

PRODUCTION D'EAU POTABLE

Procédés de traitement, paramètres de qualité
et impacts du changement climatique

Bernard Legube

PRODUCTION D'EAU POTABLE

**Procédés de traitement, paramètres de qualité
et impacts du changement climatique**

2^e ÉDITION

DUNOD

Direction artistique : Nicolas Wiel

Graphisme de couverture : Élisabeth Riba

Illustration de couverture : Surapol USanakul/shutterstock.com

Mise en pages : Nord Compo

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>		<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--	--

© Dunod, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-082895-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Yves Lévi,

Professeur émérite de l'Université Paris-Saclay, Faculté de Pharmacie.
UMR 8079 « Écologie Systématique Évolution ».
Membre de l'Académie des technologies.
Membre de l'Académie nationale de médecine.
Membre de l'Académie nationale de pharmacie.
Vice-président de l'Académie de l'eau.
Membre du Haut Conseil de la Santé Publique.

Fournir à toutes les populations une eau destinée à la consommation humaine saine, accessible à tous en quantité nécessaire est une exigence fondamentale pour la santé et la paix. Les besoins mondiaux en ce domaine sont encore immenses, liés à des défis avant tout économiques et politiques, mais aussi scientifiques et technologiques. À l'heure où les pénuries d'eau douce, au regard des exigences de consommations, conduisent parfois à promouvoir l'usage domestique d'eaux dites « non conventionnelles », il faut rappeler sans cesse que l'eau potable est une des protections fondamentales de la santé publique au sein de la sphère protectrice de l'habitat.

Les critères de potabilité sont en évolution permanente ce qui contraint à devoir, et savoir, adapter les filières de production pour valider et garantir en permanence l'innocuité de l'eau produite et distribuée. Les progrès considérables récents accomplis par la chimie analytique, l'épidémiologie et les essais biologiques conduisent à identifier dans nos environnements de nouveaux dangers sanitaires (perturbateurs endocriniens, métabolites de pesticides, génotoxiques...). La nouvelle directive européenne de 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine introduit quelques nouveaux paramètres concernant des micropolluants organiques, ce qui préfigure d'autres évolutions du même type dans l'avenir. En complément, les pressions mondiales quantitatives et qualitatives sur les ressources en eaux douces sont considérables. Elles conduisent à devoir gérer des périodes de crises, des évolutions défavorables et des non-conformités temporaires ou permanentes.

Les progrès technologiques accomplis ces dernières décennies rendent heureusement disponibles de nombreuses options capables de satisfaire la majorité des exigences de qualité. Le curatif n'est toutefois pas la solution pérenne, et il serait très imprudent de considérer que tous les traitements sont d'efficacité absolue. Cette tentation est facile, mais vite contredite par l'examen des difficultés mondiales touchant, bien entendu les zones les plus défavorisées du globe, mais aussi les pays économiquement développés. Les risques dits « émergents » liés aux mélanges de micropolluants organiques, aux défaillances de matériaux ou à l'écologie microbienne des réseaux

sont des défis à contrer d'urgence. En France, et malgré la force de ce qu'était l'École française de l'eau faisant exemple mondial avec un partenariat de haut niveau scientifique et technologique entre des laboratoires publics de recherche et des centres privés de recherche et développement, l'accessibilité à l'eau potable n'est pas égale. Le taux de non-conformités ne sera pas identique selon que l'on vive en métropole ou en outre-mer, en milieu urbain ou dans des petites communes, en zones de fortes pressions d'intrants agricoles ou non. Même si globalement la qualité des eaux distribuées en métropole est d'un très grand niveau de conformité, les investissements à accomplir pour construire, rénover et améliorer les systèmes de gestion et de distribution des eaux de consommation doivent anticiper les nouveaux critères des normes internationales de potabilité. Les délais prévisionnels pour les investissements sont parfois incompatibles avec ceux nécessaires aux chercheurs pour calculer et gérer les risques sanitaires liés aux expositions chroniques aux faibles traces de micropolluants en intégrant, dans les calculs de risques, tous les apports liés aussi à l'air et aux aliments. Traiter jusqu'à l'absolu n'est-il pas également source de risque ? De nombreuses questions et de nombreux défis exigent, outre les développements technologiques et innovants, de soutenir une recherche de pointe dans les domaines des sciences expérimentales et des sciences humaines.

Les raisonnements ne peuvent, et ne doivent plus, être uniquement axés sur les technologies, même si leurs contributions sont bien entendu considérables et indispensables. Il s'agit, encore plus qu'autrefois, d'orienter les stratégies de gestion selon l'évolution des connaissances sur les effets des changements climatiques, les effets écotoxiques et sanitaires des mélanges de micropolluants y compris ceux générés par les traitements, les évolutions de la qualité de l'eau en réseaux ou encore les attentes des citoyens en matière de confort et économiques. Parallèlement aux découvertes fréquentes de nouveaux dangers dans les eaux brutes et certaines eaux traitées, la notion fondamentale de « réacteur » biologique et chimique, qui fait évoluer la qualité de l'eau depuis la ressource jusqu'aux robinets dans un ensemble unique et indissociable, n'est pas assez intégrée lors des prises de décisions. La parfaite conduite de ces « réacteurs » se fait en développant des stratégies intégrées pour protéger la qualité des ressources, adapter les filières de potabilisation aux variations qualitatives et saisonnières, garantir un réseau au minimum de fuites et composé de matériaux les plus inertes possible. L'alimentation du réseau doit se faire avec une eau traitée à très faibles demandes en chlore et turbidité, un faible contenu en matières organiques biodégradables, non corrosive, sans turbidité. Les interactions doivent se faire en permanence avec les résultats d'analyse pour déceler les évolutions et corriger le plus rapidement.

