

ENSP

ECOLE NATIONALE DE
LA SANTE PUBLIQUE

RENNES

**Ingénieurs du Génie Sanitaire
Promotion 2007**

ATELIER SANTÉ-ENVIRONNEMENT

**Risques sanitaires liés à la production et à la
distribution d'une eau de boisson à une température
élevée**

Présenté par : Axelle GRAVELLIER
Hélène IMBERT
Adrien MARCHAIS

Référents pédagogiques : Rémi DEMILLAC
Bernard JUNOD

Remerciements

Tout d'abord, nous souhaitons remercier nos référents pédagogiques, Messieurs Rémi DEMILLAC et Bernard JUNOD, professeurs à l'Ecole Nationale de la Santé Publique pour les conseils qu'ils nous ont prodigué tout au long de l'année et qui nous ont aidé dans la construction de ce rapport.

Ensuite, nos remerciements vont à l'ensemble des ingénieurs du Génie Sanitaire et des ingénieurs d'Etudes Sanitaires qui ont pris le temps de répondre à l'enquête « Eaux tièdes ».

Enfin, nous remercions Monsieur Hervé TERRIEN, IGS à la DDASS du Lot-et-Garonne, pour avoir proposé ce sujet et nous avoir aidé à définir les axes de réflexion.

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
1. CONTEXTE DE L'ETUDE	2
1.1 ORIGINE DE LA PROBLEMATIQUE	2
1.2 LA REGLEMENTATION EN MATIERE DE TEMPERATURE DE L'EAU DE BOISSON	3
2. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA QUALITE DE L'EAU ET CARACTERISATION DES RISQUES SANITAIRES ASSOCIES	4
2.1 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE TRAITEMENT DE L'EAU	4
2.2 MODIFICATIONS DE QUALITE MICROBIOLOGIQUE SUSCEPTIBLES D'INTERVENIR LORS D'UNE ELEVATION DE TEMPERATURE DE L'EAU	5
2.2.1 <i>Influence de la température sur la croissance et la survie des microorganismes</i>	5
2.2.1.1 Les eaux brutes : réservoir d'une grande variété de microorganismes	5
2.2.1.2 Influence de la température de l'eau sur l'existence de ces organismes	5
2.2.1.2.1 Les bactéries.....	5
2.2.1.2.2 Les virus.....	8
2.2.1.2.3 Les parasites.....	9
2.2.1.2.4 Les champignons.....	10
2.2.1.2.5 Les algues et les actinomycètes.....	11
2.2.1.2.6 Les biofilms	12
2.2.2 <i>Influence de la température sur l'efficacité microbiologique du traitement des eaux</i>	13
2.2.2.1 Procédés de clarification.....	13
2.2.2.2 Procédés de filtration.....	13
2.2.2.3 Procédés de désinfection	13
2.2.2.4 Recroissance microbienne dans les réseaux	15
2.3 RISQUES SANITAIRES ASSOCIES AUX MODIFICATIONS DE QUALITE MICROBIOLOGIQUE DE L'EAU	16
2.3.1 <i>Principales maladies d'origine hydrique</i>	16
2.3.2 <i>Maladies d'origine bactérienne</i>	17
2.3.2.1 Fièvres typhoïdes et paratyphoïdes.....	17
2.3.2.2 Gastro-entérites aiguës et diarrhées	17
2.3.2.3 Légionellose	18
2.3.3 <i>Maladies d'origine virale</i>	19
2.3.3.1 Entérovirus	19
2.3.3.2 Hépatite A	19
2.3.3.3 Gastroentérites virales	19
2.3.4 <i>Maladies d'origine parasitaire</i>	20
2.3.4.1 Cryptosporidium parvum.....	20
2.3.4.2 Giardia lamblia.....	20
2.3.5 <i>Risques sanitaires associés aux cyanobactéries</i>	21
2.3.6 <i>Evaluation quantitative du risque microbiologique</i>	22
2.4 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA QUALITE CHIMIQUE DE L'EAU	23
2.4.1 <i>Influence de la température sur l'équilibre calco-carbonique</i>	23
2.4.2 <i>Influence de la température sur les conduites de distribution et risques sanitaires associés</i>	24
2.4.2.1 Inventaire des réseaux d'adduction d'eau potable	24
2.4.2.2 Influence de la température de l'eau sur la corrosion	25
2.4.2.3 Risques sanitaires liés au phénomène de corrosion	26
2.4.2.4 Influence de la température de l'eau sur les conduites synthétiques.....	27
2.4.2.5 Risques sanitaires liés au phénomène de relargage	27
2.4.3 <i>Influence de la température sur les produits de désinfection et risques sanitaires associés</i>	27
2.4.3.1 Influence de la qualité de l'eau initiale et de la température sur la demande en chlore	27
2.4.3.2 Influence de la corrosion et de la température sur la demande en chlore.....	28
2.4.3.3 Bilan quantitatif des différents phénomènes sur la demande en chlore	29
2.4.3.4 Influence de la température sur la formation des sous-produits de désinfection.....	29
2.4.3.5 Risques sanitaires liés aux sous-produits de désinfection.....	31
2.5 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES QUALITES ORGANOLEPTIQUES DE L'EAU	34

3.	ENQUETE « EAUX TIEDES ».....	35
3.1	ENQUETE DGS 2005 « CAPTAGES CHAUDS ET LEGIONELLES »	35
3.2	ELABORATION DU QUESTIONNAIRE D'ENQUETE « EAUX TIEDES »	35
3.3	RESULTATS DE L'ENQUETE	36
3.3.1	<i>Les forages chauds</i>	37
3.3.2	<i>Les dépassements de température « saisonniers »</i>	38
3.3.3	<i>Inventaire des problèmes sanitaires rencontrés</i>	40
3.3.4	<i>Solutions de gestion des risques proposées par les DDASS</i>	41
3.3.4.1	Refroidissement de la ressource	41
3.3.4.2	Gestion du risque dans les réseaux	42
4.	ELEMENTS DE GESTION DES RISQUES ET PISTES DE RECHERCHE	42
4.1	ELEMENTS DE GESTION DES RISQUES	42
4.1.1	<i>Mesures de surveillance</i>	42
4.1.2	<i>Modification des procédés</i>	43
4.1.3	<i>Information des consommateurs</i>	44
4.2	PISTES DE RECHERCHE	44
	CONCLUSION.....	46
	BIBLIOGRAPHIE.....	47
	LISTE DES ANNEXES	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des bactéries en fonction de leur température optimale de développement	6
Tableau 2 : Tableau récapitulatif de l'influence d'une augmentation de la température sur les différents microorganismes présents dans l'eau.....	13
Tableau 3 : Efficacité et caractéristiques de différentes techniques de désinfection [19].....	14
Tableau 4 : Valeurs de temps de contact (CT en min.mg/l) pour obtenir un abattement de 90 % des kystes de <i>Giardia lamblia</i> [19].....	14
Tableau 5 : Principales maladies d'origine hydriques, agents responsables et voies de transmission associées [19, 22, 48]	16
Tableau 6 : Fréquence d'apparition des différents germes pathogènes lors d'épidémies récentes dans 15 pays industrialisés [49]	17
Tableau 7 : Caractéristiques générales des cyanotoxines [16].....	21
Tableau 8 : Evolution de quelques constantes de solubilité avec la température [41].....	26
Tableau 9 : Normes concernant les THM totaux dans l'eau d'alimentation [30]	33
Tableau 10 : Récapitulatif du questionnaire de l'enquête « Eaux tièdes ».....	36
Tableau 11 : Ensemble des départements recensés comme utilisant des eaux de forages dont la température est supérieure à 25°C.....	38
Tableau 12 : Départements ayant enregistré des dépassements bactériologiques liés à une température de l'eau supérieure à 25°C	40
Tableau 13 : Performances des traitements (CAG, CAP et Ozonation) sur les composés odorants	44

Liste des figures

Figure 1 : Taux d'inactivation des entérovirus en fonction de la température de l'eau : revue bibliographique [43]	9
Figure 2 : Démarche d'évaluation quantitative des risques microbiologiques	22
Figure 3: Influence de la température sur l'équilibre calcocarbonique C.....	23
Figure 4: Matériaux utilisés dans le réseaux AEP français	24
Figure 5: Température de l'eau et taux de corrosion mesurés dans la station d'eau potable et dans le réseau d'adduction	26
Figure 6: Comparaison des consommations de chlore suivant le type de matériaux utilisé	29
Figure 7: Influence de la température sur la production des THM [35]	30
Figure 8: Volatilité des THM et température modélisation mathématique [35]	30
Figure 9 : Influence de la température et du lieu des concentrations des THM.....	31
Figure 10 : Intensité du goût de l'eau en fonction de la température	34
Figure 11 : Carte de répartition des situations rencontrées concernées par l'enquête « eaux tièdes ».....	36
Figure 12 : Carte présentant les réponses au questionnaire concernant les forages chauds.....	37
Figure 13 : Carte présentant les départements ayant rencontré un dépassement de température de l'eau lié à un épisode caniculaire.....	39
Figure 14 : Carte des types de dépassement rencontrés par les DDASS	39
Figure 15 : Concentrations en trihalométhanes dans l'eau de la Communauté Urbaine du Grand Nancy – Période 2003-2006	40

Liste des sigles utilisés

CAG	: Charbon Actif en Grain
CAP	: Charbon Actif en Poudre
CMT	: Carbone Minéral Total
CNR	: Centre National de Référence
COT	: Carbone Organique Total
COV	: Composés Organiques Volatils
DDASS	: Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
DGS	: Direction Générale de la Santé
DOM	: Département d’Outre-Mer
DSDS	: Direction de la Santé et du Développement Social
ECS	: Eau Chaude Sanitaire
HAA	: Acide Acétique Halogéné
HAN	: Halo-acétonitrile
IGS	: Ingénieur du Génie Sanitaire
MIB	: Méthyl-2-isobornéol
MO	: Matière Organique
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PE	: Polyéthylène
PEHD	: Polyéthylène Haute Densité
PEX	: Crossbonded polyéthylène
PVC	: Polychlorure de vinyle
RR	: Risque Relatif
SAGEP	: Société Anonyme de Gestion des Eaux de Paris
TAR	: Tour Aéro-réfrigérentes
THM	: Trihalométhanes
UFC	: Unité Formant Colonie

Introduction

Les risques sanitaires liés à l'eau de consommation sont étudiés et surveillés depuis longtemps. Ainsi, la loi sur l'Hygiène Publique de 1902 mettait parmi ses priorités la qualité de l'eau distribuée en introduisant la notion de périmètre de protection autour des puits.

En revanche, les risques associés à l'élévation de la température de l'eau (hors eau chaude sanitaire) n'ont jamais été étudiés. Le contexte de réchauffement climatique actuel conduit à prendre ces risques en considération. En effet, il arrive que l'eau d'adduction soit alimentée par une ressource de température élevée (supérieure à 25°C) ou soit distribuée à une température élevée en raison d'un réchauffement dans les réservoirs et circuits de distribution. Cependant, dans le Code de la Santé Publique, le paramètre température est une référence de qualité fixée à 25°C et non une limite, ainsi, le dépassement de ce paramètre n'entraîne pas d'interdiction de la consommation de l'eau.

Il convient donc de s'interroger sur les risques sanitaires engendrés par une élévation de la température de l'eau de boisson et de proposer des mesures de gestion appropriées.

Ainsi, après avoir défini l'origine de la problématique et son contexte réglementaire, l'influence de la température sur la qualité physique, microbiologique, chimique et organoleptique de l'eau ainsi que les risques sanitaires associés seront étudiés. Par la suite, les résultats de l'enquête « Eau tiède » menée afin de réaliser un inventaire des situations rencontrées en France seront exploités. Enfin, des mesures de gestion ainsi que des pistes de recherche seront proposées.

1. Contexte de l'étude

1.1 Origine de la problématique

En 2004, une épidémie de légionellose est survenue à Soulac-sur-Mer (33) [1]. L'investigation de ces cas a permis de montrer que des légionelles s'étaient développées dans l'eau d'un réseau de distribution provenant d'un forage dont la température était de 33°C. Suite à cette épidémie, la Direction générale de la Santé (DGS) a lancé une campagne nommée « Captages chauds ». Celle-ci avait pour but de permettre à toutes les Directions départementales des affaires sanitaires et sociales (DDASS) concernées par l'exploitation d'un captage dont la température est supérieure à 25°C de suivre les concentrations en légionelles de l'eau pendant plusieurs mois. Les résultats de cette enquête n'ont pas été exploités à ce jour.

D'autre part, la DDASS du Lot-et-Garonne a été confrontée en juillet 2006 à une plainte d'un consommateur sur l'eau de boisson qui atteignait 32°C à son robinet. A la demande de la DDASS, le traiteur d'eau concerné a mené une étude sur ses installations (du point de captage sur la Garonne jusqu'au robinet de l'utilisateur) afin de déterminer la cause de cette température élevée. Les résultats de cette étude ont montré que la température de l'eau de la Garonne avoisinait les 32°C et que cette température restait constante jusqu'au robinet de l'utilisateur. L'hypothèse d'un réchauffement dans le circuit de distribution a donc été écartée et aucune solution immédiate n'a pu être envisagée par le traiteur d'eau puisqu'il ne pouvait pas refroidir la ressource.

De plus, suite à la canicule de l'été 2003, la DGS a produit une circulaire (n°DGS/SD7A/2005/305) précisant les mesures de gestion des risques sanitaires liés aux eaux destinées à la consommation humaine et aux eaux de baignade, qu'il convient de mettre en oeuvre en période de sécheresse dès lors qu'elle est susceptible de conduire à des limitations des usages de l'eau. Cette circulaire rappelle les principaux risques en cas de sécheresse, et notamment :

- des difficultés de traitement liées à la dégradation des ressources en eau ;
- une élévation de la température de l'eau au cours de la production et de la distribution, favorisant la prolifération de microorganismes ou sa dégradation physico-chimique ;
- la prolifération de cyanobactéries.

Un suivi des épisodes de sécheresse est prévu dans cette circulaire, notamment par le biais de la base de données SISE-Eaux.

L'ensemble de ces événements permet de soulever la question des risques sanitaires qui pourraient être engendrés par la production et la distribution d'une eau à une température « anormalement élevée », que nous qualifierons de « tiède » par la suite.

Ainsi, si l'enquête « Captages chauds » avait restreint l'étude aux captages d'eaux naturellement chaudes, il nous a paru indispensable d'élargir cette étude à toutes les ressources dès lors qu'elles sont susceptibles de se réchauffer et de dépasser les 25°C réglementaires : c'est le cas de l'eau de la Garonne dans l'épisode rapporté par la DDASS du Lot-et-Garonne.

La question soulevée par l'enquête réalisée par le traiteur d'eau après la plainte d'un usager du Lot-et-Garonne, à savoir l'influence du réseau sur la température de l'eau, nous a amené à nous demander qu'elle pouvait être l'influence de la température de l'eau sur sa qualité au sein des réseaux de distribution. En effet, se pose alors notamment la question de l'influence

de la température de l'eau sur les matériaux des conduites de distribution et sur la reviviscence bactérienne dans ces réseaux. Ces phénomènes seront donc largement étudiés par la suite.

La gamme de température choisie concerne les eaux supérieures à 25°C (référence de qualité, voir paragraphe suivant) et pouvant aller jusqu'à 40°C, température maximale enregistrée lors des enquêtes précédentes.

1.2 La réglementation en matière de température de l'eau de boisson

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), « l'eau froide est généralement plus agréable à boire que l'eau chaude et la température a un impact sur la quantité de composés minéraux et de contaminants chimiques susceptibles d'affecter le goût de l'eau. Une température élevée favorise la croissance des micro-organismes et peut accroître le goût, la couleur, l'odeur ainsi que les problèmes de corrosion des tuyaux. » Cependant, l'OMS ne donne pas de valeur guide de température [2].

En France, le Code de la Santé Publique stipule à l'article R. 1321-3 que « les eaux destinées à la consommation humaine doivent satisfaire à des références de qualité, valeurs indicatives établies à des fins de suivi des installations de production et de distribution et d'évaluation des risques pour la santé des personnes fixées au II de l'annexe 13-1 ».

L'annexe 13-1 citée ci-dessus indique quant à elle : « Concernant les références de qualité des eaux destinées à la consommation humaines, le dépassement des valeurs ou intervalles suivants entraîne, selon les cas, l'application des dispositions prévues aux articles R. 1321-17, R.1321-28, R. 1321-29, R.1321-30 et R.1321-54. Pour la température : 25 °C, (...), cette valeur ne s'appliquant pas dans les départements d'outre-mer. »

Le rôle du préfet et celui des personnes responsables de la production et de la distribution d'eau sont définis dans les articles suivants :

- article R. 1321-17 : « Le préfet peut imposer à la personne publique ou privée responsable de la distribution d'eau des analyses complémentaires dans les cas suivants : (...) 4° Les références de qualité fixées au II de l'annexe 13-1 ne sont pas satisfaites. »
- article R.1321-28 : « Lorsque les références de qualité ne sont pas satisfaites et que le préfet estime que la distribution présente un risque pour la santé des personnes, il demande à la personne responsable de la production ou de la distribution d'eau de prendre des mesures correctives pour rétablir la qualité des eaux. Elle informe le maire et le préfet territorialement compétent de l'application effective des mesures prises. »

De plus, le paragraphe III de l'annexe 13-1 définit les limites de qualité des eaux douces superficielles destinées à être utilisées pour la production d'eau de boisson. Concernant le paramètre température, la valeur guide est de 22°C et la valeur limite impérative de 25°C. L'article R.1321-40 précise cependant que « le préfet peut déroger aux limites de qualité fixées au III de l'annexe 13-1 :

- 1° en cas d'inondations ou de catastrophes naturelles ;
- 2° en raison de **circonstances météorologiques ou géographiques exceptionnelles** ;
- 3° lorsque les eaux superficielles subissent un enrichissement naturel en certaines substances susceptible de provoquer le dépassement des valeurs fixées par l'arrêté mentionné au premier alinéa de l'article R. 1321-38 ; on entend par enrichissement naturel le processus par lequel une masse d'eau déterminée reçoit du sol des substances contenues dans celui-ci sans intervention humaine ;
- 4° dans le cas d'eaux superficielles de lacs d'une profondeur ne dépassant pas vingt mètres,

dont le renouvellement en eau prend plus d'un an et qui ne reçoivent pas d'eaux usées. En aucun cas, les conséquences de ces dérogations ne peuvent être contraires à la santé des personnes. »

Ces dérogations sont délivrées par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France.

Enfin, au même titre que l'ensemble des références de qualité, la température de l'eau fait l'objet de contrôles sanitaires par les DDASS. Au titre de ces contrôles, des prélèvements d'eau réguliers sont effectués et analysés. La température est systématiquement mesurée :

- sur la ressource si elle est superficielle,
- au point de mise en distribution,
- en différents points du réseau (fixes et mobiles).

La fréquence des prélèvements est calculée en fonction :

- des débits d'eau captée sur les ressources,
- des débits produits par les unités de traitement,
- de la population desservie par le réseau de distribution.

Elle peut varier d'un à huit cents prélèvements par an.

2. Influence de la température sur la qualité de l'eau et caractérisation des risques sanitaires associés

2.1 Influence de la température sur le traitement de l'eau

La température de l'eau a une influence sur ses propriétés physiques et chimiques. Ainsi, toute variation de température de l'eau entraîne une modification de l'efficacité des traitements qui lui sont appliqués [3]. Nous rappelons que cette étude porte sur des eaux ayant une température comprise entre 25 et 40°C, en effet, dans nos climats tempérés, la température de l'eau dépasse rarement 40°C.

Tout d'abord, la température joue un rôle important dans les étapes de clarification. En effet, le choix du coagulant et le pH optimal de l'étape de coagulation devront être adaptés à la température. Le sulfate d'alumine est plus adapté aux eaux tièdes que le chlorure ferrique et le pH optimal sera sensiblement plus faible à 25°C qu'à 15°C [3]. Concernant l'étape de floculation, celle-ci sera d'autant plus rapide que la température est élevée. De plus, le procédé d'agitation sera facilité par une température élevée : l'eau tiède ayant une viscosité inférieure à l'eau froide, la puissance de mélange à mettre en oeuvre sera moins importante. La décantation est elle aussi favorisée. En effet, plus la température de l'eau est élevée, plus la viscosité et la masse volumique de l'eau diminuent, favorisant ainsi la décantation des floes. Cependant, une hétérogénéité des températures dans le décanteur peut créer des courants de densité qui perturbent la décantation. Ainsi, l'échauffement du soleil entraîne une diminution de la densité de l'eau et la création de courants dirigés de bas en haut pouvant entraîner les floes vers les goulottes de reprise des eaux clarifiées, ce qui peut amener à couvrir les décanteurs pour améliorer leur rendement de séparation.

