.
- MACKEY, E.D., H. BARIBEAU, G. CROZES, I.H. SUFFET et P. PIRIOU (2004). Public threshold for chlorinous flavors in U.S. tap water. *Water Sci. Technol.*, 49, 335-340.
- MALLERET, L. et A. BRUCHET (2001). Application of large volume injection GC/MS to the picogram analysis of chlorinated and brominated anisoles in «earthy-musty» off-flavor water samples. *Water Sci. Technol. Water Supp.*, 1, 1-8.
- MALLERET, L., J. DUGAY, A. BRUCHET et M.-C. HENNION (2003). Simultaneous determination of «earthy-musty» odorous haloanisoles and their corresponding halophenols in water samples using solid-phase microextraction coupled to gas chromatography with electron-capture detection. *J. Chromatogr. A*, 999, 135-144.
- MARCHESAN, M. et J. MORRAN (2004). Tastes associated with products in contact with drinking water. *Water Sci. Technol.*, 49, 227-231.
- McGUIRE, M.J. (1999). Advances in treatment processes to solve off-flavor problems in drinking water. *Water Sci. Technol.*, 40, 153-164.
- McGUIRE, M.J. et J.M. GASTON (1988). Overview of technology for controlling off-flavors in drinking-water. *Water Sci. Technol.*, 20, 215-228.
- McGUIRE, M.J., R. HUND et G. BURLINGAME (2005). A practical decision tree tool that water utilities can use to solve taste and odor problems. *J. Water Supp.: Res. Technol. AQUA.*, 54, 321-327.
- MILLER, D., E.D. CONTE, C.Y. SHEN et P.W. PERSCHBACHER (1999). Colorimetric approach to cyanobacterial off-flavor detection. *Water Sci. Technol.*, 40, 165-170.
- MONTIEL, A., S. RIGAL et B. WELTÉ (1999). Study of the origin of musty taste in the drinking water supply. *Water Sci. Technol.*, 40, 171-178.
- OESTMAN, E., L. SCHWEITZER, P. TOMBOULIAN, A. CORADO et I.H. SUFFET (2004). Effects of chlorine and chloramines on earthy and musty odors in drinking water. *Water Sci. Technol.*, 49, 153-159.
- OMS (1986). *Directives de qualité pour l'eau de boisson. Vol 2. Critère d'hygiène et documentation à l'appui*. OMS (Éditeur), Genève, 341 p.
- ÖMÜR, P. (2004). *Determination of Henry's law constants of odorous contaminants and their application to human perception*. Mémoire de maîtrise, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 107 p.
- PERSSON, P.E. (1983). Off-flavours in aquatic ecosystem-an introduction. *Water Sci. Technol.*, 15, 1-11.
- PIRIOU, P., E. MACKEY, I.H. SUFFET et A. BRUCHET (2004). Chlorinous flavor perception in drinking water. *Water Sci. Technol.*, 49, 321-328.
- PRESCOTT L.M., J.P. HARLEY et D.A. KLEIN (1995). *Microbiologie*. DEBOECK-WESMAEL (éditeur), Bruxelles, Belgique 1014 p.
- PROULX, F., M.J. RODRIGUEZ, J.B. SÉRODES et L.F. MIRANDA (2010) Factors influencing public perception and water use of municipal drinking water. *Water Sci. Technol. Water Supp.*, 10, 472-485.
- RIGAL, S. et J. DANJOU (1999). Tastes and odors in drinking water distribution systems related to the use of synthetic materials. *Water Sci. Technol.*, 40, 203-208.
- SANTÉ CANADA (1996). *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada*. Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 102 p.
- SATCHWILL, T. (1998). The impact of pipe coatings on drinking water quality. Dans : *1998 Annual Alberta Water and Wastewater Operators Association*, mars 1998, Banff, AB, Canada, Compte rendu, pp. 1-9.
- SATCHWILL, T. (2001). *Compound identification and treatment*. Master of Science, University of Calgary, Calgary, 156 p.
