

Sous la direction de

Philippe Behra

Professeur des universités à l'Institut national polytechnique de Toulouse
(INPT – ENSIACET)

Chimie et environnement

Cours, étude de cas et exercices corrigés

Patrick Cognet

Professeur des universités à
l'INPT-ENSIACET

Gérald Debenest

Maître de conférences à l'INPT-ENSIACET

Matthieu Dufresne

Maître de conférences à l'ENGEEES,
Strasbourg

Laury Gauthier

Maître de conférences à l'université
Paul Sabatier, Toulouse

Christophe Gourdon

Professeur des universités à
l'INPT-ENSIACET

Maritxu Guiresse

Professeur des universités à l'INPT-ENSAT

Leslie Jacquemin

Docteure de l'INPT

Michel Kaemmerer

Maître de conférences à l'INPT-ENSAT

David Labat

Professeur des universités à l'université
Paul Sabatier, Toulouse

Robert Mosé

Professeur à l'ENGEEES, Strasbourg

Geneviève Nguyen

Maître de conférences à l'INPT-ENSAT

Éric Pinelli

Professeur des universités à l'INPT-ENSAT

Pierre-Yves Pontalier

Maître de conférence à l'INPT-ENSIACET

François Purseigle

Maître de conférence à l'INPT-ENSAT

Antoine-Georges Sadowski

Ingénieur divisionnaire de l'agriculture
et de l'environnement

Valérie Simon

Maître de conférence à l'INPT-ENSIACET

José Vazquez

Professeur à l'ENGEEES, Strasbourg

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Cet ouvrage a reçu le soutien de l'Institut national polytechnique de Toulouse.

Illustration de couverture :

Lac eutrophe, Labège © Philippe Behra.

Sauf mention contraire, toutes les illustrations intérieures
ont été réalisées par Yoann Bertrand.

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.

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

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.

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).



© Dunod, Paris, 2013

ISBN 978-2-10-056895-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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



Chimie et Environnement est un ouvrage qui veut traiter ce sujet dans sa globalité et sous tous ses aspects scientifiques.

Produire un tel ouvrage pouvait paraître un rêve fou et le risque était grand que ses promoteurs accouchent d'un brouet approximatif, mi-communicant, mi-vulgarisant et en tout cas inconsistant. En voulant aborder les questionnements avec l'exigence d'un contenu scientifique impeccable, Philippe Behra et ses co-auteurs prenaient un autre risque : celui d'aboutir à un ouvrage divisé en 12 chapitres étanches, chacun relevant d'une culture et d'un discours scientifique spécifiques, avec des codes, des approches et des langages hétérogènes.

Comme le ferait Auguste Conte aujourd'hui, j'ai essayé de comptabiliser le nombre de disciplines de base qu'il faut ajuster les unes aux autres pour couvrir l'espace scientifique ouvert par le très vaste sujet de la chimie et de l'environnement (chimie minérale, chimie organique, biologie, biochimie, éco-toxicologie, génie chimique, mécanique des fluides, mathématiques appliquées, modélisation systémique, (hydro)géologie, sociologie...). Il faut un nombre à deux chiffres pour l'apprécier.

Bref, rédiger un ouvrage à la fois globalement cohérent, avec une grande unité de ton, compréhensible pour tout public doté d'une culture scientifique de base, et suffisamment précis dans chaque chantier ouvert, était raisonnablement une chimère.

Mais comme « ils ne savaient pas que c'était impossible, ils l'ont fait »... et bien fait.

Et avant de considérer cet ouvrage comme un outil de travail et un support pédagogique précis, on est séduit à la lecture par l'unité de ton et l'égale profondeur d'approche pour chaque thème qui en font un objet cohérent qui se lit de bout en bout sans donner la sensation d'une mosaïque et d'un assemblage hétéroclite. Bien au contraire. On voit vraiment naître une discipline respectueuse de ses différentes sources d'inspiration sans qu'aucun des auteurs n'ait eu la tentation de s'appropriier l'entièreté du discours en le réduisant à sa propre vision.

C'est aussi et essentiellement un outil pédagogique, chaque chapitre étant émaillé d'illustrations et d'exercices, avec en fin d'ouvrage les corrigés *ad hoc*. Donc, un manuel de base pour un enseignement idéalement destiné à des étudiants de niveau master.

Mais j'y vois aussi un ouvrage de référence pour identifier et éclairer des pistes de recherche : je conseillerais même vivement à tout étudiant de thèse de commencer par là. Avant même de se lancer dans une bibliographie détaillée sur son propre sujet de thèse, il lui sera très utile et salutaire de positionner sa propre recherche dans son contexte global en lisant soigneusement ce livre.

Je laisserai le futur lecteur s'appropriier tous les contenus scientifiques qui font la richesse de *Chimie et Environnement* et me contenterai ici de donner un conseil ou au moins d'essayer de faire partager mon expérience de tout premier lecteur : on peut, peut-être même doit-on, lire cet ouvrage à l'envers, en découvrant la problématique depuis ses aspects les plus globaux et en plongeant ensuite dans le sujet précis d'intérêt pour chaque lecteur. À la manière de la

Préface

plongée que l'on fait avec Google Earth, en contemplant la planète entière avant de zoomer sur son quartier, puis sur sa rue. Car, dans un monde complexe, il n'y a pas de solution technologique optimale en soi. Toute préconisation est contextuelle et résulte d'arbitrages. Et il est vital de mettre en perspective ses propres travaux, en les contextualisant par rapport à toutes les dimensions d'un sujet aussi complexe.

On découvrira ainsi que tout traitement de pollution est un transfert de pollution et que travailler à des « procédés intrinsèquement propres et sûrs » vaut mieux, pour le dire de manière leste, que de confier le « sale boulot » à des stations d'épuration. On comprendra aussi que le recyclage à tous niveaux, depuis le niveau local d'un produit secondaire ou d'une molécule indésirable produite par des réactions secondaires mal contenues, jusqu'à la déconstruction d'un objet complexe comme une télévision ou un avion contient autant de pièges que de promesses. Et l'analyse des cycles de vie, discipline jeune et en plein développement, est une approche absolument nécessaire.

Plus en amont, il faut en finir avec des débats stériles entre les tenants du risque zéro et du principe de précaution et les partisans des analyses coût-bénéfice ou plus prosaïquement des approches avantages-inconvénients. C'est à partir d'un débat social confiant, éclairé et compétent que les sociétés apprendront le chemin d'un progrès technologique maîtrisé, accepté et répondant aux besoins fondamentaux de notre planète et de ses habitants.

On pourra donc lire cet ouvrage à plusieurs niveaux, en y puisant des éléments de réflexion globale ou en y trouvant des outils concrets pour y résoudre des problèmes précis.

Et en tout cas avec plaisir et intérêt.

Bonne lecture.

Professeur Gilbert Casamatta
Professeur des universités à l'INPT
Président de l'association de préfiguration
de l'IRT de Toulouse

AVANT-PROPOS



« Le climat, l'environnement, les déséquilibres de l'épargne, la démographie sont les nouveaux risques du monde global auxquels répondra, entre autres, la notion de développement durable¹ » (Le Cercle des économistes et Erik Orsenna, 2007).

Dans cette phrase, sont résumés une grande partie des points qui méritent attention lorsque l'on traite de « chimie et environnement ». En effet, en cette période de crise et d'incertitude, de primauté de la finance et de la marchandisation de tous les biens, matériels comme immatériels, à l'échelle de la planète, sur la sauvegarde d'un patrimoine et d'un savoir, se pose la question du lien entre la chimie et l'environnement et des effets à plus ou moins long terme du premier sur le second. Pour se rendre compte que ces questions ne sont pas nouvelles, il suffit de citer ce qu'écrivait Roger Heim, président de l'Académie des sciences en 1963 « On arrête les "gangsters", on tire sur les auteurs de "hold-up", on guillotine les assassins, on fusille les despotes – ou prétendus tels –, mais qui mettra en prison les empoisonneurs publics instillant chaque jour les produits que la chimie de synthèse livre à leurs profits et à leurs imprudences ? » en introduction à la traduction française de l'ouvrage de Rachel Carson *Le printemps silencieux*. Déjà au XIX^e siècle, lors de la révolution industrielle, des scientifiques se sont interrogés et ont essayé d'apporter des réponses aux problèmes de pollutions engendrées par l'industrialisation et le déplacement des populations de la campagne vers la ville. Ainsi la mise en place des filières de traitement des eaux usées à l'aval de Paris avec l'installation de la station d'épuration située à Achères, en bord de Seine, dans une zone maraîchère afin de pouvoir valoriser directement les boues, en est une bonne illustration (chapitres 4 et 5).

Mais que représentent la chimie et l'environnement ? Avant de répondre à cette question, il est important de revenir sur la définition de ces deux termes.