Ce sont aussi les qualités professionnelles des acteurs et de leurs formations qui permettent de garantir le meilleur résultat. À ce titre, le présent ouvrage est également un outil majeur qui conduit à prendre la hauteur nécessaire pour définir et fixer les objectifs à accomplir au regard des problèmes rencontrés avec la ou les eau(x) brute(s) à traiter et ceux du réseau à alimenter. Le lecteur saura alors conduire sa réflexion en combinant les meilleurs systèmes de gestion globaux avec les technologies nécessaires pour garantir en permanence la qualité irréprochable de l'eau fournie à tous les points d'usage du réseau au service de la santé publique.

Avant-propos

Cette deuxième édition, dans la continuité de celle de 2015, est consacrée à la production d'eau potable (ou eau destinée à la consommation humaine), principalement par ses aspects techniques et d'ingénierie (objectifs, réglementation, paramètres de qualité, procédés et filières de traitement). Elle diffère toutefois de la première édition dans son contenu, en partie nouveau, et dans sa construction (ordre des chapitres et utilisation du mémento numérique).

Une nouveauté importante concerne les impacts du changement climatique à échéance 2040/2050 : sur la disponibilité de la ressource en eau douce, effet largement étudié aujourd'hui, sur l'évolution de sa qualité, effet trop souvent négligé et encore incertain, ainsi que sur le traitement et le coût de l'eau potable. Une autre nouveauté porte sur les risques sanitaires, leur évaluation et leur gestion, dans l'esprit de la nouvelle réglementation européenne.

L'ouvrage est ordonné en six parties et vingt chapitres plus un mémento (ou supplément) numérique.

Les deux premières parties (« Le traitement des eaux destinées à la consommation humaine » et « Les impacts attendus du changement climatique ») sont accessibles à tous publics. C'est aussi partiellement le cas pour la troisième partie (« Évaluer les risques sanitaires et satisfaire aux paramètres de qualité ») avec toutefois une orientation plus marquée vers les personnes responsables de la production et la distribution des eaux et de leur contrôle sanitaire.

Les deux parties suivantes (« La clarification » et « Les traitements d'affinage ») appartiennent plutôt au domaine de l'ingénierie. Ce sont des reprises des parties correspondantes de la première édition avec des mises à jour et un développement des aspects académiques aux dépens des descriptions techniques qui sont souvent redirigées (en couleur pour les photos et schémas) vers la partie « mémento » ou « supplément numérique ».

La partie sur « La désinfection » conclut cet ouvrage. Aujourd'hui complètement oubliée par les médias versus les risques chimiques (pesticides, perturbateurs endocriniens, résidus pharmaceutiques et autres), l'importance de l'élimination complète des micro-organismes (bactéries, virus, protozoaires) de l'eau potable va nécessairement redevenir une priorité médiatique et politique (protection contre les épidémies, contre le vandalisme et le terrorisme, effet du changement climatique, vieillissement de la population...).

Merci aux collègues enseignants-chercheurs et chercheurs, aux anciens élèves, aux personnes en charge de la production et de la distribution de l'eau et à celles de la protection et du suivi des ressources en eau, qui par leurs publications et communications ont contribué indirectement à la rédaction et à la mise à jour de cet ouvrage.

Table des matières

Préface	V
Avant-propos	VII
A. LE TRAITEMENT DES EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE	
1 L'eau potable en France	3
1.1 Préambule	3
1.1.1 L'exigence d'absence de germes pathogènes	3
1.1.2 Les premières filières simples de traitement	3
1.1.3 Les évolutions récentes	4
1.2 Les besoins en eau potable ou en eau destinée à la consommation humaine (EDCH)	4
1.2.1 Les quantités d'eau potable à produire par habitant	5
1.2.2 Les qualités des ressources destinées à la production d'eau potable	5
1.2.3 Quelques chiffres sur la production d'eau potable en France	6
2 La réglementation	7
2.1 Les fondations et les objectifs de la réglementation moderne	8
2.2 Les principes de la réglementation actuelle	8
2.3 Les exigences de qualité	8
2.4 Le contrôle des résultats	11
2.5 Informer les consommateurs	11
2.6 La gestion de crise	12
2.7 La nouvelle directive européenne en cours de transposition	12
2.7.1 Les principales évolutions	12
2.7.2 Les normes de qualité de la directive européenne du 16/12/2020	13
2.8 L'évaluation du risque sanitaire	15

3 Les filières de traitement	16
3.1 Comment définir une filière ?	16
3.2 Les filières pour eaux souterraines profondes	17
3.2.1 Eaux souterraines contenant des impuretés naturelles	18
3.2.2 Eaux souterraines contenant des polluants	19
3.3 Les filières pour eaux de surface	20
3.3.1 Deux grandes classes d'eaux superficielles	20
3.3.2 L'évolution des filières lors des dernières décennies	21
Sources et supports	23

