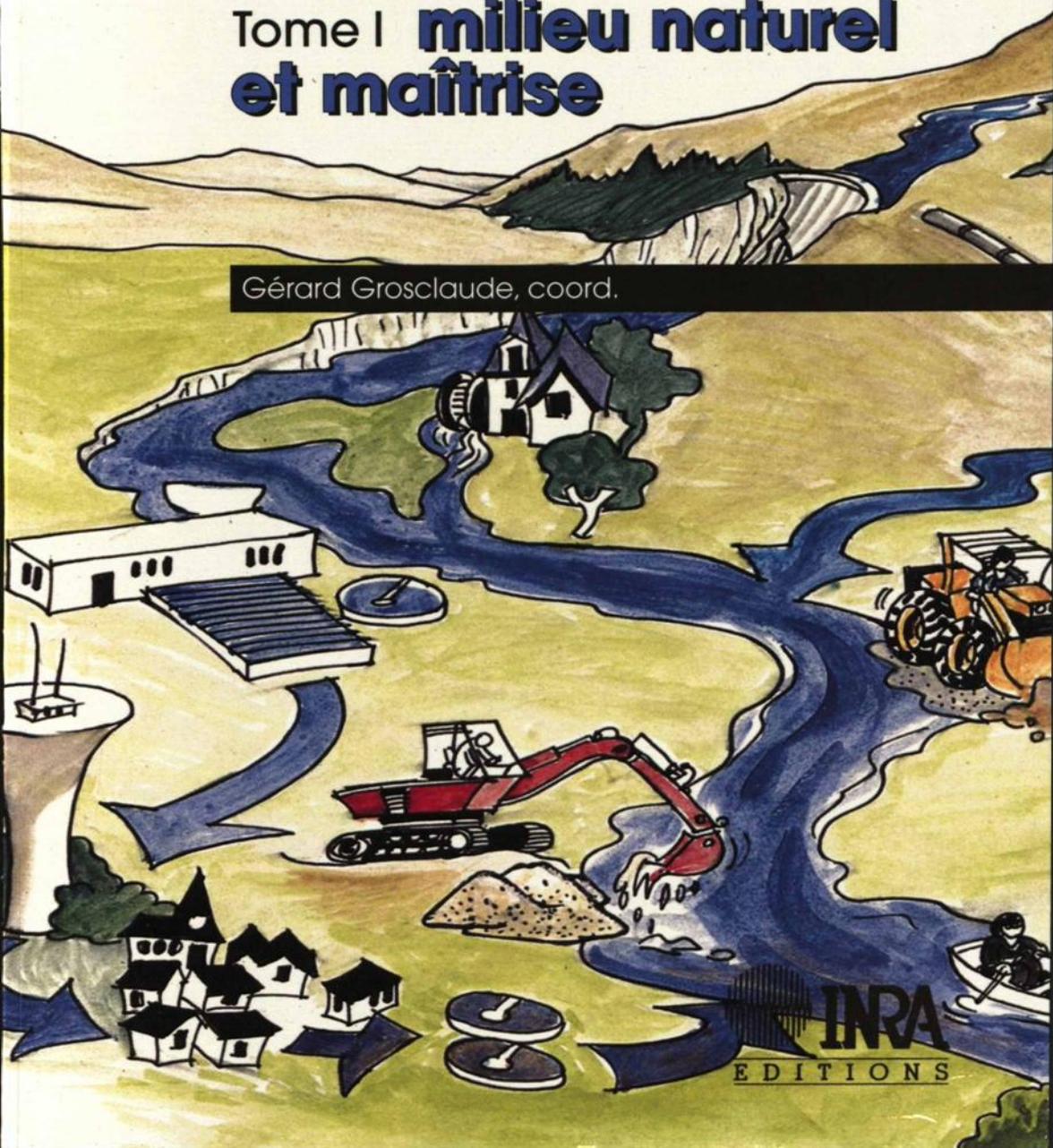


un point sur...

l'eau

Tome I **milieu naturel
et maîtrise**

Gérard Grosclaude, coord.