Pour *Le Petit Robert*, le terme « chimie » (1356 ; latin médiéval *chimia*, de *alchimia*) désigne la science de la constitution des divers corps, de leurs transformations et de leurs propriétés, aussi bien que les changements que cette science induit. Ce terme tirerait son origine de l'égyptien *kēme* (chem), signifiant « terre ». La chimie est très souvent considérée comme une science expérimentale, son rattachement à la terre renvoyant aussi à la notion de science de la matière. Dans le langage courant, la chimie désigne fréquemment les activités industrielles liées à la transformation de la matière (chimie pharmaceutique, pétrolière, etc.), ce qui induit une confusion entre la science et ses applications².

Pour *Le Petit Robert*, le mot « environnement » (dont le sens vient de l'américain *environment*) représente l'ensemble des conditions naturelles (physiques, chimiques, biologiques),

1. Développement durable : traduction de l'expression américaine *sustainable development*. Il s'agit ici d'un oxymore. En effet, un développement ne pouvant être durable à l'échelle de la planète, il serait plus juste d'utiliser l'expression « développement soutenable ».

2. Voir *L'actualité chimique*, n° 277-278, août-septembre 2004, consacré à « Chimie et environnement » et sa page de couverture, ainsi que le chapitre 12.

Avant-propos

mais aussi culturelles (sociologiques) susceptibles d'agir sur les organismes vivants et les activités humaines.

Mais ces deux termes sous-tendent des notions valables pour tout système, à savoir les notions de flux, de transport/transfert et de concentration. En effet, il n'est pas possible de concevoir un système figé, clos (*Figure 1*). La notion d'environnement induit donc le mouvement, le transport de matière entre des réservoirs, des milieux (aqueux, gazeux, solides, biologiques, vivants, etc.) et des échanges entre les différentes interfaces par des transferts de matière pour lesquels la chimie va jouer un rôle moteur. Il est donc d'une part nécessaire de calculer des bilans de matière en fonction de l'espace et du temps, ce qui dépasse la seule valeur de la concentration (rapport d'une quantité de matière par unité de volume, de masse ou de surface), et d'autre part indispensable d'y associer la notion de flux, quantité de matière traversant une surface par unité de temps. Dans ce dernier cas, le temps est un paramètre, une variable, qui doit aussi être pris en compte. Ces notions seront développées dans les chapitres 2 à 10.

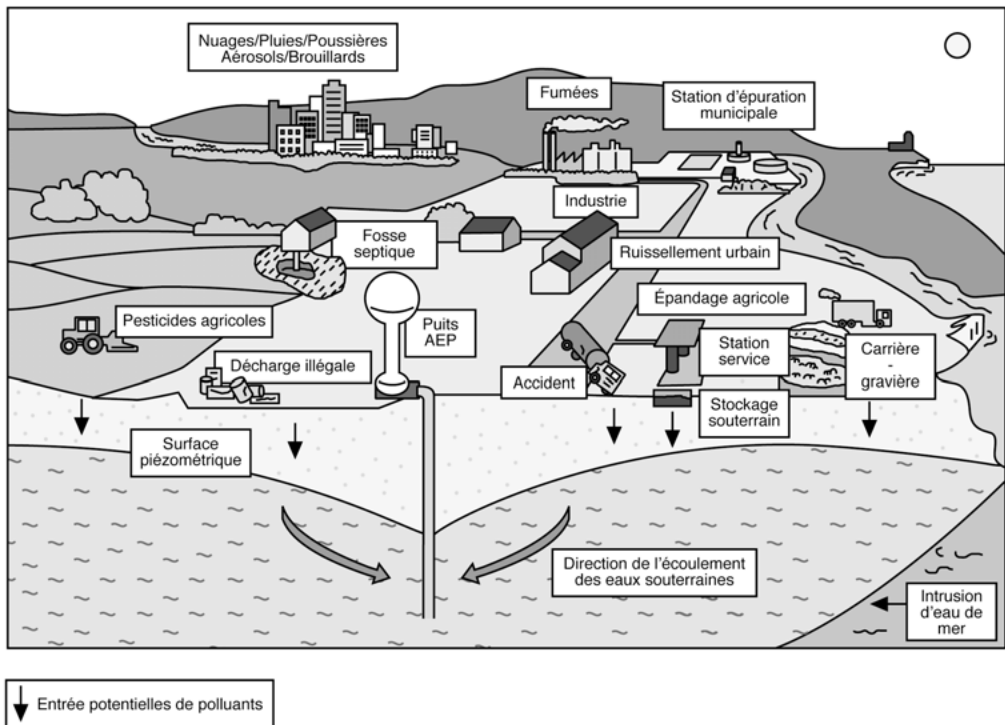


Figure 1 Schéma illustrant les différentes interfaces entre l'air, le sol, les eaux de surface et souterraines, les flux de matière entre ces interfaces, ainsi que les sources potentielles de composés qui peuvent être ponctuelles, diffuses, chroniques ou accidentelles.

Cet ouvrage a pour objectif de présenter les concepts, les méthodes et les outils actuels permettant de comprendre le fonctionnement de notre environnement, de limiter ou éviter les rejets et déchets, de recycler ces derniers, d'éviter les pollutions ou d'y remédier dans un contexte de développement durable au sens défini par Christian Lévêque et Yves Sciamia¹.

1. C. LÉVÊQUE, Y. SCIAMA, *Développement durable*, 2^e éd., Dunod, Paris, 2008.

Pour eux, le développement durable correspond à : « [une] notion [prise] soit dans un sens relativement restreint, c'est-à-dire en considérant les métiers dans lesquels l'ingénieur est en prise directe avec le milieu, naturel ou perturbé par les activités humaines, soit dans une acception plus large, c'est-à-dire en incluant les métiers dans lesquels l'action de l'ingénieur, bien qu'elle ne se fasse pas directement sur le milieu naturel en tant que tel, relève de l'environnement à différentes échelles de temps et d'espace, en particulier par la modification des flux d'énergie et de matière ainsi que par les obligations dues aux contextes légaux et réglementaires en intégrant les effets sur les milieux ». Dans cet ouvrage, nous traiterons surtout des flux de matière, les flux d'énergie n'étant pas mis en avant. C'est le cas notamment de ceux provenant du Soleil, qui régulent une grande partie du fonctionnement de la planète Terre.

En Europe aujourd'hui, une prise de conscience a lieu. La réglementation REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) a été mise en place en juin 2007 par l'Union européenne dans le but d'enregistrer, d'évaluer, d'autoriser et de restreindre les produits chimiques. Les principaux objectifs de cette réglementation sont¹ :

- d'assurer un niveau élevé de protection de la santé humaine et de l'environnement contre les risques que peuvent poser les produits chimiques ;
- de promouvoir des méthodes d'essai alternatives ;
- d'assurer la libre circulation des substances au sein du marché intérieur ;
- de renforcer la compétitivité et l'innovation.

Ce règlement REACH fait porter à l'industrie la responsabilité d'évaluer et de gérer les risques posés par les produits chimiques et de fournir des informations de sécurité adéquates à leurs utilisateurs. En parallèle, l'Union européenne peut prendre des mesures supplémentaires concernant des substances extrêmement dangereuses, quand une action complémentaire au niveau européen s'avère indispensable.

Cette réglementation est devenue nécessaire si l'on considère le nombre considérable de substances spécifiées et décrites aujourd'hui : plus de 18 millions (*Chemical Abstracts*). En 2000, on estime à 400 Tg de produits chimiques produits dans le monde à comparer avec 1 Tg en 1930. 100 000 substances ont été déclarées dans l'Union européenne en 1981 sous le terme « substances existantes ». Depuis cette date, 3 000 « substances nouvelles » ont été déclarées dans l'Union européenne. On estime qu'environ 30 000 composés sont présents sur le marché avec des quantités supérieures à 1 t et que 5 000 composés sont produits pour une quantité supérieure à 100 t. Parmi toutes les substances produites, on considère qu'il existe plus de 8 700 additifs alimentaires différents connus à ce jour et 3 300 composés sont utilisés comme médicaments pour la santé humaine (d'après Giger, 2002). W. Giger a aussi classé en catégories les facteurs de risque et les substances. Une grande part de celles-ci se retrouve dans le milieu naturel, dans les eaux et pour certaines d'entre elles dans l'atmosphère (*Tableau 1*). Le sol aux interfaces constitue un réservoir avec des devenir variables : du simple stockage à la dégradation des molécules jusqu'à leur disparition en passant par leur transformation et leur transport dans d'autres réservoirs et/ou compartiments de la biosphère.

Tout ceci repose sur la connaissance et la reconnaissance des différents composés présents dans les différents compartiments en liaison avec le cycle des différents éléments. La chimie analytique constitue ici un point clé dans l'identification et la compréhension des systèmes et des cycles.

1. Voir le règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil, du 18 décembre 2006.

Quelques limites peuvent être mises en avant en ce qui concerne certaines affirmations : en effet, faut-il penser que la science et la technologie sont les clés pour résoudre la plupart des problèmes de pollution, pour limiter les impacts à venir et militer pour un développement soutenable par la conception de procédés industriels propres ? De nombreux concepts dus à des hypothèses réductionnistes masquent les effets à plus grande échelle et à plus long terme (*e.g.* exemple des « savons-détergents-phosphates... » traité dans le chapitre 3, ou le bisphénol A, dans le chapitre 12).