B. LES IMPACTS ATTENDUS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

4 Changement climatique et disponibilité en eau douce	27
4.1 Préambule sur le changement climatique	27
4.1.1 Quelques définitions	27
4.1.2 Explication simplifiée du rôle des gaz à effet de serre (GES) sur l'évolution « forcée » du climat	31
4.1.3 Les constats actuels en France	32
4.1.4 Les prévisions sur l'évolution du climat	33
4.1.5 Que faire ?	36
4.2 Le cycle hydrologique en France aux xx ^e et xxi ^e siècles	36
4.2.1 Quelques définitions	36
4.2.2 Cycle hydrologique en France dans la seconde moitié du xx ^e siècle	38
4.2.3 Cycle hydrologique en France au xxi ^e siècle et incertitudes	42
4.3 Impact sur la disponibilité en eau douce superficielle	44
4.3.1 Qu'en sera-t-il en France au milieu du xxi ^e siècle ?	44
4.3.2 Et si on dépassait les + 2 °C, voire les + 3 °C en 2050 ?	47
4.4 Impact sur la disponibilité en eaux souterraines	47
4.5 Quelles solutions ?	49

5 Les conséquences du changement climatique sur la qualité des eaux douces destinées à la production d'eau potable	51
5.1 Préambule	51
5.1.1 Rareté des études sur ce sujet	52
5.1.2 Trois phénomènes hydro-climatologiques principaux induiront des effets sur la qualité des eaux douces	52
5.2 Effet de moindre dilution des pollutions	53
5.2.1 Constat actuel	53
5.2.2 Quelles méthodes d'approche pour mesurer cet effet ?	53
5.3 Effets de l'augmentation de la température de l'eau	54
5.3.1 Constat actuel	54
5.3.2 De la nécessité d'améliorer l'interprétation des mesures et leur modélisation	55
5.3.3 Quelle augmentation de température des cours d'eau au XXI ^e siècle ?	55
5.3.4 Principaux effets attendus sur la qualité des eaux douces superficielles	56
5.3.5 Effets incertains	56
5.4 Effets de la modification des cycles hydrologiques en fréquence et en intensité	57
5.4.1 Stock des polluants dans la zone vadose (ou non saturée)	57
5.4.2 Stock des polluants dans les archives sédimentaires	58
5.4.3 Effets attendus	58
5.5 Exemples caractéristiques d'impacts du changement climatique sur la qualité des eaux douces naturelles	58
5.5.1 Un risque écologique supplémentaire	58
5.5.2 Les cyanobactéries et les microcystines	59
5.5.3 La teneur en matière organique naturelle (MON) et sa nature	60
5.5.4 Les nitrates	63
5.5.5 Les pesticides et métabolites	64
5.5.6 Les métaux	68
5.5.7 pH	68
5.6 Quelques pistes de solutions	69

6 Les impacts du changement climatique sur la demande en eau potable, sa qualité, son traitement et son coût	71
6.1 Effet du changement climatique sur la demande en eau douce en France	72
6.1.1 « Offre vs demande en eau » au niveau national (bilan Explore 2070)	72
6.1.2 « Offre vs demande en eau » au niveau d'un bassin hydrographique (Adour-Garonne)	74
6.1.3 « Offre vs demande en eau » pour l'AEP	76
6.2 Les impacts du changement climatique sur la qualité, le traitement et la distribution en réseau des EDCH	77
6.2.1 Théoriquement pas d'impact sur la qualité de l'eau au robinet du consommateur	77
6.2.2 Plusieurs impacts sur le traitement et la distribution de l'eau, fonctions du type de ressource	77
6.3 Les impacts du changement climatique sur le coût de l'eau distribuée	82
6.3.1 L'augmentation tendancielle du coût total de l'eau à l'horizon 2040 pour le consommateur	83
6.3.2 Évaluation de l'augmentation du coût du seul service « Eau potable », due aux impacts du changement climatique	83
Sources et supports	88

C. ÉVALUER LES RISQUES ET SATISFAIRE AUX PARAMÈTRES DE QUALITÉ

7 L'évaluation des risques	93
7.1 Le risque sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine (EDCH)	93
7.1.1 Définitions	93
7.1.2 L'établissement des valeurs paramétriques (ou normes) de qualité est la première démarche d'évaluation et de gestion du risque sanitaire	94

7.1.3 La surveillance du respect des paramètres microbiologiques et chimiques est-elle actuellement suffisante ?	96
7.1.4 Les réseaux de distribution peuvent changer la qualité de l'eau traitée	98
7.2 L'évaluation du risque sanitaire et sa gestion moderne	98
7.2.1 Les récentes consignes réglementaires	99
7.2.2 Quelques outils utilisés pour l'évaluation des risques	101
7.2.3 Mise en place d'un plan de gestion de la sécurité sanitaire de l'eau (PGSSE)	102
7.3 Perspectives	102
7.3.1 Un changement de paradigme sur la surveillance analytique du risque devient nécessaire	102
7.3.2 La formation continue des PRPDE et de leur personnel doit être mieux adaptée	103
7.3.3 L'information donnée au public doit être plus complète, plus explicite et moins « déformée »	103
7.3.4 Les impacts du changement climatique doivent être impérativement et urgemment considérés	103
8 Satisfaire aux paramètres microbiologiques	104
8.1 La pratique du suivi de la qualité microbiologique d'une eau	104
8.2 Les bactéries indicatrices de contamination et d'efficacité de traitement ou « germes tests »	105
8.2.1 <i>Escherichia coli</i> et bactéries coliformes	106
8.2.2 Entérocoques (<i>Enterococcus</i>)	107
8.2.3 Bactéries sulfito-réductrices (<i>Clostridium perfringens</i>)	107
8.2.4 Germes aérobies revivifiables à 22 et 37 °C	108
8.3 Autres indicateurs réglementaires	108
8.3.1 Bactériophages et coliphages somatiques	108
8.3.2 <i>Legionella</i>	109
8.4 Pathogènes à transmission hydrique	109
8.4.1 Autres bactéries spécifiques	109
8.4.2 Virus	110
8.4.3 Protozoaires	111
8.5 Cyanobactéries et algues	113
8.5.1 Cyanobactéries et cyanotoxines	113
8.5.2 Algues	114

