

FRANÇOIS ANCTIL

L'EAU ET SES ENJEUX

2^E ÉDITION REVUE ET AUGMENTÉE



L'EAU

ET

SES

ENJEUX

FRANÇOIS ANCTIL

L'EAU

ET
SES
ENJEUX

2^E ÉDITION REVUE ET AUGMENTÉE



Presses de
l'Université Laval

Les Presses de l'Université Laval reçoivent chaque année du Conseil des Arts du Canada et de la Société de développement des entreprises culturelles du Québec une aide financière pour l'ensemble de leur programme de publication.

Nous reconnaissons l'aide financière du gouvernement du Canada par l'entremise du Fonds du livre du Canada pour nos activités d'édition.

Financé par le gouvernement du Canada
Funded by the Government of Canada

| Canada

Maquette de couverture: Laurie Patry

Mise en pages: Diane Trottier

© Presses de l'Université Laval. Tous droits réservés.

Dépôt légal 4^e trimestre 2016

ISBN 978-2-7637-2346-4

PDF 9782763723471

Les Presses de l'Université Laval

www.pulaval.com

Toute reproduction ou diffusion en tout ou en partie de ce livre par quelque moyen que ce soit est interdite sans l'autorisation écrite des Presses de l'Université Laval.

La chaleur du soleil semblait fendre la terre. Pas un souffle de vent ne faisait frémir les oliviers. Tout était immobile. Le parfum des collines s'était évanoui. La pierre gémissait de chaleur. Le mois d'août pesait sur le massif du Gargano avec l'assurance d'un seigneur. Il était impossible de croire qu'en ces terres, un jour, il avait pu pleuvoir. Que de l'eau ait irrigué les champs et abreuvé les oliviers. Impossible de croire qu'une vie animale ou végétale ait pu trouver – sous ce ciel sec – de quoi se nourrir. Il était deux heures de l'après-midi, et la terre était condamnée à brûler.

*Le soleil des Scorta
Laurent Gaudé*

Table des matières



Introduction	1
L'eau de la ville	1
L'eau de la campagne	2
S'engager	3

PARTIE 1 UNE RESSOURCE SOUS PRESSION

Chapitre 1 – Fonctions et usages	7
Les fonctions de l'eau	9
Disponibilité	11
Principaux usages	14
L'eau accessible aux sociétés	16
Hydrosolidarité	19
Aménagement du territoire	22
Chapitre 2 – Gouvernance de l'eau	27
Développement durable	29
Principes de Dublin	35
Outils de gestion intégrée	38
Sécurité de l'eau	40
Gouvernance de l'eau	41
Chapitre 3 – Changement climatique	45
Mesure du changement	48
Mécanique du changement	49
Paléoclimatologie	52
Prévoir le temps en 2050 et au-delà	56
Infléchir la trajectoire	60
S'adapter	61

PARTIE 2
DES MOLÉCULES EN MOUVEMENT

Chapitre 4 – L'eau, solvant universel	67
L'eau modèle le paysage	67
La molécule HOH	69
Sels et gaz dissous	75
Acidité, alcalinité et dureté	80
La couleur de l'eau	82
Chapitre 5 – Eaux souterraines	85
Formation des eaux souterraines	86
Une ressource accessible	92
Dangers de la surexploitation	95
Ampleur des prélèvements actuels	100
Chapitre 6 – Rivières	103
Réseaux de drainage	106
La vie des rivières	111
Abus du pouvoir autoépurateur	116
La glace en eau vive	120
Chapitre 7 – Lacs et réservoirs	125
Origines géologiques	126
Organisation verticale	128
Bilan en eau	133
Dégradation	134
Réservoirs	136
La glace en eau calme	140
Chapitre 8 – Estuaires et océans	143
La marée	146
Autres fluctuations du niveau	150
Hausse du niveau moyen	152
Cycles de l'azote et du phosphore	154
Acidification des océans	157
Désalinisation de l'eau de mer	159

PARTIE 3
UNE VULNÉRABILITÉ MULTIPLE

Chapitre 9 – Conflits d’usages	163
Acteurs de la gouvernance de l’eau	163
L’eau nécessaire à l’énergie et à l’agriculture	166
Barrages	170
Méfais des barrages	173
Chapitre 10 – Prise de risques	179
Catastrophes naturelles	182
Inondations	184
Prévention des inondations	188
Maladies liées à l’eau	192
Chapitre 11 – Eaux transfrontalières	197
Rivières transfrontalières	198
Aquifères transfrontaliers	206
Le 3 ^e pôle	208
Empreinte eau	210
Chapitre 12 – Manque d’eau	213
Principales causes du manque d’eau	215
Hydrologie des milieux arides	217
Mesure de nos besoins essentiels	222
Gouvernance sous stress hydrique	227
Conclusion	231
Le droit à l’eau	231
Remerciements	235
Références	237

