



Pierre-Alain Roche

# L'eau dans le monde

Comprendre et agir



Presses des Ponts

COLLECTION

Manuels

# L'eau dans le monde

## Comprendre et agir

Les enjeux d'une meilleure gouvernance de l'eau sont essentiels, tant au plan local que planétaire :

- respecter les droits de l'homme pour l'eau potable, la salubrité et l'hygiène ;
- préserver une biodiversité en fort déclin ;
- permettre une alimentation équilibrée et développer une agriculture respectueuse des ressources naturelles que constituent l'eau et le sol, milieu vivant ;
- contribuer à réduire des émissions de gaz à effet de serre par la production hydroélectrique ;
- s'adapter au changement climatique en améliorant la résilience et la robustesse des installations humaines au regard des risques d'inondation.

Multidisciplinaires par nature, insérées au plus profond de la vie et de la culture, ces questions complexes doivent être abordées avec pragmatisme, humilité et passion.

Cet ouvrage est destiné en premier lieu aux enseignants du supérieur et à leurs étudiants qui se destinent à des métiers en lien avec l'eau. Les spécialistes y trouveront une synthèse actualisée des débats internationaux, de nombreux cas pratiques tirés de diverses régions du monde, avec une attention particulière pour l'Afrique et des pistes de progrès et d'approfondissement. Il est accessible sans prérequis et s'adresse à tous ceux qui ne se contentent pas de discours simplificateurs, qui veulent comprendre ces grands enjeux d'avenir dans toutes leurs dimensions et qui sont prêts à mobiliser leur énergie pour agir.

### COLLECTION

## Manuels

Pensée pour accompagner enseignants et étudiants du supérieur dans l'apprentissage, la collection Manuels met l'accent sur les outils pédagogiques. Plusieurs rubriques ont été conçues en lien étroit avec l'auteur pour approfondir les notions expliquées dans le cours, sous la forme de questions, d'études de cas ou de développements complémentaires.

**Couverture :**  
Les jardins flottants de Xochimilco  
(chinampas) à Mexico  
© Pierre-Alain Roche, 2000.



## Pierre-Alain Roche

Pierre-Alain Roche est enseignant à l'École nationale des ponts et chaussées et à l'École polytechnique en hydrologie et gestion de l'eau. Il a été chercheur au BRGM, puis au Cergrene (devenu LEESU), tout en exerçant au sein de l'administration, notamment dans le domaine des transports et de l'aménagement. Il a dirigé pendant sept ans l'agence de l'eau Seine-Normandie. Président d'honneur de l'ASTEE et gouverneur honoraire du Conseil mondial de l'eau, ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts, il poursuit ses travaux avec l'OCDE dans le cadre de « l'initiative pour la gouvernance de l'eau ». Il est également l'auteur d'*Hydrologie quantitative, processus, modèles et aides à la décision*, co-écrit avec Jacques Miquel et Éric Gaume, qui a reçu le prix Roberval du manuel d'enseignement supérieur francoophone.



Presses des Ponts

45 € TTC

ISBN 978-2-85978-541-3



9 782859 785413

L'EAU DANS LE MONDE

COMPRENDRE ET AGIR



# L'eau dans le monde

Comprendre et agir

Pierre-Alain Roche

*Presses des Ponts & École des Ponts ParisTech*



Presses des Ponts



École des Ponts

ParisTech

ISBN 978-2-8597-8541-3

© Juin 2021

ISSN en cours

Collection Manuels n°1

Dépôt légal Juin 2021

**Presses des Ponts**

21 Boulevard de l'hôpital, 75005 Paris  
École des Ponts ParisTech

**École des Ponts ParisTech**

6-8 avenue Blaise-Pascal  
Cité Descartes – Champs-sur-Marne  
77455 Marne-la-Vallée cedex 2

**Conception et réalisation**

Laetitia Mussard, chargée de projets d'édition,  
direction de la Documentation, École des Ponts ParisTech

Photo de couverture : Xochimilco, Mexique © Pierre-Alain Roche, 2000.

Les jardins flottants (*chinampas*) de Xochimilco (« lieu du champ de fleurs » en nahuatl), au sein du district fédéral de Mexico, sont cultivés depuis l'époque aztèque. Reliques d'un grand lac partiellement asséché pour alimenter en eau la ville de Mexico, ils sont inscrits au patrimoine mondial de l'humanité par l'UNESCO en 1987 et ils font l'objet d'un programme de protection écologique.

Promenade très populaire, une partie du site est sillonnée par de nombreuses barques à fond plat animées par des mariachis. Dans le film *Maria Candelaria*, d'Emilio Fernández, palme d'or à Cannes en 1946, Maria est une jeune cultivatrice de fleurs de Xochimilco, victime des préjugés, malade du paludisme et trop pauvre pour acheter la quinine, qu'un marchand tente d'abuser... Xochimilco résume ainsi toute la richesse et la complexité des enjeux de l'eau.

# Remerciements

Je tiens à remercier l'équipe de la direction de la documentation qui s'est mobilisée et tout particulièrement Laetitia Mussard qui a beaucoup apporté à la mise au point du manuscrit et a réalisé le maquettage avec talent et efficacité.

Outre l'équipe avec qui j'enseigne (aujourd'hui Evelyne Lyons, Dominique Fourgeiro, Bernard Barraqué et Olivier Gilard), je remercie Gérard Payen, Hugues Aypahassorho, Philippe Guettier, Aziza Achmouch et Oriana Romano pour leurs observations et leurs encouragements ainsi que les auteurs et institutions qui ont très rapidement et aimablement accepté la reproduction de quelques figures de leurs ouvrages ou de leurs sites internet.



