

JEAN RODIER  BERNARD

avec la collaboration de Nicole Me...

**CAMPUS**
PRO

L'ANALYSE DE L'EAU

CONTRÔLE ET INTERPRÉTATION

10^e édition
entièrement
mise à jour

DUNOD

2-628-12-1

JEAN RODIER  **BERNARD LEGUÉ**
avec la collaboration de Nicole Merlet

L'ANALYSE DE L'EAU

CONTRÔLE ET INTERPRÉTATION



10^e édition
entièrement mise à jour

DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

1^{RE} PARTIE

EAUX NATURELLES, EAU POTABLE ET RÉSEAUX

A

Analyse physico-chimique

1 • Prélèvements, connexions aquifères, débits cours d'eau	5
1.1 Prélèvement de l'eau par échantillonnage actif et conservation	5
1.1.1 Différentes procédures de prélèvement,	5
1.1.2 Matériel de prélèvement,	6
1.1.3 Mode de prélèvement <i>versus</i> type de masse d'eau,	7
1.1.4 Volume de prélèvement,	8
1.1.5 Conditionnement et filtration,	8
1.1.6 Entre prélèvement et analyse,	9
1.1.7 Périodicité,	10
1.1.8 Enregistrement,	10
1.1.9 Aide-mémoire,	11
1.2 Prélèvement intégratif par échantillonnage passif	14
1.2.1 Principe, apports et limitations actuelles,	15
1.2.2 Principaux types d'échantillonneurs passifs,	17
1.2.3 Échantillonneur à membrane semi-perméable – Semi Permeable Membrane Device (SPMD),	20
1.2.4 Gradient de diffusion en couche mince - Diffusive Gradient in Thin film (DGT),	22
1.2.5 Échantillonneur intégratif de composés polaires - Polar Organic Chemical Integrative Sampler (POCIS),	25
1.2.6 Chemcatcher®,	28
1.2.7 Bande de polyéthylène basse densité - Low Density PolyEthylène (LDPE),	31
1.2.8 Bande de caoutchouc de silicone - Silicone rubber (SR),	33
1.2.9 Précautions nécessaires pour la quantification <i>in situ</i> ,	35
1.3 Principaux renseignements à fournir pour une analyse d'eau	36
1.4 Principales analyses à effectuer sur site	37

1.5 Détermination des connexions hydrauliques et des propriétés des aquifères: utilisation de traceurs	38
1.5.1 Objectif des essais de traçage, 39	
1.5.2 Précautions à prendre lors des essais de traçage, 40	
1.5.3 Critères de choix des traceurs, 40	
1.5.4 Principaux traceurs utilisés, 41	
1.5.5 Techniques d'analyse des traceurs, 46	
1.5.6 Interprétation des essais de traçage, 47	
1.6 Mesure des débits	49
2 • Caractères organoleptiques	59
2.1 Couleur (Référence de qualité « Eau potable »)	59
2.2 Odeur (Référence de qualité « Eau potable »)	61
2.3 Goût, saveur, flaveur (Référence de qualité « Eau potable »)	65
3 • Particules en suspension, colloïdes et nanoparticules	69
3.1 Taille des particules dans les eaux naturelles	69
3.2 Matières décantables	70
3.3 Matières en suspension	71
3.3.1 Méthode par filtration sur fibre de verre, 71	
3.3.2 Méthode par centrifugation, 72	
3.3.3 Méthode par ultra-centrifugation, 73	
3.3.4 Examen microscopique du dépôt (*), 73	
3.4 Nanoparticules et particules colloïdales	73
3.4.1 Analyse dimensionnelle, 74	
3.4.2 Détermination de la concentration et de la composition, 78	
3.4.3 Autres informations: physicochimie de surface, 79	
3.4.4 Exemple de démarche analytique, 80	
3.5 Résidu total	82
3.6 Turbidité (limite de qualité « Eau potable »)	82
3.6.1 Méthode « des gouttes de mastic », 85	
3.6.2 Méthode à la silice, 85	
3.6.3 Méthode néphélométrique à la formazine, 85	
3.7 Potentiel ZETA	86
3.8 Potentiel d'écoulement (ou « Streaming Current Detector – SCD » ou « Streaming Current Meter – SCM » ou « Streaming Potential Detector – SPD »)	87
3.9 Pouvoir colmatant	89
3.10 Indices de colmatage	89
3.10.1 Modèles de colmatage des pores, 89	
3.10.2 Indice de colmatage FI (<i>Fouling Index</i>), 90	
3.10.3 Indice de colmatage MFI (<i>Modified Fouling Index</i>), 92	
3.10.4 Indice de colmatage UMFI (<i>Unified Membrane Fouling Index</i>), 92	