9 Satisfaire aux paramètres chimiques	116
9.1 Acides haloacétiques (AHA)	117
9.2 Acides perfluorooctanoïques et perfluorooctanesulfoniques	118
9.3 Acrylamide	119
9.4 Aldéhydes	120
9.5 Aluminium total	120
9.6 Amiante	122
9.7 Ammonium ou azote ammoniacal	123
9.8 Antimoine	126
9.9 Arsenic	126
9.10 Baryum	129
9.11 Benzène	130
9.12 Benzo(a)pyrène et HAP	131
9.13 Bisphénol A et autres perturbateurs endocriniens	133
9.14 Bore (borates)	135
9.15 Bromates (et bromures)	136
9.16 Cadmium	138
9.17 Carbone organique total ou COT (et COP/COD/CODB)	139
9.18 Chlorates	144
9.19 Chlore libre et chlore total	144
9.20 Chlorites	145
9.21 Chlorures	146
9.22 Chlorure de vinyle (monomère ou CVM)	147
9.23 Chrome	148
9.24 Conductivité	149
9.25 Cosmétiques	151
9.26 Couleur	151
9.27 Cuivre	152
9.28 Cyanures totaux	153
9.29 Dichloroéthane (1,2-)	154
9.30 Épichlorhydrine	154
9.31 Équilibre calco-carbonique	155
9.32 Fer total	156

Table des matières

9.33 Fluorures	159
9.34 Manganèse	161
9.35 Médicaments (résidus pharmaceutiques et vétérinaires)	164
9.36 Mercure total	166
9.37 Microcystine LR et totale	167
9.38 Microplastiques	168
9.39 Nanoparticules (et colloïdes)	169
9.40 N-nitrosodiméthylamine (NDMA)	170
9.41 Nickel	171
9.42 Nitrates	172
9.43 Nitrites	179
9.44 Nonylphénol	180
9.45 Odeur et saveur	180
9.46 Œstradiol (β)	182
9.47 Oxydabilité au permanganate de potassium	182
9.48 Perchlorates	182
9.49 Pesticides et métabolites	183
9.49.1 Les pesticides dans les eaux naturelles et EDCH	184
9.49.2 Pour éliminer les pesticides dans les eaux	186
9.50 PFAS ou substances alkylées per- et polyfluorées	188
9.51 pH ou potentiel hydrogène	190
9.52 Plomb	192
9.53 PMOC ou polluants organiques polaires	194
9.54 Radioactivité – Dose totale indicative	194
9.55 Radon	196
9.56 Sélénium	196
9.57 Sodium	197
9.58 Sulfates	198
9.59 Température	198
9.60 Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène	200
9.61 Thallium	201
9.62 Trihalométhanés (THM)	201
9.63 TOX (ou AOX)	203

9.64 Tritium	204
9.65 Turbidité	204
9.66 Uranium	206

Sources et supports	208
----------------------------	------------

D. LA CLARIFICATION

10 Coagulation et floculation	225
10.1 Notions théoriques de coagulation/floculation	225
10.1.1 Pourquoi une suspension colloïdale ne décante pas ou décante mal ?	226
10.1.2 Le potentiel zêta (et le SCD)	226
10.1.3 L'agglomération des colloïdes, même déstabilisés, n'est pas spontanée, il faut la provoquer	227
10.1.4 Les principaux modes (mécanismes) connus de coagulation/floculation	227
10.1.5 Calcul du gradient de vitesse de coagulation et de floculation	230
10.2 La pratique de la coagulation/floculation en usine	231
10.2.1 Réactifs	231
10.2.2 Réacteurs	233
10.3 Conditions d'une bonne coagulation/floculation	234
10.3.1 Choix des réactifs, de leurs doses et du pH de coagulation	234
10.3.2 Doses et pH optimaux de coagulation	236
10.3.3 Utilisation de floculants	238
10.4 Performances et dysfonctionnements évalués après sédimentation (décantation ou flottation)	239
10.4.1 Floccs trop petits et/ou trop légers	239
10.4.2 Fuite en coagulant	240
10.4.3 Mauvaise élimination du COT (et COD)	240
11 Sédimentation (décantation et flottation)	241
11.1 Notions de sédimentation (clarification par voie gravitaire)	241
11.1.1 Les vitesses de sédimentation (au sens décantation) et de flottation se calculent ou se mesurent	241