Une des limites est celle imposée par le **principe de la conservation de la matière**, qui fait que la dilution, souvent pratiquée lors de rejets, ne signifie nullement disparition mais transfert d'un réservoir vers un autre plus vaste, plus ouvert. À cela s'ajoute la notion d'atténuation naturelle prônée par certains et décriée par d'autres. Cette notion consiste à énoncer qu'un composé émis dans un milieu naturel va être dégradé et/ou transformé sous l'action le plus souvent des micro-organismes présents naturellement en association avec des réactions physico-chimiques. Si cette notion peut certainement s'appliquer dans le cas de molécules organiques, elle possède deux limites importantes :

- les éléments sont conservatifs, ce qui signifie qu'un élément métallique en trace, comme le mercure ou le cadmium, restera présent et ne subira pas de transformation ; il pourra être au mieux transféré dans des minéraux qui contribueront à son « inertage », ou au contraire introduit dans la chaîne alimentaire puis bio-amplifié jusqu'en bout de chaîne ;
- il existe des composés organiques, organo-métalliques ou organo-métalloïdes issus de la synthèse exclusive de l'homme, appelés « xénobiotiques » du fait de l'absence de voie de synthèse naturelle ; ces composés ont des usages spécifiques, souvent avec des effets à faibles concentrations ; dans ce cas, peu ou pas de micro-organismes sont capables de les transformer, ce qui conduit à des effets à plus grande échelle à la fois dans le temps et dans l'espace.

Une autre limite est due au **second principe de la thermodynamique**. En effet, la restauration d'un site contaminé crée des désordres localement, mais aussi en un autre lieu (nouveaux problèmes environnementaux et consommation d'énergie) avec des coûts supplémentaires. Il apparaît donc nécessaire de mieux prévoir et anticiper plutôt que de traiter les cas une fois que le problème est survenu. Cela vaut notamment pour les métaux, pour lesquels la réhabilitation des sites pollués constitue presque toujours un défi environnemental, économique et social pour les collectivités après la fin et/ou le départ des activités industrielles.

Tableau 1 Les catégories de facteurs de risque pour l'environnement (d'après W. Giger, 2002).

Catégorie	Exemple : substance, apport
I. Substances détectées précocement	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), chlorofluorocarbones (CFC, fréons)
II. Substances déversées de manière ponctuelle et massive	Dioxines (Seveso, 1978), radioactivité (Tchernobyl, 1986), produits phytosanitaires (Schweizerhalle/Rhin, 1986), accidents pétroliers (Torrey Canyon, Amoco Cadiz, etc.)
III. Substances à effets identifiables lors de contaminations chroniques	Alkykbenzènes sulfonates à chaînes ramifiées, tensioactifs anioniques des lessives (mousses), phosphates des lessives (eutrophisation)

Catégorie	Exemple : substance, apport
IV. Substances s'accumulant dans les systèmes biologiques	DDT (dichloro-diphényl-trichlorotéthane), biphényles polychlorés (PCB), polluants organiques persistants (POP), métaux lourds ou éléments traces métalliques (Pb, Cd, Hg, etc.)
V. Substances à usage spécifique	Détergents, pesticides, herbicides, adjuvants des bétons, produits antialissures (organoétains)
VI. Produits de remplacement	Alkylbenzènes sulfonates à chaîne linéaire (LAS), nitrilotriacétate (NTA), zéolite A, insecticides organo-phosphorés
VII. Produits intermédiaires de biodégradation (métabolites)	Méthylmercure, nitrosamines, nonylphénol
VIII. Sous-produits d'analyse (« pics fantômes »)	PCB, perchloroéthylène, acide clofibrigue
IX. Impuretés de production	Dibenzodioxines polychlorées et dibenzofuranes (disoxines)
X. Sous-produits de technologie des eaux	Chlorophénols, trihalométhanés (THM), acides haloacétiques, nitrosodiméthylamine (NDMA), bromates
XI. Substances détectées tardivement	Arsenic (Cf. Exemple 1 dans ce chapitre)
XII. Substances mal jugées	Méthyl-tert-butyl-éther (MTBE), atrazine
XIII. Substances difficiles à évaluer	Composés à effets endocriniens (bisphénol A, β -estradiol, médicaments (anti-inflammatoires, etc.)
XIV. Polluants émergents	Antibiotiques, produits ignifuges bromés, sulfonates fluorés (tensioactifs)
XV. Facteurs de risque toujours d'actualité	Boues d'épuration, agents pathogènes dans l'eau potable

C'est aussi le cas du stockage et des émissions de solvants organochlorés à partir de réservoirs enterrés, oubliés le plus souvent, pour lesquels des fuites, même négligeables, ont des conséquences importantes sur la qualité des eaux souterraines ou sur des travaux (fondation de bâtiments, voiries, etc.), induisant des surcoûts de dépollution et des retards dans les chantiers.

D'autres limites existent et peuvent être mises en avant. Elles sont détaillées dans le livre de Meadows *et al.* (2012).

L'ambition de cet ouvrage n'est nullement de couvrir l'ensemble de ces points en détail, mais d'apporter des concepts, des outils et des réflexions :

- pour mieux mettre en exergue la nécessité de prendre en compte la chimie pour comprendre l'environnement ;

Avant-propos

- pour évaluer l'impact des activités humaines liées à la chimie sur l'environnement et en prévenir et limiter les conséquences.

Cet ouvrage se décompose en douze chapitres, qui vont traiter notamment :

- de l'hydrologie et du cycle de l'eau d'un point de vue des bilans et des moyens pour les quantifier ;
- du transport réactif dans les sols ;
- de la physico-chimie des eaux, sous l'angle des principes et de l'influence des activités humaines ;
- des eaux urbaines, comment les collecter et quelles sont les perturbations qu'elles peuvent engendrer ;
- des traitements des eaux afin de présenter les méthodes aujourd'hui utilisées pour limiter les rejets dans les eaux de surface ;
- des techniques de séparation et de dépollution des eaux de plus en plus mises en œuvre pour obtenir une eau de meilleure qualité, mais aussi pour séparer des molécules d'intérêt présentes dans des effluents ;
- de la pollution atmosphérique, aussi bien dans les systèmes homogènes qu'hétérogènes, et des conséquences sur l'environnement ;
- de la valorisation des déchets en fonction de leur origine ;
- des procédés propres, en s'appuyant sur les concepts du génie chimique et des procédés afin d'optimiser les systèmes et produire en minimisant les coûts énergétiques et de matière ;
- de l'analyse de cycle de vie et des procédés, qui a pour but de connaître le cycle d'un élément dans un produit, de la conception à la mort de ce dernier ;
- de l'écotoxicologie et de la normalisation, dans le but de mieux comprendre les effets des perturbations liées aux émissions dans l'environnement sur les écosystèmes ;
- de la chimie et des sociétés afin de comprendre comment fonctionnent les controverses socio-technologiques et environnementales.

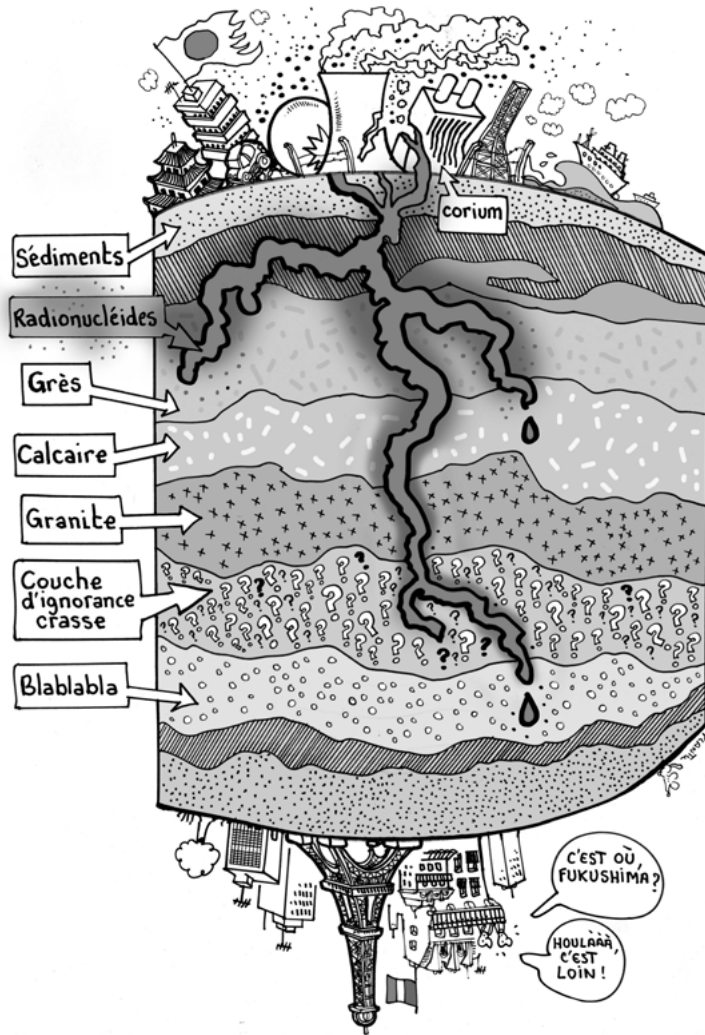
L'ensemble intègre des exemples et études de cas, et dans la mesure du possible des exercices d'application afin que chacun puisse vérifier si les notions présentées sont bien assimilées.