Concernant la filtration sur sable, celle-ci est facilitée dans la gamme de température étudiée en raison de la plus faible viscosité de l'eau [4]. Il en est de même pour la filtration membranaire et, pour des raisons différentes, pour la filtration biologique (meilleure survie des bactéries mésophiles). Cependant, il est important de noter que le pouvoir adsorbant des charbons actifs diminue à mesure que la température augmente.

Enfin, l'efficacité de la désinfection est d'autant plus importante que la température augmente. En revanche, la demande en chlore augmente avec la température, du fait de

l'accroissement de la biomasse se développant sur les parois des réseaux sous l'effet de cette même température. Ce point sera détaillé dans le paragraphe suivant.

2.2 Modifications de qualité microbiologique susceptibles d'intervenir lors d'une élévation de température de l'eau

La température intervient sur la qualité microbiologique de l'eau potable car elle influence non seulement la croissance et la survie des microorganismes mais également l'efficacité des procédés de traitement des eaux d'un point de vue microbiologique.

2.2.1 Influence de la température sur la croissance et la survie des microorganismes

2.2.1.1 Les eaux brutes : réservoir d'une grande variété de microorganismes

Les microorganismes présents dans l'eau brute utilisée pour la production d'eau d'alimentation sont de nature variée. Il peut s'agir de bactéries, de virus, de parasites, de champignons ou d'algues. Leur nombre et leur nature dépendent de l'origine de l'eau brute.

Ainsi, dans les eaux souterraines, pauvres en matière organique ou dont la matière organique est présente sous forme inutilisable pour les microorganismes, la prolifération des bactéries est réduite et la présence de champignons inconnue. Les protozoaires flagellés, amibes, ciliés et virus éventuellement présents dans la partie supérieure de la couche insaturée du sol (de 10^3 à 10^6 /g) restent emprisonnés dans le sol à cause de leur taille et n'accèdent donc pas aux aquifères, si les ouvrages sont réalisés dans les règles de l'art.

Dans les eaux superficielles, il faut distinguer les bactéries autochtones, dont la présence et influencée par la lumière, la température, le pH, les substances nutritives et l'oxygène dissous des bactéries exogènes de passage qui peuvent être des pathogènes indicateurs de contamination fécale. La proportion de ces deux types de bactéries dépend de la saison. En été, on observe une croissance des bactéries autochtones et une diminution des bactéries exogènes sauf pour les eaux riches en matière organique dont la température avoisine 30°C . En hiver, la survie des bactéries exogènes est prolongée. Les bactéries de tout type de chaîne trophique sont représentées : bactéries chimiolithotrophes, photosynthétiques et chimioorganotrophes, dont les espèces dominantes sont *Pseudomonas*, *Cytophaga*, *Flavobacterium*, *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Aeromonas* (90% de la population viable et cultivable sous forme de colonies). Dans ce type d'eau brute, on relève également la présence de virus, d'algues, de protozoaires et de champignons.

Ces différents microorganismes peuvent ensuite se retrouver dans les réseaux de distribution sous forme phytoplantonique ou de biofilm.

2.2.1.2 Influence de la température de l'eau sur l'existence de ces organismes

2.2.1.2.1 Les bactéries

La température est le facteur environnemental le plus influant sur la multiplication et le métabolisme microbiens. Ainsi, les bactéries hydriques peuvent être classées selon leur température optimale de développement (voir Tableau 1).

Type de bactéries	Température optimale de développement	Exemple
Psychrophiles	entre 0 et 15°C	Cytophaga <i>sp.</i> Flavobacterium <i>sp.</i> Acinetobacter <i>sp.</i>
Mésophiles	entre 20 et 40°C	<u>Campylobacter jejuni</u> (37-42°C) <u>Shigella sonnei</u> (37°C) <u>Salmonella typhi</u> (35-37°C) <u>Escherichia coli</u> (25-35°C) <u>Aeromonas hydrophila</u> (28°C) <u>Legionella pneumophila</u> (25-45°C) <u>Pseudomonas aeruginosa</u> (30-32°C) <u>Pseudomonas putida</u> (30-32°C)
Thermophiles	entre 45 et 65°C	Bacillus <i>sp.</i> Clostridium <i>sp.</i>

Souligné : les bactéries pathogènes pour l'homme

Tableau 1 : Classification de quelques bactéries hydriques en fonction de leur température optimale de développement [sources : voir paragraphes suivants]

Dans la suite de l'exposé, on choisit de limiter l'étude de l'influence de la température sur le développement des principales bactéries hydriques pathogènes pour l'homme. Les expériences ont montré que la survie des bactéries en laboratoire est différente de celle observée dans le milieu naturel. Aussi, s'il est communément admis qu'une élévation de température de l'eau favorise la croissance bactérienne, peu de données concernant la survie et le développement des bactéries en fonction de la température sont disponibles en dehors des expériences menées en laboratoire. Elles concernent les six espèces de bactéries suivantes.

➤ *Legionella pneumophila*

Les légionelles sont des bacilles Gram – de forme coccobacillaire (devenant filamenteuse en culture) aérobies strictes. Elles sont assez répandues dans l'environnement, notamment dans les eaux douces (lacs et rivières), les sols humides et les boues. La plupart des eaux naturelles superficielles sont contaminées. Leur présence dans les eaux souterraines est possible, mais il ne s'agit pas de leur habitat normal. Elles ne s'y reproduisent généralement pas mais peuvent y survivre pendant plusieurs mois, voire quelques années. Nakache –Danglot et al. [5] ont confirmé par une étude que ces bactéries sont susceptibles de coloniser tous les milieux, même les eaux en cours de traitement et les eaux distribuées.

Les légionelles présentent un développement optimal à des températures comprises entre 25°C et 45°C [5]. En deçà de 25°C, leur multiplication est généralement très limitée. Cependant, la revue bibliographique réalisée sur le sujet n'a pas permis d'établir l'influence d'une augmentation de température de l'eau de 25°C à 40°C sur le développement de ces bactéries.

Par contre, il est établi que certains facteurs favorisent leur prolifération : les bras morts des canalisations, la présence de biofilms, certains matériaux constitutifs des canalisations, et la présence d'amibes qui les phagocytent et les protègent.

Ainsi, Rogers et al ont montré dans leurs études [6] que *Legionella pneumophila* se développe mieux dans les canalisations en PVC et polybutylène que dans celles en cuivre, pour des températures de l'eau comprises entre 20 et 60°C. Ces observations sont expliquées par les auteurs par le fait que sur les surfaces cuivrées, les biofilms incorporent des ions cuivre qui inhibent la colonisation de leur surface par *Legionella*.

➤ *Campylobacter jejuni*

La survie de *Campylobacter jejuni* dans l'eau est mal connue en dehors des expériences menées en laboratoire. Ces études ont montré que la survie de cette bactérie augmente quand la température de l'eau diminue. Cette bactérie peut survivre dans l'eau pendant plusieurs semaines, voir plusieurs mois, à une température inférieure à 15°C [7].

➤ *Escherichia coli* O157

E. coli O157 est capable de survivre plusieurs jours dans une eau à basse température. Ainsi, cette bactérie introduite dans un puit à une concentration de 10^6 à 10^7 /ml ne présente pas de réduction significative après 7 jours à 5°C et à 20°C. Après 70 jours à 5°C, une réduction de la concentration de 3,5 log a été observée. D'autres auteurs se sont intéressés à la survie de *E. coli* O157 dans les réservoirs et les lacs. Ils ont montré que celle-ci est plus importante à 8°C qu'à 15 et 25°C [7].

➤ Autres bactéries

A travers plusieurs études, G. Fransolet et al. [8] ont cherché à comprendre les causes et les mécanismes de l'instabilité biologique des eaux au cours de leur distribution au consommateur. Ils ont ainsi étudié l'influence de la température sur le développement bactérien dans l'eau, en se basant sur les critères suivants :

- taux de croissance (nombre de doublements des bactéries par heure),
- rendement de croissance (nombre maximal de germes obtenus en fin de croissance),
- temps de latence (temps s'écoulant entre l'introduction de la souche dans le milieu et le début de sa croissance).

Pour cela, 20 souches de bactéries ont été isolées à partir d'eau de rivière traitée (par ozonation et filtration), d'eau souterraine et d'un mélange des deux types d'eau précédents. Parmi celles-ci, deux sont pathogènes pour l'homme : *Escherichia coli* et *Aeromonas hydrophila*.

Pour chacune de ces bactéries, une première expérience a permis de déterminer la température optimale de croissance en bouillon nutritif. Ces températures sont comprises entre 25 et 35°C, sachant que le taux de croissance observé à ces températures est compris entre 0,1 et 0,75.

Une seconde expérience concernait l'étude de l'influence de la température (comprise entre 7,5 et 27,5°C) et du type d'eau (eau de rivière brute, eau de rivière ozonée, eau souterraine et eau artificielle) sur le taux de croissance d'une souche de *Pseudomonas putida* (pathogène chez l'homme). Les résultats ont montré que le taux de croissance de cette bactérie est une fonction croissante de la température et que celui-ci est en relation avec la température par la loi d'Arrhénius dans l'eau brute et l'eau ozonée.

L'influence de la température et du type d'eau sur le temps de latence de cette même bactérie a ensuite été étudiée. Les auteurs ont montré que le type d'eau a peu d'effet sur le temps de latence, mais que dans l'eau brute, le temps de latence de la bactérie varie en fonction de la température selon l'équation suivante :

$$\text{Temps de latence (h)} = (-0,1029 T + 14,8062) / (0,1206 T - 0,69477) \text{ avec } T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Ainsi le temps de latence de la bactérie diminue quand la température augmente. A 27,5°C, le temps de latence représente 11,8% de celui observé à 12,5°C.

Une dernière expérience réalisée uniquement sur *Pseudomonas putida* a démontré l'influence du type d'eau et de sa température sur le rendement de croissance de la bactérie. Ainsi le rendement de croissance de la bactérie est maximal dans l'eau brute, plus faible dans l'eau ozonée et minimale dans l'eau souterraine. D'autre part, quel que soit le type d'eau, le rendement de croissance augmente en fonction de la température, atteignant un maximum à partir de 17,5°C.

Enfin, les auteurs ont mené une expérience sur les deux autres souches de bactérie pathogènes afin d'étudier l'influence de la température sur leur croissance dans une eau ozonée. Ces bactéries sont les suivantes : *Escherichia coli* et *Aeromonas hydrophila*. Les résultats obtenus confirment ceux des expériences menées sur la souche *Pseudomonas putida*, à savoir qu'une augmentation de la température de l'eau augmente le taux et le rendement de croissance des bactéries et diminue leur temps de latence.

➤ Adaptation du métabolisme bactérien aux variations de l'environnement

L'adaptation du métabolisme bactérien aux variations de l'environnement est déterminée par une génétique complexe qui fait l'objet de recherches actuellement. La réponse génétique totale à des variations de l'environnement est abordée par l'étude du transcriptome chez *Bacillus subtilis* et *Staphylococcus aureus*. Cette stratégie a permis d'identifier les jeux de gènes qui répondent de façon coordonnée à un même événement. De nombreuses études portent sur le contrôle du métabolisme de l'azote et des sucres, d'autres sur la résistance aux agressions. Le stress thermique induit en effet l'expression de protéines, dites de choc thermique, qui assurent la protection des enzymes clés de la physiologie microbienne, mais qui sont aussi liées à la pathogénicité. Le contrôle de leur expression a été très étudié dans de nombreux microorganismes [9].

2.2.1.2.2 Les virus

D'après Schwartzbrod [10], les virus hydriques peuvent être classés en quatre catégories :

- les entérovirus,
- les virus hépatiques,
- les virus des gastroentérites : rotavirus, norovirus et astrovirus,
- les adénovirus.

Les virus sont incapables de se multiplier en milieu hydrique, ils peuvent donc disparaître sous l'effet de facteurs physico-chimiques et biologiques. L'association à des particules solides ainsi que leur agrégation les protègent contre les facteurs inactivants dont le plus important est la température.

La plupart des virus survivent à basse température et sont inactivés à température élevée. Ainsi, d'après la Figure 1 réalisée à partir d'une revue bibliographique [7], les entérovirus peuvent survivre jusqu'à 10 jours à des températures comprises entre 20 et 30°C. D'autre part, les études menées sur les norovirus ont montré que ces derniers sont plus résistants que les autres virus aux températures élevées, puisqu'ils ne sont pas inactivés après 30 minutes dans une eau à 60°C.

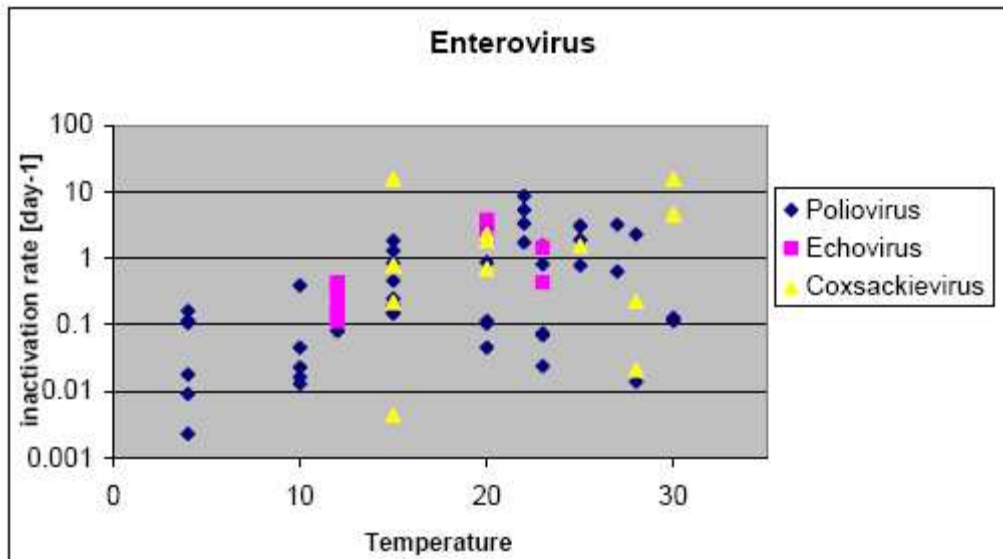


Figure 1 : Taux d'inactivation des entérovirus en fonction de la température de l'eau : revue bibliographique [7]

2.2.1.2.3 Les parasites

La résistance des protozoaires est exceptionnelle sous forme kystique. Cependant, les températures élevées diminuent le temps de survie, dans l'eau, des kystes et des œufs des vers parasites. Ainsi, les œufs du *Schistosoma* meurent au bout de neuf jours à une température variant entre 29 et 32°C, au bout de trois semaines si cette dernière se situe entre 15 et 24 °C et au bout de trois mois à une température de 7°C [4].

➤ Les amibes libres

Parmi les nombreuses familles d'amibes libres recensées, celles dont le pouvoir pathogène chez l'homme a été démontré sont *Acanthamoebae* et *Naegleria fowleri*.

N. fowleri est présente sur toute la planète dans les eaux douces des pays tropicaux à tempérés sous forme kystique, en abondance dans les lacs et les rivières en été, les eaux naturelles réchauffées par les activités industrielles et le réseau d'eau potable réchauffé par le soleil lorsque le niveau de chloration est insuffisant. De Jonckheere et al [11] ont observé dans une eau superficielle industriellement chauffée qu'une température de l'eau supérieure ou égale à 20°C est une condition nécessaire mais non suffisante pour le développement de *N. fowleri*. D'autre part, Detterline et Wilhelm [12] citent un travail universitaire de Detterline en 1989 dont les conclusions sont que, en présence de microorganismes compétiteurs, une température plus élevée n'est pas favorable à la prolifération de cette amibe libre, contrairement à ce qui se produit, de manière bien établie, en l'absence de ces derniers. Enfin, il est établi que *N. fowleri* résiste jusqu'à une température de 44-45°C [13].

Les *Acanthamoebae* éventuellement pathogènes – celles dont le pouvoir pathogène a été démontré chez la souris (*A. castellami*, *A. culbertsoni*, *A. polyphaga*, *A. astronyxis*, *A. rhyssodes*, *A. lenticulata*, *A.comandoni*) sont extrêmement fréquentes dans les eaux douces et les sources thermales. Cependant, aucune influence de la température sur leur écologie n'a été démontrée jusqu'à maintenant [13].

➤ Cryptosporidium

Cryptosporidium est un parasite ubiquiste. Dans l'environnement, il se présente uniquement sous la forme d'oocyste, seule forme capable de survivre en dehors de l'hôte infecté. En raison de leur résistance aux conditions environnementales et aux différents traitements, les oocystes de Cryptosporidium possèdent un grand potentiel de transmission par voie hydrique. La contamination naturelle de l'eau par ce parasite peut se faire directement au niveau de la ressource (par ruissellement lors de fortes pluies, contamination de puits par des eaux usées) ou indirectement au niveau du réseau de distribution (introduction d'eaux contaminées lors de casses ou d'opérations de réparation, mauvaises connections dans le réseau...) [14].

Les oocystes de Cryptosporidium peuvent rester viables et infectieux dans l'eau pendant plusieurs mois à des températures comprises entre 0 et 30°C. La viabilité et l'infectiosité des oocystes survivants ont été étudiées dans l'eau de distribution maintenue pendant 8 semaines à 2 températures différentes (4°C et 10°C). Les comptages ont montré qu'après 4 semaines de séjour à 10°C le pourcentage d'oocystes survivants était de 67%, 48% après 6 semaines et 27% après 8 semaines. A 4°C on obtenait dans les mêmes temps des survies de 95%, 90% et 88% respectivement. Le dékystement des oocystes survivants à 4°C décroissait rapidement en 2 semaines et se stabilisait à 30% jusqu'à 8 semaines alors qu'il décroissait régulièrement à 10°C. L'infectiosité des oocystes survivants décroissait de 40% à 10°C en 6 semaines et seulement de 15% par conservation à 4°C et ceci quelle que soit la quantité d'oocystes survivants [15]. Les oocystes sont détruits ou perdent leur infectiosité à la suite d'un traitement par la chaleur : 1 minute à 72°C ou au moins 30 minutes à 65°C. D'après les recherches de Fayer menées en 1994 [16], des oocystes de *Cryptosporidium parvum* sont devenus non infectants après que l'eau les contenant ait été chauffée à une température d'au moins 64,2°C pendant 2 minutes, tandis que d'autres oocystes ont gardé leur caractère infectieux pour une température de 59,7°C appliquée à l'eau pendant 5 minutes.

Les oocystes de Cryptosporidium sont donc toujours infectieux dans une eau dont la température est comprise entre 25 et 40°C, mais survivent moins longtemps qu'à une température d'une dizaine de degrés.

➤ Giardia

Il a été montré que les oocystes de Giardia sont moins résistants aux pressions environnementales que ceux de Cryptosporidium. Ainsi, les oocystes placés dans une eau à 8°C survivent pendant 77 jours, tandis qu'à 21°C, ils restent viables pendant 5 à 24 jours, et qu'à 37°C, ils ne survivent pas plus de 4 jours. Wickramanayake et al [7] ont montré que la température optimale de survie des oocystes de Giardia dans l'eau est 5°C.

2.2.1.2.4 Les champignons

Il semble qu'à une température supérieure à 16°C, des champignons microscopiques puissent se développer dans les canalisations et donner à l'eau une odeur et un goût de terre, de boue ou de moisi [4].

Les champignons sont ubiquistes dans l'environnement. Plusieurs groupes de champignons ont été retrouvés dans des réseaux d'adduction d'eau potable, et plusieurs études ont montré que les champignons filamenteux et unicellulaires sont couramment retrouvés dans les réservoirs d'eau potable « ouverts » et sur les parois des canalisations même en présence de chlore résiduel libre.

Cependant, aucune donnée n'a été trouvée dans la littérature permettant une quantification du lien entre augmentation de la température et développement des champignons hydriques.

2.2.1.2.5 Les algues et les actinomycètes

Les eaux de surface sont particulièrement touchées par des proliférations d'algues à différentes périodes de l'année et spécialement en été. Les algues constituent un ensemble très diversifié de plus de 20 000 espèces. Les principales algues rencontrées en climat tempéré sont du type chlorophycées (algues vertes), diatomées (algues brunes) et cyanophycées (algues bleues). Cette problématique liée aux algues est connue depuis longtemps. Cependant, la fréquence d'apparition et la concentration des algues, et spécialement des cyanobactéries, ont considérablement augmenté au cours de ces dernières années en France, en lien avec l'apport de nutriments dans les ressources et l'élévation significative de la température [17].