INRA
EDITIONS

un point sur...

l'eau

Tome I

Milieu naturel et maîtrise

l'eau

Tome I **Milieu naturel et maîtrise**

Gérard Grosclaude (coordinateur)

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
147, rue de l'Université, 75338 Paris Cedex 07

un point sur...

Phytoprotecteurs, protection des plantes, biopesticides

P. BYE, C. DESCOINS, A. DESHAYES, coord.

1991, 178 p.

Le magnésium en agriculture

C. HUGUET, M. COPPENET, coord.

1992, 276 p.

Agricultures et société

C. COURBET, M. BERLAN-DARQUES, Y. DEMARNE, éd.

1993, 326 p.

Élaboration du rendement des principales cultures annuelles

L. COMBE, D. PICARD, coord.

1994, 192 p.

Comportement et bien-être animal

M. PICARD, R.H. PORTER, J.P. SIGNORET, coord.

1994, 228 p.

Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990)

J.C. MULLER, coord.

1996, 392 p.

Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (France)

D. BAIZE

1997, 412 p.

Oiseaux à risques en ville et en campagne

Vers une gestion intégrée des populations ?

P. CLERGEAU, coord.

1997, 376 p.

L'information scientifique et technique

Nouveaux enjeux documentaires et éditoriaux

P. VOLLAND-NAIL, coord.

1997, 282 p.

Aliments et industries alimentaires : les priorités de la recherche publique

P. FEILLET, coord.

1998, 288 p.

L'homme et l'animal d'élevage : un débat de société

Arouna P. OUÉDRAOGO, P. LE NEINDRE, coord.

1999, 218 p.

© INRA, Paris 1999 – ISSN : 1250-5218 – ISBN : 2-7380-0854-2

Tome 1 - 2-7380-0855-0

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Cet ouvrage a été réalisé dans le cadre
du Comité scientifique "EAU" de l'INRA.

Nous tenons à remercier tout particulièrement
M^{me} Nadine Brisson et MM. Pierre Chassin, René Moletta,
André Neveu, François Papy et Charles Riou
qui ont bien voulu assurer la relecture des différents chapitres.

sommaire

Tome I

L'eau : milieu naturel et maîtrise

Préface	11
----------------------	----

1 Le cycle de l'eau

■ Le cycle de l'eau dans l'atmosphère	17
■ Le cycle de l'eau dans le sol	18
■ Les processus d'interface	19
■ Le bilan hydrique des sols	21
■ Les anomalies régionales et locales du cycle de l'eau	27
■ Conclusion	28
■ Références bibliographiques	28

2 L'histoire de l'eau

■ La compréhension du cycle de l'eau	31
■ Le paradis : l'eau-amie, un don des dieux	32
■ Le paradis perdu : l'eau, danger et source de conflits	35
■ Conclusion	40
■ Références bibliographiques	40

3 L'eau et le sol

■ Introduction	43
■ Notions de base concernant l'eau dans le sol	45
■ Relations sol/eau à l'échelle des bassins versants	51

<input type="checkbox"/> Spatialisation régionale du fonctionnement hydrique	56
<input type="checkbox"/> Formation et dynamique des nappes du sol	59
<input type="checkbox"/> Les dysfonctionnements du système sol/eau	62
<input type="checkbox"/> Conclusion	65
<input type="checkbox"/> Références bibliographiques	66

4 L'eau et la biosphère

<input type="checkbox"/> Climats et microclimats	71
<input type="checkbox"/> Transferts hydriques dans le <i>continuum</i> sol-plante-atmosphère	73
<input type="checkbox"/> Bilan hydrique des cultures	75
<input type="checkbox"/> Bilan hydrique des forêts	82
<input type="checkbox"/> Bilan hydrique et télédétection	86
<input type="checkbox"/> Conclusion	87
<input type="checkbox"/> Références bibliographiques	88

5 Les zones humides

<input type="checkbox"/> Introduction	89
<input type="checkbox"/> Définitions et typologies	90
<input type="checkbox"/> Inventaire succinct	91
<input type="checkbox"/> Histoire et évolution récente	92
<input type="checkbox"/> Usages, fonctions, espace : les éléments de la gestion	95
<input type="checkbox"/> Protection	98
<input type="checkbox"/> Conclusion	100
<input type="checkbox"/> Références bibliographiques	101