Cet ouvrage constitue une synthèse, non exhaustive, des enseignements de l'option transversale « Génie de l'environnement » de l'Institut national polytechnique de Toulouse (INPT), enseignements que peuvent y recevoir les élèves-ingénieurs de troisième année. Des collègues de l'université Paul Sabatier (UPS, Toulouse) et de l'École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (ENGEES) ont également participé à cette rédaction. Ce livre s'adresse donc à un public large, souhaitant approfondir certains domaines de la chimie et de l'environnement dans une vision pluridisciplinaire et interdisciplinaire afin que le dialogue puisse se faire plus aisément, en toute connaissance, entre les différents acteurs.

Enfin, je voudrais remercier tous ceux qui ont soutenu ce projet ainsi que l'ensemble des contributeurs qui ont mené à bien cette entreprise de longue haleine.

Hanoï, le 11 mars 2013

Philippe Behra



Fukushima, printemps 2011 (avec l'aimable autorisation de Plantu)

TABLE DES MATIÈRES



Avant-propos	III
Chapitre 1. Hydrologie – cycle de l'eau	1
1.1 La répartition de l'eau sur la Terre	1
1.2 Le moteur du cycle hydrologique : le Soleil	9
1.3 Les précipitations atmosphériques	10
1.4 L'interception	12
1.5 L'évapotranspiration	13
1.6 La circulation de l'eau souterraine	15
1.7 L'infiltration et les écoulements	20
1.8 Le Bassin versant	23
Exercices d'application	27
ÉTUDE DE CAS : Application d'un modèle hydrologique à un petit bassin versant tropical : Nsimi (Cameroun)	28
Chapitre 2. Transport réactif en milieu poreux	32
2.1 Les méthodes de modélisation des phénomènes de transport réactif en milieu poreux	35
2.2 Du microscopique vers le terrain : changement d'échelle et validité des approches	42
ÉTUDE DE CAS : Systèmes réactifs : forme finale de l'équation d'advection-dispersion-réaction en milieu poreux	53
Exercices d'application	56
Chapitre 3. Physico-chimie des eaux	57
3.1 La composition chimique des eaux naturelles	58
3.2 Impact des activités humaines	70
3.3 La chimie analytique et la spéciation	74
ÉTUDE DE CAS 1 : Impact d'une mine sur la qualité de l'eau dans le bassin potassique alsacien	80
ÉTUDE DE CAS 2 : Suivi hydrologique et hydrochimique du bassin amont de la Moselle – Méthodologie et expérience d'amélioration de la qualité de l'eau et des sols	83
Exercices d'application	87

Table des matières

Chapitre 4. Les eaux urbaines	90
4.1 Un peu d'histoire	90
4.2 Le but de l'assainissement	91
4.3 La classification des eaux usées	93
4.4 Les principaux constituants des eaux usées	94
4.5 L'impact des pollutions associées aux eaux usées	101
4.6 La mesure de la pollution	102
4.7 Caractéristiques des différentes sources de pollution	108
ÉTUDE DE CAS : La toxicité de l'hydrogène sulfuré	124
Exercices d'application	127
Chapitre 5. Traitement des eaux usées	129
5.1 Un peu d'histoire	129
5.2 Le contexte réglementaire – Niveau de rejet	131
5.3 Le principe du traitement des eaux usées	135
5.4 Les procédés de traitement par cultures libres	144
5.5 Les procédés de traitement par cultures fixées	150
5.6 Le procédé de traitement par cultures mixtes	156
5.7 Le traitement de la pollution azotée	157
5.8 Le traitement de la pollution phosphorée	158
5.9 Le traitement tertiaire	159
5.10 Le traitement des rejets urbains de temps de pluie	159
5.11 Le traitement des boues et des déchets	161
5.12 La modélisation dynamique des procédés biologiques	168
Exercices d'application	169
Chapitre 6. Les procédés de séparation liquide - solide dans le traitement des eaux	170
6.1 La production d'eau	170
6.2 Le traitement d'effluents	185
ÉTUDE DE CAS : Le traitement des vinasses de distillerie	193
Exercices d'application	197
Chapitre 7. La pollution atmosphérique	198
7.1 Quelques notions sur l'atmosphère	198
7.2 Les émissions atmosphériques	201
7.3 Le devenir des polluants atmosphériques	203
7.4 Les problématiques atmosphériques	205

7.5	La métrologie	218
7.6	Les outils pour la modélisation	224
7.7	La législation	225
7.8	Le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France	229
7.9	Procédés de traitement des émissions	231
	ÉTUDE DE CAS : Les émissions d'origine naturelle et les émissions d'origine anthropique	234
	Exercices d'application	238
Chapitre 8.	La valorisation des déchets	240
8.1	Introduction	240
8.2	La réglementation : un moteur pour les filières de recyclage	241
8.3	Les grandes filières de valorisation	243
8.4	Les intérêts et les limites du retour aux sols des déchets organiques	255
	ÉTUDE DE CAS : Gestion d'un ISDND et impacts environnementaux	267
	Exercice d'application	272
Chapitre 9.	Les procédés propres	274
9.1	Introduction	274
9.2	Les enjeux et le contexte réglementaire	275
9.3	La conceptualisation du génie des procédés propres	278
9.4	Les étapes de mise en œuvre du génie des procédés propres	279
9.5	L'optimisation de procédé	284
9.6	Les principes de l'intensification des procédés	287
9.7	Quelques exemples d'innovations de rupture en procédés (chimie sans solvant, nouveaux milieux, activations, miniaturisation)	291
	Exercices d'application	299
Chapitre 10.	L'analyse du cycle de vie (ACV) des produits et des procédés	303
10.1	L'éco-conception et l'analyse environnementale	304
10.2	L'analyse du cycle de vie	307
10.3	L'analyse du cycle de vie des procédés	320
	ÉTUDE DE CAS : L'ACV d'un procédé appliqué à la valorisation de biomasse végétale	322
	Exercice d'application	328
Chapitre 11.	L'écotoxicologie et la normalisation	330
11.1	L'écotoxicologie : définition et principaux paramètres	330
11.2	Les essais biologiques en écotoxicologie réglementaire et la normalisation	338
	Exercice d'application	351

Chapitre 12. Chimie et sociétés : comprendre les controverses socio-technologiques et environnementales	353
12.1 Chimie et sociétés : aux origines des controverses	353
12.2 Quelques définitions	357
12.3 Se doter d'outils pour mieux comprendre les controverses ?	365
ÉTUDE DE CAS : L'invasion de la chrysomèle du maïs : Où est le danger ? Est-ce l'insecte ou les méthodes de lutte ?	366
Exercices d'application	374
Solutions des exercices	376
Liste des acronymes et abréviations	389
Références bibliographiques	398
Index général	411

HYDROLOGIE

CYCLE DE L'EAU

1

D. Labat

PLAN

- 1.1 La répartition de l'eau sur la Terre
- 1.2 Le moteur du cycle hydrologique : le Soleil
- 1.3 Les précipitations atmosphériques
- 1.4 L'interception
- 1.5 L'évapotranspiration
- 1.6 La circulation de l'eau souterraine
- 1.7 L'infiltration et les écoulements
- 1.8 Le Bassin versant

OBJECTIFS

- Connaître les grands réservoirs d'eau au niveau mondial.
- Comprendre les processus qui gouvernent le transit de l'eau au sein des bassins versants.
- Connaître les techniques de mesure en hydrologie et leurs limites.

1.1 LA RÉPARTITION DE L'EAU SUR LA TERRE

Le cycle hydrologique

Le cycle hydrologique est un concept qui englobe l'ensemble des phénomènes liés aux mouvements, pertes et renouvellements de l'eau sous toutes ses formes à la surface de la planète.

Le **cycle hydrologique** se divise en trois étapes principales : une phase superficielle, une phase souterraine et une phase atmosphérique qui sont principalement associées respectivement au ruissellement de surface, aux circulations dans les aquifères, et aux phénomènes d'évapotranspiration et aux précipitations. Les temps de transferts à travers ces différentes composantes pouvant être très différentes.

Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont concomitants. Ainsi, le cycle hydrologique est un mouvement continu de l'eau à travers les différents réservoirs terrestres.