Les cyanobactéries constituent une partie du phytoplancton, que l'on retrouve communément dans les lacs d'eau douce, les étangs, les réservoirs mais également certaines rivières [18]. Ce sont des microorganismes procaryotes (à la différence des autres algues qui sont eucaryotes), photosynthétiques, qui forment une composante naturelle de la plupart des écosystèmes aquatiques. Une interaction complexe de facteurs environnementaux contribue à la croissance des cyanobactéries. Les blooms sont généralement associés à :

- des concentrations importantes de nutriments, et particulièrement de phosphore,
- des températures élevées (le potentiel de croissance des cyanobactéries est significatif au-delà de 15°C et atteint un maximum au dessus de 25°C),
- un zooplancton abondant,
- une circulation faible de l'eau (temps de séjour élevé, conditions météorologiques calmes)
- une stratification thermique.

D'autre part, les cyanobactéries génèrent des molécules odorantes telles que la géosmine ou le méthyl-isobornéol (MIB) qui ont un impact sur la qualité organoleptique de l'eau à très faibles concentrations (quelques nanogrammes par litre).

Outre les algues, un autre type de microorganismes est fréquemment cité dans la littérature parmi les composés responsables du goût de l'eau. Il s'agit de microorganismes unicellulaires appartenant à un groupe confus situé entre les bactéries et les champignons : les actinomycètes. Ceux-ci sont très largement distribués dans la nature, surtout dans les sols et les boues sédimentaires des lacs et des rivières. On en trouve également dans les réseaux de distribution : soit ils y sont introduits accidentellement (avec de la terre lors de travaux par exemple), soit ils y pénètrent sous forme de spores, celles-ci échappant aux chaînes de traitement. Contrairement aux algues, les actinomycètes ne semblent pas pouvoir proliférer dans les réseaux.

Certains actinomycètes, tout comme les cyanophycées, sont producteurs de géosmine et de MIB, composés connus pour les nuisances qu'ils engendrent, en particulier les odeurs de terre et de moisi. Cependant, la grande diversité de genres d'actinomycètes laisse une zone d'ombre importante sur la réelle capacité de chaque genre à produire de la géosmine et/ou du MIB. Une revue bibliographique de l'ensemble des connaissances sur les actinomycètes [19] laisse entendre que seulement quelques genres seraient concernés (*Streptomyces sp.* principalement, mais aussi *Microbispora sp.* et *Actinomadura sp.* qui n'ont cependant jamais été isolés dans les environnements aquatiques).

Une étude réalisée autour du Lac Ontario au Canada contenant des actinomycètes a montré que les concentrations en géosmine étaient plus importantes quand la température de l'eau augmente [20], d'autres études ont montré qu'il existait une relation significative entre les concentrations en actinomycètes et des températures élevées (>17°C) [19]. Cependant, les incertitudes sont très importantes en ce qui concerne les espèces d'actinomycètes réellement productrices de géosmine et de MIB. De nombreuses études tentent de clarifier ces

phénomènes et les zones d'ombre sont nombreuses. Ainsi, nous n'avons pas réussi à trouver d'étude qui quantifiait la production de composés odorants par les actinomycètes en fonction de la température du milieu.

2.2.1.2.6 Les biofilms

L'eau traitée produite dans les stations de traitement d'eau potable puis distribuée par le réseau jusqu'aux usagers n'est jamais stérile car les procédés physico-chimiques classiques de traitement ne permettent pas d'assurer avec fiabilité une élimination totale des microorganismes.

D'autre part, dans le réseau, certains points offrent des voies d'entrée à la contamination par des microorganismes. C'est le cas des réservoirs où l'eau est en contact avec l'air, et où les orifices mal protégés peuvent permettre le passage de poussières ou d'insectes apportant des contaminations. De plus, les interventions sur le réseau, les fuites et les accidents, tels que des retours d'eau ou des cassures, peuvent également être responsables de l'introduction de microorganismes dans le réseau.

La biomasse libre dans le réseau se fixe sur les parois des canalisations, qu'elle soit morte ou vivante et constituera un premier support pour le développement de couches supérieures plus actives. Si ces organismes rencontrent des conditions ambiantes satisfaisantes, le développement d'un biofilm peut avoir lieu. Celui-ci est constitué d'espèces résistantes dans cet environnement particulier. Il est le lieu privilégié de métabolisme, reviviscence, croissance et mort.

A l'interface solide – liquide, le biofilm représente une protection à la fois hydraulique et chimique, puisqu'il limite la diffusion des désinfectants tels que le chlore. Il protège ainsi certains types de microorganismes du désinfectant résiduel ou même d'un nettoyage incomplet, notamment grâce aux effets d'agrégation, encapsulation et attachement.

De plus, dans des zones de dépôts ou de décantation de particules, des niches écologiques peuvent se développer plus particulièrement et des conditions d'anaérobiose se mettent en place. Des proliférations de bactéries générant de la corrosion et même parfois la prolifération de coliformes y deviennent alors possible [21].

Il a été montré qu'une augmentation de température favorise le développement des biofilms [22]. Ce phénomène est directement lié au fait que les développements bactérien, algal et fongique sont favorisés par une augmentation de la température de l'eau de distribution.

La revue bibliographique menée dans le cadre de cette étude a permis de déterminer l'influence d'une élévation de température sur le développement et la survie des microorganismes dans l'eau d'un point de vue qualitatif mais non quantitatif. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 2:

Microorganisme		Température optimale de développement ou de survie	Influence d'une augmentation de température de l'eau (de 25 à 40°C)
Bactéries	<i>Legionella pneumophila</i>	entre 25 et 45°C	Non renseigné dans la bibliographie
	<i>Pseudomonas putida</i> <i>Escherichia coli</i> O157 <i>Aeromonas hydrophila</i>	entre 25 et 35°C	Augmentation du taux de croissance Augmentation du rendement de croissance Diminution du temps de latence
	<i>Campylobacter jejuni</i>	Inférieure à 15°C	Diminution du temps de survie
Parasites	<i>Naegleria fowleri</i>	entre 20 et 45°C	Dépend de la présence de compétiteurs dans l'eau. En cas d'absence, une température élevée favorise la prolifération.
	<i>Giardia lamblia</i>	5°C	Diminution du temps de survie
	Cryptosporidium	Survie de plusieurs mois entre 0 et 30°C	Diminution du temps de survie
Virus		Pas de multiplication dans l'eau	Diminution du temps de survie Protection par les biofilms dans les canalisations
Algues		Au-delà de 15°C	Développement favorisé
Champignons		Au-delà de 16°C	Développement favorisé

Tableau 2 : Tableau récapitulatif de l'influence d'une augmentation de la température sur les différents microorganismes présents dans l'eau

2.2.2 Influence de la température sur l'efficacité microbiologique du traitement des eaux

2.2.2.1 Procédés de clarification

Les phases de coagulation et de décantation du traitement des eaux permettent de réduire le nombre de microorganismes en suspension dans l'eau. Cependant, comme il l'a été dit plus haut (§ 2.1), la vitesse de décantation augmente avec la température. Ainsi l'augmentation de la température de la ressource favorise l'élimination des microorganismes par coagulation-floculation.

En revanche, la présence d'algues augmente la demande en coagulant, perturbe le fonctionnement des décanteurs et accélère le colmatage des filtres à sables.

2.2.2.2 Procédés de filtration

La filtration membranaire, procédé utilisé pour éliminer les kystes protozoaires et les virus, est facilitée par une augmentation de température (cf. § 2.1).

2.2.2.3 Procédés de désinfection

La température influe sur la diffusion du germicide, sa cinétique d'action et sur l'agrégation des microorganismes ; en règle générale, si la température croît, l'efficacité du désinfectant s'accroît.

Ainsi, Buterfield et ses collaborateurs ont montré que lorsque la température s'élève à partir

de 2 à 5°C pour atteindre 20 à 25°C, l'action bactéricide du chlore sur *E. Coli* se trouve multipliée par cinq [4]. Ames et Whitney-Smith ont montré, eux, que si la température passe de 8°C à 40°C, l'action bactéricide du chlore est multipliée par neuf. Enfin, Chambers a constaté que l'effet de la température sur l'action du chlore dépend du pH [4]. Celui-ci est nul à un pH de 7 à 8,5, tandis que si la température passe de 4 à 22°C avec un pH plus élevé, l'efficacité du chlore est quatre à huit fois plus grande [4].

Dans l'eau potable, le chlore libre existe principalement sous forme d'acide hypochloreux et d'ion hypochlorite. L'action germicide du premier est à peu près cent fois plus grande que celle du deuxième, car l'acide hypochloreux a le pouvoir de pénétrer dans les enveloppes des microorganismes. Le rapport acide hypochloreux – ion hypochlorite dépend du pH. Quand celui-ci est égal à 6, 96,8 % du chlore libre est de l'acide hypochloreux. Ce pourcentage tombe à 2,9 à un pH de 9 [4]. A pH égal, une augmentation de la température stimule la dissociation de l'acide hypochloreux. Mais l'effet de la concentration d'acide hypochloreux sur l'efficacité germicide de l'eau chlorée est annulé par l'influence contraire et plus importante qu'exerce une hausse de température. Le Tableau 3 montre l'efficacité des différents désinfectants sur les microorganismes hydriques.

Réactifs	Efficacité			Pouvoir rémanent	Effet bactériostatique sur le biofilm
	Bactéries	Virus	Kystes		
HOCl	++++	++++	++	++++	++
OCl	+++	++	+	+++	+++
NH ₂ Cl	++	+	Néant	++++	++++
O ₃	++++	++++	+++	Néant	Néant
ClO ₂	++++	++++	+++	++++	++

++++ : excellent ++ : moyen
 +++ : bon + : faible

Tableau 3 : Efficacité et caractéristiques de différentes techniques de désinfection [21]

D'autre part, des chercheurs ont montré que l'augmentation de la température de l'eau a une influence positive sur l'action des désinfectants sur le poliovirus de type 1 [21] ainsi que sur *Giardia lamblia* (cf. Tableau 4).

Désinfectant	pH	Température (°C)					
		0,5	5	10	15	20	25
Chlore libre	6	49	35	26	18	13	9
	7	70	50	37	25	19	12
	8	101	72	54	36	27	18
	9	146	104	78	52	39	26
Ozone	6-9	0,97	0,63	0,48	0,32	0,24	0,16
Dioxyde de chlore	6-9	20	13	10	5	5	3,3
Chloramines	6-9	295	737	675	505	366	260

Tableau 4 : Valeurs de temps de contact (CT en min.mg/l) pour obtenir un abattement de 90 % des kystes de *Giardia lamblia* [21]

2.2.2.4 Recroissance microbienne dans les réseaux

Dans le cadre d'une désinfection par le chlore, une augmentation de température amène une diminution rapide de son taux résiduel par suite de sa combinaison avec la matière organique présente. L'effet biocide global est moindre car la croissance microbienne est en même temps stimulée. On observe dans le réseau une multiplication bactérienne qui sera proportionnelle au temps de rétention. La difficulté est alors de savoir à quelle concentration résiduelle le désinfectant cesse d'être efficace. La prévention du phénomène de recroissance nécessite un taux élevé de chlore résiduel.

D'autre part, la présence d'algues, à l'origine de relargage de matières organiques, favorise également la reviviscence bactérienne dans les réseaux et contribue à augmenter la demande en chlore.

2.3 Risques sanitaires associés aux modifications de qualité microbiologique de l'eau

2.3.1 Principales maladies d'origine hydrique

Le Tableau 5 présente les principales maladies d'origine hydrique françaises ainsi que leurs agents responsables.

	Maladie	Agents pathogènes responsables	Voie de transmission	Nombre de cas par an
Bactéries	Fièvres typhoïdes et paratyphoïdes	<i>Salmonella typhi / paratyphi</i>	Fécale-orale, ingestion	93 (2001), 106 (2002), 137 (2003) dont 80% de cas importés
	Choléra	<i>Vibrio cholerae</i>	idem	
	Gastroentérites aiguës et diarrhées	<i>E. coli</i> <i>Shigella sonnei</i>	Fécale-orale, ingestion idem	83 foyers de cas groupés en 2003 entre 12 160 et 16 700 cas en moyenne
		<i>Campylobacter jejuni</i> <i>Yersinia enterocolitica</i>	idem idem	
Suppuration Legionellose	Pseudomonas, Staphylococcus <i>Legionella pneumophila</i>	Cutano-muqueuse inhalation	1500 cas en 2005 (incidence de 1,8/100 000 hab)	
Virus	Hépatite A	Virus de l'hépatite A	Fécale-orale ingestion	16 112 cas en 2000 (IC95% [10440 – 21784]) dernier cas autochtone en 1989, dernier cas importé en 1995
	Poliomyélite	Virus poliomyélitique	idem	
	Gastroentérites aiguës et diarrhées	Norovirus, Rotavirus, Astrovirus	idem	
Parasites	Dysenterie amibienne Gastro-entérite Méningites	<i>Entamoeba histolytica</i> Giardia, Cryptosporidium <i>Naegleria fowleri</i> , Acanthamoebae	Fécale-orale, ingestion idem Contact, inhalation	3 épidémies dues à Cryptosporidium entre 1998 et 2003
Champignons	Maladie pulmonaire, allergies Infection auriculaire Méningite, infection pulmonaire Infections vaginale, urinaire et eosophagienne Infections des sinus Infections extracutanées, abcès du cerveau, infection du système nerveux central Dermatomycoses Hemodiserosis pulmonaire infantile Infections du cuir chevelu	<i>Aspergillus fumigatus</i> <i>Aspergillus flavus</i> <i>Aspergillus niger</i> <i>Cryptococcus neoformans</i> <i>Candida albicans</i> Mucor <i>Pseudallescheria boydii</i> <i>Sporothrix schenckii</i> <i>Schachybotrys chartarum</i> Trichophyton		

Tableau 5 : Principales maladies d'origine hydriques, agents responsables et voies de transmission associées [19, 22, 48]

Le recensement des cas est réalisé par un réseau de surveillance comprenant les laboratoires

des Centres nationaux de référence (CNR) et des médecins sentinelles.

Le Tableau 6 permet de connaître la part de chacun de ces microorganismes dans les dernières épidémies apparues dans 15 pays industrialisés.

Agent pathogène	Fréquence d'apparition
Cryptosporidium	20
<i>Campylobacter jejuni</i>	14
<i>Giardia lamblia</i>	13
Virus de Norwalk	12
<i>E. coli</i> entérotoxigène	7
Agent non identifié	5
Rotavirus	2
<i>Shigella sp.</i>	2
Virus de l'Hépatite A	1
<i>Salmonella typhi</i>	1

Tableau 6 : Fréquence d'apparition des différents germes pathogènes lors d'épidémies récentes dans 15 pays industrialisés [26]

Ainsi, d'après ces tableaux, parmi l'ensemble des maladies d'origine hydrique susceptibles d'apparaître dans la population, seules quelques unes sont observées de façon récurrente en France. Seuls les risques sanitaires associés à ces microorganismes seront donc détaillés dans la suite de l'exposé, bien qu'une élévation de la température de l'eau ne favorise pas forcément le développement de ceux-ci.

Par ailleurs, un autre problème lié à la température de l'eau retient l'attention des traiteurs d'eau actuellement [18] : celui des risques sanitaires associés aux cyanobactéries.

2.3.2 Maladies d'origine bactérienne

2.3.2.1 Fièvres typhoïdes et paratyphoïdes

Ce sont des septicémies dues à des salmonelles (cf. Tableau 5). Elles sont caractérisées par des fièvres, céphalées, diarrhées, douleurs abdominales, accompagnées d'un abattement extrême (le tufos) et peuvent engendrer des complications graves, voir mortelles : hémorragies intestinales, collapsus cardiovasculaire, atteintes hépatiques, respiratoires, neurologiques.

En 2003, 137 cas des ces fièvres ont été répertoriés en France dont 80% de cas importés.

2.3.2.2 Gastro-entérites aiguës et diarrhées

Bien que retenues comme germes-tests de contamination fécale des eaux car d'une extrême abondance et résistance dans l'eau, les bactéries *Escherichia coli* ne sont guère pathogènes : 5 à 6% des souches seulement chez les enfants. Ces dix dernières années, des épidémies d'infections à *E. coli* O157:H7 impliquant une possible contamination de l'homme par l'eau ont été décrites. La présence de *E. coli* O157:H7 dans les prélèvements d'eau permettant de confirmer l'origine de l'infection, a rarement été mise en évidence. La consommation d'eau de puit, d'eau de source privée et d'eau de distribution non traitées a été à l'origine de cas isolés et d'épidémies à *E. coli* O157. L'ingestion accidentelle d'eau lors de baignade dans un lac ou dans une piscine a elle aussi été incriminée.

En revanche, *Campylobacter jejuni* est l'une des causes les plus courantes de gastroentérites (sa prévalence parmi les gastroentérites est de l'ordre de 2% dont 78% chez des enfants de 1 à 15 ans). Entre 12 160 et 16 700 cas sont observés en moyenne par an en France (Tableau 5). C'est une infection sporadique apparaissant en été, le plus souvent à la suite de manipulations de nourriture contaminée, tandis que les épidémies survenant au printemps ou à l'automne sont plutôt associées à l'ingestion de lait et d'eau contaminée. Les manifestations de l'infection vont de la forme asymptomatique à l'atteinte sévère avec fièvres, crampes abdominales, diarrhées plus ou moins sanglantes pouvant durer plus d'une semaine.

En France, *Shigella sonnei* est l'espèce dominante parmi l'ensemble des shigelles. L'infection à *Shigella sonnei* est caractérisée par une diarrhée fébrile modérée, après une incubation brève de quelques heures à quelques jours (48h). L'évolution est résolutive en 3-4 jours sans traitement mais certaines infections peuvent être sévères et nécessiter une hospitalisation.

2.3.2.3 Légionellose

Les espèces *L. pneumophila* et *L. anisa* sont les plus virulentes et les plus fréquemment retrouvées dans les contaminations de réseaux intérieurs d'eau chaude sanitaire (ECS) ou des tours aéroréfrigérantes (TAR). 85% des cas de légionellose sont en effet dus à l'espèce pathogène *L. pneumophila*. A l'heure actuelle, aucune contamination inter-humaine ou par ingestion de l'eau n'a été rapportée ou démontrée. La transmission à l'être humain se fait par inhalation d'aérosols ou de microgouttelettes contaminés.

La maladie est souvent caractérisée par une pneumonie aiguë présentant un large spectre de signes cliniques allant de la toux avec fièvre modérée jusqu'à la détresse respiratoire. En début d'affection, les symptômes ne sont pas spécifiques : fièvre, myalgies, anorexie, céphalées. Dans 20 à 40% des cas, on observe des symptômes gastro-intestinaux. La mortalité est importante : 10 à 15%.

La dose de légionelles inhalées par aérosol nécessaire pour provoquer une infection chez l'homme n'est pas connue actuellement. On ne connaît pas non plus les relations entre concentrations de légionelles dans l'eau et dans l'air. En l'absence d'une relation dose-réponse clairement établie, il n'existe pas de seuil sanitaire concernant la présence de *Legionella spp.* ou de *L. pneumophila* dans l'eau. Dans le cas particulier de l'ECS, l'OMS indique qu'au-delà d'une concentration en *L. pneumophila* de 10^3 UFC (unité formant colonies) par litre, le risque d'apparition de légionellose par inhalation d'aérosols formés à partir de cette eau est très faible pour la population générale. Pour certaines installations à risque, comme les TAR (circulaire du 23 avril 1999) et les établissements de santé (circulaire du 22 avril 2002), des valeurs cibles, correspondant à des seuils d'alerte et des seuils d'actions, ont été préconisées. Ainsi la concentration de 1000 UFC/l pour l'ECS a été abaissée à la valeur de 250 UFC/l pour les services à haut ou très haut risque, en milieu hospitalier et pour les eaux thermales.

Par contre, la relation entre la contamination de réseaux d'adduction publique avant compteur et l'apparition de cas groupés de légionellose est exceptionnelle. L'épisode apparu à Soulac-sur-Mer en 2004 [1] dont la caractéristique est la production d'eau potable à partir d'une ressource souterraine chaude refroidie par de l'eau superficielle a toutefois montré cette possibilité. Cet épisode a mis en évidence une contamination du réseau par *Legionella spp.* et *L. pneumophila* des sérogroupes 1, 2 à 14, à des concentrations variant de 480 à 160 000 UFC/l.

2.3.3 Maladies d'origine virale

2.3.3.1 Entérovirus

Les entérovirus font partie des plus courants et des plus importants agents pathogènes pour les humains. En ce qui concerne le virus polio, la contamination se fait par voie digestive par l'intermédiaire de l'eau ou des aliments. Au cours de l'infection, le virus provoque dans un premier temps une légère fièvre souvent accompagnée de symptômes de rhume banal. Au bout de quelques jours, des paralysies musculaires flasques s'installent brutalement avec abolition des réflexes et atrophie musculaire précoce. La poliomyélite est en voie d'éradication mondiale depuis l'avènement du vaccin à la fin des années 1950. L'attention se porte donc désormais sur les autres virus de la famille : le virus Coxsackie A et B et les Echovirus. Ces virus sont la première cause d'encéphalites bénignes, et sont également responsables d'affections respiratoires et cardiovasculaires. En 2000, l'InVS a recensé de l'ordre de 1200 cas de méningite dues à des entérovirus non poliovirus, notamment des Echovirus 13 et 30 [23].