4 • Gaz dissous (gaz de l'eau)	95
4.1 Solubilité des gaz dans l'eau	95
4.2 Dosage des gaz totaux	96
4.3 Oxygène dissous	97
4.4 Dioxyde de carbone (anhydride carbonique)	101
5 • Salinité totale, potentiels et titres	103
5.1 Résidus et sels dissous totaux	103
5.1.1 Résidu sec (ou sels dissous totaux sur eau filtrée),	103
5.1.2 Résidu minéralisé et perte au feu,	104
5.1.3 Détermination du résidu fixe sulfaté,	105
5.2 Conductivité électrique (Référence de qualité « Eau potable »)	105
5.2.1 Mesure de la conductivité électrique,	105
5.2.2 Conductivité équivalente et conductivité réelle,	111
5.2.3 Conductivité permanente,	111
5.2.4 Minéralisation globale de l'eau,	111
5.3 pH (Référence de qualité « Eau potable »)	113
5.3.1 Méthode colorimétrique,	114
5.3.2 Méthode potentiométrique avec électrode de verre,	114
5.3.3 Solutions tampons de référence,	117
5.4 Potentiel d'oxydo-réduction	121
5.5 rH	124
5.6 Acidité	124
5.6.1 Acidité forte,	125
5.6.2 Dioxyde de carbone dissous (CO ₂ libre),	125
5.7 Alcalinité (TA-TAC)	129
5.7.1 Titre alcalimétrique simple (TA),	130
5.7.2 Titre alcalimétrique complet (TAC),	130
5.7.3 Méthode titrimétrique de dosage du TA et du TAC,	132
5.7.4 Méthode pH-métrique au point équivalent,	133
5.7.5 Méthode potentiométrique,	134
5.7.6 Méthode par flux continu,	135
5.7.7 Relations entre les titres alcalimétriques (TA et TAC) et les concentrations en anions fondamentaux,	137
5.8 Carbone minéral total	137
5.9 Dureté ou titre hydrotimétrique (TH)	138
5.9.1 Dureté totale par titrimétrie à l'EDTA,	139
5.9.2 Détermination de la dureté calcique,	141
5.9.3. Détermination de la dureté magnésienne,	141
5.10 Titre acidimétrique (TACi) ou Anions d'acides forts ou Sels d'acides forts (SAF)	141

6 • Équilibre calcocarbonique (agressivité, entartrage)	145
6.1 Rappel historique des diverses méthodes proposées	146
6.2 Données analytiques nécessaires aux calculs d'équilibre calcocarbonique	147
6.3 Aspects théoriques de l'équilibre calcocarbonique	148
6.3.1 Relations entre les concentrations des éléments dissous,	148
6.3.2 Relations entre des éléments dissous et des éléments d'une autre phase,	149
6.3.3 Éléments fondamentaux – éléments caractéristiques,	150
6.3.4 Relations entre les éléments fondamentaux – bases des représentations graphiques,	151
6.4 Détermination de l'agressivité ou du caractère entartrant d'une eau et utilisation des méthodes graphiques	151
6.4.1 Indice de LANGELIER,	151
6.4.2 Méthode de HALLOPEAU et DUBIN,	152
6.4.3 Diagramme de LEGRAND et POIRIER,	153
7 • Cations et anions	161
7.1 Méthodes instrumentales pour l'analyse des cations et des anions	162
7.1.1 Spectrométrie d'absorption moléculaire (absorption des radiations lumineuses de l'UV et du visible),	164
7.1.2. Analyse en flux,	168
7.1.3 Chromatographie ionique (CI),	172
7.1.4 Spectrométrie d'émission de flamme,	185
7.1.5 Spectrométrie d'absorption atomique (SAA),	191
7.1.6 Spectroscopie atomique (émission ou masse) avec plasma à couplage inductif (ICP-OES ou ICP-MS),	201
7.1.7 Électrodes ioniques spécifiques-Potentiométrie,	209
7.1.8 Analyse par activation ,	213
7.2 Aluminium (référence de qualité « Eau potable »)	213
7.3 Ammonium (référence de qualité « Eau potable »)	215
7.4 Antimoine (limite de qualité « Eau potable »)	220
7.5 Argent	222
7.6 Arsenic (limite de qualité « Eau potable »)	223
7.7 Baryum (limite de qualité « Eau potable »)	225
7.8 Béryllium	227
7.9 Bismuth	228
7.10 Borate et bore (limite de qualité « Eau potable »)	229
7.11 Bromate (limite de qualité « Eau potable »)	234
7.12 Bromure	237
7.13 Cadmium (limite de qualité « Eau potable »)	238
7.14 Calcium	240
7.15 Carbonate et bicarbonate (ou hydrogénocarbonate)	245
7.16 Césium	246
7.17 Chlorate	246
7.18 Chlorite	247