Chapitre 1 • Hydrologie cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est donc sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons les précipitations atmosphériques, l'interception par la canopée, l'évapotranspiration (constituée de l'évaporation et de la transpiration des végétaux), le ruissellement, les écoulements souterrains, l'infiltration et les écoulements de surface au sein d'une unité hydrologique : le bassin versant. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le Soleil, et sont présentés dans la suite de ce chapitre.

1.1.1 L'eau

L'eau est presque aussi ancienne que notre planète et depuis sa formation son volume est resté globalement stable. Ainsi, depuis le début, c'est toujours cette eau originelle qui circule entre les principaux réservoirs : la mer, les continents et l'atmosphère. Cette eau, suivant les conditions de pression et de température, peut se retrouver sous trois états : solide (neige et glace), liquide (eau pure ou chargée en solutés), gazeux (vapeur d'eau). Le passage d'une forme à l'autre (changement de phase) s'accompagne d'échanges thermodynamiques avec le milieu.

1.1.2 Les différents réservoirs d'eau au niveau terrestre

La Terre, vue de l'espace, apparaît comme une planète recouverte en grande partie d'eau, ce qui explique son surnom de « planète bleue ». Il s'avère que le volume d'eau sur Terre est très important et que cette ressource est loin d'être négligeable. Dans le tableau 1.1, sont reportées les valeurs des volumes d'eau et leur répartition par rapport aux différents réservoirs.

L'eau salée et l'eau douce

Les océans occupent une superficie à peu près égale à 70 % de la surface du globe et représentent 97 % de la masse totale de l'eau dans la biosphère. Cette eau salée n'est cependant pas directement utilisable pour les besoins de l'homme, mais constitue un puissant régulateur thermodynamique. Cela explique en grande partie les différents climats sur la Terre et en particulier la répartition des précipitations à l'échelle locale et globale. L'eau douce ne représente que 3 % de l'eau totale sur la planète. Les trois quarts de cette eau douce se présentent sous forme de glace piégée dans les calottes glaciaires ou les glaciers continentaux. L'eau douce libre est piégée à 98,5 % dans les aquifères souterrains.

Ainsi, 97 % de l'eau est présente sous forme d'eau salée et moins de 1 % représente de l'eau douce. Cette proportion d'eau douce constitue une ressource ne nécessitant que peu de traitements, avec une accessibilité plus ou moins aisée, une eau superficielle étant plus facilement accessible qu'une eau souterraine puisque dans ce dernier cas, des installations seront nécessaires sous forme de puits notamment.

L'eau souterraine

L'eau souterraine joue un rôle d'autant plus important que, dans une grande partie du globe, les populations s'alimentent presque exclusivement en eau par l'intermédiaire de puits. On doit cependant garder à l'esprit que plus de la moitié de l'eau souterraine se trouve à plus de 800 m de profondeur et que son captage demeure en conséquence très difficile et économiquement peu rentable. Une autre partie de l'eau souterraine est emmagasinée dans les aquifères carbonatés karstiques et apparaît sous la forme de résurgences (*Figure 1.1*). Les eaux souterraines occupent ainsi une place essentielle et devancent largement les eaux continentales de surface, qui ne représentent au mieux que 2 à 3 % de l'eau douce libre.

Tableau 1.1 Estimation des volumes d'eau (km³) et répartition sur la Terre entre ces différentes ressources (d'après de Marsily, 2006, 2009).

Localisation	Planète	Pourcentage
Eaux superficielles		
lacs	125 000	0,009
rivières	1 300	
glaciers	200 000	0,015
calottes glacières	28 800 000	2,1
lacs salés	100 000	0,007
Eaux sol et sous-sol		
humidité du sol	65 000	0,005
Eaux souterraines		
0 000 à 1 000 m	4 000 000	0,29
< 1 000 m	4 000 000	0,29
Atmosphère	13 000	0,001
Océans	1 320 000 000	97,0
TOTAL	1 360 000 000	100



Figure 1.1 La résurgence karstique de Ban Don Kan (Laos).

Les eaux souterraines, et en particulier karstiques, constituent les réserves en eau douce les plus importantes. Elles sont parfois, comme dans le cas de cette résurgence, facilement accessibles et disponibles en grande quantité (Photographie © D. Labat).

L'eau superficielle

Cette eau superficielle correspond principalement aux écoulements dans les fleuves et rivières et les réserves d'eau des lacs pour moitié, à l'eau contenue dans les sols pour un quart et enfin à l'eau contenue dans l'atmosphère et dans la biosphère. Les eaux continentales de surface sont, à l'inverse des eaux souterraines, facilement accessibles, mais sont donc susceptibles d'être plus facilement polluées malgré l'effort fait depuis une dizaine d'années pour en améliorer la qualité. À l'échelle globale, le plus grand fleuve est l'Amazone, avec un débit moyen annuel de $7\,000\text{ km}^3/\text{a}$, loin devant le Gange, le Congo, l'Orénoque et le Yangzi Jiang.

Globalement, le volume d'eau accessible à la surface des continents est de $113\,500\text{ km}^3$ par an. Le volume qui repart directement lors de l'évapotranspiration est estimé à $73\,000\text{ km}^3/\text{a}$. La différence est donc de $40\,500\text{ km}^3/\text{a}$, répartie entre la fusion des glaciers et des icebergs ($2\,500\text{ km}^3/\text{a}$), les écoulements souterrains ($10\,500\text{ km}^3/\text{a}$) et les écoulements de surface ($27\,500\text{ km}^3/\text{a}$). Sur ces $40\,500\text{ km}^3/\text{a}$, il est estimé que $13\,500\text{ km}^3/\text{a}$ environ peuvent être récupérés.



ENCART 1.1 La situation de l'eau dans le monde et son utilisation

Au cours du xx^{e} siècle, la population mondiale est passée de 1,7 milliard d'individus en 1900 à plus de 7 milliards en l'an 2011. Cette multiplication par quatre de la population mondiale s'est accompagnée d'une multiplication par sept de la consommation en eau de l'humanité, soit une augmentation presque deux fois plus importante. Ainsi, un tiers de l'humanité vit dans une situation dite de « stress hydrique », soit moins de $1\,700\text{ m}^3$ d'eau douce disponibles par habitant et par an. De nombreux pays ont donc pris des mesures de protection de la ressource en eau. Par exemple, au niveau européen, la directive cadre sur l'eau 2000/60/CE du 23 octobre 2000 (DCE) établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau qui vise à atteindre un bon état chimique et écologique des eaux en 2015 et à réduire progressivement les rejets dans le milieu naturel de substances toxiques, avec pour but une suppression totale des rejets de substances dangereuses prioritaires d'ici à 2021.

En moyenne, la disponibilité en eau par habitant a été divisée par deux en l'espace de cinquante ans. En 1950, les réserves mondiales (après déduction de l'eau utilisée par l'agriculture, l'industrie et les ménages) se montaient à $17\,000\text{ m}^3$ par habitant et par an. Elles sont aujourd'hui descendues à $7\,300\text{ m}^3$ et devraient se limiter à $4\,800\text{ m}^3$ à l'horizon 2025.

Il y a seulement 50 ans, aucun pays au monde n'enregistrait un niveau d'alimentation en eau dit « catastrophique », signifiant qu'en cas de crise, une sécheresse par exemple, il n'y aurait probablement pas assez d'eau pour assurer la survie de la population. Aujourd'hui, près de 35 % de la population mondiale vit dans cette situation. Par ailleurs, les régions et pays « riches en eau » comme l'Europe du Nord, le Canada, la quasi-totalité de l'Amérique du Sud, l'Afrique centrale, l'Extrême-Orient et l'Océanie continuent elles à disposer de vastes réserves.

L'eau douce est ainsi très mal répartie au niveau global, et aujourd'hui plus de 40 % de l'eau des fleuves, des réservoirs souterrains et des lacs se trouve concentrée dans six pays : le Brésil, la Russie, le Canada, les États-Unis, la Chine et l'Inde alors que 40 % des terres émergées n'en concentrent que 2 %.

Enfin, notons qu'en plus de cette inégalité géographique face à l'accès à l'eau douce, plusieurs facteurs tendent aussi à réduire les disponibilités en eau : la mauvaise gestion, le gaspillage et la pollution des réserves.

Au niveau mondial, 70 % de l'eau est dédiée aux usages agricoles, 20 % aux usages industriels et 10 % seulement aux usages domestiques. Cette répartition est bien sûr variable d'un pays à l'autre en fonction de son développement économique, la proportion d'eau réservée aux usages agricoles étant par exemple de l'ordre de 85 % en Afrique et en Asie, et celle réservée aux usages industriels étant de l'ordre de 50 à 70 % en Europe et Amérique du Nord. En France, la consommation domestique moyenne journalière est de l'ordre de 162 L/habitant. Cependant, 7 % de cette eau seulement est dédiée à la préparation des aliments et à la boisson alors que 60 % de cette eau est consacrée aux bains, douches et sanitaires. Le reste est consacré à l'arrosage des jardins, à la vaisselle et au lavage du linge majoritairement.