2.3.3.2 Hépatite A

Egalement nommée hépatite infectieuse, elle est provoquée par un virus dont la transmission est oro-fécale. Le virus de l'hépatite A ne cause pas de maladie chronique du foie mais plusieurs complications peuvent accompagner l'affection : méningoencéphalite, atteintes rénales et cardiovasculaires. Dans 5 à 20% des cas, la maladie peut conduire à une hépatite fulminante avec détérioration des fonctions hépatiques, encéphalopathie et coma. Dans ces conditions, la mortalité est de l'ordre de 1% après 40 ans. En général, la mortalité liée à l'hépatite A est estimée à 3,3‰, 70% des cas survenant chez les adultes âgés de plus de 49 ans. Il existe un vaccin qui protège 90% des sujets en 15 jours et 100% en 1 mois, mais il n'est utilisé que pour la vaccination des enfants, compte tenu de son coût élevé et de la faible morbidité associée à la maladie [23].

2.3.3.3 Gastroentérites virales

Il existe de nombreux virus impliqués dans les syndromes diarrhéiques. Les plus courants sont les norovirus (dont le virus de Norwalk) et les rotavirus, mais on trouve également des coronavirus et des astrovirus.

Les rotavirus sont la cause majeure de gastroentérite aiguë sporadique du jeune enfant. Aux Etats-Unis, ils atteignent 2,7 millions d'enfants et sont responsables de 150 décès par an. En France, il n'existe pas de surveillance nationale, mais on estime que les rotavirus sont responsables de 51 % des gastroentérites hospitalisées, loin devant les salmonelles (8,6 %), *Campylobacter jejuni* (2 %), et les Shigella (0,7 %). L'infection est caractérisée par de la toux, un écoulement nasal, une broncho-pneumopathie qui précèdent les symptômes gastro-intestinaux. La mort est généralement due à la déshydratation et au déséquilibre électrolytique. Mises à part les exceptionnelles formes chroniques décrites chez les immunodéprimés, la guérison est complète en 5 à 8 jours [23].

Le virus de Norwalk porte le nom de l'école primaire de l'Ohio dans laquelle s'est produit la première épidémie en 1969 (aux Etats-Unis, il a été retrouvé dans 42 % des 74 épidémies de gastroentérites survenues entre 1976 et 1980). Il constitue le prototype de la souche la plus largement étudiée de virus non cultivables dénommés « Norwalk-like » ou norovirus. Les manifestations cliniques de ces agents sont essentiellement des nausées et vomissements avec douleurs abdominales, diarrhées et fièvres [23].

En Europe et aux Etats-Unis, les adénovirus sont responsables de 1,1 à 7,9 % des gastroentérites.

Les astrovirus sont décrits comme cause occasionnelle de gastroentérites dans diverses parties du monde. Les symptômes comportent, après une période d'incubation de 24 à 48 h, des vomissements, diarrhée et fièvre supérieure à 39,5°C.

Les calicivirus sont une cause relativement courante de gastroentérite infantile (de l'ordre de 8 %) et paraissent responsables d'épidémies de vomissements durant la période hivernale.

2.3.4 *Maladies d'origine parasitaire*

2.3.4.1 *Cryptosporidium parvum*

Ce parasite est responsable de la cryptosporidiose, dont les symptômes habituels sont relativement bénins : diarrhée, vomissements, douleurs abdominales, légère fièvre et syndrome grippal. Tandis que la maladie évolue spontanément vers la guérison en 3 à 20 jours chez les sujets immunocompétents, elle prend une forme beaucoup plus grave et est souvent fatale chez les immunodéprimés. La gravité du danger est alors renforcée par le fait qu'il n'existe pas de traitement antimicrobien efficace contre ce protozoaire parasite [27].

Cryptosporidium a causé de nombreuses épidémies ayant pour origine l'eau de distribution publique. Parmi les 12 survenues de par le monde de 1984 à 1996, la plus importante a eu lieu en 1993 à Milwaukee dans le Wisconsin aux Etats-Unis avec 11 000 malades et 40 morts. Entre 1998 et 2003, la France a connu 3 épidémies de gastro-entérites liée à Cryptosporidium : Sète en 1998 (150 cas), Dracy-le-Fort en septembre 2001 et Divonne-les-Bains en Septembre 2003.

2.3.4.2 *Giardia lamblia*

Ces flagellés habitent les régions intestinales et atriales. L'infection est oro-fécale par ingestion de kystes. Les trophozoïtes infectent le haut intestin grêle mais n'envahissent pas les tissus et ne provoquent pas d'ulcération. Le temps d'incubation peut aller de quelques jours à plusieurs semaines. Les symptômes incluent des crampes abdominales, des nausées et une diarrhée aqueuse. Giardia est le responsable le plus courant de diarrhée protozoaire à travers le monde. Entre 1971 et 1994, plus de 25 000 cas de giardioses ont été enregistrés aux Etats-Unis [7].

2.3.5 Risques sanitaires associés aux cyanobactéries

Les cyanobactéries sont génératrices de toxines (hépatotoxines, neurotoxines, dermatotoxines, toxines irritantes). Ces métabolites peuvent être relargués au niveau de la ressource ou au cours des traitements de potabilisation, lors de la lyse des cellules.

Cependant, seules certaines des cyanobactéries sont productrices de toxines et la toxicité de ces composés est très variable (Tableau 7).

Groupe de toxines	Organe cible chez les mammifères	Genres de cyanobactéries impliqués (non exhaustif)
Peptides cycliques		
Microcystines	Foie	Microcystis, Anabaena, Anabaenopsis, Nostoc, Planktothrix (Oscillatoria), Hapalosiphon,
Nodularines	Foie	Nodularia
Alcaloïdes		
Anatoxine-a	Nerfs (synapses)	Anabaena, Planktothrix (Oscillatoria), Aphanizomenon
Anatoxine-a(S)	Nerfs (synapses)	Anabaena
Aplysiatoxine	Peau	Lyngbya, Schizothrix, Planktothrix (Oscillatoria)
Cylindrospermopsine	Foie	Cylindrospermopsis, Aphanizomenon, Umezakia, Raphidiopsis
Lyngbyatoxine-a	Peau, système digestif	Lyngbya
Saxitoxines	Nerfs (axones)	Anabaena, Aphanizomenon, Cylindrospermopsis, Lyngbya
Lipopolysaccharides		
Lipopolysaccharides	Effets irritants, affectent tous les tissus exposés	Tous

Tableau 7 : Caractéristiques générales des cyanotoxines [18]

L'exposition aux cyanobactéries peut se faire via plusieurs voies d'exposition :

- contact direct des parties exposées du corps,
- ingestion d'eau,
- inhalation d'eau,
- voie intraveineuse (cas particuliers des dialysés).

Alors que la directive européenne de 1998 n'imposait aucun seuil réglementaire sur les cyanotoxines, la France a choisi de reprendre la valeur guide de l'OMS sur la microcystine LR pour en faire une limite réglementaire de qualité des eaux destinées à la consommation humaine : 1µg/l. Ce paramètre doit être recherché « en cas de prolifération algale ».

2.3.6 Evaluation quantitative du risque microbiologique

La démarche d'évaluation des risques mise au point à la fin des années 1970 pour le domaine chimique a été appliquée au risque microbiologique aux Etats-Unis dès les années 1990 et plus récemment à travers un projet européen intitulé MicroRisk (5ème Programme Cadre européen) [28]. Ce projet, achevé en avril 2006, avait pour objectif l'élaboration d'un outil de quantification des risques microbiologiques liés à l'eau de boisson.

La démarche peut être résumée en quatre étapes principales présentées par le schéma de la Figure 2.

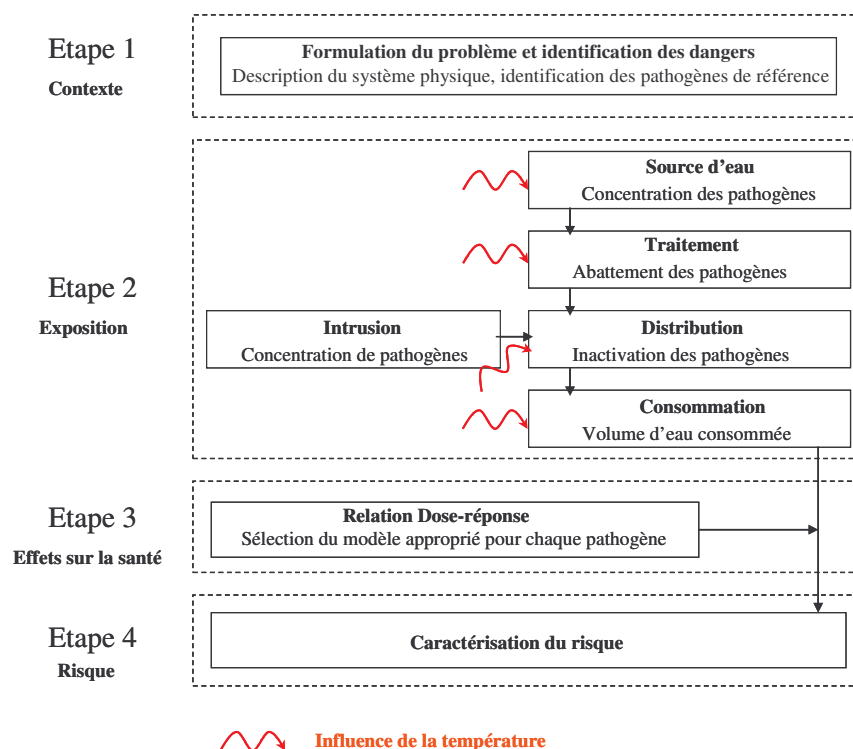


Figure 2 : Démarche d'évaluation quantitative des risques microbiologiques

Cependant, cet outil présente des limites, notamment concernant la mesure de concentration des pathogènes, leur abattement par les procédés de traitement et les modèles dose-réponse.

Comme il l'a été vu dans les paragraphes précédents, la température de l'eau a une influence sur quatre des étapes de cette démarche (voir Figure 2). Cependant, comme il est difficile en l'état actuel des connaissances de quantifier la relation entre élévation de la température de l'eau au-delà de 25°C et développement microbien, une évaluation quantitative du risque microbiologique lié à une température supérieure à 25°C se révèle, pour l'heure, impossible.

2.4 Influence de la température sur la qualité chimique de l'eau

Sur le plan physico-chimique, la température de l'eau joue un rôle majeur, non seulement au cours du traitement à l'usine, mais aussi au sein des conduites de distribution avant consommation. Ainsi, l'augmentation de la température peut provoquer un accroissement de la corrosion des conduites métalliques et des phénomènes de relargage de matières organiques dans le cas de conduites en matière plastique de type PVC. Elle modifie également les cinétiques de formation de sous-produits de chloration. Ces modifications physico-chimiques peuvent s'accompagner d'effets sur la santé des consommateurs.

2.4.1 Influence de la température sur l'équilibre calcocarbonique

La température est un facteur important pour l'équilibre calcocarbonique d'une eau. La Figure 3 montre qu'en présence d'une forte concentration en calcium et d'une température élevée, le pouvoir tampon de cette eau sera grand. Dans le cas d'une chute de température, l'eau aura tendance à devenir déposante, et son pouvoir incrustant sera d'autant plus fort que la concentration initiale en calcium est forte et la chute de température importante. Ce phénomène peut poser des problèmes dans les canalisations dont le diamètre nominal diminue suite aux dépôts de carbonate de calcium [29]. Ce dépôt est néanmoins utilisé afin de protéger des canalisations face à la corrosion, dans le cas de changements ponctuels de la nature de l'eau (variations de pH).

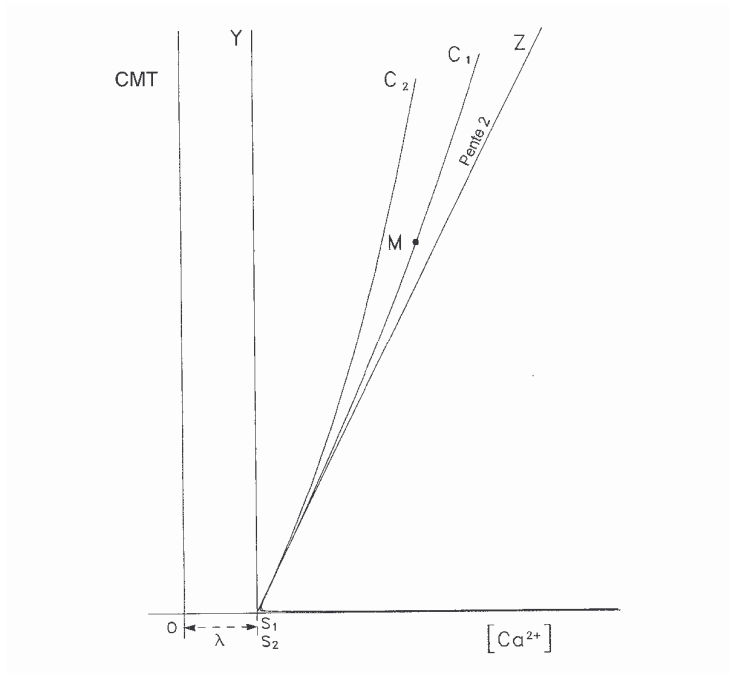


Figure 3: Influence de la température sur l'équilibre calcocarbonique C

Avec C_1 la courbe à $T_1 = 10^\circ\text{C}$ et C_2 la courbe à $T_2 = 60^\circ\text{C}$

CMT : Carbone Minéral Total

2.4.2 Influence de la température sur les conduites de distribution et risques sanitaires associés

2.4.2.1 Inventaire des réseaux d'adduction d'eau potable

➤ Réseau public

La longueur totale des canalisations servant à l'adduction d'eau potable en France est évaluée à environ 560 000 km. La répartition des matériaux les composant est présentée par la Figure 4. Il est important de noter que les canalisations en amiante-ciment, en béton contraint et en ciment renforcé sont rigides et résistent bien aux pressions du sol ainsi qu'à la corrosion [30, 31]. Ces matériaux sont utilisés en revêtement intérieur des tuyaux en acier et fonte ductile.

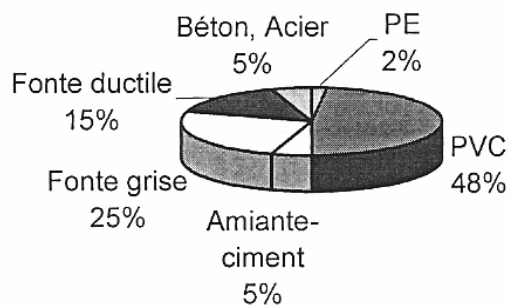


Figure 4: Matériaux utilisés dans le réseaux AEP français

Les tuyaux métalliques aujourd'hui sont systématiquement protégés aussi bien à l'extérieur, par des revêtements thermoplastiques ou thermodurcissables, qu'à l'intérieur par un revêtement en ciment, pour limiter les problèmes de corrosion. Les caractéristiques de l'eau jouent un rôle important sur ces phénomènes. En effet, dans le cas d'une eau agressive, le carbonate de calcium contenu dans le ciment est en partie consommé, ce qui peut mettre à nu l'acier et favoriser la corrosion, l'eau étant directement en contact avec le métal.

Plus légers et plus récents que les autres matériaux, les plastiques, surtout le PVC et le polyéthylène (PE), sont très résistants à la corrosion.

En France, la majeure partie des canalisations a dépassé l'âge des 35 ans [30]. Ces conduites peuvent être à l'origine de phénomènes de détérioration de la qualité de l'eau potable car elles sont exposées depuis longtemps aux variations de qualité physique et chimique (température, pH, minéralisation) de l'eau.

Ces phénomènes de détérioration de la qualité de l'eau potable au sein des canalisations sont de différentes natures. Les eaux peu minéralisées et à faible pH, en contact avec des canalisations en métal ferreux ancien (fonte grise ou acier nu), forment de l'hydroxyde de fer qui teinte l'eau en rouge. Au contact de canalisations en matériaux organiques, des phénomènes de relargage de composés sont possibles. Ils sont dus à une mauvaise polymérisation lors de la fabrication du matériau ou à la migration d'additifs nécessaires à l'élaboration et à la mise en œuvre du plastique.

Aujourd'hui, trois techniques principales permettent le rétablissement de la qualité de l'eau dans les conduites d'adduction : le nettoyage intérieur des conduites (par exemple par hydrocurage), la réhabilitation de ces canalisations (réparation d'une partie de réseau) et le remplacement de celles-ci. Des normes imposent des méthodes et produits à utiliser ou à éviter pour chaque type de canalisation [31].

➤ Réseau privé

L'arrêté du 16/09/2004 modifiant l'arrêté du 29/09/1997 indique les matériaux à utiliser dans les installations fixes de production, de traitement et de distribution d'eau destinée à la consommation humaine. Le cuivre est par exemple recommandé jusqu'au diamètre de 54 mm. Il est aussi mentionné de veiller à la compatibilité des matériaux avec les caractéristiques de l'eau (par exemple pour prévenir les risques de corrosion). Cet arrêté interdit l'utilisation du plomb et déconseille les installations ou réhabilitations de conduites en acier galvanisé [33].

La majeure partie de l'adduction de l'eau destinée à la consommation se faisant dans le réseau public, on étudiera seulement l'effet de la température sur les conduites métalliques (à base de fer de type acier galvanisé ou fonte grise) et synthétiques (PE et PVC principalement).

2.4.2.2 Influence de la température de l'eau sur la corrosion

Plusieurs d'articles traitent des problèmes de corrosion en général et de leurs impacts sur les canalisations, mais très peu se sont intéressés à l'importance de la température sur ce phénomène [33, 34, 35]. En effet, la corrosion d'un réseau résulte toujours de plusieurs paramètres liés aux sols et aux canalisations :

Sols : - la température de la terre,
- la résistivité de la terre,
- la présence de nappes.

Canalisations : - la présence de bactéries sulfato-réductrices,
- la qualité de l'eau (caractère déposant ou agressif, température, pH).

L.S. McNeill et ses collaborateurs [36] se sont intéressés spécifiquement à l'impact de la température sur la corrosion d'une conduite en fer. Ainsi, ils ont mis en valeur le fait que la température influence plusieurs paramètres comme la quantité d'oxygène dissout, la viscosité de l'eau, les taux de diffusion des différents composés produits, leur solubilité, les enthalpies de réaction, et l'activité biologique. Chacun de ces facteurs influence directement et différemment le taux de corrosion de la conduite.

L'auteur présente l'influence de la température sur les paramètres cités précédemment. Ainsi, la solubilité de l'oxygène aura tendance à diminuer lors d'une augmentation de température. La réduction de concentration de l'oxygène aura pour conséquence une limitation du taux de corrosion (l'oxygène jouant souvent le rôle de l'accepteur d'électron). Toutefois, cette baisse de concentration favorise la réaction de Kuch où $FeOOH$ joue le rôle d'accepteur d'électron :



Cette réaction est exothermique, elle est donc limitée par la température.

Les propriétés de la solution sont également modifiées : la viscosité diminue avec l'augmentation de la température (§2.1), ce qui permet un meilleur transport des réactifs (O_2 dissout ou un autre accepteur d'électron) et de certains produits de réaction (Fe^{2+}) entre l'eau et la surface métallique. L'augmentation de la température aura donc tendance dans ce cas à favoriser la corrosion.

Enfin, la température modifie les propriétés thermodynamiques de l'eau comme les coefficients d'activité, la solubilité et les enthalpies des réactions susceptibles de s'y dérouler. Ainsi, les coefficients d'activité augmentent avec la température. La solubilité d'une phase solide augmente ou diminue suivant le signe de l'enthalpie de réaction. Par conséquent, la température aura un effet sur les différentes formes de composés solubles produits et sur leurs

concentrations respectives. La dégradation de la conduite dépendra de ces composés, suivant par exemple, leur activité protectrice ou destructrice sur la conduite. Quelques exemples sont donnés dans le Tableau 8.

Constantes de solubilité	$\Delta H_r^0(25^\circ\text{C})$ [kJ/mol]	$\log K_{25^\circ\text{C}}$	$\log K_{5^\circ\text{C}}$
$Fe(OH)_2 \leftrightarrow Fe^{2+} + OH^-$	19,9	-14,7	-15
$FeCO_3 \leftrightarrow Fe^{2+} + CO_3^{2-}$	-25,7	-10,7	-10,4
$Fe(OH)_3 \leftrightarrow Fe^{3+} + OH^-$	84,6	-38,7	-39,8

Tableau 8 : Evolution de quelques constantes de solubilité avec la température [36]

C. Volk et ses collaborateurs [33] présentent un graphique qui met en valeur une forte corrélation entre température et taux de corrosion (Figure 5). Cette figure récapitule l'action globale de la température sur les différents paramètres vus précédemment.