6 Les milieux aquatiques

<input checked="" type="checkbox"/> Diversité des milieux aquatiques	103
<input checked="" type="checkbox"/> Structure du milieu aquatique	105

■ Fonctionnement de l'écosystème aquatique	110
■ L'évolution de la qualité des eaux : l'exemple du Léman	114
■ Gestion des milieux aquatiques	116
■ Références bibliographiques	118

7 L'eau et le poisson

■ Les exigences du poisson	121
■ Les pollutions	124
■ L'exploitation du poisson	128
■ La gestion de l'eau	131
■ Références bibliographiques	136

8 L'eau et les plantes

■ Les fonctions de l'eau dans la plante	137
■ Le fonctionnement hydrique des couverts végétaux	142
■ Alimentation hydrique et production agricole	149
■ L'adaptation à la sécheresse	152
■ Conclusion	157
■ Références bibliographiques	158

9 L'irrigation

■ La maîtrise de l'eau : une nécessité vitale	159
■ Les besoins en eau des cultures	160
■ Les techniques d'irrigation	163
■ Le pilotage des irrigations	165
■ La place de l'irrigation dans les problèmes de gestion de l'eau ..	166
■ Irrigations spéciales	168

■ L'avenir de l'irrigation	169
■ Références bibliographiques	169

10 Le drainage

■ Introduction	171
■ Pourquoi drainer ?	172
■ Les techniques de drainage	174
■ Appréciation de l'intérêt à drainer un sol et conception des réseaux	177
■ Drainage et environnement	182
■ Conclusion	185
■ Références bibliographiques	186

Lexique	187
---------------	-----

Sommaire du tome II	199
---------------------------	-----

Liste des auteurs	203
-------------------------	-----

Préface

Charles Riou

L'eau fait partie de notre environnement naturel tout comme l'air que nous respirons et la terre qui nous porte et nous nourrit ; elle constitue un des éléments familiers de notre vie quotidienne.

Pour l'homme, les océans étaient jadis presque l'infini ; l'eau était certes mal répartie dans le temps et dans l'espace et il y a fort longtemps que la sécheresse est évoquée, mais cela faisait partie des phénomènes « naturels » : il y avait, il y aura encore des « catastrophes naturelles » dues au manque ou à l'excès d'eau.

Cette idée d'une nature parfois généreuse, parfois cruelle et injuste et finalement imprévisible a longtemps imprégné la pensée humaine.

Le développement des connaissances a peu à peu modifié cette attitude et grâce à la science et à la technique l'homme a appris à maîtriser en maintes occasions les « forces naturelles » : il a édifié des barrages qui tempèrent les variations du débit des rivières et permettent de faire des réserves, il a prospecté les ressources en eau du sous-sol, il a su déplacer sur de grandes distances des volumes d'eau importants ; il a su aussi assécher des zones régulièrement inondées et peu à peu s'est imposée cette nouvelle idée que l'homme pouvait maîtriser l'eau. Certes, il ne peut empêcher les tempêtes qui mettent en jeu des énergies colossales, mais dans le domaine des eaux continentales, seul le manque de ressources financières met une limite à son action.

Cette science de l'eau acquise au cours des derniers siècles a donné naissance à un grand optimisme, encore très apparent il y a quelques décennies seulement. On se souvient entre autres de la manière dont le barrage d'Assouan sur le Nil était annoncé... et d'autres grands projets sur les fleuves africains... Certes, tout le monde savait qu'il existait dans le monde, outre les déserts, de grandes zones peuplées menacées périodiquement par la sécheresse, mais des solutions étaient constamment évoquées, issues du génie créatif de l'homme... tout paraissait possible. Cet optimisme a disparu aujourd'hui ! L'augmentation constante de la population de la terre, notre capacité réelle d'intervention sur les phénomènes naturels désormais mieux connus et les excès commis par des pays qui disposaient de tous les atouts de la connaissance et de la technique ont modifié notre vision du problème de l'eau, au point de faire émerger cette idée que l'eau est devenue un problème majeur !