11.1.2	La sédimentation sous flux vertical	243
11.1.3	La sédimentation sous flux horizontal	243
11.1.4	La décantation lamellaire	244
11.1.5	La décantation à contact de boues	246
11.1.6	Le principe de la flottation à air dissous (FAD) ou aéroflottation	246
11.1.7	Les essais en vue d'optimiser la décantation et la flottation	248
11.2	La pratique de la décantation	251
11.2.1	Décanteurs statiques	252
11.2.2	Décanteurs à contact de boues	254
11.2.3	Décanteurs « à grande vitesse »	255
11.3	La pratique de la flottation	257
11.3.1	Bases de dimensionnement	257
11.3.2	Ballons de pressurisation	258
11.3.3	Différents types de flottateurs à air dissous	258
11.4	Performances à attendre	259
11.4.1	MES et turbidité	259
11.4.2	Matières organiques oxydables (COT et indice permanganate)	260
11.4.3	Résiduel en coagulant dissous	260
11.4.4	Micro-organismes	260
11.4.5	Minéraux toxiques et indésirables	261
11.4.6	Micropolluants organiques	261
11.4.7	Production de boues	261
11.4.8	Dysfonctionnements	262
12	Filtration (sur lit de matériau granulaire et membranaire)	264
12.1	Notions de filtration	265
12.1.1	Caractéristiques des milieux filtrants	265
12.1.2	L'élimination des particules, des phénomènes complexes (détails en G-D18 et G-D19)	267
12.1.3	L'hydraulique du lit filtrant (détails en G-D20)	268
12.1.4	Transfert hydraulique en filtration membranaire (détails en G-D21 et G-D22)	268

12.2	La pratique de la filtration en profondeur	269
12.2.1	Différents types de filtres en profondeur et de fonctionnements	269
12.2.2	Matériaux granulaires	274
12.2.3	Paramètres de dimensionnement de la filtration rapide en profondeur	274
12.2.4	Production (ou charge) et fréquence de lavage à attendre	274
12.2.5	Monocouche vs bicouche	275
12.2.6	Filtration lente	275
12.2.7	Principaux dysfonctionnements	275
12.3	La pratique de la filtration membranaire	276
12.3.1	Membranes, modules et mode d'alimentation	276
12.3.2	Mise en œuvre de la filtration membranaire	277
12.3.3	Énergie consommée et renouvellement des membranes	281
12.4	Performances à attendre	282
12.4.1	Les paramètres à mesurer sur l'eau	282
12.4.2	Le suivi des filtres en profondeur et de leurs matériaux granulaires	285
12.4.3	Le suivi des membranes	287
12.4.4	Les performances à attendre	289
12.5	La gestion des eaux de lavage de filtration	291
12.5.1	Résumé des recommandations 2017 de l'ANSES	291
12.5.2	Aspect réglementaire (méthodologie préconisée par l'ANSES)	294
12.5.3	Sur le devenir des concentrats de membrane et des eaux sales de lavage	295
	Sources et supports	296

E. LES TRAITEMENTS D’AFFINAGE

13	Mise à l'équilibre	305
13.1	L'équilibre calco-carbonique des eaux	305
13.1.1	L'importance du dioxyde de carbone (CO ₂) dissous	306
13.1.2	Qu'est-ce que le pH d'équilibre ou de saturation (pH _S) ?	306

13.1.3 Les paramètres à mesurer	307
13.1.4 Détermination de l'agressivité et du caractère entartrant	310
13.1.5 Tests et indices	312
13.2 Les traitements courants de mise à l'équilibre	313
13.2.1 Réactifs	314
13.2.2 Neutralisation du CO_2 agressif	315
13.2.3 Reminéralisation	317
13.3 La théorie et la pratique de la décarbonatation par précipitation	318
13.3.1 Solubilité de la calcite (CaCO_3) et de la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)	319
13.3.2 Principales réactions mises en jeu et doses théoriques de réactifs	319
13.3.3 Mise en œuvre de la décarbonatation (chaux et/ou soude)	322
13.3.4 Performances attendues	323
13.4 Adoucissement par échange d'ions	323
13.4.1 Adoucissement par échangeur de cations fortement acide, régénéré par NaCl	323
13.4.2 Décarbonatation par échangeur d'ions faiblement acide, régénéré à l'acide chlorhydrique ou sulfurique	324
13.4.3 Autres procédés (indirects) d'adoucissement	325
13.4.4 Conseils d'installation et d'utilisation d'adoucisseur domestique	325
14 Affinage par charbon actif	328
14.1 L'adsorption : une réaction équilibrée et non instantanée	328
14.1.1 Modélisation de l'équilibre (capacité d'adsorption)	329
14.1.2 Modélisation de la cinétique (vitesse d'adsorption)	332
14.2 Le matériau charbon actif	332
14.2.1 Origine et fabrication	333
14.2.2 Caractéristiques texturales	333
14.2.3 La morphologie (CAG/CAP)	334
14.3 Les objectifs recherchés	334
14.3.1 Objectifs recherchés	335
14.3.2 Sélection d'un charbon actif	335