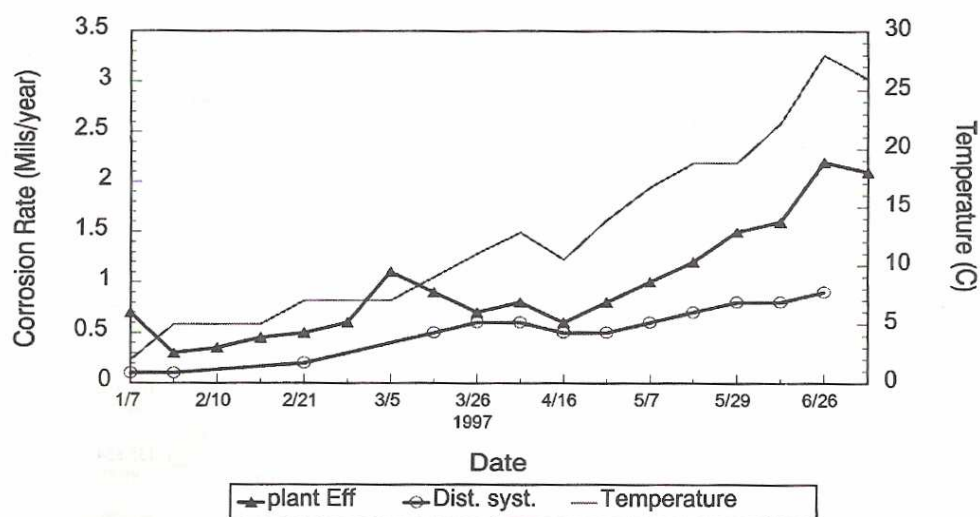


Figure 5: Température de l'eau et taux de corrosion mesurés dans la station d'eau potable et dans le réseau d'adduction [33]

Ainsi, l'augmentation de la température agit simultanément en favorisant le phénomène de corrosion des conduites et en déplaçant la courbe d'équilibre calcocarbonique de l'eau, provoquant un dépôt de carbonate de calcium à leur surface. Ces deux phénomènes agissent de manière antagoniste. Toutefois, la composition de l'eau, et donc ses caractéristiques initiales (titre calcique) joue un rôle majeur. En présence d'eaux très douces, la corrosion peut devenir le caractère dominant et endommager les conduites d'adduction.

2.4.2.3 Risques sanitaires liés au phénomène de corrosion

Ils sont principalement de trois natures :

- l'oxyde de fer peut teinter l'eau d'une couleur rougeâtre (désagréable pour les consommateurs),
- certaines sections du réseau d'adduction sont endommagées (corrosion),
- une partie du chlore injecté en fin de filière de traitement dans le but de maintenir une désinfection tout au long du réseau est consommée par les ions ferreux issus de la corrosion des conduites (§2.4.3.2).

2.4.2.4 Influence de la température de l'eau sur les conduites synthétiques

Peu d'articles traitent de l'influence d'une augmentation de température sur la qualité de l'eau dans des conduites synthétiques. Toutefois, il est connu que ces matériaux relarguent des composés organiques volatils (COV) susceptibles de migrer dans l'eau potable. Ainsi Skjevraak et ses collaborateurs [37] ont mené une étude sur ces composés issus de conduites en PEHD (polyéthylène haute densité), PVC et PEX (crossbonded polyethylene). Il s'agit de composés appartenant aux familles des esters, des aldéhydes, des cétones, des trépanoïdes, des aromatiques et du toluène. Au cours de cette étude comme lors d'autres recherches [38], l'influence de la température n'a pas véritablement été mise en évidence.

2.4.2.5 Risques sanitaires liés au phénomène de relargage

Ces COV étant présents en quantité extrêmement faible, de l'ordre du nanogramme/litre, leur action principale est l'altération de la qualité organoleptique de l'eau décelable par les consommateurs, même à faibles concentrations [37].

2.4.3 *Influence de la température sur les produits de désinfection et risques sanitaires associés*

La dégradation microbiologique de l'eau (§ 2.2) est un des problèmes les plus importants auxquels sont confrontées les compagnies de distribution d'eaux et les collectivités. Celles-ci utilisent majoritairement le chlore comme désinfectant. Afin de permettre une désinfection suffisante, elles font en sorte de maintenir un taux de chlore libre de 0,1 mg/l dans l'eau distribuée, conformément à la réglementation en vigueur. Toutefois, le chlore injecté dans l'eau à la sortie de la station de potabilisation disparaît en partie avant son arrivée chez le consommateur. Cette chute de concentration est due à trois facteurs principaux, déterminés de manière qualitative et quantitative dans un article rédigé par Kiéné et ses collaborateurs :

- la qualité de l'eau initiale,
- la présence de biofilms,
- la nature des canalisations (synthétiques ou métalliques).

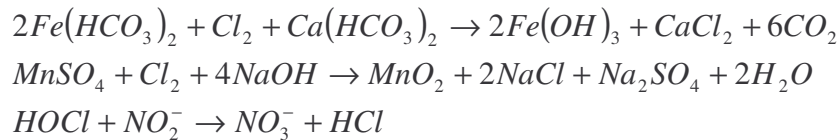
2.4.3.1 Influence de la qualité de l'eau initiale et de la température sur la demande en chlore

Plusieurs auteurs ont démontré que les réactions d'oxydation successives dans les réservoirs et les conduites de distribution sont la principale cause de la diminution de la concentration en chlore dans l'eau de distribution. Les principaux paramètres agissant sur ces réactions sont :

- la concentration initiale en chlore (Cl_2),
- la température,
- la matière organique totale (COT).

Les auteurs ont cherché, de manière empirique, des méthodes permettant de déterminer les concentrations en chlore d'une eau en fonction de son traitement initial, de sa teneur en COT et de sa température. Ils ont pu ainsi proposer des équations permettant de calculer les chutes de concentration de chlore dans l'eau. Viera et ses collaborateurs [39] proposent un modèle utilisant une cinétique de premier ordre se décomposant en deux phases distinctes. Ces deux phases sont caractérisées par deux constantes cinétiques : k'_1 est associée à une première phase de chute rapide de concentration de chlore et k'_2 est utilisée pour une seconde phase correspondant à une chute plus lente de la concentration du désinfectant.

Le chlore réagit tout d'abord facilement, et avec une cinétique rapide, avec des matières inorganiques oxydables présentes dans l'eau traitée comme le fer, le manganèse ou les nitrites. Les équations suivantes indiquent les réactions possibles utilisant du chlore dans l'eau potable :



A la fin de l'étude faite en laboratoire, la relation empirique permettant de déterminer l'influence de la température et de la qualité de l'eau initiale sur la concentration en chlore est la suivante :

$$C = x \cdot C_0 \cdot \exp(-k_1' t) + (1 - x) \cdot C_0 \cdot \exp(-k_2' t)$$

avec :

C_0 : concentration initiale en chlore,

t : temps de contact

x : fraction initiale de chlore ayant subi une déconcentration avec la constante de réaction k_1' .

Toutefois, la concentration initiale de chlore étant faible, x est faible et la première partie de l'équation est négligeable [39]. Elle se réduit donc de la manière suivante :

$$C = C_0 \cdot \exp(-k_2' t) [mg/l] \quad \text{avec} \quad k_2' = 0,00209 \cdot COT \cdot \exp\left(-\frac{848}{T}\right) \cdot \frac{4,839}{C_0} [\text{min}^{-1}]$$

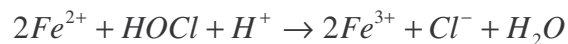
D'autres auteurs comme L. Kiéné [40] proposent également des relations empiriques semblables. Ainsi, pour des températures comprises entre 5 et 25°C et des valeurs de COT comprises entre 1 et 3 mg/l, l'expression permettant de déterminer la chute de concentration de chlore due exclusivement à la qualité de l'eau est la suivante :

$$C = C_0 \cdot \exp(-k_2' t) [mg/l] \quad \text{avec} \quad k_2' = 1,8 \cdot 10^6 \cdot COT \cdot \exp\left(-\frac{6050}{T}\right) [\text{min}^{-1}]$$

Il est enfin précisé que les valeurs des constantes utilisées pour le calcul de k' dépendent des valeurs prises par le COT et la température de l'eau. Pour une température légèrement plus élevée et des valeurs de COT différentes, ces constantes sont à redéfinir.

2.4.3.2 Influence de la corrosion et de la température sur la demande en chlore

Les matériaux métalliques en contact avec l'eau sont souvent endommagés par des phénomènes de corrosion. L'intensité de cette dégradation est liée à plusieurs paramètres comme la température, le pH, l'équilibre calcocarbonique ou la présence de biofilms [40]. En présence de conduites en fer, celui-ci peut s'oxyder en ions ferreux Fe^{2+} qui peuvent être oxydés en ions ferriques Fe^{3+} comme suit :



La consommation de chlore, sous forme désinfectante, due au phénomène de corrosion dépend donc de la présence d'ions ferreux, eux-mêmes directement liés au « taux de corrosion » C_r . Elle peut être décrite par une réaction d'ordre zéro d'après P. Viera et al [40] :

$$\frac{dC}{dt} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{\tau} \cdot \frac{M_{Cl}}{M_{Fe}} \cdot \rho_{Fe} \cdot \frac{C_r}{D} [mg/(l \cdot s)]$$

avec :

$$\tau = 3,6 \cdot 10^7 \text{ s/an}$$

t : temps en secondes

D : diamètre du tuyau (m)

M : masses molaires ($g \cdot mol^{-1}$)

ρ_{Fe} : densité du fer ($7860 kg/m^3$)

C_r : taux de corrosion ($\mu m/an$)

Cette formule permet de mettre en évidence le fait qu'une augmentation de la température de l'eau engendre une augmentation du taux de corrosion et par conséquent une augmentation de la demande en chlore.

2.4.3.3 Bilan quantitatif des différents phénomènes sur la demande en chlore

Les deux paragraphes précédents ont permis de mettre en valeur qualitativement la relation entre la consommation de chlore, la qualité de l'eau étudiée, le phénomène de corrosion et l'impact de la température. Il est également intéressant de comparer quantitativement l'importance de ces phénomènes et la demande globale en chlore.

La Figure 6 permet de comparer les différentes consommations en chlore en fonction du matériau des canalisations. Ainsi, pour les conduites métalliques, 70% de la consommation en chlore est due à des facteurs susceptibles de varier avec la température, à savoir la qualité de l'eau et la corrosion, contre seulement 30% dans le cas d'une conduite synthétique.

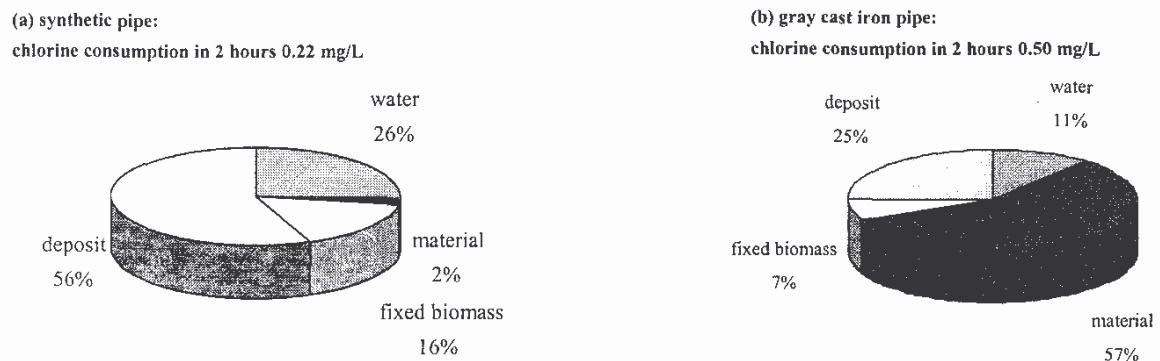


Figure 6: Comparaison des consommations de chlore suivant le type de matériaux utilisé

(D = 250 mm, t = 2 h, Co= 1 mg/l) [40]

2.4.3.4 Influence de la température sur la formation des sous-produits de désinfection

Tous les désinfectants chimiques entraînent la formation de sous-produits de désinfection. Ces derniers ont été découverts pour la première fois en 1974. La plupart des recherches ont été effectuées sur les sous-produits de désinfection chlorés liés à l'utilisation intensive de chlore. Il en existe des centaines [41]. La nature de l'eau détermine les types de sous-produits susceptibles de se former. Les plus connus sont les trihalométhanes (THM), les acides acétiques halogénés (HAA), les halo-acétonitriles (HAN), les haloaldéhydes, les halocétones ainsi que le 3-chloro-4(dichlorométhyl)-5-hydroxy-2(5H)furanone ou MX, découverts en 1986.

Les THM et HAA ont été les premiers sous-produits identifiés. Ils forment la majeure partie des sous-produits de chloration. Par voie de conséquence, il existe aujourd'hui beaucoup de documentation à leur sujet, et peu dans le cas des autres sous-produits déjà énumérés précédemment. Pour ces raisons, la suite de ce paragraphe traitera principalement des THM et dans une moindre mesure des HAA.

Les THM de forme chimique générale CHX_3 , peuvent se décliner sous plusieurs formes, suivant leur teneur en chlore et en brome : trichlorométhanes $CHCl_3$, bromures de méthylène

CHBrCl₂, chlorures de méthylène CHBr₂Cl, tribromométhanes CHBr₃.

Les HAA sont des acides acétiques composés de trois atomes d'hydrogène, fixés à un groupe COOH. Les atomes H de l'acide acétique sont partiellement remplacés par des atomes d'halogènes. Les HAA peuvent se trouver dans l'eau dans des concentrations plus élevées que les THM. Ceci est déterminé soit par la température, soit par la valeur du pH de l'eau. La proportion de THM et de HAA formés dépend du pH : à pH faible, les HAA sont majoritaires, alors qu'ils sont minoritaires à pH élevé.

Enfin, il est connu que les HAA contribuent à la formation des THM lors de leur décomposition.

De manière générale, les auteurs citent comme facteurs principaux de formation de THM et HAA, le COT, le pH, la température, la concentration initiale en Cl₂ et le temps de contact t.

R.J. Garcia Villanova et ses collaborateurs [42] ont étudié l'influence de la température entre 6 et 26°C sur la formation des THM au sein d'un réseau d'eau potable de la ville de Salamanque. Ils ont démontré une forte corrélation linéaire entre température et concentration en THM ($p=0,0001$). Ainsi, comme le montre la Figure 7, la concentration des sous-produits de chloration augmente avec la température jusqu'à $T = 19^\circ\text{C}$. A partir de cette température, la concentration en THM a tendance à diminuer. Ce phénomène est aussi bien visible sur la Figure 8 où ont été tracées les courbes correspondantes au modèle mathématique de prédiction des THM dans le réseau pour les différents pH de l'eau. La forme de ce modèle est la suivante :

$$\ln \text{CHCl}_3 (\mu\text{g/l}) = \alpha + \beta_3 \cdot T^3 + \beta_4 \cdot T^4 + \gamma \cdot \text{pH}^2 + \delta + \varepsilon$$

avec :

δ : dépend du point de prélèvement

ε : terme d'erreur

La température $T = 19^\circ\text{C}$ est estimée comme étant la température à partir de laquelle la volatilité des THM dépasse leur taux de formation dans l'eau. Le polluant passe donc de la phase liquide à gazeuse plus facilement. De ce fait, une pollution de l'air à proximité des eaux chaudes ayant de fortes teneurs en THM est possible, d'où éventuellement une exposition du consommateur non plus seulement par la voie orale mais aussi par inhalation.

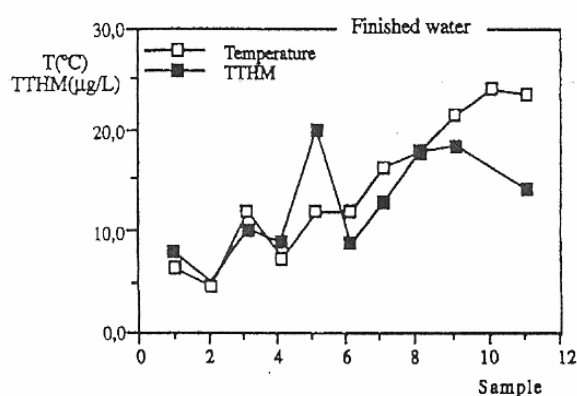


Figure 7: Influence de la température sur la production des THM [42]

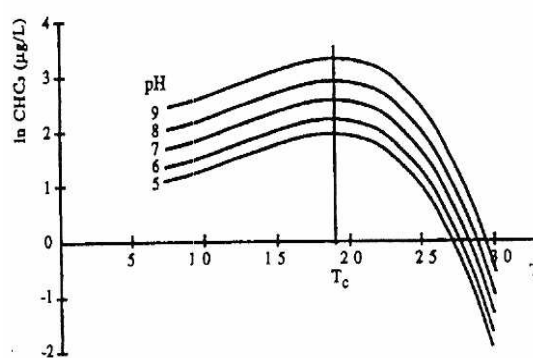


Figure 8: Volatilité des THM et température modélisation mathématique [42]

M.J. Rodriguez et son équipe [43] ont insisté sur les difficultés rencontrées pour définir clairement l'importance des différents paramètres susceptibles d'agir sur les concentrations de

THM, comme le COT, la température, le pH et le temps de contact dans les tuyaux d'adduction. Par conséquent, la détermination d'un modèle mathématique multivarié est difficile. Les auteurs ont toutefois cherché des corrélations entre THM et température en fonction des différentes localités où ont eu lieu les prélèvements. Tout comme dans le cas de l'article précédent, la formation des THM augmente avec la température comme le présente la Figure 9.

Les auteurs proposent les corrélations suivantes :

$$THM_{S(Ext)} = 0,020 \cdot (THM_{S(TP)})^2 + 0,078 \cdot (T^{\circ}C)^2 + 22,4$$

$$THM_{C(Ext)} = 0,533 \cdot (THM_{C(TP)}) + 0,000161 \cdot (T^{\circ}C)^4 + 23,4$$

avec : S Sainte-Foy
 C Charlesbourg
 (TP) en sortie de station d'eau potable
 (Ext) en extrémité de réseau

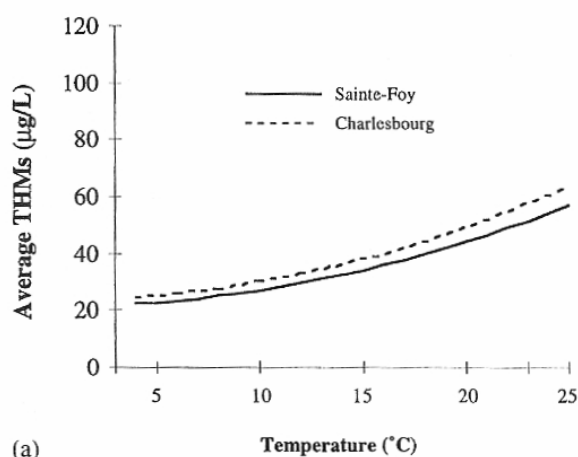


Figure 9 : Influence de la température et du lieu des concentrations des THM [43]

Enfin, Abdullah et ses collaborateurs [38] ont essayé de modéliser les concentrations de THM en fonction des différents paramètres vus précédemment au sein de trois réseaux d'adduction en Malaisie. L'intervalle de température étudié [26,5°C ; 32,2°C] correspond à notre domaine d'étude. Les auteurs trouvent de bonnes corrélations entre THM, COT et pH, et dans une moindre mesure avec la teneur en chlore de l'eau. Contrairement aux études précédentes, aucune corrélation n'est démontrée avec la température. Pour expliquer ce phénomène, les auteurs reprennent les recherches de R.J. Garcia Villanova [42] et indiquent une plus grande volatilité des THM que le taux de formation de ces derniers dans leur domaine de température.

2.4.3.5 Risques sanitaires liés aux sous-produits de désinfection

➤ Voies d'absorptions et métabolisme

L'ingestion constitue une voie importante d'absorption des THM contenus dans l'eau du robinet. L'utilisation de l'eau à des fins domestiques, particulièrement lors de douches ou de bains contribue également à l'absorption des THM par inhalation et par contact cutané [37]. Pour des concentrations de chloroforme dans l'eau inférieures à 50 µg/l, l'absorption par inhalation et contact cutané lors de la prise d'une douche de 10 minutes serait égale ou supérieure à l'absorption par ingestion d'un litre d'eau chlorée. D'un point de vue

toxicologique, les THM absorbés par ingestion sont métabolisés dans le foie alors que ceux inhalés ou absorbés par voie cutanée se retrouvent directement dans la circulation sanguine. Par ailleurs, ces deux derniers modes d'absorption ne sont pas significatifs pour tous les sous-produits de chloration. En effet, les HAA ne sont pas volatils et possèdent un faible coefficient de perméabilité au niveau cutané. Pour ces substances, l'ingestion demeure la seule voie d'absorption.