Le temps de séjour de l'eau dans les différents réservoirs

Un facteur important à prendre en compte est aussi le **temps de séjour** de l'eau dans les différents réservoirs identifiés précédemment.

Le temps de séjour

Le temps de séjour est défini comme le rapport entre le volume du réservoir considéré et le flux d'eau entrant dans le réservoir ou le flux sortant (le système étant considéré comme à l'équilibre, les deux flux doivent se compenser).

Le temps de séjour est très variable (*Tableau 1.2*), mais est de l'ordre de 2 500 ans dans les océans, de 10 000 ans dans les calottes glaciaires, et pour l'eau douce il est de l'ordre de 1 500 ans en moyenne pour l'eau souterraine, de 20 ans en moyenne pour les lacs et de quelques jours dans les cours d'eau. Cette extrême variabilité des temps de séjour s'explique par des vitesses de circulation très différentes, en particulier entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Tableau 1.2 Temps de séjours moyens dans les principaux réservoirs
(d'après Gleick, 1993 et Jacques, 1996).

Réservoirs	Temps de séjour
Océans	2 500 ans
Glaciers	1 600 à 9 700 ans
Eaux souterraines	1 400 ans
Mers intérieures	250 ans pour la mer Caspienne, qui contient 80 % de tout le volume d'eau de ce réservoir
Lacs d'eau douce	17 ans pour les grands lacs, 1 an pour les autres lacs
Humidité des sols	1 an
Rivières	16 jours
Atmosphère (humidité de l'air)	8 jours
Biosphère (cellules vivantes)	Quelques heures

Chapitre 1 • Hydrologie cycle de l'eau

Le tableau 1.3 résume l'évolution de la demande en eau depuis 1900 jusqu'en 2000.

Remarque

Il est intéressant de constater que la proportion du volume d'eau prélevée augmente notablement pour l'industrie et l'usage domestique durant cette période. En 2000, le total est de 5 200 km³/a.

Tableau 1.3 Évolution de la demande en eau sur un siècle (valeur en km³ pour une année et valeur en pourcentage) (d'après de Marsily, 2006, 2009).

Usage	1900	1950	1990	2000
Agriculture	525 (91 %)	1 130 (83 %)	2 680 (65 %)	3 250 (63 %)
Industrie	37 (6 %)	178 (13 %)	973 (24 %)	1 290 (25 %)
Domestique	16 (3 %)	58 (4 %)	470 (11 %)	660 (12 %)

Ainsi, il resterait environ 8 300 km³ d'eau par an accessible pour les besoins à l'échelle de la planète. Le tableau 1.4 montre la répartition des usages de l'eau en fonction des domaines d'utilisation et des régions. Il s'avère qu'il existe des différences importantes en fonction du niveau de vie des populations et une inégalité importante en ce qui concerne l'accessibilité aux ressources.

Tableau 1.4 La répartition de l'eau sur Terre ainsi que des usages de l'eau par région dans le monde et par domaine d'utilisation (d'après de Marsily, 2006, 2009).

Région	Population (millions)	Agriculture (km ³ /a)	Industrie (km ³ /a)	Domestique (km ³ /a)	Réserves (%)
Europe	512	225	285	80	35
Asie	3 612	1 800	330	290	20
Afrique	853	200	32	40	9
Amérique du Nord	489	400	390	130	19
Amérique du Sud	367	100	105	50	17
Australie, Îles du Pacifique	30	25	3	8	*
Russie & ex-URSS	310	500	145	62	**
Eaux prélevées		3 250	1 290	660	
Eaux consommées		1 500	130	40	

* Valeur comptée avec l'Asie ; ** valeur comptée avec l'Europe.

Remarque

Dans le tableau 1.4, il est important de distinguer les eaux prélevées (5 200 km³/a) des eaux consommées (1 670 km³/a) – valeurs en 2000. Les eaux prélevées représentent l'ensemble des eaux soutirées, une part retournant directement dans le cycle de l'eau et une part étant soustraite de ce cycle. Cette dernière représente l'eau consommée qui disparaît, pour partie temporairement, du cycle de l'eau. C'est le cas lors de la photosynthèse où l'eau réagit globalement avec le CO₂ pour former des sucres.

**ENCART 1.2 Que représentent les besoins et usages de l'eau ?**

En France, le prélèvement annuel est de 41 milliards de m³ dont deux tiers pour le refroidissement des centrales nucléaires et thermiques, le tiers restant étant réparti comme suit : 10 % industrie, 12 % agriculture, 11 % collectivités. La consommation par habitant est de 150 à 200 L par jour avec 6 % sous forme d'eau potable. Aux États-Unis, cette consommation par habitant est de l'ordre de 300 à 400 L par jour, en moyenne. Pour la ville de Québec, la consommation par habitant et par jour est estimée à 800 L. À l'échelle de la planète, les besoins par habitant sont estimés à 1 000 m³ avec un minimum vital de 500 m³ par an, valeur à comparer à la ressource disponible en France, qui est de 4 500 m³/a par habitant.

Ces chiffres évoluent constamment, notamment avec l'augmentation du niveau de vie de pays comme la Chine.

1.1.3 L'impact des usages liés à la production agricole

Le tableau 1.5 permet de relativiser les besoins en eau en fonction des produits agricoles, végétaux comme animaux ou produits transformés par l'industrie agro-alimentaire. La différence entre les besoins en eau pour produire une tonne de blé et une tonne de maïs ne peut que nous interpeller. Ceci est dû à un métabolisme différent au niveau de la photosynthèse. En regardant les chiffres, il apparaît que le maïs serait plus intéressant à produire en termes de consommation d'eau. Cependant, les cycles végétatifs sont différents entre les plantes : le blé pousse au printemps et est récolté en été, contrairement au maïs, qui est semé au printemps, et pour lequel l'eau est indispensable en juillet c'est-à-dire durant une période où sous nos climats les apports en eau par les pluies sont minimums. Dans ce cas, il y aura nécessité d'irrigation et d'apport en intrants à des périodes décalées par rapport au cycle de l'eau. Les besoins en eau pour la production de viande sont considérables. À l'échelle de la planète, ces valeurs méritent réflexion. Elles permettent d'introduire la notion d'« **eau virtuelle** », qui représente les volumes d'eau nécessaires à la production des biens de consommation. Exporter une tonne de viande de bœuf d'Amérique du Sud vers l'Europe correspond à exporter, en plus de la tonne de viande, 13 500 m³ d'eau. À l'échelle de la planète, ces transferts d'eau virtuelle ne sont pas sans conséquence. Ceci est vrai notamment dans les pays déjà déficitaires en eau, c'est-à-dire les pays exportant vers d'autres pays des produits agricoles. Le résultat en est un appauvrissement d'autant des réserves en eau (voir E. Orsenna, 2008).

Tableau 1.5 Les besoins en eau selon la production agricole ou agro-alimentaire.

Produits végétaux	Volumes	Produits transformés et animaux	Volumes
Blé, céréales C3 (orge...)	1 160	Huiles	5 000
Maïs, céréales C4 (sorgho, mil)	700	Volailles	4 100
Pommes de terre	100	Bœuf	13 500
Maraîchage	200-400	Œufs	2 700
Agrumes	400	Lait	800

Les volumes d'eau requis sont exprimés en m³/t pour produire les bases alimentaires, pour une partie consommée brute (non en matière sèche) des différents produits.

1.1.4 Quels seraient les effets des changements climatiques sur ce cycle de l'eau ?

Les principales conséquences du réchauffement climatique sur le régime hydrologique seraient une accélération générale du cycle hydrologique avec plus d'évaporation sur les océans... et une augmentation globale des précipitations. Cependant, les variations régionales devraient être importantes avec de fortes incertitudes sur les événements extrêmes (sécheresses, tempêtes, cyclones, tornades...). Les conséquences au niveau des eaux du sol seraient une importante réduction de l'humidité du sol dans les zones méditerranéennes, liée à une évapotranspiration plus élevée, et des pluies plus réduites en été. À l'échelle de la planète, il faudrait prendre en compte la fusion des glaciers (cordillères des Andes, Alpes, Himalaya...) et des réserves de glace importantes au niveau des pôles. Enfin, il est considéré que les rendements des cultures augmenteraient du fait d'une augmentation de la température et de la pression partielle en CO₂, sauf en milieu tropical. Cependant, demeurent de grosses inconnues en ce qui concerne les changements des fréquences des événements climatiques extrêmes ainsi que les effets de l'augmentation des rendements agricoles.