14.4	La filtration sur charbon actif en grains (CAG)	336
14.4.1	Mise en œuvre et exploitation	336
14.4.2	Performances habituelles de la filtration CAG	337
14.4.3	Inconvénients et dysfonctionnements fréquents de la filtration CAG	340
14.5	Les traitements d'affinage avec charbon actif en poudre (CAP) et en micrograins (CA μ G)	341
14.5.1	Mise en œuvre et exploitation, en général	341
14.5.2	Le CAP en clarification	341
14.5.3	Les réacteurs à CAP pour traitement d'affinage	342
15	Place et rôle de l'ozonation	346
15.1	Préambule	346
15.2	Rôle de l'inter-ozonation et résultats attendus	347
15.2.1	L'ozone désinfecte efficacement	347
15.2.2	L'ozone « fabrique » du CODB	347
15.2.3	L'ozone oxyde de nombreuses espèces minérales	348
15.2.4	L'ozone diminue les potentiels de formation de THM et TOX	348
15.2.5	L'ozone est une barrière efficace contre les micropolluants organiques	348
15.2.6	L'ozonation produit des bromates	349
15.2.7	En conclusion	349
15.3	La pré-ozonation est-elle justifiée ?	350
16	Nanofiltration (et osmose inverse basse pression)	351
16.1	Les procédés de NF et OIBP	351
16.1.1	Quelles différences fondamentales avec les procédés membranaires de clarification (MF et UF)	351
16.1.2	Une mise en œuvre plus complexe	352
16.1.3	Place dans la filière de traitement	353
16.1.4	Le pré-traitement	353
16.1.5	Colmatage et nettoyage des membranes	354
16.2	Les performances	354
16.3	La nécessité de post-traitements	355
	Sources et supports	356

F. LA DÉSINFECTION

17 Notions théoriques sur la désinfection chimique	363
17.1 Problématique et objectifs de la désinfection chimique	363
17.1.1 Désinfection chimique en usine	364
17.1.2 Désinfection en réseau	365
17.2 Relations dose/effet en désinfection	365
17.2.1 Notion de $C.t$ en désinfection chimique	365
17.2.2 Différentes approches d'évaluation de la valeur de t	366
17.2.3 Différentes approches d'évaluation de la valeur de C	368
17.2.4 Distribution du temps de séjour par traçage	369
17.2.5 Quelques valeurs de $C.t_{10}$ d'après l'US EPA	369
17.2.6 Pour la suite de cette partie	370
17.3 La physico-chimie (de base) des désinfectants	370
17.3.1 Physico-chimie et propriétés du chlore libre	372
17.3.2 Physico-chimie et propriétés du dioxyde de chlore	377
17.3.3 Physico-chimie et propriétés de l'ozone	379
18 La pratique de la chloration	384
18.1 Réactifs et réacteurs	384
18.1.1 Chlore gazeux, Cl_2	384
18.1.2 Hypochlorite de sodium ($NaOCl + NaOH$) ou eau de Javel et hypochlorite de calcium ($Ca(OCl)_2$)	385
18.1.3 Dioxyde de chlore (ClO_2) et chlorite de sodium (ClO_2^-)	385
18.1.4 Bassin (ou bêche) de contact en usine	386
18.1.5 Analyseur en ligne	386
18.2 Conditions d'une bonne chloration en production	386
18.2.1 $C.t$ à appliquer	387
18.2.2 Demande en chlore et taux de chloration en production	387
18.2.3 Formation de sous-produits de chloration en usine (production)	388
18.2.4 Traçages	392
18.3 Chloration en réseau de distribution	392
18.3.1 Évolution du chlore libre résiduel en réseau	392

18.3.2	Évolution du dioxyde de chlore en réseau	393
18.3.3	Rechloration en réseau	393
18.3.4	Évolution des THM (et AHA) en réseau	394
18.3.5	Entretien du réseau par désinfection	395
18.3.6	Réactions du chlore et du dioxyde de chlore avec les matériaux du réseau	395
18.4	Comment maîtriser le risque de formation de sous-produits de chloration (THM, AHA et autres) ?	396
18.4.1	Optimiser l'élimination des précurseurs	397
18.4.2	Optimiser les conditions de chloration	397
18.5	Les paramètres à contrôler en chloration	397
18.5.1	Qualité microbiologique de l'eau	398
18.5.2	Qualité physico-chimique de l'eau	399
18.5.3	Paramètres de dimensionnement	400
19	La pratique de l'ozonation	401
19.1	Réactifs et réacteurs	402
19.1.1	Ozone, O_3	402
19.1.2	Gaz vecteur (air ou oxygène)	402
19.1.3	Production d'ozone	402
19.1.4	Analyseurs en ligne	402
19.1.5	Réacteurs ou cuves d'ozonation	403
19.2	Conditions d'une bonne désinfection par l'ozone	404
19.2.1	$C.t$ à appliquer	404
19.2.2	Demande en ozone et taux d'ozonation	405
19.2.3	Formation de bromates (BrO_3^-)	406
19.3	Comment maîtriser le risque de formation de bromates ?	406
19.3.1	Maîtriser le $C.t$	406
19.3.2	Ozoner à pH le plus faible possible	407
19.3.3	Tenter une modélisation permettant ainsi d'évaluer le risque de formation en post- ou inter-ozonation	407
19.3.4	Évolution des bromates après leur formation	408
19.4	Les paramètres à contrôler en (post- ou inter-) ozonation	408
19.4.1	Paramètres spécifiques à l'ozonation	408