Après ingestion ou inhalation, les THM sont absorbés au niveau gastro-intestinal ou pulmonaire. Les concentrations les plus importantes se retrouvent dans les tissus adipeux, le foie et les reins. Une partie des THM absorbés est exhalée sous forme inchangée. Le reste est oxydé en composés dihalocarboxyliques très réactifs (ex : phosgène), puis hydrolysés en dioxyde ou monoxyde de carbone. Les données suggèrent que ces composés, avant hydrolyse, seraient responsables des effets toxiques des THM [35].

➤ Données toxicologiques et épidémiologiques [41]

- Intoxication aiguë

Les concentrations mesurées dans l'eau potable sont beaucoup trop faibles pour observer une dépression du système nerveux, des manifestations cardiaques ou des atteintes aux niveaux du foie et des reins caractérisées chez l'animal. La dose correspondante à un effet sédatif pour l'homme se situe à environ 54 mg/kg. Cette dose est de façon approximative 5 000 fois plus élevée que celle à laquelle la population est généralement exposée.

- Effet sur la reproduction et le développement

Des malformations congénitales, un faible poids à la naissance et la mort d'embryons ont été observés après l'administration de fortes doses de différents sous-produits de la chloration chez l'animal. Par ailleurs, certaines études épidémiologiques soulèvent la possibilité d'association entre l'exposition aux THM par la consommation d'eau potable pendant la grossesse et certains effets comme des retards de la croissance fœtale, des avortements spontanés et des malformations congénitales. Toutefois, les preuves appuyant ces effets demeurent minces.

- Intoxication chronique

Tout comme dans le cas de l'intoxication aiguë, une exposition prolongée à de fortes doses de THM (plusieurs mg/kg) est nécessaire pour observer une toxicité du type hépatique ou rénale. Les doses concernées ne permettent pas d'envisager de telles expositions chez l'homme.

- Effets cancérogènes

De nombreuses études épidémiologiques ont été menées afin d'évaluer le risque de cancer chez les populations exposées à ces produits. Les excès de cancer de la vessie observés demeurent faibles ($RR \leq 1,5$) chez des populations exposées pendant plus de 20 ans. Cependant, des contradictions ont été relevées concernant le lien de causalité entre exposition et maladie [29]. Des études portant sur d'autres cancers (colon et rectum) indiquent des résultats encore moins probants.

Malgré un risque relatif relativement faible, compte tenu de la taille des populations exposées, l'impact est important. A titre d'exemple, l'US EPA estime que 2 232 cas de cancer de la vessie pourraient être évités annuellement aux Etats-Unis en abaissant la norme fédérale pour les THM de 20 µg/l (en passant de 100 µg/l à 80 µg/l).

➤ Normes et recommandations

La norme prévue par le Code de la Santé Publique pour les THM totaux est de 100 µg/l, tandis que les Etats-Unis sont les plus restrictifs en la matière. Cette norme est considérée

comme un indicateur d'un potentiel de toxicité associé à l'ensemble des sous-produits de la chloration. En effet, la réduction de la concentration des THM est le plus souvent synonyme de réduction de la concentration des autres sous-produits de la chloration et des risques toxiques associés.

Les normes choisies constituent un compromis entre la capacité des stations de traitement d'eau potable à réduire les concentrations de sous-produits, sans compromettre la désinfection et les bénéfices pour la santé associés à une réduction de ces substances dans l'eau potable.

Normes	Valeurs
USA	80 $\mu\text{g} / \text{l}$
Canada (Recommandation fédérale)	100 $\mu\text{g} / \text{l}$
Québec	80 $\mu\text{g} / \text{l}$
France	100 $\mu\text{g} / \text{l}$
OMS (Critère)	200 $\mu\text{g} / \text{l}$ (moyenne annuelle THM)

Tableau 9 : Normes concernant les THM totaux dans l'eau d'alimentation [41]

Enfin, sur le plan physico-chimique, il a été démontré qu'une élévation de la température de l'eau au-delà de 25°C peut avoir deux conséquences. D'une part, elle peut diminuer la qualité organoleptique de l'eau aux yeux du consommateur, et d'autre part, elle peut avoir un impact sur la production des THM, qui à cette température, exposent les consommateurs non seulement par voie orale mais aussi par inhalation.

2.5 Influence de la température sur les qualités organoleptiques de l'eau

Comme nous l'avons vu précédemment, la présence d'algues (actinomycètes et cyanobactéries) et la corrosion des réseaux sont à l'origine d'odeurs et de goûts désagréables pour le consommateur.

Or, une étude [44] a montré que la température a une influence très importante sur l'intensité du goût et le degré d'appréciation de l'eau de boisson par les consommateurs. Ainsi, différentes eaux, plus ou moins minéralisées, ont été portées à quatre températures différentes : 0, 22, 37 et 55°C, 22°C étant considéré comme la température ambiante et 37°C comme la température corporelle. Des consommateurs ont classé ces eaux en fonction de l'intensité de leur goût et du degré d'appréciation. Les conclusions sont les suivantes : plus l'eau a du goût, moins les consommateurs l'apprécient et l'intensité du goût suit l'évolution présentée par la Figure 10.

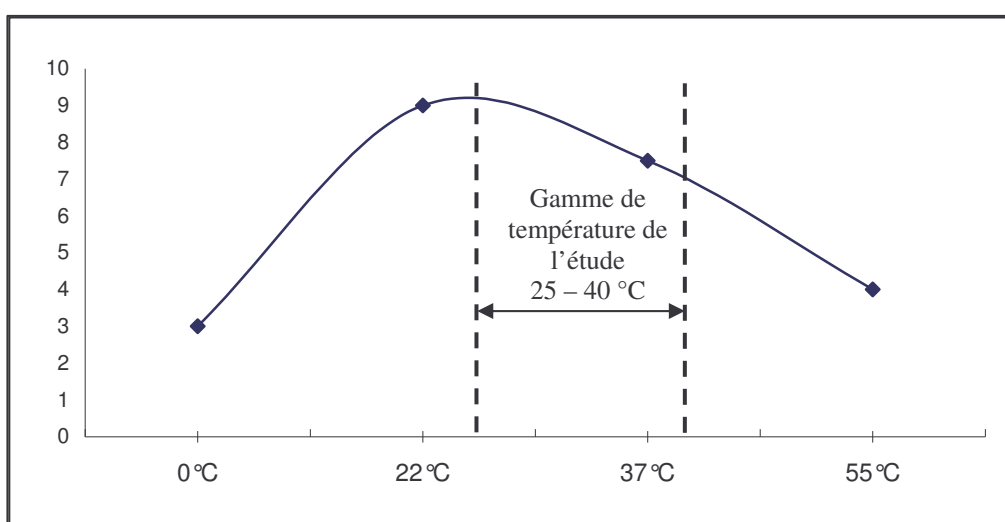


Figure 10 : Intensité du goût de l'eau en fonction de la température [44]

Ainsi, c'est autour de la gamme de température concernée par notre étude (25-40°C) que l'eau a le plus de goût et qu'elle est la moins appréciée des consommateurs.

3. Enquête « Eaux tièdes »

Après avoir étudié les modifications chimiques et microbiologiques de l'eau engendrées par une élévation de température et caractérisé les risques sanitaires associés, nous avons jugé nécessaire de réaliser un inventaire des situations rencontrées. Pour se faire, il aurait été intéressant de mener une enquête, non seulement en France mais également dans certains pays chauds. Cependant, compte tenu du temps imparti relativement restreint et de la difficulté des prises de contact, cette enquête a été limitée au territoire français.

3.1 Enquête DGS 2005 « Captages chauds et légionelles »

En 2005, une enquête avait été menée par la DGS auprès des DDASS et des Direction de la santé et du développement social (DSDS) sur le thème « Captages chauds et légionelles ». Les DDASS concernées avaient réalisé des prélèvements tri-mensuels pour analyse des légionelles. Les questions posées concernaient uniquement les forages chauds : présence ou non de légionelles, température de l'eau, débit journalier du forage, population desservie...

Après analyse des résultats de cette enquête, il nous est apparu nécessaire d'envoyer un questionnaire à l'ensemble des DDASS et DSDS car les questions posées dans l'enquête « Captages chauds » ne permettaient pas de cerner totalement notre problématique qui concerne l'ensemble des modifications de la qualité de l'eau liées à une température élevée quels que soient le type de ressource et le mode de distribution.

Le questionnaire relatif à l'enquête « Captages chauds et légionelles » est présenté en Annexe I. Les résultats de cette enquête ont été intégrés aux résultats de l'enquête « Eaux tièdes ».

3.2 Elaboration du questionnaire d'enquête « Eaux tièdes »

Nous avons alors élaboré un questionnaire permettant de dresser un état des lieux, le plus exhaustif possible, des situations rencontrées par les DDASS en matière de dépassement du paramètre température.

Ce questionnaire s'intitule « Eaux tièdes ». Il est divisé en deux parties. La première concerne les eaux brutes, utilisées pour produire l'eau potable, qu'il s'agisse d'une ressource souterraine ou d'une ressource superficielle. La seconde partie concerne les eaux distribuées, après potabilisation, depuis les réservoirs jusqu'aux robinets des consommateurs. Si les DDASS n'avaient eu connaissance d'aucun dépassement de température sur la ressource ou dans le réseau, le questionnaire prenait fin. Dans le cas contraire, chacune des deux parties comportaient une dizaine de questions, certaines communes aux deux parties, d'autres spécifiques à l'une ou à l'autre.

Les questions principales sont présentées dans le Tableau 10 et le questionnaire en Annexe II.

Questions concernant un dépassement de température sur la ressource	Questions concernant un dépassement de température dans le circuit de distribution
1) S'agit-il d'une ressource souterraine ou superficielle ?	1) Le dépassement est-il occasionnel, saisonnier ou permanent ?
2) Le dépassement est-il occasionnel, saisonnier ou permanent ?	2) Où ce dépassement a-t-il été mis en évidence ? (réservoirs, robinets municipaux ou particuliers...)
3) Comment ce dépassement a-t-il été mis en évidence : lors du dimensionnement de la filière, lors des analyses réglementaires, par une plainte d'un usager ?	3) Comment ce dépassement a-t-il été mis en évidence : lors des analyses réglementaires, par une plainte d'un usager ?
4) Des actions ont-elles été mises en place ? si oui, lesquelles ?	4) Des actions ont-elles été mises en place ? si oui, lesquelles ?
5) Des non-conformités bactériologiques ou physico-chimiques ont-elles été induites par ce(s) dépassement(s) ?	5) Des non-conformités bactériologiques ou physico-chimiques ont-elles été induites par ce(s) dépassement(s) ?

Tableau 10 : Récapitulatif du questionnaire de l'enquête « Eaux tièdes »

Ce questionnaire a été envoyé par mail aux quatre-vingt quatorze ingénieurs du génie sanitaire (IGS) des DDASS (France métropolitaine) ainsi qu'aux 5 DSDD (Corse, Guadeloupe, Martinique, Guyane et Ile de la Réunion) le 16 janvier 2007. Quatre relances ont été envoyées jusqu'au 16 février. L'ensemble des résultats est présenté dans le paragraphe suivant.

3.3 Résultats de l'enquête

L'ensemble des résultats est présenté dans un tableau de synthèse en Annexe III.

A la fin de la période d'enquête (du 16 janvier au 16 février 2007), soixante-neuf questionnaires ont été retournés, soit un taux de réponse de 70 %.

Parmi ces soixante-neuf départements, vingt-huit ont déclaré n'avoir jamais eu à gérer un dépassement du paramètre température, soit près de 40% (voir Figure 11).

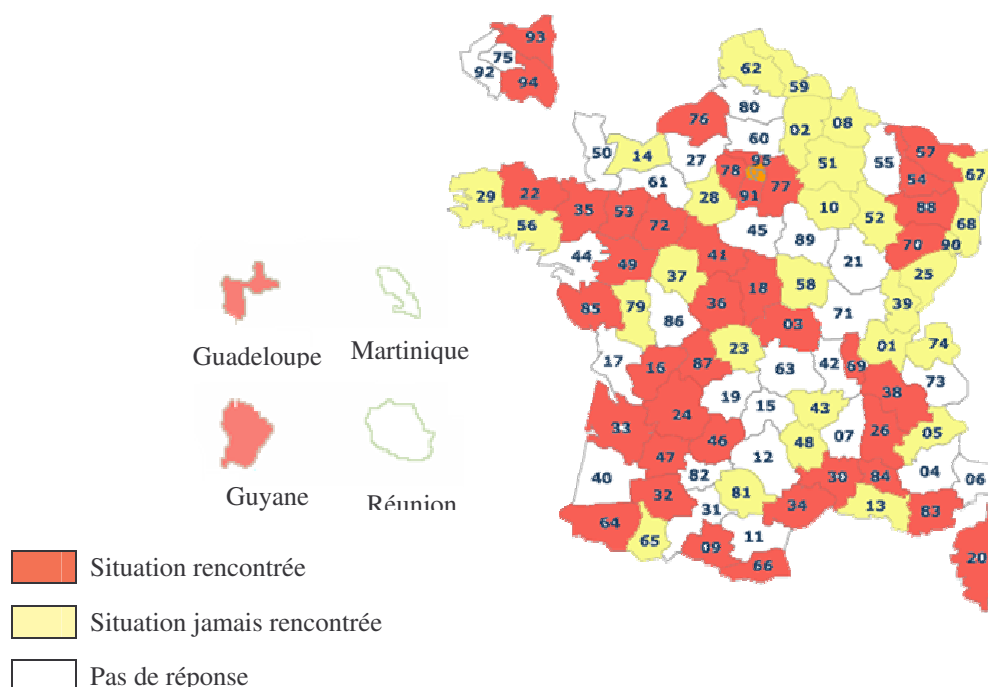


Figure 11 : Carte de répartition des situations rencontrées concernées par l'enquête « Eaux tièdes »

Les résultats de cette enquête doivent cependant être analysés prudemment. En effet, il est assez étonnant que 40% des départements n'aient jamais connu de dépassement de température alors que les phénomènes de canicule touchent la totalité du territoire métropolitain, au moins depuis l'été 2003. D'autre part, certains départements connus pour leur climat estival chaud et sec disent ne pas avoir rencontré cette situation contrairement à leurs départements limitrophes (départements des Hautes-Pyrénées (65) et des Bouches-du-Rhône (13)). Ce phénomène aurait pu s'expliquer si les ressources en eau brute de ces départements n'étaient que souterraines, or ce n'est pas le cas.

Nous avons étudié les réponses des trente-neuf questionnaires « positifs ». Parmi ces réponses, deux groupes de situations se distinguent :

- les départements possédant des forages chauds dont la température est en permanence supérieure à 25°C ;
- les départements ayant à gérer des dépassements saisonniers ou occasionnels liés aux conditions climatiques exceptionnelles de ces dernières années.

3.3.1 Les forages chauds

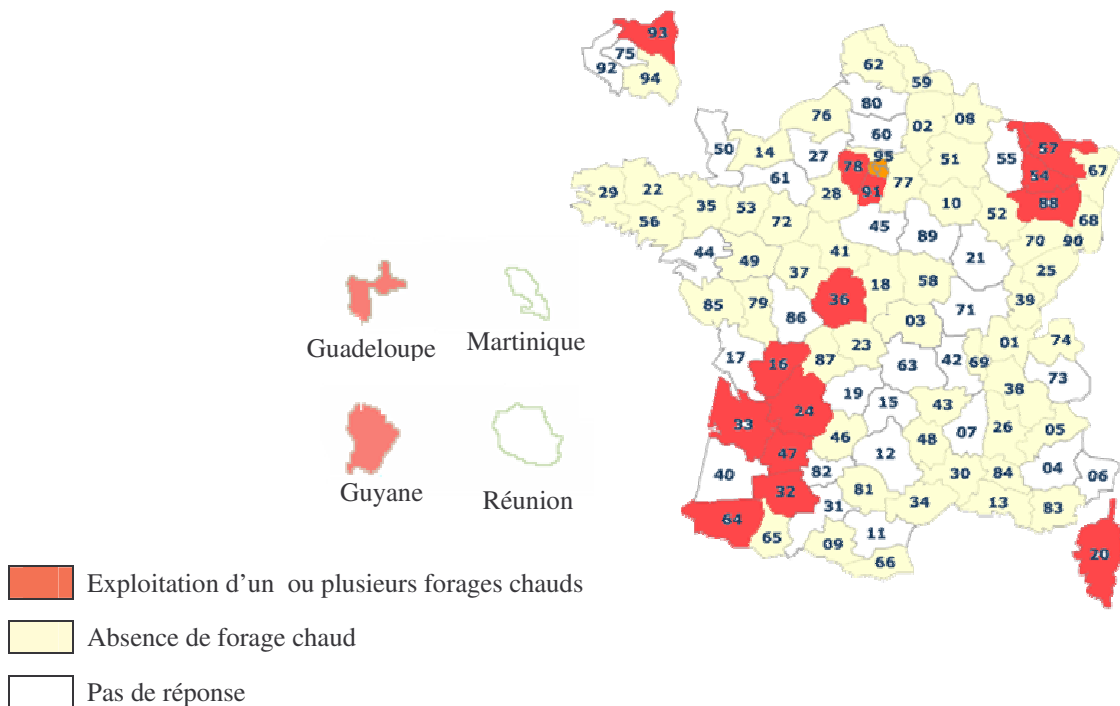


Figure 12 : Carte présentant les réponses au questionnaire concernant les forages chauds

Seize départements ont déclaré exploiter un ou plusieurs forages chauds. Dans la plupart des cas, ces forages ont été mis en service alors que la température de l'eau était parfaitement connue. Dans ce cas, des procédures de refroidissement des eaux avant distribution sont mises en place : soit l'eau est refroidie au contact de l'air ambiant, soit elle est mélangée, après traitement, à une eau plus froide.

Le Tableau 11 présente les différents cas recensés.

Département	Nombre de forages	Gamme de température (°C)	Technique de refroidissement
Charente (16)	1	Non renseignée	Mélange à une source froide
Corse (20)	Plusieurs	Non renseignée	Non renseignée
Dordogne (24)	3 + un projet	25 – 26 (projet ~ 30°C)	Mélange à des ressources froides en aval
Gers (32)	5	Non renseignée	Tours aéro-réfrigérantes
Gironde (33)	19	25,5 – 34	Mélange à des ressources froides après traitement
Indre (36)	1	30	Mélange à une ressource froide dont on souhaitait abaisser la teneur en nitrates
Lot-et-Garonne (47)	Plusieurs	Non renseignée	Refroidissement par déversement en haut d'une tour dans un flux d'air ambiant montant
Meurthe-et-Moselle (54)	4	25 – 35	Mélange à des ressources froides et/ou refroidissement naturel dans le circuit de distribution
Moselle (57)	Plusieurs	Non renseignée	Mélange et/ou mise à l'équilibre avec air ambiant
Pyrénées-Atlantique (64)	1	Non renseignée	Aération et refroidissement dans la canalisation de transport avant mise en distribution
Yvelines (78)	Plusieurs	25 – 27	Non renseignée
Vosges (88)	3	Non renseignée	Non renseignée
Essonne (91)	Plusieurs	Non renseignée	Non renseignée
Seine-Saint-Denis (93)	2	Non renseignée	Mélange à une ressource froide
Guyane	Plusieurs	Non renseignée	Non renseignée
Guadeloupe	Non renseigné	Non renseignée	Non renseignée

Tableau 11 : Ensemble des départements recensés comme utilisant des eaux de forages dont la température est supérieure à 25°C

Pour ces ressources souterraines dont la température est supérieure à 25°C, l'exploitation du forage est soumise à autorisation auprès du ministère de la Santé sur avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France.

3.3.2 Les dépassements de température « saisonniers »

Il y a quelques années, les principaux départements touchés par des dépassements ponctuels du paramètre température étaient ceux du sud de la France. En effet, entre juin et septembre, les ressources ont tendance à se réchauffer et les circuits de distribution, s'ils sont mal isolés, peuvent favoriser une élévation de température parfois importante. Depuis l'été 2003, les épisodes caniculaires se multiplient et de nombreux départements sont désormais confrontés à des dépassements de température de la ressource en eau ou dans le circuit de distribution durant ces périodes « chaudes ».

La carte suivante présente l'ensemble des départements ayant connu un dépassement de température durant les périodes de canicule entre 2003 et 2006. Les DOM ne sont pas représentés car ils ne sont pas concernés par les épisodes caniculaires (du fait de leur situation en zone tropicale ou équatoriale, la limite de qualité de 25°C définie dans l'annexe 13-1 du Code de la Santé Publique ne s'applique pas aux DOM).