7.19	Chlorure (référence de qualité « Eau potable »)	247
7.20	Chromate	252
7.21	Chrome (limite de qualité « Eau potable »)	253
7.22	Cobalt (limite de qualité « Eau potable »)	258
7.23	Cuivre (limite de qualité « Eau potable »)	259
7.24	Cyanure (limite de qualité « Eau potable »)	261
7.25	Étain	262
7.26	Fer (référence de qualité « Eau potable »)	263
7.27	Fluorure et fluor (limite de qualité « Eau potable »)	266
7.28	Gallium	269
7.29	Germanium	270
7.30	Indium	271
7.31	Iodure et Iode	271
7.32	Lithium	275
7.33	Magnésium	276
7.34	Manganèse (référence de qualité « Eau potable »)	277
7.35	Mercurure (limite de qualité « Eau potable »)	278
7.36	Molybdène	288
7.37	Nickel (limite de qualité « Eau potable »)	289
7.38	Nitrate (limite de qualité « Eau potable »)	290
7.39	Nitrite (limite de qualité « Eau potable »)	296
7.40	Perchlorate	300
7.41	Phosphate	300
7.42	Plomb (limite de qualité « Eau potable »)	305
7.43	Plutonium	307
7.44	Potassium	307
7.45	Radium	309
7.46	Sélénium (limite de qualité « Eau potable »)	309
7.47	Silicate soluble (orthosilicate) et silice totale	311
7.48	Sodium (référence de qualité « Eau potable »)	317
7.49	Strontium	318
7.50	Sulfate (référence de qualité « Eau potable »)	319
7.51	Sulfite et composés soufrés réducteurs	325
7.52	Sulfure	328
7.53	Thallium	328
7.54	Thiocyanate	329
7.55	Thiosulfate	329
7.56	Thorium	329
7.57	Titane	330
7.58	Tritium (limite de qualité « Eau potable »)	331
7.59	Uranium	331
7.60	Vanadium	331
7.61	Zinc	332

8 • Radioactivité	335
8.1 Généralités	335
8.1.1 Radioactivité naturelle,	335
8.1.2 Radioactivité artificielle,	335
8.1.3 Exposition annuelle de la population,	336
8.2 L'eau	336
8.2.1 Qualité radiologique de l'eau,	336
8.2.2 Conservation et manipulation des échantillons d'eau,	337
8.3 Détermination de la radioactivité d'un échantillon	337
8.3.1 Spectrométrie gamma,	338
8.3.2 Spectrométrie alpha,	339
8.3.3 Mesure de la radioactivité bêta,	340
8.3.4 Sources de référence pour l'étalonnage des appareils,	340
8.3.5 Limite de détection et seuil de décision,	341
8.3.6 Modèle statistique,	341
8.3.7 Expression des résultats,	341
8.4 Actinides	342
8.4.1 Uranium,	342
8.4.2 Plutonium,	343
8.4.3 Transuraniens (Pu, Am, Cm, Np) par spectrométrie alpha,	344
8.4.4 Radium,	345
8.4.5 Radon,	345
8.5 Strontium 90 et Yttrium 90	346
8.5.1 Indice de radioactivité β global en équivalent strontium 90,	346
8.5.2 Activité du strontium 90,	346
8.6 Tritium	347
8.7 Carbone 14	349
8.8 Césium 137	349
8.8.1 Méthode au phosphomolybdate d'ammonium,	349
8.8.2 Méthode du iodobismuthate de césium,	349
9 • Paramètres organiques globaux	351
9.1 Indice permanganate (référence de qualité « Eau potable »)	352
9.2 Demande chimique en oxygène (DCO)	355
9.3 Demande biochimique en oxygène (DBO)	355
9.4 Carbone organique total (COT) (référence de qualité « Eau potable »)	357
9.5 Carbone organique dissous biodégradable (CODB)	360
9.5.1 Méthode par bactéries fixées,	361
9.5.2 Méthode par bactéries en suspension,	364
9.6 Azote total et azote organique	366
9.6.1 Azote Kjeldahl (NK),	366
9.6.2 Azote par minéralisation au peroxydisulfate,	369
9.6.3 Dosage de l'azote global par chimiluminescence après oxydation en oxydes d'azote,	369