19.4.2 Organisation spécifique liée au contrôle des bromates	409
19.4.3 Paramètres de dimensionnement	410
20 Désinfection UV	411
20.1 Physico-chimie et propriétés des radiations UV	411
20.1.1 Notion de <i>I.t</i> en désinfection UV (BUNSEN-ROSCOE)	412
20.1.2 Exemples de doses de rayons UV pour l'inactivation des micro-organismes, notamment des virus	413
20.2 Génération de rayons UV (lampes UV)	413
20.3 Réacteurs	414
20.3.1 Description générale	414
20.3.2 Contrôle et entretien	414
20.4 Conditions d'une bonne désinfection UV	414
20.4.1 Transmittance et absorbance	414
20.4.2 Doses à appliquer	415
20.4.3 Calcul du débit à appliquer	416
20.4.4 Performances attendues	416
20.4.5 Sous-produits de désinfection	417
20.5 Paramètres à contrôler	417
20.5.1 Sur la qualité de l'eau à désinfecter	417
20.5.2 Sur les équipements	417
20.5.3 Cahier des charges	418
20.5.4 Sur les eaux désinfectées	418
Sources et supports	419
Index	423

A

**LE TRAITEMENT
DES EAUX DESTINÉES
À LA CONSOMMATION
HUMAINE**



L'eau potable en France

Fin du XIX^e siècle, début du XX^e, avec les découvertes en microbiologie, on assiste à une prise de conscience sur le risque sanitaire par l'eau suite à l'établissement de la relation entre les grandes épidémies européennes (choléra et fièvre typhoïde) et la pollution des eaux d'égouts. Ces constats aboutissent en 1900, en France, à la première circulaire ministérielle qui annonce qu'une analyse chimique ne suffit pas pour apprécier la salubrité de l'eau mais qu'il faut aussi une analyse microbiologique (sans préciser les méthodes).

1.1 Préambule

1.1.1 L'exigence d'absence de germes pathogènes

La première élaboration d'une réglementation aboutira en 1962 à une exigence essentielle mais invérifiable « d'absence de tout germe pathogène ». C'est en effet au milieu du XX^e siècle que le concept d'évaluation des risques prend naissance et qu'il devient obligatoire pour les eaux destinées à la consommation humaine de respecter l'absence de certains germes tests, qui est considérée comme représentative d'un très faible risque de la présence redoutée de certains pathogènes comme *Salmonella* et *Shigella*. Cet objectif sanitaire « d'absence de germes tests » a aujourd'hui montré son efficacité et on lui doit sans doute une partie des énormes progrès dans le domaine de l'hygiène publique.

1.1.2 Les premières filières simples de traitement

L'effet bénéfique de la filtration de l'eau est mis en évidence dès la fin du XIX^e siècle, au moment des grandes épidémies. C'est dans le premier quart du XX^e siècle que se développent les procédés de filtration lente, de désinfection (javellisation, ozonation, iodation) puis de clarification utilisant la coagulation.

Dans les années 1960-1970, le traitement de l'eau pour la production d'eau potable demeure toujours très simplifié. Les eaux souterraines sont simplement pompées et chlorées et le traitement des eaux superficielles est conçu suivant le schéma classique « pré-chloration fréquente, coagulation, floculation, décantation, filtration sur sable, désinfection par chloration ».

1.1.3 Les évolutions récentes

Ces dernières décennies, le développement de la chimie et de la microbiologie analytiques, ainsi que celui de la toxicologie et de l'épidémiologie ont permis de détecter de nombreuses molécules chimiques et de nouveaux micro-organismes présents dans les eaux naturelles et d'évaluer leurs effets sur la santé.

Il est incontestable que la plupart de ces substances sont nouvelles, car issues de la consommation exponentielle de nouvelles molécules de synthèse associée à l'augmentation de la population. Les nombreuses molécules dérivées de l'industrie chimique dont les pesticides, ou encore les hormones de synthèse, les résidus pharmaceutiques et les produits cosmétiques (plus récemment analysables) en sont des exemples révélateurs. Nombreux de ces polluants existent depuis longtemps dans les eaux distribuées à des concentrations qui étaient jadis parfois plus élevées qu'aujourd'hui, mais soit de nature et/ou de toxicité non connues, soit non analysables. C'était le cas par exemple des trihalométhanes, des bromates, des monomères de matériaux ou encore des hormones naturelles.

Pour la plupart de ces substances chimiques, le risque est surtout à long terme et les réglementations sont établies dans ce sens avec la notion de concentration maximale admissible (CMA) à respecter (§ 2.3). Quand la prévention de la pollution n'est pas suffisante et/ou quand le traitement de l'eau est insuffisamment efficace pour satisfaire ces exigences de CMA, les filières de traitement doivent être adaptées (dès leur conception ou lors de leur réhabilitation). Ces dernières décennies, les premières filières simples, citées ci-dessus, ont donc dû intégrer des traitements spécifiques, généralement pour eau souterraine, et des traitements dits « d'affinage » ou « de finition » pour eau de surface.

C'est ainsi que de nombreux procédés ont vu le jour à la fin du xx^e siècle. Ceux utilisant des membranes, initiés dans les années 1980, constituent certainement le saut technologique le plus important dans le domaine de la production d'eau potable. Permettra-t-il d'atteindre le concept « d'eau sans chlore », recherché depuis les années 1990 ? C'est encore inimaginable aujourd'hui dans la très grande majorité des cas, compte tenu de la nécessité de distribuer l'eau dans des réseaux qui demeurent toujours très sensibles au développement d'une pollution microbiologique.