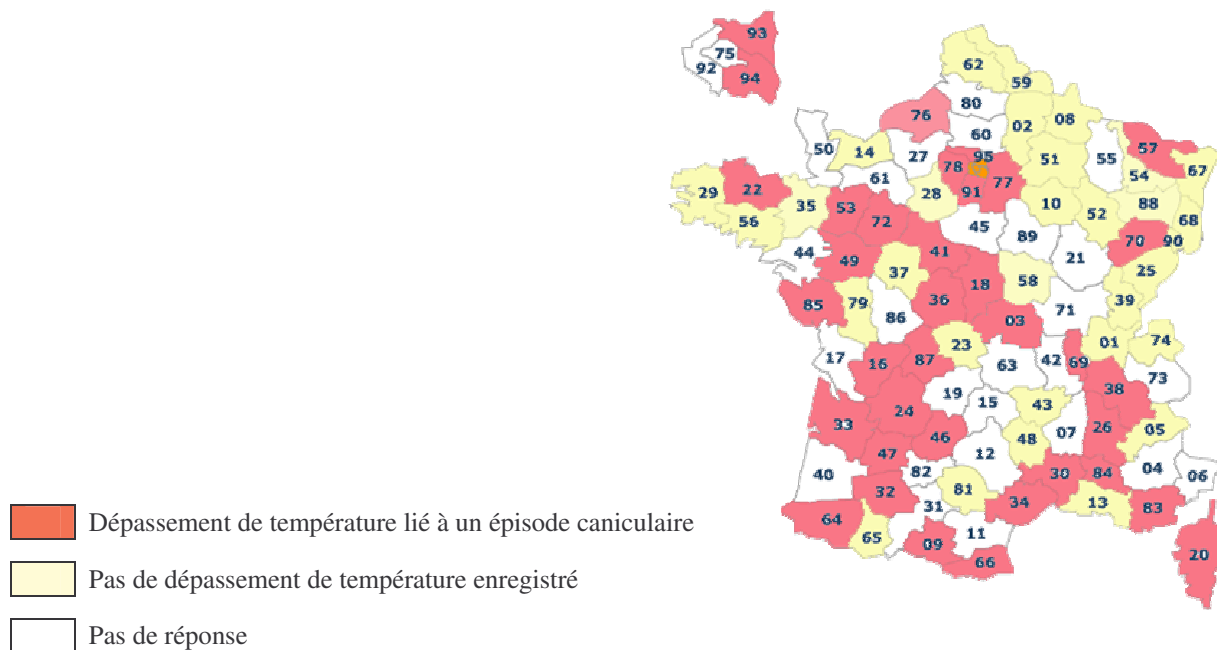


Figure 13 : Carte présentant les départements ayant rencontré un dépassement de température de l'eau lié à un épisode caniculaire

Parmi ces dépassements, il est important de distinguer ceux qui ont été enregistrés sur la ressource en eau brute de ceux qui ont été enregistrés sur le réseau de distribution. En effet, les actions correctives et/ou préventives envisageables sont différentes et les conséquences en matière de santé également.

La carte suivante permet de différencier ces deux types de dépassements.

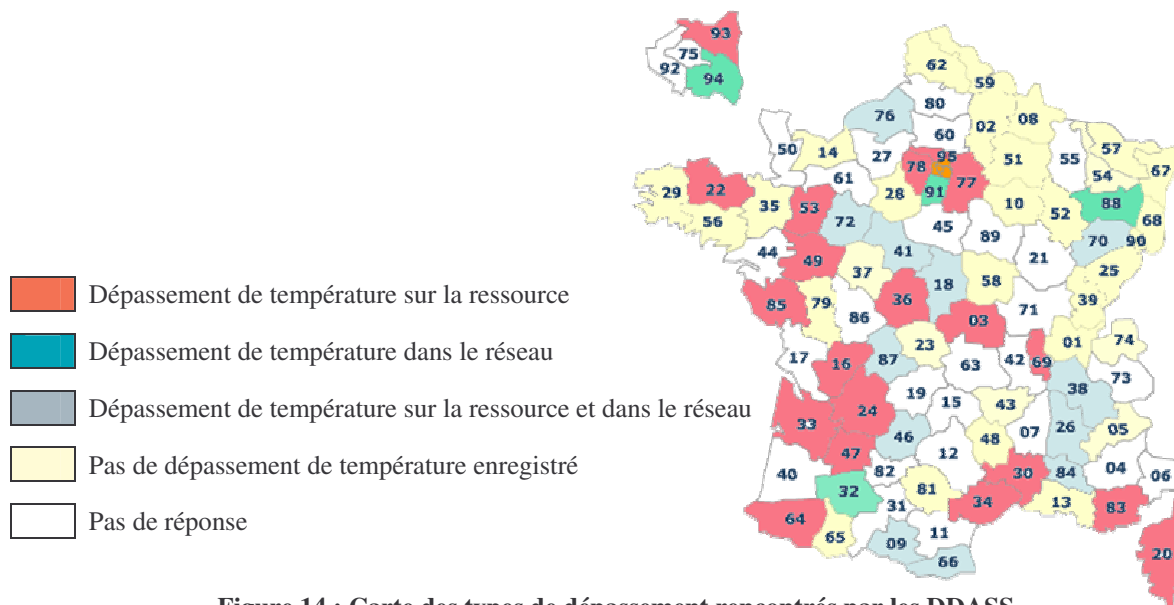


Figure 14 : Carte des types de dépassement rencontrés par les DDASS

3.3.3 Inventaire des problèmes sanitaires rencontrés

Peu de DDASS ont déclaré avoir rencontré de réels problèmes sanitaires liés aux dépassements de température. En effet, il ressort de notre enquête que ces dépassements sont très rarement associés à des non-conformités bactériologiques et physico-chimiques.

Les quelques dépassements bactériologiques enregistrés sont présentés dans le tableau suivant :

Département	Nombre de dépassements	Lieu de détection	Paramètres concernés
Allier (03)	3	réseau	Bactéries coliformes (2) Entérocoques (1)
Gers (32)	Plusieurs	eaux de forages	Légionelles
Gironde (33)	1	Sortie de déferrisation (eau de forage)	Légionelles
Haute-Vienne (87)	1	Réseau	Légionelles

Tableau 12 : Départements ayant enregistrés des dépassements bactériologiques liés à une température de l'eau supérieure à 25°C

Concernant les non-conformités physico-chimiques, seule la DDASS de Meurthe et Moselle nous a indiqué avoir réalisé un suivi des THM sur l'eau de la Communauté Urbaine du Grand Nancy où la ressource dépasse les 25°C chaque été. Son exploitation ne pose pas de problème d'un point de vue bactériologique mais une élévation de la concentration en THM en lien direct avec la température a été mise en évidence (voir Figure 15). La DDASS a également procédé à un contrôle des paramètres représentatifs d'une dissolution augmentée des revêtements de certaines canalisations (hydrocarbures polycycliques aromatiques et métaux lourds), ceux-ci ne présentent pas d'anomalie.

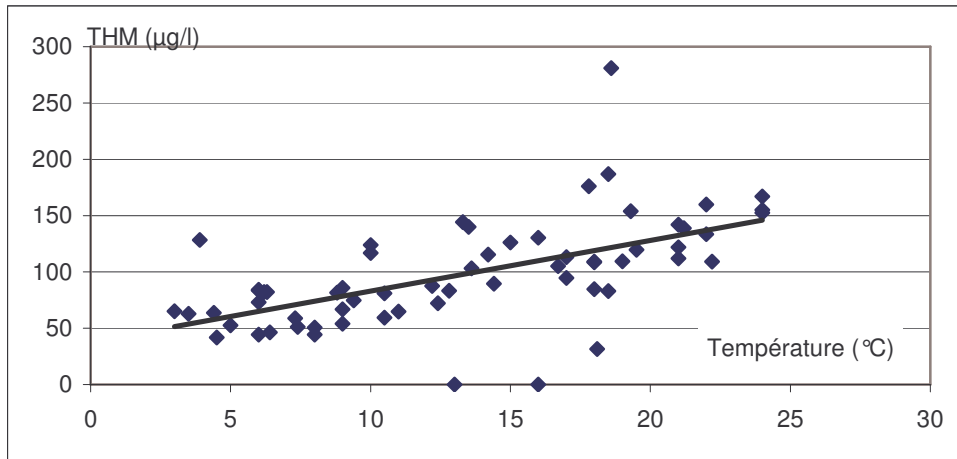


Figure 15 : Concentrations en trihalométhanes dans l'eau de la Communauté Urbaine du Grand Nancy – Période 2003-2006

De nombreuses DDASS sont restées prudentes sur le lien entre température et observation d'une non conformité. Certaines nous ont conseillé de réaliser une requête sur le logiciel SISE-Eaux, qui permettrait certainement une meilleure exhaustivité de l'enquête. Cependant, nous n'avons pu accéder à ce logiciel dans le cadre de cette étude pour des raisons logistiques.

D'autre part, très peu de plaintes des consommateurs ont été enregistrées :

- dans le Lot-et-Garonne, un consommateur s'est plaint de la température élevée de l'eau à son robinet. Cela était dû à la température élevée de la ressource (rivière) ;
- en Dordogne, un consommateur s'est plaint également, il s'agissait cette fois d'un problème de réseau mal conçu (trop en surface) après guerre. Celui-ci a été entièrement refait ;
- en Gironde, une plainte a été enregistrée en 2005 ;
- dans les Yvelines, plusieurs plaintes ont été enregistrées ;
- en Haute-Vienne, le directeur d'un hôpital rural a signalé la température anormalement élevée de l'eau. Des contrôles ont été réalisés et une contamination du réseau par des légionelles a été mise en évidence.

Il est à noter que l'ensemble des plaintes concerne directement la température de l'eau, que l'usager juge trop élevée.

Aucune DDASS ne nous a signalé d'épidémie directement liée à un dépassement du paramètre température. Cependant, nous avons trouvé dans la littérature l'investigation de cas groupés de légionellose survenus en août 2004 à Soulac-sur-Mer (Gironde), dus à l'alimentation du réseau d'eau potable par des forages d'eau à 33°C [1].

3.3.4 Solutions de gestion des risques proposées par les DDASS

Parmi les questions posées aux DDASS dans notre enquête, figurait la question des actions mises en place face à un dépassement de température. Comme précisé précédemment, les actions sont totalement différentes selon qu'il s'agisse d'un dépassement permanent ou occasionnel et que la ressource ou le circuit de distribution soit concerné.

3.3.4.1 Refroidissement de la ressource

Concernant les ressources souterraines, elles sont, après traitement, mélangées à des ressources froides (superficielles ou souterraines) ou bien refroidies à l'air ambiant, dans des tours aéro-réfrigérantes principalement.

Cependant, le risque de développement de légionelles est évoqué par l'ensemble des DDASS : en sortie d'exhaure, au niveau des filtres de déferrisation et dans les tours aéro-réfrigérantes. Afin de prévenir ce risque, des unités de chloration sont souvent installées au niveau de ces points clés.

En période de fortes chaleurs, le refroidissement des eaux peut rapidement devenir problématique si la ressource froide se réchauffe et ne permet plus de ramener l'eau en-dessous de 25°C ou bien si l'air ambiant utilisé pour refroidir l'eau est à une température supérieure à 25°C (ce qui est quasiment toujours le cas en période de canicule). Dans ce cas, le risque de développement des légionelles est accru et l'ensemble du circuit de distribution peut être touché.

Aucune mesure de gestion vis à vis du réchauffement des ressources superficielles n'a été évoquée parmi les résultats de notre enquête.

En période de fortes chaleurs, de nombreuses DDASS invoquent l'article R.1321-40 qui permet d'utiliser une eau dépassant les références de qualité lors de conditions climatiques exceptionnelles.

3.3.4.2 Gestion du risque dans les réseaux

Le réchauffement de l'eau dans les circuits de distribution est immédiatement associé à des recommandations faites par la DDASS aux traitiers d'eau concernant une augmentation de la chloration ainsi qu'une surveillance accrue des paramètres microbiologiques. Cependant, aucune consigne claire n'est formulée afin d'optimiser cette désinfection qui est souvent réalisée de façon approximative.

Certains départements touchés par des développements de cyanobactéries dans leurs eaux de surface mettent en place, en période de fortes chaleurs, une surveillance de la teneur en microcystine des eaux en sortie d'usine.

Seul le département de Meurthe-et-Moselle a signalé avoir fait des recommandations concernant le suivi des concentrations en THM.

Enfin, le risque légionelle reste le plus contrôlé par des prélèvements réguliers, notamment dans les établissements à risque (hôpitaux, établissements thermaux).

4. Éléments de gestion des risques et pistes de recherche

Comme cette étude s'est attachée à le montrer précédemment, il est difficile actuellement de quantifier les risques sanitaires dus à une élévation de la température de l'eau. En effet, s'il est possible de qualifier les risques microbiologiques et physico-chimiques dans l'eau de boisson, aucune étude ne permet de relier l'élévation de la température au-delà de 25°C au développement bactérien ou à la formation de sous-produits de chloration.

De plus, ces dernières années, les réseaux de surveillance des épidémies français ont recensé peu d'épidémies d'origine hydrique et il est très compliqué de connaître la part de celles-ci dues à une température élevée.

Il faut également noter que l'élévation de la température de l'eau rend celle-ci désagréable au goût. Il est donc probable que les usagers en consomment moins, lui préférant des eaux embouteillées.

Au vu de ces réflexions, le risque apparaît relativement faible. Cependant, d'après les évolutions climatiques annoncées, les épisodes de fortes chaleurs devraient devenir de plus en plus fréquents. Il est donc nécessaire de proposer quelques éléments de gestion des risques et des pistes de recherche pour les années à venir.

4.1 Éléments de gestion des risques

Il est possible de mettre en œuvre trois grands types de mesures de gestion des risques.

4.1.1 Mesures de surveillance

Pour garantir la qualité microbiologique de l'eau, le principe est de contrôler l'absence de bactéries indicatrices d'une contamination fécale à partir de la numération de « germes tests ». Ces bactéries, généralement présentes en plus grand nombre que les pathogènes dans les eaux contaminées, sont en effet plus aisées à mettre en évidence que les pathogènes eux-mêmes, dont la détection est fastidieuse et coûteuse en routine.

Cependant, cette méthode de contrôle présente certaines limites, car une eau traitée par le chlore dans laquelle on ne retrouve pas d'indicateurs bactériens n'est pas forcément exempte

de tout pathogène.

S'il est illusoire de vouloir délivrer une eau de telle qualité, les principes de gestion des risques français pourraient être actualisés, en prenant pour exemple d'autres pays européens (Finlande notamment) [45], en surveillant notamment les bactéries dont le développement est favorisé par des températures supérieures à 25°C telles que *Legionella pneumophila* et *Campylobacter jejuni*, et les toxines produites par les cyanobactéries telles que les microcystines.

De plus, il serait intéressant de créer une procédure permettant un renforcement de la fréquence des analyses bactériologiques sur l'eau à la sortie de l'usine et dans le réseau durant les périodes de fortes chaleurs, notamment dans les établissements à risque.

4.1.2 Modification des procédés

Les services des eaux peuvent difficilement agir sur la température de l'eau. Les efforts doivent donc se porter sur les procédés de traitement des eaux.

Les mesures mises en place pour limiter la formation de sous produits de chloration dans l'eau de consommation ne doivent pas se faire au détriment de l'efficacité de la désinfection. On considère donc que la meilleure méthode pour contrôler la formation de ces produits consiste à diminuer la matière organique de la ressource avant la désinfection, afin qu'elle ne réagisse pas avec le chlore pour former des sous-produits. Cette méthode permet aussi d'accroître l'efficacité de la désinfection. D'une manière générale, une filière de traitement comporte des étapes (floculation, décantation, filtration) qui permettent de réduire la matière organique dissoute, et par conséquent les précurseurs des sous-produits de chloration.

Cependant, en présence d'eaux particulièrement chargées en matière organique, d'autres procédés de traitement comme la nanofiltration peuvent s'avérer intéressants pour la réduction des précurseurs (MO) et pour l'élimination des microorganismes. Des systèmes de filtration au charbon actif permettent également de réduire les teneurs en THM.

Après le chlore, l'odeur de terre-moisi est le deuxième type d'odeurs le plus couramment cité par les consommateurs et entraîne une crainte de non-potabilité de l'eau chez ces consommateurs [19].

La géosmine et le MIB, molécules associées à de nombreuses cyanobactéries et aux actinomycètes et responsables de goûts et odeurs type terre-moisi à de très faibles concentrations, sont adsorbables sur charbon actif en poudre (CAP) ou en grain (CAG) et oxydables par ozonation [17]. La géosmine est plus facilement éliminée que le MIB. Les traitements sont donc basés sur ce dernier composé.

Un traitement ponctuel d'ajout de CAP peut être efficace en cas de crise sur une filière permettant la mise en œuvre de ce réactif (en période caniculaire par exemple). Si l'occurrence de ces molécules est chronique, un traitement combinant ozone et filtration sur CAG, avec fréquence de régénération du charbon adaptée à la teneur en polluant et à la matrice organique est recommandé. Le Tableau 13 présente les performances de ces traitements.

	MIB	Géosmine
Oxydation à l'ozone (faible efficacité des autres oxydants)	1 log d'élimination C.T = 5 mg/min/l	1 log d'élimination C.T < 5 mg/min/l
Adsorption CAG Pollution : 10<MIB<50 ng/l dans eau avec COT = 2 mg/l Régénération	1/12 mois	1/24 mois
Adsorption CAP Dose (mg/l) pour 95% d'élimination de MIB : 100 à 5 ng/l dans eau avec COT = 3 mg/l	45	25

Tableau 13 : Performances des traitements (CAG, CAP et Ozonation) sur les composés odorants [17]

Il est également possible d'utiliser des bactéries capables de dégrader le MIB [46].

Concernant la corrosion des réseaux, accentuée par une élévation de température de l'eau, une solution adoptée par certains distributeurs d'eau consiste à favoriser la formation d'une couche de carbonate de calcium sur la paroi de la conduite (métallique ou en ciment). Cette technique, déjà utilisée dans certains grands centres urbains, pourrait permettre aux communes dont la taille des canalisations est suffisante, de contrer les dommages causés sur les réseaux par une élévation ponctuelle de la température de l'eau.

4.1.3 Information des consommateurs

Comme démontré dans les paragraphes précédents, les THM sont volatils lorsque l'eau dépasse les 19°C. Ainsi, il est important de recommander aux consommateurs, en période de fortes chaleurs, d'aérer régulièrement les lieux de vie afin d'éviter une accumulation des THM dans l'air intérieur.

D'autre part, la qualité organoleptique de l'eau peut être améliorée par refroidissement de l'eau (Figure 10). Il peut donc être conseillé aux consommateurs de placer l'eau au réfrigérateur avant consommation dans une carafe fermée, la température optimale étant comprise entre 12 et 15°C.

Enfin, le consommateur est la meilleure sentinelle concernant la qualité organoleptique de l'eau. Il est donc important de l'impliquer dans le réseau de surveillance renforcé suggéré plus haut. L'exemple peut être pris sur le groupe de consommateurs témoins mis en place par la SAGEP qui s'engagent à rendre compte de la qualité de l'eau du robinet deux fois par mois et sur les lignes téléphoniques mises en place par les traités d'eau au niveau régional. Ainsi, une campagne d'information pourrait inciter le consommateur-sentinelle à être particulièrement attentif aux paramètres goût et température en période de forte chaleur.

4.2 Pistes de recherche

Au vu du manque de connaissances concernant la quantification du risque microbiologique en lien avec la température (entre 25°C et 40°C), il serait intéressant que les recherches se portent plus particulièrement sur les bactéries responsables des principales maladies hydriques actuelles telles que *Campylobacter jejuni*, *Legionella pneumophila*, *Shigella sonnei* ou encore *Salmonella typhi*.

D'autre part, dans une publication récente (octobre 2006), Nazir et al [47] ont étudié les

différentes voies d'exposition des THM au sein des communes de St Jones, Clarendville et Shoal Harbor au Canada. Ainsi, se doucher et boire de l'eau ont été identifiés comme étant les sources majeures d'exposition. Ils ont utilisé des approches déterministes pour déterminer les concentrations dans l'air de la douche et l'impact des THM par la voie cutanée et par inhalation.

Sur les trois voies d'exposition, seule l'inhalation a été déterminée comme dépassant significativement le seuil d'excès de risque « acceptable » admis de 10^{-6} .

Ainsi, dans le cas d'une consommation d'eau tiède, il serait intéressant d'étudier l'exposition aux THM par inhalation.

Par ailleurs, ainsi que de nombreuses DDASS l'ont suggéré, il serait intéressant, pour compléter cette étude, d'exploiter la base de données SISE-Eaux, afin de tenter de réaliser un recoupement entre les non-conformités et une élévation de la température.

Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer qualitativement deux principaux types de risque sanitaire associés à une élévation de température de l'eau de consommation au-delà de 25°C.