1.1.5 Qu'en est-il de l'influence de la croissance démographique ?

Depuis novembre 2011, nous avons dépassé les 7 milliards d'habitants sur la Terre dont plus d'un milliard sont sous-alimentés. Si depuis 50 ans, le nombre de personnes sous-alimentées a eu tendance à diminuer, grâce à un bilan positif entre production de biens agricoles et consommation, la tendance s'inverse depuis quelques années du fait d'une sous-production – notamment de céréales en raison de sécheresses récurrentes – et d'une augmentation de la consommation liée à l'amélioration du niveau de vie dans certaines régions. À ce rythme, en 2050, nous serons environ 9 milliards d'habitants, et les besoins en eau supplémentaires seront alors d'environ 4 500 km³ d'eau par an. Les déséquilibres régionaux, déjà marqués, seront encore plus importants, et il sera nécessaire de limiter les prélèvements d'eau et les consommations avec des stratégies de réutilisation locale de ces eaux par des moyens techniques et technologiques encore à définir. De plus, à cette notion de quantité d'eau disponible il est indispensable d'associer celle de qualité : avec les outils d'aujourd'hui, il est possible de

produire de l'eau potable quelle que soit la qualité de l'eau initiale, mais cela a un coût à la fois énergétique et économique qu'il est possible de minimiser en optimisant les usages et les rejets.

1.2 LE MOTEUR DU CYCLE HYDROLOGIQUE : LE SOLEIL

Le cycle hydrologique est gouverné par les changements de phase de l'eau. Ces changements de phase, et en particulier la vaporisation de l'eau liquide ou la fonte de l'eau solide, impliquent un apport substantiel de chaleur. Cette chaleur provient exclusivement du Soleil. La gamme de longueur d'ondes d'émission du Soleil varie ainsi entre 0,25 et 3 μm , et se répartit en terme d'intensité entre l'ultraviolet (10 %), le visible (40 %) et l'infrarouge (50 %).

1.2.1 La variabilité spatio-temporelle du rayonnement et sa mesure

Afin d'estimer correctement les quantités de chaleur disponible par exemple pour l'évaporation de l'eau contenue dans les sols, il est nécessaire d'identifier, mesurer et modéliser correctement ces flux. Les échanges de chaleur entre l'atmosphère, la surface du sol et la surface des lacs et des océans, qui sont les agents de l'évaporation, mettent en jeu des phénomènes physiques tels que la convection, l'absorption, la réflexion, la transmission, la diffraction ou la diffusion.

La quantité de chaleur disponible (exprimée en W/m^2) pour une surface donnée est fonction de la position géographique, mais aussi de l'altitude. Elle varie ainsi de 240 à 260 W/m^2 au niveau des tropiques, pour descendre en moyenne à 100 W/m^2 au niveau des pôles. Elle varie aussi bien sûr suivant les saisons, mais aussi au cours de la journée.

Au cours de sa traversée dans l'atmosphère, le rayonnement solaire incident est partiellement atténué par absorption et par réflexion diffuse. Ainsi, suivant le domaine spectral, environ un tiers du rayonnement solaire est renvoyé vers l'espace par réflexion diffuse, cette proportion pouvant atteindre 80 % lorsque le ciel est couvert. Le rayonnement solaire global atteignant la surface du sol comporte ainsi deux composantes, d'une part le rayonnement solaire incident direct transmis par l'atmosphère, et d'autre part le rayonnement solaire diffus réfléchi par l'atmosphère en direction du sol. Le rayonnement est partiellement réfléchi par la surface du sol, selon sa nature, sa rugosité mais aussi l'inclinaison de la pente. L'instrument de mesure qui permet d'estimer le rayonnement est l'**héliographe**.

L'héliographe

L'héliographe est un instrument météorologique qui permet de mesurer la durée d'insolation, c'est-à-dire les périodes au cours de la journée pendant lesquelles le rayonnement solaire dépasse le seuil de 120 W/m^2 , ce seuil correspondant à une intensité suffisante pour créer des ombres portées bien nettes.

Remarque

D'autres instruments sont aujourd'hui utilisés tels que le pyranomètre, qui produit une tension électrique proportionnelle à l'ensoleillement reçu.

1.2.2 La répartition de l'énergie au niveau du sol

L'albédo

L'albédo est défini comme le pourcentage de lumière solaire réfléchi à la surface terrestre pour une zone irradiée.

L'albédo varie considérablement suivant diverses composantes terrestres ou atmosphériques et climatiques (présence de nuages ou de poussières dans l'atmosphère, angle d'incidence du rayonnement solaire).

Cet albédo, de l'ordre de 0,3 en moyenne à la surface de la Terre, peut cependant varier fortement en fonction de l'occupation du sol avec par exemple un albédo de l'ordre de 0,9 pour les sols fraîchement enneigés, mais de l'ordre de 0,1 pour un couvert forestier.

1.3 LES PRÉCIPITATIONS ATMOSPHÉRIQUES

Sous le terme « précipitations atmosphériques » sont rassemblées toutes les eaux météoriques qui tombent à la surface de la Terre, que ce soit sous forme liquide (bruine, pluie, averse) ou sous forme solide (neige, grésil, grêle), mais aussi les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre...). Les précipitations sont dues à un changement de température ou de pression qui induit la transformation de la vapeur d'eau en eau liquide. Elles constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants.

1.3.1 Les différents types de précipitations

Le processus de formation des gouttelettes d'eau au sein des nuages amenant les précipitations est essentiellement fondé sur un processus de collision-coalescence amenant à la formation de gouttelettes de taille critique.

Il existe principalement trois grands types de précipitations :

- Les **précipitations convectives** résultent d'une ascension rapide des masses d'air dans l'atmosphère. Ces précipitations, en général orageuses, de courte durée (moins d'une heure), de forte intensité et de faible extension spatiale sont associées aux cumulus et cumulonimbus, à développement vertical important pouvant aller jusqu'à 6 km d'altitude. Ces précipitations peuvent conduire à des événements hydrologiques désastreux.
- Les **précipitations frontales** sont associées aux surfaces de contact entre les masses d'air de température, de gradient thermique vertical, d'humidité et de vitesse de déplacement différents, que l'on nomme fronts. Les fronts froids créent ainsi des précipitations souvent brèves, peu étendues et intenses alors que les fronts chauds génèrent en général des précipitations longues, étendues, mais peu intenses. Ces précipitations sont associées aux nuages à développements horizontaux tels que les stratus et les stratocumulus.
- Les **précipitations orographiques** sont liées à la présence d'une barrière topographique particulière et ne sont pas, par conséquent, spatialement mobiles. Les caractéristiques des précipitations orographiques dépendent de l'altitude, de la pente et de son orientation, mais aussi de la distance séparant l'origine de la masse d'air chaud du lieu de soulèvement. En général, elles présentent une intensité et une fréquence assez régulières.

Le territoire français reçoit en moyenne 770 mm de précipitations annuellement. Les cumulés annuels de pluie sont relativement homogènes à l'échelle nationale : 655 mm à Toulouse, 788 mm à Nantes, 610 mm à Strasbourg et 670 mm à Paris. Seules deux régions se distinguent : le Pays Basque, avec 1 500 mm à Biarritz, et les régions à relief marqué soumises aux précipitations orographiques (980 mm à Grenoble, 2 200 mm à la station du Mont-Aigoual, dans le Gard).

1.3.2 La mesure de la précipitation et sa spatialisation

Comme les précipitations sont extrêmement variables sur le plan spatio-temporel, leur mesure est relativement complexe. Quelle que soit la forme de la précipitation, liquide ou solide, on mesure la quantité d'eau tombée durant un certain laps de temps. Ce temps d'intégration peut varier de cinq minutes, lorsque l'on s'intéresse aux événements extrêmes, au mois ou à l'année, lorsque l'on s'intéresse aux bilans hydrologiques globaux. On l'exprime en hauteur de précipitation ou lame d'eau précipitée par unité de surface horizontale. On définit aussi son intensité (mm/h) comme la hauteur d'eau précipitée par unité de temps. Deux appareils de mesures fondamentaux que sont le **pluviomètre** (instrument totalisateur qui indique la quantité d'eau totale précipitée et recueillie à l'intérieur d'une surface calibrée dans un intervalle de temps séparant deux relevés) et le **pluviographe** (instrument permettant de connaître, outre la hauteur d'eau totale, sa répartition dans le temps). Le passage de la donnée ponctuelle, à l'échelle du pluviomètre, à l'estimation des pluies sur une zone donnée s'effectue en général par la méthode des polygones de Thiessen (1911).

Afin d'avoir accès rapidement à une estimation spatio-temporelle des précipitations, le **radar météorologique** a été mis en service au début des années 1990. Un radar est constitué d'une antenne parabolique, d'un système d'émission-réception et d'un ordinateur. L'antenne parabolique du radar tourne et émet un faisceau d'ondes électromagnétiques (de longueur d'onde fixée entre 5 et 10 cm suivant les modèles en réseau). Ces ondes, qui se déplacent à la vitesse de la lumière, sont rétrodiffusées par les gouttes de pluie, les grêlons ou la neige. Le radar calcule alors la distance qui le sépare des gouttes. Il localise ainsi les zones de précipitations à des distances atteignant 200 à 300 km et mesure convenablement leur intensité dans un rayon de 80 à 120 km. Par contre, l'image radar peut être perturbée par des obstacles fixes (montagnes ou les constructions au voisinage immédiat de l'antenne), mais aussi par les conditions atmosphériques (propagation anormale par exemple dans le cas de fortes stratifications en température ou d'inversion de température). Toutefois, la mesure radar demeure une mesure indirecte et deux principales limites à cette technique de mesure existent. Tout d'abord, le radar mesure la réflectivité des précipitations à une certaine altitude alors que le pluviomètre mesure l'intensité des précipitations au niveau du sol. Puis la conversion entre la réflectivité et l'intensité de précipitations est loin d'être évidente et constitue une source importante d'erreurs.