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	
Eau renouvelable, superficie et population par continent	13
Tableau 1.2	
Comptabilité des prélèvements en eau pour différentes régions.	14
Tableau 2.1	
Pourcentage de la population desservie par niveau de service.	33
Tableau 3.1	
Composition de l’atmosphère	52
Tableau 4.1	
Concentration des sels dissous dans l’eau.	76
Tableau 4.2	
Concentration des sels dissous dans l’eau de rivière, selon le type de roche.	78
Tableau 5.1	
Les 10 plus grands consommateurs d’eaux souterraines	101
Tableau 6.1	
Besoins des plantes en éléments nutritifs et disponibilité au sein de la charge dissoute des cours d’eau	105
Tableau 6.2	
Statistiques de la classification Strahler appliquée au territoire états-unien	110
Tableau 7.1	
Statistiques selon la cause de formation des lacs de plus de 0,01 km ² . .	126
Tableau 7.2	
Caractéristiques des lacs les plus étendus	127
Tableau 7.3	
Statistiques selon la superficie des lacs	128
Tableau 7.4	
Exemples de réservoirs imposants	137
Tableau 9.1	
Coefficients de consommation pour différentes activités au sein du bassin versant des Grands Lacs laurentiens.	167

TABLE DES MATIÈRES

Tableau 9.2	
Exigence énergétique de l'eau	170
Tableau 9.3	
Répartition géographique des grands barrages	172
Tableau 10.1	
Compilation des catastrophes liées à l'eau et au climat	180
Tableau 10.2	
Compilation annuelle des catastrophes récentes	183
Tableau 11.1	
Liste des bassins versants les plus internationaux	199
Tableau 11.2	
Classification des collaborations et des conflits	202
Tableau 11.3	
Les vingt pays les plus dépendants d'eau renouvelable transfrontalière .	206
Tableau 11.4	
Empreinte eau de quelques produits alimentaires communs	211
Tableau 12.1	
Pays pour lesquels le volume total d'eau renouvelable par personne est inférieur à 1 000 m ³ par année, en combinant les sources internes et externes	214
Tableau 12.2	
Causes génériques du manque d'eau	216
Tableau 12.3	
Besoins minimaux essentiels	224
Tableau 12.4	
Liste des pays pour lesquels les prélèvements pour usage municipal sont inférieurs à 50 litres par personne par jour	226

Liste des figures

Figure 1.1	Eau bleue et eau verte.	17
Figure 1.2	Chemins de l'eau en culture irriguée	18
Figure 1.3	Chemins de l'eau en culture pluviale	19
Figure 1.4	Structure amont/aval des bassins versants	20
Figure 1.5	Conséquences hydrologiques de l'exploitation forestière	23
Figure 1.6	Conséquences hydrologiques de pâturages	23
Figure 1.7	Conséquences hydrologiques de cultures.	24
Figure 1.8	Conséquences hydrologiques de mines	25
Figure 3.1	Concentration en CO ₂ observée à Mauna Loa, Hawaï. . .	46
Figure 3.2	Concentration en CO ₂ emprisonnée dans le glacier antarctique à Law Dome	47
Figure 3.3	Écart de température annuelle globale avec la normale 1961-1990.	53
Figure 3.4	Nombre d'années depuis le retrait des glaciers de la plus récente glaciation en Amérique du Nord	53
Figure 3.5	Température annuelle globale	55
Figure 3.6	Température annuelle globale	56
Figure 3.7	Hausse relative de la température en fonction la quantité cumulée de CO ₂ d'origine anthropique depuis 1870. . .	58
Figure 3.8	Carte de la hausse locale de la température par rapport à la hausse moyenne mondiale	59
Figure 4.1	Anatomie des atomes d'oxygène et d'hydrogène	70
Figure 4.2	Des ponts hydrogènes lient des molécules HOH entre elles	71
Figure 4.3	Couple pression-température de plusieurs planètes du système solaire.	72
Figure 4.4	Structure cristalline de l'eau en phase (a) solide, (b) liquide et (c) gazeuse	73
Figure 4.5	Évolution de la température de l'eau lors de la cristallisation.	74
Figure 4.6	Masse volumique de l'eau en fonction de la température	75
Figure 4.7	Hydratation d'ions de sel par des molécules d'eau: a) ion chlorure hydraté et b) ion sodium hydraté	75
Figure 4.8	Influence de la salinité sur la température de fusion	77
Figure 4.9	Consommation et génération de CO ₂ et d'O ₂ au gré de la photosynthèse et de la respiration	79