9.7 Composés phosphorés et phosphore total	371
9.7.1 Détermination des phosphates hydrolysables,	372
9.7.2 Détermination du phosphore total et du phosphore organique,	373
9.8 Composés organohalogénés (AOX)	375
9.9 Absorbance UV et absorbance UV spécifique (SUVA)	380
9.10 Matière organique naturelle et substances humiques	381
9.10.1 Fractionnement de la matière organique des eaux par filtration sur résines XAD,	383
9.10.2 Analyse chromatographique de classes de composés organiques: acides aminés et sucres,	385
10 • Micropolluants organiques	387
10.1 Méthodes instrumentales pour l'analyse des micropolluants organiques	388
10.1.1 Préparation et traitement de l'échantillon,	388
10.1.2 Chromatographie,	408
10.2 Acides haloacétiques	421
10.3 Acrylamide (limite de qualité « Eau potable »)	424
10.4 Agents de surface (tensioactifs, détergents)	425
10.5 Alcanes polychlorés à chaîne courte	430
10.6 Aldéhydes (et chloroaldéhydes)	432
10.7 AOX (et TOX)	436
10.8 Benzène (limite de qualité « Eau potable »)	438
10.9 Benzo(a)pyrène (limite de qualité « Eau potable »)	438
10.10 Bisphénols	438
10.11 BTEX	441
10.12 Chlorobenzènes	444
10.13 Chlorure de vinyle (limite de qualité « Eau potable »)	445
10.14 Complexants	445
10.15 Composés perfluorés (PFCs)	450
10.16 Cosmétiques	450
10.17 (1,2) – Dichloroéthane (limite de qualité « Eau potable »)	453
10.18 Dioxines	453
10.19 Ethers diphényles polybromés (PBDE)	454
10.20 Epichlorhydrine (limite de qualité « Eau potable »)	454
10.21 Hydrocarbures aromatiques monocycliques	456
10.22 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (limite de qualité « Eau potable »)	460
10.23 Hydrocarbures halogénés aliphatiques volatils	465
10.24 Hydrocarbures totaux (indice hydrocarbure)	469
10.25 MTBE (et ETBE)	473
10.26 Microcystine LR (limite de qualité « Eau potable »)	473
10.27 Mercaptans	476
10.28 Nitrosamines (NDMA)	477

10.29 Organostanniques	478
10.30 PBDE – Ethers diphényles polybromés	478
10.31 PFCs – Composés perfluorés	481
10.32 Perturbateurs endocriniens de type œstrogéniques (hormones)	483
10.33 Pesticides et apparentés (limite de qualité «Eau potable»)	489
10.33.1 Organochlorés par chromatographie gazeuse,	492
10.33.2 Organophosphorés (et organothiophosphorés) par chromatographie gazeuse,	497
10.33.3 Triazines par chromatographie gazeuse,	502
10.33.4 Phénylurées et triazines par chromatographie liquide,	503
10.33.5 Acides phénoxyalcanoïques par chromatographie gazeuse,	506
10.33.6 Glyphosate et AMPA par chromatographie liquide,	509
10.33.7 Aminotriazole par chromatographie gazeuse,	512
10.33.8 Méthodes multi-classes par chromatographie gazeuse,	512
10.33.9 Méthode multi-classes par chromatographie liquide,	517
10.34 Phénols	521
10.34.1 Méthode à l' amino-4-antipyrine (indice phénol),	522
10.34.2 Méthode par spectrométrie infra-rouge,	525
10.34.3 Chlorophénols par chromatographie gazeuse,	525
10.34.4 Chlorophénols par chromatographie liquide haute performance,	527
10.34.5 Nitrophénols par chromatographie gazeuse,	528
10.34.6 Nonylphénols et alkylphénols,	530
10.34.7 Bisphénols dont bisphénol A,	532
10.35 Phtalates	533
10.36 PCB (Polychlorobiphényles)	534
10.37 Résidus pharmaceutiques	534
10.38 Stupéfiants	536
10.39 Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène (limite de qualité «Eau potable»)	538
10.40 Trihalométhanes (THM) (limite de qualité «Eau potable»)	538
Bibliographie	539

B

Analyse microbiologique des eaux

1 • Généralités	569
2 • Méthodes générales de prélèvement, transport et conservation	571
2.1 Matériel de prélèvement	571
2.1.1 Choix et stérilisation des récipients, 571	
2.1.2 Appareils de prélèvement, 572	
2.2 Méthodes générales de prélèvement	572
2.2.1 Prélèvement à un robinet, 572	
2.2.2 Prélèvement dans un puits à l'aide d'un plongeur, 573	
2.2.3 Prélèvement dans une rivière, 574	
2.2.4 Prélèvement dans un lac ou une rivière profonde, 574	
2.2.5 Prélèvement aux griffons des sources, 574	
2.3 Prélèvements avec concentration de la population bactérienne (méthode de Moore) par adsorption sur de la gaze hydrophile	574
2.3.1 Prélèvement dans les eaux de surface, 575	
2.3.2 Prélèvement au robinet de distribution, 576	
2.4 Transport et conservation au laboratoire	576
3 • Méthodes générales d'examen bactériologique des eaux	579
3.1 Méthodes générales de dénombrement après concentration	579
3.1.1 Concentration <i>in situ</i> par adsorption, 579	
3.1.2 Concentration au laboratoire par filtration sur membranes, 579	
3.1.3 Dénombrement sur membrane filtrante, 581	
3.2 Méthodes générales de dénombrement direct par numération des colonies après ensemencement sur (ou dans) une gélose nutritive	582
3.2.1 Caractères généraux, 582	
3.2.2 Dénombrement par incorporation en gélose, 583	
3.2.3 Dénombrement par étalement en surface, 584	
3.3 Méthode générale de dénombrement en milieu liquide par détermination du nombre le plus probable (NPP)	584
3.3.1 Méthodologie, 584	
3.3.2 Systèmes d'ensemencement, 586	
3.3.3 Avantages et inconvénients des dénombrements sur milieux liquides, 593	