En juin 1998, l'UNESCO organisait une conférence internationale intitulée : *Water : a looming crisis ?* Le point d'interrogation n'apparaissait plus chez les conférenciers qui parlaient de « crise de la gestion des eaux » de « surexploitation des nappes » ; un thème sur cinq était consacré à la qualité de l'eau, un autre à l'impact de l'activité humaine sur la ressource en eau. La FAO annonçait déjà en 1993 qu'en l'an 2000 près de 30 pays connaîtraient une pénurie d'eau... il ne semble pas qu'elle ait changé d'avis depuis cette annonce.

En France, où certes existent de très fortes différences de disponibilités en eau d'une région à l'autre, nous avons globalement une situation avantageuse ; pourtant ces dernières années, il a souvent été question de sécheresse entraînant un état de crise en été où différents utilisateurs entraient alors en conflit.

Nous voici donc actuellement devant un constat... l'eau qui paraissait inépuisable, mises à part quelques régions bien identifiées, ne l'est pas ; bien pire, sa qualité se dégrade dans les régions les plus avancées du monde en technologie ; enfin l'avenir est menaçant pour une partie importante du globe, menaçant à deux titres : pour l'alimentation humaine, mais aussi pour la paix car des observateurs avertis n'hésitent plus à parler de risques de conflits entraînés par le manque d'eau.

Peut-on à ce propos fournir quelques chiffres ? Il n'est pas facile d'évaluer la quantité d'eau renouvelable annuellement pour l'ensemble de la terre, mais avec beaucoup de précautions dans la méthode, la dernière proposition est de $42\,757\text{ km}^3$. Il faut noter que ce volume d'eau, renouvelable annuellement par l'effet des précipitations auxquelles il faut retrancher l'évaporation, et qui constitue en fait la limite supérieure de ce que nous pouvons théoriquement consommer sans entamer nos réserves non renouvelables, est peu de chose comparé au volume d'eau présent dans le monde. Les océans stockent en effet un peu plus de 97 % de l'eau (salée) et l'eau des continents se répartit entre les glaciers et les eaux souterraines avec une très faible part pour les eaux de surface : moins de 1 %. On constate en fait que, disposant d'un énorme capital d'eau sur les continents, l'homme ne peut en dépenser qu'un peu plus de un pour mille par an : la part renouvelée disponible.

Il faut ajouter à cela qu'une partie importante de cette eau est actuellement perdue, soit qu'elle se trouve dans des zones difficilement accessibles : le grand Nord, les hauts bassins de l'Amazone et du Congo, soit qu'une partie retourne inévitablement vers la mer : grandes crues difficiles à maîtriser, dilution nécessaire des eaux usées (non recyclées après épuration)...

En fait, il resterait réellement d'accessible moins de $15\,000\text{ km}^3$ par an soit environ $2\,500\text{ m}^3$ par habitant et par an... Si l'on considère que la FAO estime qu'en dessous de $2\,000\text{ m}^3$ par an et par habitant (tous usages confondus) il y a un risque de pénurie, on voit que la situation *moyenne actuelle* n'offre pas une grande sécurité pour l'avenir, mais il faut surtout noter que ce chiffre moyen dissimule de très grandes inégalités.

Si l'on se réfère à nouveau à l'eau théoriquement disponible, soit 7 650 m³ par habitant et par an, on constate qu'un Européen dispose de 4 240 m³ par habitant et par an, un Américain du Nord de 17 400 m³ par habitant et par an, un Asiatique 3 970 m³ par habitant et par an.

D'une manière plus détaillée, l'Européen du Nord a presque 10 fois plus d'eau que l'Européen du Sud (3 190 m³ par habitant et par an) et 15 fois plus que l'Européen du centre (2 120 m³ par habitant et par an).

En Afrique du Nord, la disponibilité de l'eau n'est que de 710 m³ par habitant et par an !

En Asie, les différences sont également considérables entre l'est de la Russie et la Sibérie (76 600 m³ par habitant et par an) et l'Asie du Sud ou de l'Ouest où l'on est déjà à la limite du seuil défini par la FAO !