Remarque

Aujourd'hui, les radars météorologiques (réseau ARAMIS) couvrent la quasi-totalité de la surface du territoire français avec une résolution spatiale de l'ordre de 100 m et une résolution temporelle de l'ordre de 5 minutes.

1.4 L'INTERCEPTION

Parmi les éléments de perte qui interviennent lors de l'estimation d'un bilan hydrologique d'un bassin versant, une partie non négligeable de l'eau des précipitations n'atteint pas le sol. En effet, cette eau peut être interceptée par des obstacles au cours du trajet vertical mais aussi horizontal de l'eau et en particulier par la végétation. Une partie de cette eau est directement évaporée à partir de la plante ou absorbée par celle-ci. Une autre partie atteint le sol à travers l'écran végétal par égouttage de la végétation. Une troisième partie enfin circule le long des branches et ruisselle ensuite sur les troncs avant d'atteindre le sol. On définit ainsi l'**interception** I comme la fraction de l'eau qui n'atteint jamais le sol à savoir :

$$I = P_i - (P_s + P_t)$$

avec :

I : interception (mm) ;

P_i : pluie incidente (mm) ;

P_s : pluie atteignant le sol drainée au travers du couvert végétal (mm) ;

P_t : pluie atteignant le sol par transfert le long des branches et des troncs (mm).

Les deux termes P_s et P_t constituent donc une précipitation différée, mais *pas une perte* du point de vue hydrologique.

Remarque

Dans la littérature, il y a souvent confusion entre l'interception (soit toute l'eau qui est retenue, même temporairement par la végétation) et les pertes dues à l'interception (soit l'eau qui n'atteint jamais le sol).

Le rôle hydrologique de l'interception

Le rôle hydrologique de l'interception est multiple. D'une part l'eau qui ruisselle sur la végétation assure le lessivage des dépôts secs qui ont pu s'y produire et les entraîne dans le sol : c'est un des mécanismes qui expliquent les pluies acides. D'autre part, le transit de l'eau à travers la canopée en assure une distribution différente au niveau du sol, ce qui peut modifier les conditions d'infiltration comme par exemple au niveau des forêts de teck en Asie. Enfin et surtout, l'interception est à l'origine d'une évaporation qui s'ajoute parfois de manière notable à l'évapotranspiration du bassin versant.

Les paramètres influençant l'interception

L'interception va être fonction du type de couvert végétal et de son degré de croissance, mais aussi et surtout de la structure de l'épisode pluvieux. En effet, on admet aujourd'hui que même durant la pluie, une fraction de l'eau interceptée peut s'évaporer. La durée et l'intensité de la précipitation vont influencer directement les volumes interceptés. Plus une averse sera fractionnée, plus une grande partie de l'eau interceptée mécaniquement par le feuillage aura le temps de s'évaporer par rapport à la situation d'une précipitation constante. Enfin, la présence de vents concomitante le plus souvent avec des pluies intenses explique la diminution de l'interception en fonction de l'intensité des précipitations. Ainsi, l'interception sous de jeunes épicéas en Angleterre passait de 65 % pour des précipitations de l'ordre de 2,5 mm à 20 % pour des précipitations de l'ordre de 18 mm (Jackson, 1975). De telles variations sont aussi mises en évidence sous climat tropical.

1.5 L'ÉVAPOTRANSPIRATION

La notion d'évapotranspiration regroupe l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration par les plantes. Notons toutefois d'ores et déjà que sur un sol présentant une couverture végétale, même partielle, les échanges par transpiration sont quantitativement plus importants que les échanges par évaporation directe.

1.5.1 Les paramètres influençant l'évapotranspiration

À l'échelle de la planète, l'évapotranspiration correspond aux deux tiers des précipitations alors que sous climat tempéré, elle correspond à la moitié environ des précipitations.

L'évaporation des surfaces d'eau libre ou des sols nus est fonction de deux principaux facteurs : la vitesse du vent et la pression de vapeur d'eau dans l'air situé au-dessus de la surface. En effet, la présence de vents permet une circulation et donc un renouvellement de l'air situé au-dessus de la surface et plus la différence entre la pression de vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante sera grande, plus l'évaporation sera importante. Ainsi, sous des conditions de température et de pression données, l'évaporation est possible jusqu'à une limite supérieure qui n'est autre que la pression de vapeur saturante, celle-ci croissant avec la température.

L'évaporation à partir d'une surface d'eau libre dépend de sa profondeur, de son étendue spatiale et de sa salinité tandis que l'évaporation à partir des sols nus dépend en particulier de la teneur en eau et de la capillarité.

En général, le calcul de l'évapotranspiration « réelle » c'est-à-dire pour une culture ou un couvert à un stade physiologique donné est basé sur l'estimation d'une évapotranspiration de référence notée ET_0 (ou évapotranspiration potentielle), qui est ensuite modulée par un coefficient.

L'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence correspond à la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance.

1.5.2 Les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration

Il existe trois grandes catégories de mesure pour quantifier l'évapotranspiration. Les **mesures directes** permettent par extrapolation de déterminer l'évapotranspiration à une échelle plus régionale via des coefficients d'ajustements. Les **méthodes empiriques** sont le résultat d'un traitement statistique des observations disponibles concernant certains éléments physiques ou atmosphériques facilement mesurables, qui expliquent l'évapotranspiration. Enfin, les **méthodes analytiques** font appel au bilan énergétique.

Ainsi, l'estimation de l'évapotranspiration de référence peut se faire à travers des méthodes empiriques telles que la formule de Turc (1961) :

$$ET_0 = 0,4 \times (R_G + 50) \frac{T}{T + 15}$$

avec :

ET_0 : évapotranspiration de référence mensuelle (mm) ;

Chapitre 1 • Hydrologie cycle de l'eau

T : température moyenne mensuelle (°C) ;

R_G : rayonnement global mensuel ou décadaire (W/m²/d).

L'estimation peut se faire aussi à travers des formules plus complexes telles que la formule de Penman (1948) :

$$ET_0 = \frac{R_N \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot C_p \cdot \delta e}{r_a}}{\lambda \left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right)}$$

avec :

ET_0 : évapotranspiration de référence mensuelle (mm) ;

R_N : rayonnement net (W/m²) ;

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air (kPa/°C) ;

ρ : densité de l'air à pression constante (kg/m³) ;

C_p : capacité thermique de l'air humide (kJ/kg/°C) ;

δe : différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur effective dans l'air (kPa) ;

r_a, r_s : Résistance aérodynamique et de surface traduisant le rôle des structures turbulentes de la couche limite atmosphérique dans le processus d'évaporation (s/m) ;

λ : Chaleur latente de vaporisation de l'eau (MJ/kg) ;

γ : Constante psychrométrique (kPa/°C).

Une autre formule fréquemment utilisée à l'échelle mensuelle est la formule de Thornthwaite :

$$ET_0 = 1,6 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_m(i)}{I} \right)^a \text{ avec } I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_m(i)}{5} \right)^{1,5}$$

avec :

ET_0 : évapotranspiration de référence mensuelle (mm) ;

$T_m(i)$: température moyenne mensuelle du mois i (°C) ;

I : indice de chaleur annuel ;

$$a = 0,49 + 0,179 I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3.$$

Sur le terrain, la mesure de l'évaporation se fait à l'aide d'une cuve d'un mètre de diamètre environ, remplie d'eau et dans laquelle, grâce à un flotteur, on mesure la vitesse de descente du niveau, couplée à une mesure synchrone de la vitesse du vent et de la pression de vapeur d'eau. Des stations météorologiques peuvent aussi être utilisées afin de déterminer l'ensemble des termes de l'équation de Penman à savoir la vitesse du vent, la température de l'air, l'humidité de l'air et la radiation nette. Enfin, un dernier appareil utilisé est le **lysimètre**. Ces appareils sont utilisés pour estimer l'évapotranspiration par des mesures simultanées du drainage vertical, des précipitations et des profils de teneurs en eau du profil du sol d'un milieu naturel. Ce sont de grands conteneurs, remplis du même type de sol que celui du terrain avoisinant ou d'un bloc de sol non perturbé, recouvert de surfaces nues ou plantées pour déterminer l'évapotranspiration d'un végétal en croissance, d'une couverture végétative de référence ou d'évaporation à partir de sol nu. Un bilan d'eau entre le drainage et les précipitations permet une estimation directe de l'évapotranspiration. Par exemple, le lysimètre de