4 • Bactéries indicatrices de contamination et d'efficacité de traitement	595
4.1 Dénombrement des germes totaux par épifluorescence	595
4.2 Dénombrement des bactéries aérobies revivifiables (germes aérobies mésophiles, hétérotrophes)	597
4.2.1 Méthode par incorporation en milieu gélosé,	598
4.2.2 Méthode par ensemencement en surface sur milieu gélosé,	600
4.3 Dénombrement des coliformes	601
4.3.1 Classification des coliformes. Intérêt et modalités de leur recherche,	601
4.3.2 Méthode de dénombrement par filtration sur membrane,	603
4.3.3 Méthode de détermination du nombre le plus probable (NPP) par inoculation de tubes en milieux liquides (ou fermentation en tubes multiples),	605
4.3.4 Dénombrement des <i>Escherichia coli</i> par ensemencement en milieu liquide (NPP) en microplaques,	608
4.4 Dénombrement des <i>Enterococcus</i>	610
4.4.1 Classification. Intérêt et modalités de leur recherche,	610
4.4.2 Méthode par filtration sur membrane,	611
4.4.3 Méthode par ensemencement en milieu liquide pour détermination du nombre le plus probable (méthode en tubes),	612
4.4.4 Méthode de dénombrement des <i>Enterococcus</i> par ensemencement en milieu liquide (NPP) sur microplaque,	614
4.5 Recherche et dénombrement des bactéries sulfito-réductrices et de leurs spores	617
4.5.1 Signification de la recherche de ces bactéries,	617
4.5.2 Méthode par incorporation en gélose,	619
4.5.3 Méthode par enrichissement en milieu liquide,	620
4.5.4 Méthode par filtration sur membrane,	622
4.5.5 Recherche et dénombrement des spores de <i>Clostridium</i> sulfito-réducteurs,	624
4.6 Recherche des bactériophages	625
5 • Bactéries spécifiques	629
5.1 Recherche de <i>Campylobacter jejuni</i>	629
5.2 Recherche et dénombrement des <i>Legionella</i> et de <i>Legionella pneumophila</i>	631
5.3 Recherche des leptospires	637
5.4 Recherche et dénombrement de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	638
5.5 Recherche des <i>Salmonella</i>	640
5.6 Recherche des staphylocoques pathogènes	651
5.7 Recherche du vibron cholérique et des <i>Vibrio</i>	653
5.8 Recherche de <i>Yersinia enterocolitica</i>	655
5.9 Recherche des bactéries sulfato-réductrices (vibrions sulfato-réducteurs)	657
5.10 Recherche et dénombrement des actinomycètes	660
5.11 Recherche de mycobactéries dans l'eau	661

6 • Analyse virale	665
6.1 Détection des virus dans l'eau	665
4.1 6.1.1 Méthode de concentration sur laine de verre, 668	
4.2 6.1.2 Méthode de concentration sur filtres électrochargés, 672	
6.1.3 Méthode de concentration sur filtre en microfibres de verre, 672	
6.1.4 Méthode de concentration sur poudre de verre, 675	
4.3 6.1.5 Méthode de concentration des enterovirus dans les boues, 675	
6.2 Concentration secondaire des virus (laine de verre, filtres électrochargés et microfibre de verre)	677
6.3 Concentration tertiaire des virus	677
6.4 Isolement et numération des virus	678
6.4.1 Méthode des plages, 678	
6.4.2 Dénombrement par microméthode en milieu liquide (NPP), 679	
6.5 Identification des virus	680
6.5.1 Caractérisation des virus isolés, 680	
6.5.2 Identification des enterovirus isolés, 680	
6.5.3 Identification des souches vaccinales de poliovirus, 680	
6.6 Méthodes moléculaires	680
7 • Parasitologie	683
7.1 Introduction	683
7.2 Description du pathogène	684
7.3 Méthode	684
7.4 Mode opératoire	686
6.3 7.4.1 Première concentration sur cartouche filtrante, 686	
6.4 7.4.2 Éluion, 687	
6.5 7.4.3 Récupération des parasites (réaction IMS), 688	
6.5 7.4.4 Identification (morphologie et taille) et le dénombrement des parasites, 690	
6.6 7.4.5 Expression des résultats, 692	
6.7 7.4.6 Contrôle qualité, 692	
8 • Les amibes libres	693
8.1 Introduction	693
8.2 Pathologie	693
8.3 Domaine d'application	694
9 • Bonnes pratiques de biologie moléculaire	699
9.1 L'extraction des acides nucléiques	699
9.1.1 Les technologies, 699	
9.1.2 Conservation, 700	
9.2 L'amplification et détection des amplicons	701
9.2.1 Les technologies d'amplification, 701	
9.2.2 Les technologies de détection, 702	
9.2.3 Matériel, 706	
9.2.4 Conception des amorces et sondes, 706	