Le premier constat est donc celui d'une très grande inégalité devant la ressource en eau, et d'une situation déjà difficile pour certains pays avec la menace d'une augmentation non maîtrisée de la population.

Tout ceci ne concerne que les quantités *moyennes* d'eau, il faut y ajouter les risques que fait peser la variation des besoins au regard des disponibilités au cours de l'année, ce qui explique qu'en France où l'on dispose globalement de plus de 3 000 m³ par habitant et par an (dont on ne consomme en moyenne que moins de 5 %, alors que l'on en prélève en fait presque 25 %) on peut, en été, manquer d'eau face à des besoins en augmentation : irrigations, collectivités locales, protection des plans d'eau, stockage par EDF, besoins de l'industrie...

Il faut enfin ajouter un autre élément de plus en plus préoccupant (dans les pays développés, mais pas uniquement) : les risques actuels concernant la *qualité de l'eau*.

Il existe depuis toujours des eaux contenant naturellement des éléments dissous les rendant plus ou moins impropres non seulement à la consommation humaine mais aussi à l'alimentation en eau des plantes (qui réagissent de façon très diverse) : eaux chargées de chlorure de sodium autour de la Méditerranée, de fluor en Tanzanie et au Radjasthan, et au Sénégal et même d'arsenic au Chili ; on peut également citer le natron du lac Tchad.

Mais à côté de cette chimie « naturelle », le développement de l'industrie, de l'agriculture intensive et de l'activité ménagère ont introduit dans le cycle de l'eau des substances chimiques de plus en plus nombreuses dont une partie importante atteint les nappes superficielles, les rivières et les plans d'eau : métaux lourds, nitrates en excès, phosphore, produits phytosanitaires etc. La concentration urbaine de la population accentue cette pollution.

Il n'est pas facile de rendre compte de la pollution dans le monde mais on peut localement suivre l'évolution de la qualité de l'eau et constater que si des efforts ont rendu possible ça et là une nette amélioration (le Rhin ou la Seine), les niveaux de nitrates augmentent en Europe de l'Ouest, en Amérique du Nord et en Chine. Dans de nombreux bassins sous des climats secs les eaux déjà naturellement salées le deviennent encore davantage sous

l'effet de l'évaporation dans les réservoirs et de l'irrigation mal contrôlée. On mesure également des taux de métaux lourds notables dans les matières en suspension des fleuves comme la Seine, le Rhin, le Pô, le Mississippi ou les rivières chinoises.

Quand on parle du problème de la ressource en eau, il faut donc avoir présent à l'esprit non seulement que les besoins en quantité seront insuffisants pour de nombreux pays, mais que la qualité de cette ressource est menacée. On doit noter la gravité de la situation dans des pays qui ont à la fois une population à croissance rapide, des ressources en eau insuffisantes et des moyens financiers qui ne leur permettent pas de mettre en œuvre les infrastructures indispensables.

A côté de ce problème latent qui demande un engagement permanent, l'eau apparaît aussi de temps à autre comme un facteur de risque accidentel.

Chaque année des inondations catastrophiques sont signalées par les médias, non seulement en Inde ou en Chine mais en Europe, plus localisées alors certes mais mal perçues par l'opinion qui s'indigne parfois du maintien d'un tel risque à notre époque. A cette occasion sont souvent évoquées des responsabilités humaines : aménagements des rivières mal conçus, augmentation du ruissellement sur le bassin versant, travaux de régulation des débits insuffisants etc.

Si face à des phénomènes pluvieux exceptionnels il n'y a guère de parade définitive, il n'en reste pas moins que l'homme par imprudence, incompetence, ou légèreté peut aggraver les conséquences de ces phénomènes.