- SCHWEITZER, L., J. NOBLET, Q. YE, E. RUTH et I.H. SUFFET (1999). The environmental fate and mechanism of formation of 2-ethyl-5,5 '-dimethyl-1,3-dioxane (2EDD) - A malodorous contaminant in drinking water. *Water Sci. Technol.*, 40, 217-224.

- SCHWEITZER, L., P. TOMBOULIAN, K. ATASI, T. CHEN et D. KHIARI (2004). Utility quick test for analyzing materials for drinking water distribution systems for effect on taste-and-odor. *Water Sci. Technol.*, 49, 75-80.
- SKJEVRAK, I., V. LUND, K. ORMEROD, A. DUE et H. HERIKSTAD (2004). Biofilm in water pipelines; a potential source for off-flavours in the drinking water. *Water Sci. Technol.*, 49, 211-217.
- SUFFET, I.H., A. BRUCHET. et C.C. YOUNG (2006). Development of a closed loop stripping analysis using solid-phase microextraction to analyze geosmin and MIB in drinking water. *Water Sci. Technol.*, 6, 167-174.
- SUFFET, I.H., A. CORADO, D. CHOU, S. BUTTERWORTH et M.J. McGUIRE (1996). AWWA taste and odor survey. *JAWWA*, 88, 168-180.
- SUFFET, I.H., D. KHIARI et A. BRUCHET (1999). The drinking water taste and odor wheel for the millennium: Beyond geosmin and 2-methylisoborneol. *Water Sci. Technol.*, 40, 1-14.
- TOMBOULIAN, P., L. SCHWEITZER, K. MULLIN, J. WILSON et D. KHIARI (2004). Materials used in drinking water distribution systems: contribution to taste-and-odor. *Water Sci. Technol.*, 49, 219-226.
- TURGEON, S., M.J. RODRIGUEZ, M. THÉRIAULT et P. LEVALLOIS (2004). Perception of drinking water in the Quebec City region (Canada): the influence of water quality and consumer location in the distribution system. *J. Environ. Manage.*, 70, 363-373.
- USEPA (2009). *List of drinking water contaminants and MCLs*. <http://www.epa.gov/safewater/mcl.html>, consultation le 12 août 2009.
- WATSON, S.B., B. BROWNLEE, T. SATCHWILL et E. McCAULEY (1999). The use of solid phase microextraction (SPME) to monitor for major organoleptic compounds produced by chrysophytes in surface waters. *Water Sci. Technol.*, 40, 251-256.
- WEHR, J.D. et R.G. SHEATH (2003). *Freshwater algae of North America, ecology and classification*. ACADEMIC PRESS (Éditeur), San Diego, CA, USA, 918 p.
- WELTÉ, B. et A. MONTIEL (1999). Study of the possible origins of chlorinous taste and odour episodes in a distribution network. *Water Sci. Technol.*, 40, 257-263.
- WHELTON, A.J. et A.M. DIETRICH (2004). Relationship between intensity, concentration, and temperature for drinking water odorants. *Water Res.*, 38, 1604-1614.
- WIESENTHAL, K.E., G. AMAH, T. LAM et I.H. SUFFET (2004). The effect of applying a pipe-joint lubricant to connect ductile iron pipe on off-flavors in drinking water distribution systems. *Water Sci. Technol.*, 49, 233-240.
- WIESENTHAL, K.E. et I.H. SUFFET (2007). The effect of white or grey PVC pipe and its joint solvents (primer and cement) on odour problems CD in drinking water distribution systems. *Water Sci. Technol.*, 55, 169-176.
- YOUNG, W.F., H. HORTH, R. CRANE, T. OGDEN et M. ARNOTT (1996). Taste and odour threshold concentrations of potential potable water contaminants. *Water Res.*, 30, 331-340.
- ZAITLIN, B. et S.B. WATSON (2006). Actinomycetes in relation to taste and odour in drinking water: Myths, tenets and truths. *Water Res.*, 40, 1741-1753.
- ZANDER, A.K. et P. PINGERT (1997). Membrane-based extraction for detection of tastes and odors in water. *Water Res.*, 31, 301-309.