9.3 L'analyse	708
9.3.1 Les contrôles,	708
9.3.2 Évaluation des performances,	709
9.3.3 L'interprétation,	711
9.4 L'environnement et matériel	711
9.4.1 Environnement,	712
9.4.2 Matériel,	712
Bibliographie	713

C

Contrôle analytique du bon état des masses d'eau naturelle – Indicateurs biologiques de qualité – Bioessais

1 • Généralités	723
1.1 Évaluation de l'état écologique des eaux	723
1.2 Écotoxicologie en milieu aquatique	724
2 • Cadre réglementaire – Les SDAGEs	727
2.1. La Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE)	727
2.2. Les masses d'eau naturelle	728
2.3. Qu'est-ce que le « bon état » d'une masse d'eau douce de surface ?	729
2.4. Qu'est-ce que le « bon état » global d'une masse d'eau souterraine ?	730
2.5. Pour les masses d'eau côtière et de transition	731
2.6. Les SDAGEs (et PDM)	731
3 • Les indicateurs physico-chimiques prioritaires de la qualité des eaux naturelles	735
3.1. Les paramètres physico-chimiques utiles à l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau douce de surface (NQE des SP et SDP)	735
3.2. Les paramètres physico-chimiques utiles à l'évaluation de l'état écologique des masses d'eau douce de surface (NQE des PSEE)	736
3.3. Les paramètres physico-chimiques utiles à l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau souterraine (Valeurs seuils nationales)	737
3.4. Les objectifs de suppression et de réduction en 2021	750
3.5. La liste de vigilance	750

4 • Les indices (indicateurs) biologiques de la qualité des eaux naturelles	753
4.1 Généralités	753
4.2 Indice biologique global normalisé (IBGN)	754
4.2.1 Méthode Petits Cours d'Eau (MPCE), 761	
4.2.2 Méthode Grands Cours d'Eau (MGCE), 767	
4.3 Indice biologique diatomées (IBD)	770
4.4 Indice biologique macrophytique en rivière (IBMR)	775
4.5 Indice poissons rivière (IPR)	778
4.6 Indice oligochète de bioindication des sédiments (IOBS)	782
4.7 Compléments succincts sur les nouveaux indices (en préparation)	786
5 • Biomasse végétale planctonique	787
5.1 Chlorophylle et phéopigments	787
5.1.1 Dosage des chlorophylles a et b par HPLC, 788	
5.1.2 Dosage de la chlorophylle a et de l'indice phéopigments par spectrométrie d'absorption moléculaire, 789	
5.2 Efflorescences de cyanobactéries	793
5.2.1 Cyanobactéries et cyanotoxines, 793	
5.2.2 Détection des proliférations, analyse des cyanobactéries, 794	
6 • Les essais de toxicité ou bioessais	797
6.1 Sélections des modèles biologiques pour les essais	798
6.2 Protocole général des méthodes d'essai	804
6.3 Inhibition de la luminescence de la bactérie <i>Vibrio fischeri</i>	806
6.4 Inhibition de croissance d'une population d'algues vertes chlorococcale	812
6.5 Inhibition de la mobilité du crustacé cladocère <i>Daphnia magna</i>	816
6.6 Détermination de la toxicité létale vis-à-vis d'un poisson d'eau douce (<i>Brachydanio rerio</i>)	819
6.7 Détermination de la toxicité aiguë d'une substance vis-à-vis de <i>Salmo gairdneri</i>	823
6.8 Mesure des effets génotoxiques	825
6.9 Évaluation des effets perturbateurs endocriniens	827
7 • Méthodes biologiques pour le contrôle sur site et en continu de la toxicité des eaux	833
7.1 Contexte	833
7.2 Les tests biologiques utilisables sur site	833
7.2.1 Les biodétecteurs disponibles: principes de base et objectifs, 833	
7.2.2 Systèmes basés sur l'inhibition de la luminescence bactérienne, 835	
7.2.3 Systèmes basés sur la fluorescence algale, 836	
7.2.4 Systèmes basés sur l'activité photosynthétique algale, 837	
7.2.5 Systèmes basés sur l'activité locomotrice de la Daphnie, 837	
7.2.6 Systèmes basés sur le mouvement des valves des moules, 837	