L'eau aujourd'hui est donc devenue un problème pour l'homme, mais sa responsabilité étant également engagée, il a le devoir d'agir... le citoyen est d'abord un consommateur d'eau avec là encore de très grandes inégalités. Un Australien consomme 1 440 litres par jour *d'eau potable*, un Américain 617 litres, un Européen 210 litres, un Asiatique 89 litres et un Africain 48 litres ! Mais il y a à côté de la consommation d'eau potable beaucoup d'autres usages : l'industrie, le tourisme, la pêche, la sauvegarde des écosystèmes aquatiques, les réserves indispensables à l'énergie hydroélectrique, le refroidissement des centrales nucléaires, l'irrigation... Tout ceci est fait pour le citoyen qui est donc au cœur des débats : son attention est d'ailleurs naturellement attirée par l'augmentation régulière du prix de l'eau. La complexité de la situation actuelle exige que le citoyen soit mieux averti qu'auparavant des différents aspects du problème de l'eau. La meilleure façon d'informer est de le faire tôt, au moment privilégié où l'individu est le plus apte à comprendre et retenir, et c'est en général quand il est formé par l'école.

C'est dans cet esprit que cet ouvrage est conçu. La réalisation en revient à l'INRA, et particulièrement au Comité Scientifique « EAU », mais il faut noter que Gérard GROSCLAUDE en a été l'initiateur et le coordinateur.

Il s'agit d'une publication destinée à être lue par un large public, et même si inévitablement il y a des différences de ton, voire de niveau entre les articles,

les textes restent accessibles à la majorité des lecteurs qui ne sont pas nécessairement familiarisés avec la démarche scientifique.

Cet ouvrage a aussi l'ambition de traiter d'un très grand nombre d'aspects de la question de l'eau. On y trouvera un tome sur l'eau dans le milieu naturel et un autre sur les usages de l'eau avec les risques de pollution.

Dans l'un et l'autre, un gros effort a été fait pour faire le tour du problème : le cycle de l'eau, l'eau et la plante, l'eau et le poisson, l'aménagement des eaux, constituent l'essentiel du premier tome où l'on trouve également un chapitre sur l'histoire de l'eau. Dans le second tome les acteurs et le droit de l'eau, l'alimentation, le rôle de l'eau dans les industries agroalimentaires, la pollution, les traitements sont étudiés et fournissent les connaissances actuelles indispensables sur les relations entre l'homme et l'eau. Vingt-sept auteurs ont participé à cet ouvrage, dont la plupart appartiennent à l'INRA, mais aussi à l'IRD (ex. ORSTOM), à Météo France, au corps des Ingénieurs du Génie Rural et des eaux et forêts, au CNERNA, à la CGE et à la Lyonnaise de Eaux. C'est dire le souci des coordinateurs de faire participer non seulement des chercheurs, mais des aménageurs et des industriels.

Il reste à souhaiter, d'abord que le lecteur trouve du plaisir à parcourir ces pages qui se veulent instructives et faciles à lire, et qu'il soit ainsi mieux informé de la réalité et de la complexité des problèmes d'aujourd'hui liés à l'eau, et enfin, car c'est là l'ambition la plus haute de cette publication, qu'il devienne un citoyen compétent et responsable, jouant un rôle positif dans les décisions qui devront être prises dans l'avenir.

Le cycle de l'eau

Emmanuel Choissnel

Le cycle de l'eau pris dans son ensemble regroupe deux branches bien distinctes, bien que couplées entre elles : le cycle de l'eau dans l'atmosphère d'une part, le cycle de l'eau dans le sol d'autre part. La première branche, atmosphérique, est la partie la plus visible du cycle (nuages, précipitations...), elle est caractérisée par une circulation rapide de l'eau, essentiellement sous forme vapeur (le temps moyen de résidence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est de l'ordre de 8 jours), et elle interagit directement avec le fonctionnement de l'atmosphère elle-même. Par contraste, le cycle de l'eau dans le sol se passe essentiellement en phase liquide, il est marqué par une vitesse de circulation de l'eau relativement lente, et l'eau qui parcourt cette branche du cycle est pour un temps soustraite à toute interaction avec la branche atmosphérique. Du fait même de la présence de deux branches distinctes du cycle, les processus physiques qui se produisent à leur interface revêtent une grande importance comme nous le verrons.