Ainsi, le développement de bactéries responsables des principales maladies d'origine hydrique est favorisé par cette gamme de température, sans qu'il soit quantifiable dans l'état actuel des connaissances.

D'autre part, si le risque associé aux THM est principalement dû à l'ingestion d'eau froide, au-delà de 19°C, l'exposition par inhalation n'est plus négligeable. De même que pour le risque microbien, la quantification de ce risque n'est pour l'heure pas réalisée et des études sont en cours.

Enfin, une augmentation de la température de l'eau entraîne une altération de sa qualité organoleptique.

L'enquête « Eaux tièdes » menée dans le cadre de cette étude a révélé que la majorité des départements français sont concernés par cette problématique. Cependant, aucune DDASS ne considère ce phénomène comme étant un problème sanitaire préoccupant : le lien entre température élevée et non-conformité n'est jamais prouvé. Il n'en reste pas moins que quelques plaintes de consommateurs ont été enregistrées au sujet de la qualité organoleptique ces dernières années, principalement en période de forte chaleur. Face à ce problème, les DDASS privilégient dans un premier temps le refroidissement de la ressource, puis préconisent une surchloration de l'eau pour prévenir le développement bactérien, associée à une surveillance accrue des paramètres microbiologiques réglementaires.

Afin de compléter les mesures existantes, trois axes de gestion ont été proposés. Le premier concerne la mise en place d'un réseau de surveillance étendu, en période de forte chaleur, de la qualité microbiologique de l'eau (en y incluant notamment des analyses fréquentes de *Legionella pneumophila*, *Campylobacter jejuni* et de cyanotoxines). Le second s'intéresse aux procédés qu'il serait possible de mettre en œuvre en vue de limiter les risques sanitaires associés. Enfin, il a été proposé d'informer les consommateurs des précautions à prendre concernant le risque THM et de les impliquer en tant que sentinelle sur les paramètres goût et température.

Enfin, d'après les évolutions climatiques annoncées, les épisodes de fortes chaleurs devraient devenir de plus en plus fréquents. Il paraît donc nécessaire d'encourager les recherches pour être capable de quantifier les risques induits par la température qui pourraient devenir émergents.

Bibliographie

- [1] Charon M., Dejean G., Manetti A., Campese C., Jarreau S., Filleul L. 2005. Investigation de cas groupés de légionelloses dans la commune de Soulac-sur-mer, France, 2004. BEH n° 14.
- [2] Guidelines for Drinking-Water Quality, 3rd (current) edition, including the first addendum. Organisation Mondiale de la Santé. 2006
- [3] Mauguin G, Delion N, Corsin P.2004. La température de l'eau, un paramètre important pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. L'eau, l'industrie, les nuisances, 273 : 49-52.
- [4] Site Santé Canada :
www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/doc_sup-appui/temperature/index_f.html
- [5] Nakache-Danglot F., Joret J.-C., Taudou O. 2006. Suivi des légionelles dans les réseaux de distribution d'eau potable. TSM n° 7/8.
- [6] Rogers J., Dowsett A.B., Dennis P.J., Lee J.V., Keevil C.W. May 1994. Influence of temperature and plumbing material selection on biofilm formation and growth of *Legionella pneumophila* in a model potable water system containing complex microbial flora. Applied and Environmental Microbiology, 60 (5): 1585-1592.
- [7] Pathogens in drinking water sources, literature review. November 2004. MicroRisk report:
http://217.77.141.80/clueadeau/microrisk/publish/cat_index_11.shtml
- [8] Fransolet G., Villers G., Masschelein W.J. Influence of temperature on bacterial development in waters.
- [9] Site de l'institut Pasteur:
http://www.pasteur.fr/recherche/RAR/RAIP2000/HTML/02-Acti_scientifique.html
- [10] Schwartzbrod L. 1991. Virologie des milieux hydriques. Ed Lavoisier Tec& Doc.
- [11] De Jonckheere J., Van Dijck P., Van De Voorde H. 1975. The effect of thermal pollution on the distribution of *Naegleria fowleri*. J. Hyg. 75 (1): 7-13.
- [12] Dettlerline J.L., Wilhelm W.E. 1991. Survey of pathogenic *Naegleria fowleri* and thermotolerant amebas in federal recreational waters. Trans. Am. Microsc. Soc. 110 (3): 244-61.
- [13] Bard D., Siclet F. 1995. Amibes libres et santé publique. Ed ENSP.
- [14] Rabier P.2004. Risques sanitaires liés à l'utilisation d'appareils de traitements individuels et collectifs d'eau et de générateurs d'eau chaude dans le cadre d'une contamination du réseau par *Cryptosporidium*. Mémoire IGS.

- [15] Evaluation scientifique des risques associés à *Cryptosporidium sp.* Septembre 2002. Rapport AFSSA.
- [16] Fayer R. 1994. Effect of high temperature on infectivity of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water. Applied and Environmental Microbiology 60: 2732-5.
- [17] Baudin I, Cagnard O, Chatenet L, Taudou O, 2006. Suivi et maîtrise des algues et sous-produits. Application à l'usine de production d'eau potable du Ribou. TSM 7/8, 81-93.
- [18] Lenès D, Gaget V, Delabre K, Tandeau de Marsac N, Roche P, 2006. Problématique cyanobactéries toxiques en eau de consommation. TSM 7/8, 67-79.
- [19] Zaitlin B., Watson S., 2006. Actinomycetes in relation to taste and odour in drinking water: Myths, tenets and truths. Water Research 40 : 1741-1753.
- [20] Skafel M., Yerubandi R., 2003. Physical processes in Western lake Ontario during a taste and odour episode. Conférence canadienne sur le littoral.
- [21] Célérier J.L., Faby J.A. OIEau. La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux. Document technique FNDAE. Hors série n°12.
- [22] Momba M.N.B., Kfir R., Venter S.N., Cloete T.E. 2000. An overview of biofilm formation in distribution systems and its impact on the deterioration of water quality. Water SA, 26 (1).
- [23] Vilaginès R. 2003. Eau, environnement et santé publique : introduction à l'hydrologie. Ed Lavoisier.
- [24] Health Risks from Microbial Growth and Biofilms in Drinking Water Distribution Systems. Juin 2002. Rapport US-EPA.
- [25] Surveillance nationale des maladies infectieuses, 2001-2003. Décembre 2005. Rapport du département des maladies infectieuses de l'InVS : www.invs.sante.fr/publications/default.htm
- [26] De Mascureau H. 2007. Effets sanitaires et traitement de l'eau, Véolia Eau. Site de l'université de Paris-Sud 11 : <http://www.u-psud.fr>
- [27] Lesne J. 2001. Cryptosporidiose et usage de l'eau : point sur le risque sanitaire. TSM n°12, 25-31.
- [28] QMRA methodology. Avril 2006. MicroRisk report: http://217.77.141.80/clueadeau/microrisk/publish/cat_index_11.shtml
- [29] Leroy P. (1995), Prévention de la corrosion et de l'entartrage dans les réseaux de distribution d'eau, ouvrage CIFEC.
- [30] S. Rigal et al., « Etat de l'art sur l'utilisation des matériaux organiques dans les réseaux d'eau potable », CRECEP.

- [31] A. Leguen (1999), Synthèse bibliographique: « Matériaux utilisés pour les canalisations AEP: Influence sur la qualité de l'eau », ENGREF.
- [32] M. Liege (DDASS Charente), Journée d'information DRIRE, « Réseaux d'eau chaude sanitaire », 07/06/2005.
- [33] C. Volk et al. (1999), « Practical evaluation of iron corrosion control in a drinking water distribution system », *Wat. Res.*, Vol.34, n°6, pp 1967-1974.
- [34] Ph. Juan et al. (1995), « Diagnostic corrosion en réseau de distribution. Etude sur site », *TSM*, n°12, pp57-63.
- [35] Van der Kooij D et al. (1991), "Interaction of water with pipes", *Water Supply*, 9(3-4), pp.1-12.
- [36] Laurie S. McNeill et al. (2002), The importance of temperature in assessing iron pipe corrosion in water distribution system, *Env. Monit. And Ass.*, Vol. 77, pp 229-242.
- [37] Ingun Skjevraak et al. (2003), « Volatile organic components migrating from plastic pipes (HDPE, PEX and PVC) into drinking water », *Wat. Res.*, Vol. 37, pp 1912-1920.
- [38] Md. Pauzi Abdullah et al. (2003), « Formation, modelling and validation of trihalomethanes (THM) in Malaysian drinking water: a case study in the districts of Tampin, Negeri Sembilan and Sabak Bernam, Selangor, Malaysia », *Wat. Res.*, Vol. 37, pp 4637-4644.
- [39] Paula Vieira et al. (2004), « Accounting for the influence of initial chlorine, TOC, iron and temperature when modelling chlorine decay in water supply », *J. of Water Supply: Res. and Tec.*, Vol. 53.7, pp 453-467.
- [40] L.Kiééné et al. (1998), « Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water distribution systems », *Wat. Sc. Tech.*, Vol. 38, n°6, pp219-227.
- [41] Institut national de santé publique du Québec (décembre 2002), Groupe scientifique sur l'eau, Fiche trihalométhanes.
- [42] Rafael J. Garcia-Villanova et al. (1997), « Formation, evolution and modeling of trihalomethanes in the drinking water of a town. At the municipal treatment utilities », *Wat. Res.*, Vol. 31, n°6, pp 1299-1308.
- [43] Manuel J. Rodriguez et al. (2001), « Spatial and temporal evolution of trihalomethanes in three water distribution systems », *Wat. Res.*, Vol. 35, n°6, pp 1572-1586.
- [44] Pangborn R.M., Bertolero L.L. 1972. Influence of temperature on taste intensity and degree of liking of drinking water. *Journal of AWWA*, Août 1972, 511-515.
- [45] Intestinal illness through drinking water in Europe. Décembre 2005. MicroRisk report : http://217.77.141.80/clueadeau/microrisk/publish/cat_index_11.shtml

[46] Lauderdale C., Aldrich H., Lindner A. 2004. Isolation and characterization of a bacterium capable of removing taste –and odor – causing 2-methylisoborneol from water. *Water Research*, 38 : 4135-4142.

[47] Nazir, Muddassir, Khan, Faisal. 2006. Human health risk modelling for various exposure routes of trihalomethanes (THMs) in potable water supply. *Environmental Modelling & Software*, 21(10) : 1416-1429.

Liste des annexes

Annexe I : Questionnaire d'enquête « Captages chauds »

Annexe II : Questionnaire d'enquête « Eaux tièdes »

Annexe III : Tableau récapitulatif des réponses à l'enquête « Eaux tièdes »

Annexe I : Questionnaire de l'enquête « Captages chauds » menée par la DGS

Grille de renseignements Analyse de <i>Legionella pneumophila</i> dans les forages chauds campagne 2005
--

Nom et adresse du captage (ou identifiant) :	date du prélèvement	Résultats analyse de <i>Legionella pneumophila</i> en UFC/L	
		Eau brute	Eau traitée

Origine de l'eau :

eau souterraine

eau de surface
l'eau brute :

Si eau de surface, précision du niveau de qualité de

critère de qualité : selon l'article R.1321-38 ; du CSP .

A1

A2

A3

Description succinct du niveau de traitement mis en œuvre :

Etapes de traitement (préciser si nécessaire) :

Type de désinfectant éventuel :

Type de traitement d'affinage éventuel :

Fonctionnement du captage :

fonctionnement saisonnier

fonctionnement annuel

Indiquez la durée de fonctionnement :

Indiquez la (les) date(s) de remise en fonctionnement pour l'année 2005 :

Population desservie :

Précisez la taille de la population desservie pendant la période de fonctionnement :

Annexe II : Questionnaire de l'enquête « Eaux tièdes »

Dans le cadre des ateliers santé environnement de la formation d'IGS, nous menons une étude sur les risques sanitaires liés à la production et à la distribution d'une eau potable « tiède » ($T > 25^{\circ}\text{C}$). Dans ce contexte, et afin de réaliser un état des lieux des situations rencontrées sur le territoire français, nous faisons parvenir à l'ensemble des DDASS et des DSDS le questionnaire ci-joint. Celui-ci est à nous retourner par mail d'ici la fin du mois de janvier.

En vous remerciant de l'attention que vous y porterez, nous vous prions d'agréer, Madame, Monsieur, nos respectueuses salutations.

Axelle GRAVELLIER, Hélène IMBERT et Adrien MARCHAIS
Elèves IGS

Questionnaire à l'attention des IGS des DDASS et DSDS

Département :

Nom et coordonnées de l'IGS :

1) Avez-vous eu à gérer dans votre département un dépassement de qualité du paramètre température ($T > 25^{\circ}\text{C}$ selon l'annexe 13-3 du Code de la Santé Publique) sur une ressource en eaux brutes ?

Si non passez directement à la question 10.

2) Si oui, par qui est géré le traitement de l'eau correspondante ?

3) S'agit-il d'une ressource souterraine ou de surface ?

4) s'agit-il d'un dépassement : occasionnel ?
saisonnier ?
permanent ?

5) Comment ce dépassement a-t-il été mis en évidence ?

- lors du dimensionnement de la filière ?
- lors des analyses réglementaires ?
- par une plainte d'utilisateur ?

6) Des actions ont-elles été mises en places ? Si oui, lesquelles ?

7) Des non conformités bactériologiques ou physicochimiques ont-elles été induites par ce(s) dépassement(s) ?

8) Pouvez-vous fournir les analyses d'eaux correspondant à ce(s) dépassement(s) ?

9) Commentaires :

10) Avez-vous eu à gérer dans votre département un dépassement de qualité du paramètre température ($T > 25^{\circ}\text{C}$, selon l'annexe 13-3 du code de la Santé Publique) dans l'eau de distribution dû à un réchauffement de l'eau dans le réseau d'adduction ou dans les réservoirs ?

Si non, fin du questionnaire.

11) Si oui, par qui est géré le réseau correspondant ?

12) Si oui, s'agit-il d'un dépassement : permanent ?
occasionnel ?
saisonnier ?

13) Comment ce dépassement a-t-il été mis en évidence ?

- lors des analyses réglementaires
- par une plainte d'utilisateur ?

13) Des actions ont-elles été mises en place ? Si oui, lesquelles ?

14) Des non conformités bactériologiques ou physicochimiques ont-elles été induites par ce(s) dépassement(s) ?

15) Pouvez-vous fournir les analyses d'eaux correspondant à ce(s) dépassement(s) ?

16) Commentaires :

24	oui	oui	oui	oui	26 °C + 1 projet à 30 °C	non	/	/	/	oui (saisonnier mais plutot occasionnel)			Forages : analyses réglementaires Distribution : analyses réglementaires + 1 plainte sur Périgueux (quartier où un réseau avait été mal enterré après guerre)	Forages : mélange et projet de dérogation pour la ressource à 30 °C Distribution : travaux sur réseau pour quartier problématique sinon aucune action car pas de pb de NC microbio ou autre
25	oui	non												
26	oui	oui	non	/	/	/	/	/	/	oui (canicule)	robinets		analyses réglementaires	commentaires sur les analyses du type "Eau conforme à la norme "DISTRIBUTION" pour les paramètres bactériologiques, mais DEPASSANT la REFERENCE de QUALITE pour le paramètre TEMPERATURE fixé à 25 °C"
27	non													
28	oui	non												
29	oui	non												
30	oui	oui	oui	non		oui	jusqu' à 29 °C	oui		oui	robinets	jusqu'à 34 °C	analyses réglementaires	EB : Pas d'action particulière Distribution : Pas de mesures prises globalement. Une société fermière a calorifugé un réservoir. Une règle proposée par la DGS est une augmentation de la chloration.
31	non													
32	oui	oui	oui	oui		oui			oui	non			ESO : dimensionnement ESU : analyses réglementaires	forages : dérogations CSHPF, équipés de tour aéro- réfrigérantes et acidification en tête pr éviter entartrage et dvp légionelles ESU : demande de dérogation de véolia non suivie car t°C a diminué rapidement

33	oui	oui	oui	oui (19)	de 25,4 à 34 °C	non			oui (occasionnellement)	robinets particuliers		1 plainte	<p><u>ESO</u> : mélange des eaux avec eaux froides pr être < 25°C au départ de la distribution prévention du dyp des légionelles au niveau des exhaures ou des filtres de déferrisation, chlorations (ClO2) sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • sortie eau brute lorsque l'eau transite dans des canalisations de transfert de longueur importante jusqu'à la station de traitement ou de mélange. • En amont et aval des filtres de déferrisation ou tour d'aération <p><u>Distrib</u> : contrôle des légionelles dans le réseau correspondant = pas de NC</p>
34	oui	oui	oui	non		oui		oui (2 cas)	oui, saisonnier 81 collectivités concernées en 2006	tous types de points		analyses réglementaires	<p><u>EB</u> : demande par la DDASS de renforcer l'autosurveillance / désinfection, bactériologie. Pour le cas 1 : la ressource superficielle est mélangée avec des ressources souterraines et l'exploitant augmente autant que possible la proportion des ESO par rapport à l'ESU (ça ne suffit pas à régler le problème) + suivi algues et microcystines à la ressource <u>Distribution</u> : Demande par la DDASS de renforcer l'autosurveillance / désinfection, bactériologie.</p>
35	oui	oui	non	non					oui	RPrivé		analyses et plainte	<p>(1) ECS mal isolé --> travaux (2) travaux de clorifugeage aussi</p>
36	oui	oui	oui	oui	30	non			oui (canicule 2003 et 2006)	réservoir		Forage : dimensionnement filière intérêt : permet de corriger la qualité d'eaux excessivement chargées en NO3 délivrées par un autre ouvrage Distribution : analyses réglementaires	<p>Forage : recherche d'une autre ressource en cours Distribution : pas de solution envisageable !</p>

83	oui	oui	oui	non		oui	25,7 - 26,7		oui	oui tous les étés	réseau, pb de canas peu profondes et t°C extérieure très élevée	38	analyses réglementaires	information mairie et traiteurs d'eau Problème récurrent de juin à septembre chaque année
84	oui	oui	non	non	/	non	/	/	oui (canicule 2003 et 2006)				analyses réglementaires	surveillance renforcée taux de chlore résiduel et bactériologie
85	oui	oui	oui	non	/	oui	29,1		oui (canicule de 2003 et juin 2005)	oui	robinets municipaux	jusqu'à 31,2°C	analyses réglementaires	pas d'actions particulières à part suivi bactério, une soixantaine de prélèvements concernés
86	non													
87	oui	oui	non	/	/	/	/	/	oui (3 jours pdt canicule de 2003)		sortie de station de traitement et arrivée hôpital		signalé par le directeur d'un hôpital rural	présence de légionelles, recommandations données au responsable de la distribution pour l'été suivant : examiner la possibilité de mettre en place des postes de rechloration et avant cette mise en place, réaliser des injections d'eau de javel sur des points stratégiques du réseau pr maintenir un résiduel de chlore suivant. De plus, contrôle régulier de la température <u>Remarque</u> : pas d'autre problème depuis 2003
88	oui	oui	oui	oui	?	non	/	/	non					
89	non													
90	oui	non												
91	oui	oui	oui	oui	?	oui		oui (Seine et Essone)	non		/	/	analyses réglementaires	<u>Esu</u> : eau se refroidit seule dans les réseaux, dérogation globale pr l'ensemble des captages de l'Albien <u>Esu</u> : Arrêté de dérogation pour le prélèvement d'une eau non conforme
92	non													
93	oui	oui	oui	oui		oui	30,1	oui	?				analyses réglementaires	<u>Forage Arien</u> : 2 captages naturellement chauds (~800m) mélangés systématiquement à 1 captage du sparnacien <u>Eau superficielle</u> : arrêté préfectoral de dérogation et renforcement chloration, mise en évidence de seulement 2 échantillons non conformes concernant la flore aérobie (entre 01/07 et 10/08/2006)

94	oui	oui	oui	non		oui		oui		non			analyses réglementaires + autosurveillance du distributeur	autorisation DDASS de poursuivre traitement ss réserve d'un suivi renforcé par le distributeur (vérif bactério, chlore libre et t°C), si t>28 °C, info immédiate à la DDASS. Maintient des consignes de chloration
95	oui	oui	oui	non		oui			canicule	oui (canicule)	robinet		analyses réglementaires	analyses legionelles sur EB et sur réservoirs les + éloignés
96	non													
Guadeloupe	oui	oui	oui	non						oui	robinet	35 - 40	analyses réglementaires	pas d'action, la norme ne s'applique pas dans les DOM sur le réseau de distrib de St martin et St Bart : pb de réchauffement de l'eau dans l'unité de désalement par distillation, bientôt remplacé par osmose inverse
Martinique	non													
Guyane	oui	oui	oui			oui							analyses réglementaires	la totalité des eaux brutes dépassent les 25°C qui ne sont d'ailleurs pas un paramètre de qualité ds les DOM