7.2.7	Systèmes basés sur le comportement de nage du poisson,	838
7.2.8	Systèmes utilisant des poissons électrogènes,	838
7.3	Les stations d'alerte	839
7.4	Test poisson (<i>Brachydanio rerio</i>) adapté à une pollution accidentelle	841
8	Eaux naturelles et changements climatiques	843
8.1	Généralités	843
8.2	Vers une évolution préoccupante des débits et niveaux d'eau douce naturelle et de la température des eaux de surface	843
8.3	Des impacts inévitables sur la qualité physico-chimique et microbiologiques des eaux naturelles	844
8.4	Les impacts sur le littoral	844
8.5	Les impacts sur les usages de l'eau	845
8.6	Les mesures	845
Bibliographie		847

D

Contrôle, par analyses et tests, du fonctionnement des usines de production d'eau potable

1	Qualité des ressources – traitement et distribution	857
1.1	Qualité des ressources destinées à la production d'eau potable	857
1.2	Traitement et distribution	858
2	Cadre réglementaire – limites et références de qualité	859
2.1	Les principes de la réglementation actuelle	859
2.2	Les exigences de qualité	859
2.3	Les contrôles sanitaire et interne	862
3	Contrôle de la clarification	863
3.1	Contrôles analytiques utiles	863
3.2	Expérience du Jar-test	864
3.3	Essai en colonne de décantation	866
3.4	Expérience du flottatest	866
3.5	Contrôle du lit filtrant d'un filtre à profondeur	867

3.6 Performances à atteindre en clarification	869
3.6.1 Après coagulation/floculation et décantation ou flottation,	869
3.6.2 Après filtration en profondeur,	869
3.7 Principaux dysfonctionnements sur les paramètres de qualité	870
3.7.1 Sur la turbidité,	870
3.7.2 Sur la fuite de coagulant (Fe ou Al),	870
3.7.3 Sur un mauvais abattement du COT,	870
4 • Contrôle de la désinfection	871
4.1 Les contrôles analytiques utiles	871
4.2 Détermination du «C.t» en désinfection chimique	872
4.3 Tests en désinfection chimique	874
4.4 Tests en désinfection UV	875
4.5 Performances maximales à atteindre en désinfection (valeurs annoncées par la bibliographie)	876
4.5.1 Rétention par capture en clarification conventionnelle complète,	876
4.5.2 Rétention par filtration membranaire,	877
4.5.3 Inactivation par désinfection chimique au chlore et dérivés (pour des «C.t» > 15 min.mg/L),	877
4.5.4 Inactivation par désinfection chimique au dioxyde de chlore (pour des «C.t» de 10 à 15 min.mg/L),	877
4.5.5 Inactivation par désinfection chimique à l'ozone (pour des «C.t» de 1,6 à 2 min.mg/L),	877
4.5.6 Inactivation par désinfection UV (pour une dose de 400 J/m ²),	878
4.6 Maîtrise du risque de formation de sous-produits de désinfection	878
4.6.1 Formation de THM (et AOX) par chloration,	878
4.6.2 Formation de bromates par ozonation,	879
4.6.3 Formation de chlorites et chlorates par désinfection au ClO ₂ ,	879
4.6.4 Photo-produits par désinfection UV,	880
4.7 Désinfection chimique en réseau	880
5 • Contrôle des traitements spécifiques et d'affinage	881
5.1 Mise à l'équilibre	881
5.2 Affinage par charbon actif couplé ou non à l'ozonation	882
5.2.1 Les contrôles analytiques utiles,	883
5.2.2 Les différents tests,	883
5.2.3 Performances à atteindre en affinage sur charbon actif,	884
5.2.4 Principaux dysfonctionnements sur les paramètres de qualité,	884
5.3 Affinage pour élimination de composés minéraux spécifiques	885
5.3.1 Les contrôles analytiques utiles,	885
5.3.2 Les tests possibles,	885
6 • Contrôle des membranes	887
6.1 Objectifs des procédés à membrane	887
6.2 Analyses et tests utiles	887

6.3 Contrôles des propriétés membranaires	887
6.3.1 Contrôle de la perméabilité, 888	
6.3.2 Autres propriétés à contrôler éventuellement, 888	
6.4 Tests sur membrane	888
6.4.1 Tests d'innocuité sur membranes et modules neufs, 888	
6.4.2 Tests d'intégrité sur membranes et modules en service, 889	