TABLE DES MATIÈRES

Figure 4.10	Concentration maximale d'oxygène dissous en fonction de la température de l'eau	80
Figure 4.11	Spectre de l'éclairement énergétique solaire capté à la surface de la Terre	83
Figure 4.12	Simulation du spectre de l'éclairement énergétique solaire pour des profondeurs d'eau pure de 1, 10 et 100 mètres.	84
Figure 5.1	L'eau, une ressource en mouvement	86
Figure 5.2	Schéma de l'aquifère d'un bassin versant	88
Figure 5.3	Analogie entre une boîte et un bassin versant	90
Figure 5.4	Convergence des écoulements souterrains	91
Figure 5.5	Influence d'un puits sur la convergence des écoulements souterrains.	93
Figure 5.6	Diversité des sources, des aquifères et des puits.	94
Figure 5.7	L'intrusion saline	98
Figure 5.8	Conséquences de l'urbanisation sur l'aquifère sous-jacent	100
Figure 6.1	Réseaux de drainage des fleuves Amazone et Mississippi	106
Figure 6.2	Réseaux de drainage de fleuves et lacs célèbres.	108
Figure 6.3	Effet de la forme du bassin sur la répartition temporelle du débit.	109
Figure 6.4	La convergence de l'eau	110
Figure 6.5	Schéma de la zone hyporhéique d'un cours d'eau	111
Figure 6.6	Profil vertical de la vitesse longitudinale d'un écoulement	113
Figure 6.7	Colonisation du substrat par les microorganismes	114
Figure 6.8	Lien entre l'ordre des biefs et la végétation riveraine en milieu tempéré.	115
Figure 6.9	Conséquence d'un rejet ponctuel de matière organique sur la concentration en oxygène dissous.	118
Figure 6.10	Formation de frasil et de glace de fond.	121
Figure 6.11	Glace de rive	121
Figure 6.12	Couverture partielle	122
Figure 6.13	Couverture consolidée	122
Figure 6.14	Couverture fragmentée.	123
Figure 6.15	Barrage suspendu	123
Figure 7.1	Organisation des lacs	129
Figure 7.2	Stratification des lacs selon leur profondeur et leur latitude	131
Figure 7.3	Remontée d'eau sous l'action du vent: (a) mise en vitesse de l'eau et (b) remontée.	132
Figure 7.4	Bilan hydrique moyen de bassins exoréiques par continent	481
Figure 7.5	Lacs (a) oligotrophes et (b) eutrophes	135

Figure 7.6	Organisation verticale des réservoirs	137
Figure 7.7	Organisation horizontale des lacs	139
Figure 8.1	Estuaire du Saint-Laurent	144
Figure 8.2	Estuaire stratifié	145
Figure 8.3	Estuaire mélangé	145
Figure 8.4	Paramètres de rotation du système Terre-Lune	146
Figure 8.5	Forces centrifuge et d'attraction	147
Figure 8.6	Force de marée	147
Figure 8.7	Système Terre-Lune-Soleil	148
Figure 8.8	Exemples de marée à Churchill (semi-diurne), Victoria (diurne), Rimouski (mixte semi-diurne) et Cap-aux-Meule (mixte diurne)	150
Figure 8.9	Répartition du niveau énergétique des ondes à la surface des océans	151
Figure 8.10	Niveau altimétrique moyen des mers par rapport à la moyenne de la période 1993-2002.	153
Figure 8.11	Cycle de l'azote simplifié	155
Figure 8.12	Cycle du phosphore simplifié	156
Figure 8.13	Acidification de l'eau par dissolution de CO ₂	158
Figure 8.14	Schéma d'une chaîne de potabilisation de l'eau de mer .	160
Figure 9.1	Multiplicité des acteurs de la gouvernance de l'eau	164
Figure 10.1	Lit mineur et lit majeur d'un cours d'eau	185
Figure 10.2	Le barrage retient en amont une partie de l'eau de crue .	189
Figure 10.3	La digue protège, mais rehausse le niveau de l'eau	190
Figure 10.4	La digue nuit à l'évacuation des eaux après une inondation	190
Figure 10.5	Le canal de déviation détourne une partie des eaux de crue	191
Figure 10.6	Parcours hydrique de contamination	193
Figure 10.7	Parcours préférentiels de contamination d'un puits en nappe libre	194
Figure 11.1	Carte des dix importantes rivières asiatiques qui prennent leur source au sein du complexe montagneux de l'Hindou Kouch et des Himalayas	209
Figure 12.1	Distribution des zones arides et semi-arides	218
Figure 12.2	Hydrologie des oueds	221
Figure 12.3	Histogramme des prélèvements municipaux par pays . . .	225