1.2 Les besoins en eau potable ou en eau destinée à la consommation humaine (EDCH)

La France dispose de l'ordre de 190 milliards de m³ de ressources en eau renouvelables avec de fortes disparités géographiques et saisonnières. Chaque année, la France doit puiser environ 5 à 5,5 milliards de m³ (*i.e.* 5 à 5,5 km³) de ces ressources en eau pour ses besoins en eau potable : un peu moins de 70 % de ce volume en eau souterraine et un peu plus de 30 % en eau de surface. En comptabilisant les autres usages, ce sont entre 33 et 34 milliards de m³ de prélèvements dont la France a besoin, la production d'eau potable ne représentant que de l'ordre de 16 % de ce total des prélèvements (détails en G-A1).

À noter que lorsqu'on parle de prélèvements dans les ressources en eau (ou de disponibilité en eau), en se référant à des notions environnementales (dans les agences de

l'eau par exemple), on qualifie l'usage domestique par « usage pour l'eau potable ». Lorsque cette problématique est présentée sur un plan sanitaire, on parle plutôt d'eau destinée à la consommation humaine (EDCH). Les deux appellations seront utilisées, parfois indifféremment, dans cet ouvrage.

1.2.1 Les quantités d'eau potable à produire par habitant

Aujourd'hui, on peut raisonnablement se baser sur une valeur de consommation moyenne de 146 litres par habitant et par jour (soit 53 m³ annuels par habitant). Cette valeur peut être jusqu'à 3 à 4 fois plus faible en zone rurale et 2 fois plus élevée dans certains milieux urbains. Elle a constamment augmenté jusqu'en 1992-1993 puis a diminué progressivement, notamment par souci de réduction de la facture d'eau au niveau des gros consommateurs, mais aussi par changement de comportement des petits consommateurs conduisant à une diminution des pertes d'eau.

Il faut noter qu'un prélèvement de 5 à 5,5 km³ dans les ressources pour produire de l'eau potable destinée à 67 millions d'habitants conduit à une valeur annuelle de près de 75 à 82 m³ prélevés par habitant et par année à comparer avec les 53 m³ annuels de consommation moyenne nationale par habitant. En fait, la perte d'eau en réseau, bien que réduite ces dernières années, est estimée en 2020 à 850 à 900 millions de m³ par année, soit de l'ordre de 13 m³ par habitant et par an (c.-à-d. 20 % du volume mis en distribution en sortie usine). Les pertes d'eau lors du traitement, les consommations par le secteur tertiaire, le secteur public et le secteur industriel (consommant de l'eau potable) doivent expliquer la différence restante.

C'est donc entre 205 et 225 litres par habitant et par jour de prélèvement d'eau douce pour la production d'eau potable qu'il faut prévoir en moyenne au niveau national. Ceci n'est pas une règle infaillible, il faut tenir compte des spécificités de chaque secteur couvert par la distribution d'eau potable.

1.2.2 Les qualités des ressources destinées à la production d'eau potable

On peut classer les principales substances (naturelles et d'origine anthropique) présentes dans les eaux naturelles et/ou dans les eaux distribuées par leur origine :

- ▶ les impuretés biologiques, comme les bactéries, les virus, les protozoaires parasites et le phytoplancton ;
- ▶ les impuretés minérales sans effet appréciable sur la santé ou avec un effet indirect, comme la turbidité, la couleur, la minéralisation, certains métaux de transition, l'ammonium et certains gaz dissous ;
- ▶ les impuretés minérales avec effet appréciable sur la santé, comme les métaux lourds, les formes oxydées de l'azote, l'antimoine, l'arsenic, le baryum, le bore, le fluor et le sélénium ;
- ▶ les impuretés organiques mesurées par les paramètres globaux (COT, oxydabilité au KMnO₄) ;
- ▶ les micropolluants organiques avérés (pesticides, solvants chlorés, hydrocarbures, PCB, détergents) et les micropolluants émergents (PFAS, perturbateurs endocriniens, résidus pharmaceutiques, cosmétiques, etc.) ;
- ▶ les impuretés de nature radioactive.

De plus, de nouvelles impuretés seront introduites par le traitement et la distribution, comme les coagulants, les sous-produits de désinfection (THM, bromates, chlorites, chlorates), le plomb et les monomères de floculants et de matériaux au contact de l'eau. La présence de ces impuretés induira différentes problématiques à résoudre lors du traitement de l'eau (exemples en G-A1).

1.2.3 Quelques chiffres sur la production d'eau potable en France

On estime le nombre de captages à environ 33 000 (dont de l'ordre de 95 % en eau souterraine), mais 90 % de ces captages ne produisent que 21 % des volumes. Le volume global capté représente 14 à 15 millions de m³ par jour, en moyenne, dont 32 % en eau superficielle et 68 % en eau souterraine.

De l'ordre de 80 % des ressources en eaux superficielles pour l'alimentation en eau potable sont des eaux courantes (rivières, canaux) et 20 % des eaux stagnantes (dont 13 % de barrages et réservoirs).

En termes d'ouvrages, l'alimentation en eau potable en France compte théoriquement entre 16 000 et 17 000 stations de production dont environ 3 000 usines, 850 000 à 900 000 km de canalisations et plus de 10 millions de m³ de capacité de réservoirs, soit à peine une journée de consommation.