Bibliographie

891

E

Contrôle du fonctionnement des réseaux et des circuits d'eau

1 • Dégradation de la qualité des eaux en réseau	897
1.1 Paramètres influençant l'évolution de la qualité de l'eau dans les circuits	897
1.2 Les croissances bactériennes en réseau et leur rôle dans la dégradation de la qualité des eaux	898
1.3 <i>Legionella</i> et légionellose	902
2 • Distribution de l'eau potable	905
2.1 Cadre réglementaire	905
2.2 Caractéristiques et dysfonctionnements des réseaux	905
2.3 Paramètres à contrôler dans les eaux transportées	908
2.3.1 Teneur en désinfectant résiduel et évolution, 908	
2.3.2 Microorganismes, 910	
2.3.3 Particules, 910	
2.3.4 Teneur en matière organique, 911	
2.3.5 Sous-produits de désinfection, 911	
2.3.6 Métaux, 912	
2.3.7 Micropolluants organiques, 913	
2.4 Voies d'amélioration	913
3 • Réseaux d'eaux chaudes sanitaires (ECS)	915
3.1 Caractéristiques des installations d'ECS et domaines d'utilisation	915
3.2 Les risques infectieux liés aux eaux chaudes	917
3.3 Contexte réglementaire	917
3.4 Les enjeux dans les ERP	919
3.5 Contrôle et maîtrise du risque légionelle dans les réseaux d'ECS	920

4 • Circuits de refroidissement (installations de dispersion d'eau dans un flux d'air)	923
4.1 Caractéristiques des tours de refroidissement	924
4.2 Problèmes rencontrés : pathologies des réseaux et proliférations de légionelles	926
4.3 Aspects réglementaires	927
4.3.1 Régime de classement dans la rubrique 2921 des ICPE,	927
4.3.2 Modalités de surveillance des légionelles,	928
4.3.3 Entretien préventif et surveillance de l'installation,	928
4.3.4 Procédures à suivre en cas de dépassement,	929
4.3.5 Maîtrise de la qualité des rejets,	930
4.4 Stratégies de traitement des installations de refroidissement	931
4.5 Maîtrise de l'entartrage et de la corrosion	932
4.6 Procédés de nettoyage et de désinfection des circuits	933
4.6.1 Traitement chimique par des produits biocides oxydants,	934
4.6.2 Traitement chimique par des produits biocides non oxydants,	935
4.6.3 Utilisation de composés à propriétés tensio-actives,	935
4.7 Gestion hydraulique des installations	936
4.8 Méthodes de suivi des installations	937
Bibliographie	939

F

Contrôle de la désinfection chimique (toutes eaux)

1 • Généralités	945
1.1 Objectifs de la désinfection par voie chimique	945
1.2 Critères d'évaluation de la désinfection	946
1.3 Choix et conditions d'application des désinfectants chimiques	949
1.3.1 Eau potable,	949
1.3.2 Eaux de piscines,	949
1.3.3 Circuits de refroidissement,	950
1.3.4 Eaux résiduaires urbaines épurées,	950
2 • Chlore et chloramines	951
2.1 Chimie du chlore et des chloramines	951
2.1.1 Réactions chlore/ammoniaque,	952
2.1.2 Réactions avec les ions bromures,	954
2.1.3 Formation de composés organohalogénés,	954
2.2 Analyse	

2.2	Analyse des solutions concentrées (eaux et extraits de Javel) par titrage iodométrique	955
2.3	Dosage du chlore résiduel total	957
2.4	Dosage du chlore résiduel total, libre ou combiné	959
2.5	Demande en chlore	970
3	• Dioxyde de chlore	973
3.1	Chimie et réactivité du dioxyde de chlore	973
3.2	Préparation des solutions mères de dioxyde de chlore	974
3.3	Analyse des solutions concentrées	975
3.4	Dosage du dioxyde de chlore résiduel	979
3.5	Demande en dioxyde de chlore	987
4	• Ozone	989
4.1	Chimie de l'ozone	989
4.2	Dosage de l'ozone dans l'air ozoné	990
4.3	Dosage de l'ozone dans l'eau	993
4.4	Demande en ozone	996
5	• Brome et iode	999
5.1	Formes chimiques et utilisations	999
5.2	Dosage du brome ou de l'iode résiduel par la méthode à la N, N-diéthylphénylène-1,4 diamine (DPD)	999
5.3	Dosage du brome ou de l'iode résiduel par ampérométrie	1000
6	• Peroxyde d'hydrogène	1001
6.1	Formes chimiques et utilisations	1001
6.2	Analyse des solutions concentrées	1001
6.3	Dosage du peroxyde d'hydrogène résiduel par la méthode au sel de titane (méthode d'EISENBERG)	1004
7	• Acide peracétique	1007
7.1	Formes chimiques et utilisations	1007
7.2	Dosage de l'acide peracétique par méthode volumétrique (iodométrie et manganimétrie)	1008
7.3	Dosage de l'acide peracétique résiduel par chromatographie liquide haute performance	1009
8	• Chloroisocyanurates	1011
8.1	Formes chimiques et utilisations	1011
8.2	Dosage de l'acide isocyanurique et des chloroisocyanurates dans les eaux de piscines	1012
8.3	Dosage de l'acide isocyanurique en présence de chlore libre	1014