LISTE DES ENCADRÉS

Encadré 1.1	
Zones hydronomiques	21
Encadré 2.1	
Objectifs de développement durable.	30
Encadré 2.2	
Cibles du 6 ^e ODD	31
Encadré 2.3	
Principes de Dublin	35
Encadré 2.4	
Risques ciblés par la sécurité de l'eau	41
Encadré 2.5	
Fondements de la gouvernance de l'eau	43
Encadré 3.1	
Options d'adaptation	62
Encadré 9.1	
Actions à mener pour la mise en place d'un grand barrage	177
Encadré 10.1	
Cadre opérationnel de la sécurité de l'eau.	181
Encadré 1	
Extraits de l'observation générale n° 15.	232
Encadré 2	
Obligations des États	233



Introduction

Ce livre est structuré en trois parties afin d'aborder en profondeur l'ensemble des enjeux physicochimiques et socioéconomiques de la ressource mondiale en eau de la Terre : une ressource sous pression, des molécules en mouvement et une vulnérabilité multiple. Tout au long de ce parcours dans l'univers complexe du cheminement de l'eau et de son interaction avec le système tout aussi complexe que les humains ont érigé pour fonctionner en société, l'eau sera compartimentée de multiples façons afin de fournir une variété d'éclairages favorisant, nous l'espérons, une meilleure prise en main du rôle que chacun de nous et que chacune de nos institutions doit jouer au sein de ce que l'on nomme aujourd'hui la gouvernance de l'eau. C'est que nous migrons lentement d'une ère millénaire d'exploitation vers une ère nouvelle de gouvernance.

Avant de lancer la première partie de ce livre, cette introduction offre déjà une première compartimentation de cette ressource si importante, l'eau de la ville et l'eau de la campagne, et décrit les bases favorisant un engagement individuel.

L'EAU DE LA VILLE

Les villes constituent un cas particulier d'aménagement du territoire ayant un effet considérable sur la ressource en eau, notamment parce qu'elles tendent au gigantisme. Aujourd'hui, plus de la moitié de la population mondiale est urbanisée, une tendance lourde qui n'est pas en voie de se résorber. Trois graves problèmes surviennent alors : une accentuation marquée des crues, la surexploitation et la

pollution des ressources locales et la propagation de maladies hydriques.

L'urbanisation a pour effet d'imperméabiliser les sols, accélérant les écoulements et favorisant l'érosion des cours d'eau. En réaction, les riverains ont alors tendance à exiger que les berges soient artificialisées afin de mettre un terme à l'effritement de leurs propriétés. Dans certains cas, ce sont des digues qui doivent être construites pour protéger des quartiers entiers de crues amplifiées par la présence même de ces quartiers. Les rivières deviennent alors des canaux artificiels, sans grand attrait pour la vie aquatique. Sans compter que les eaux de ruissellement urbain y déversent des charges parfois élevées de matières particulaires et dissoutes, voire des charges fécales et industrielles.

Une ville qui grossit a des besoins en eau toujours plus grands. Il faut alors puiser l'eau où elle se trouve, dans les rivières et les sols. Cependant, l'inefficacité des infrastructures de récupération et de traitement des eaux usées, surtout en régions peu fortunées, aura tôt fait de rendre impropre la ressource proximale, qu'elle soit lac, rivière ou eaux souterraines. Il faut donc puiser plus loin l'eau requise. La pollution émanant de ces villes touchera alors les populations en aval qui n'ont souvent pas d'autres choix que d'exploiter une source polluée pour les propres activités domestiques, industrielles et agricoles. Dans certains cas, la pollution urbaine des eaux est telle que les écosystèmes des estuaires et des baies en sont largement affectés.

Finalement, le troisième défi des mégapoles est de mettre en place un réseau de distribution d'eau salubre accessible à tous ses habitants. Encore faut-il posséder suffisamment d'eau au départ et disposer du temps et du financement pour installer de tels réseaux. L'eau étant un vecteur efficace de maladies, il est fréquent que les populations qui vivent dans les quartiers les plus pauvres et les plus désorganisés doivent se rabattre auprès de fournisseurs privés à un coût qui peut aller jusqu'à dix fois celui de l'eau courante dans la même ville. L'élimination des eaux usées est également un problème critique de ces quartiers.

L'EAU DE LA CAMPAGNE

La campagne, prise ici au sens très large de tout le territoire non occupé par une grande ville, se vide non seulement de sa population au profit des métropoles et des mégapoles, mais se vide aussi de son