Il faut également, en préambule, préciser que seule une très faible fraction de la quantité totale d'eau présente sur la planète terre (de l'ordre de 1,4 milliards de km³) circule, la majeure partie (plus de 97 %) étant stockée dans les océans, à quoi il faut ajouter environ 2 % stockés dans les calottes glaciaires et les glaciers.

Le cycle de l'eau dans l'atmosphère

L'atmosphère est réalimentée en permanence en eau sous forme de vapeur du fait de l'évaporation qui se produit à la surface des océans et des continents. On sait que l'évaporation à la surface de la terre est assurée à hauteur de 85 % du total par les zones océaniques, à la fois parce que le flux moyen annuel par unité de surface est de l'ordre de 1 400 mm/an pour les océans (à comparer à 470 mm/an pour les continents), et que les océans recouvrent 70 % de la surface terrestre.

Le cycle de l'eau dans l'atmosphère est caractérisé par un certain nombre de processus physiques. Ce sont : les changements de phase de l'eau (condensation ou évaporation), les mouvements verticaux dans l'atmosphère, enfin la circulation des masses d'air atmosphérique qui peuvent transporter sur des distances considérables, et notamment des zones océaniques vers les zones

continentales, des quantités énormes d'eau, sous forme liquide (gouttelettes nuageuses) ou sous forme de vapeur.

La vapeur d'eau dans l'atmosphère s'élève grâce aux mouvements turbulents à l'œuvre dans les basses couches de l'atmosphère, à une vitesse verticale moyenne de l'ordre du centimètre par seconde, puis se transporte en altitude, jusqu'à la formation de nuages. Ce transfert vertical et ce passage de l'eau de la phase vapeur à la phase liquide correspondent à un échange énorme de chaleur latente entre la surface terrestre et l'atmosphère, puisque cela représente un flux d'énergie à peu près égal au quart de l'énergie solaire incidente à la limite supérieure de l'atmosphère.

Au-delà des processus complexes en jeu au sein de l'atmosphère elle-même, ce cycle de l'eau dans l'atmosphère se traduit essentiellement de deux façons : d'une part par la présence (ou non) d'une couverture nuageuse qui va moduler l'apport d'énergie solaire à la surface du sol et donc le niveau d'évapotranspiration des plantes, d'autre part par l'apport, discontinu dans le temps, d'eau au sol sous forme de précipitations. Selon que certains de ces processus précités font défaut, ou sont au contraire exacerbés, les régions concernées vont connaître des anomalies du cycle hydrologique, alternativement sécheresse dans le premier cas, ou excès d'eau dans le second cas.

Le cycle de l'eau dans le sol

L'eau de pluie, provenant de la branche atmosphérique du cycle, est partie prenante du cycle de l'eau dans le sol à partir du moment où elle s'est infiltrée dans ce sol (cf. p. 21). La circulation de l'eau à l'intérieur du sol dépend bien entendu de la texture et de la structure des différents horizons du sol. De plus, seule une fraction du contenu total en eau du sol, pouvant aller de 30 % pour les sols les plus argileux à 60 % pour les sols limoneux, est éventuellement disponible ultérieurement pour contribuer à l'évapotranspiration de la végétation recouvrant le sol. Un sol limono-argileux d'un mètre de profondeur peut stocker 350 mm d'eau à la capacité au champ, dont 200 mm environ sont accessibles à la plante.

Parler de cycle de l'eau dans le sol revient implicitement à ne considérer que la partie de l'eau qui y circule, là encore très faible par rapport à la quantité totale d'eau stockée dans le sol et le sous-sol (nappes souterraines) évaluée à environ 8 millions de km³ pour l'ensemble de la terre.

En dehors des mesures de l'humidité volumique du sol (sondage neutronique ou réflectométrie), qui permettent un suivi précis des variations de la teneur en eau d'un sol au cours de l'année, la seule façon d'évaluer ces variations est de procéder à un bilan hydrique des sols (cf. p. 21).

En résumé, le devenir possible de l'eau de pluie ayant pénétré, voire percolé, à l'intérieur du sol peut être décrit qualitativement ainsi : elle peut être retenue autour des particules du sol et reste ainsi temporairement stockée dans le sol, avant d'être éventuellement réévaporée dans l'atmosphère après succion