# Introduction

Aujourd'hui, des milliards de personnes n'ont pas accès à une eau potable, vivent dans un environnement dont la pollution de l'eau menace leur santé, ou voient leurs vies et leurs biens menacés par des inondations : la mauvaise qualité de l'eau et de l'hygiène domestique est la principale source de mortalité infantile. Des centaines de millions de personnes sont obèses, essentiellement parmi les plus pauvres, en raison d'une alimentation déséquilibrée. Des centaines de millions de personnes continuent à s'entasser dans des bidonvilles pour fuir le dénuement total des zones rurales... Depuis une cinquantaine d'années, les écosystèmes des eaux douces sont ceux qui ont connu la plus grande dégradation et la perte de zones humides a été drastique. Les difficultés de la gestion de l'eau, très contrastées selon les régions du monde, reflètent la pression des populations en forte croissance, les inégalités sociales et les grands flux de denrées à l'échelle mondiale, bien plus que la diversité de répartition géographique des ressources, pourtant forte.

Les questions sont nombreuses :

- Comment mieux organiser le service essentiel de l'eau potable et de l'assainissement ? Qui doit payer quoi et comment assurer les solidarités nécessaires ?
- Comment une humanité qui sera dans trente ans 50 % plus nombreuse qu'aujourd'hui pourra-t-elle s'alimenter correctement ?
- Les ressources en eau sont surexploitées dans de nombreuses régions du monde et la biodiversité des milieux aquatiques est celle qui a le plus régressé : a-t-on le choix de faire autrement et peut-on en éviter la ruine ? À quel niveau faut-il le décider et le mettre en œuvre ? Comment ménager la planète, user de l'eau disponible sans en abuser, aménager avec l'aide de la nature et non contre elle ? Comment gérer ensemble ce patrimoine commun ?
- Les changements climatiques enclenchés par l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre par les activités humaines nous exposent à des déséquilibres, des sécheresses ou des inondations accrues. Comment s'adapter à ces bouleversements imminents, alors que dès aujourd'hui les déséquilibres sont criants ?

Les diagnostics alarmistes et les signaux forts émis il y a vingt, trente ou quarante ans restent toujours d'une cruelle actualité. Mais les connaissances évoluent vite et notre approche s'enrichit, on peut s'en réjouir. Au-delà d'une analyse critique des expériences passées, il s'agit maintenant de trouver le chemin de politiques publiques mieux étayées (des « *science-based policies* », aime-t-on dire dans les colloques, et pratique-t-on peu).

Depuis bien des années, avec des collègues, nous nous attachons à transmettre des notions concernant la gestion de l'eau à des étudiants qui suivent un cursus d'ingénieur. Ils seront tous concernés par ce sujet durant leur vie professionnelle et parmi eux se recruteront de futurs praticiens spécialisés dans ce domaine.

L'immense avantage d'enseigner cette matière est qu'il n'est nul besoin d'un grand talent pour convaincre les étudiants de l'importance du sujet. La principale difficulté est qu'il ne s'agit pas d'une discipline dont on pourrait borner le champ et définir avec précision les compétences à acquérir en vue d'une pratique professionnelle pertinente.

Partout, chacun s'accorde aisément à constater que « l'eau, c'est la vie ». C'est une bonne base, mais ce consensus de façade est loin de suffire... Il s'agit d'appréhender les enjeux multiples liant l'homme et la nature, ancrés dans des réalités locales environnementales, sociales et culturelles très diverses qui ne se prêtent pas aisément aux généralités. Leur combinaison forme des systèmes ouverts et complexes, imbriqués à différentes échelles de temps et d'espace, non-linéaires, aléatoires et incertains. Si la plupart des acteurs professionnels ou bénévoles associatifs sont impliqués dans des actions visant à résoudre des problèmes à des échelles essentiellement locales, ils ne peuvent ignorer dans leurs propres choix les enjeux qui se trament à l'échelle planétaire pour les prochaines générations et dont ils sont partie prenante.

L'étendue des savoirs utiles est immense et une vie d'étude n'y suffirait pas. Il faut bien agir, pourtant, car les problèmes à régler sont patents. Pour cela, le praticien doit assumer ses ignorances, en veillant à ce qu'elles n'entraînent pas trop d'erreurs grossières. C'est bien de « comprendre » qu'il s'agit, au sens du latin *cumprehendere*, prendre ensemble, embrasser toutes les dimensions d'un sujet.

Avant d'être une question technique, la gestion de l'eau est ainsi d'abord une question sociale, politique, économique et environnementale. Les experts et les professionnels y jouent un rôle essentiel, mais ils doivent être conscients que ce sujet est trop sérieux pour être laissé aux seuls ingénieurs et trop important pour être laissé aux seuls politiques : l'eau est l'affaire de tous, et même au-delà de l'humanité, du monde vivant.

Outil principalement à disposition des enseignants et de leurs étudiants, ce livre ne reste qu'une modeste introduction à ces sujets complexes. Il est volontairement peu technique et se veut accessible à tous ceux que ces questions intéressent. Il propose, après un premier tour d'horizon des connaissances de base, de se pencher plus particulièrement sur l'analyse de deux usages centraux de l'eau dont la compréhension est un préalable à toute approche du sujet : l'agriculture et l'alimentation d'une part, l'eau potable et l'assainissement de l'autre. La dernière partie passe en revue les outillages et questionnements actuels de la gestion de l'eau proprement dite et propose des pistes d'évolution.

Une attention plus particulière est portée au continent africain qui, dans toute sa diversité, fait face à des difficultés d'une ampleur inédite dans l'histoire de l'humanité, auxquelles les acteurs de terrain se confrontent avec une énergie impressionnante. Puissent les lecteurs de ce livre y trouver une raison de renforcer les rangs de ceux qui se mobilisent pour que, demain, les filles soient délivrées de la corvée d'eau, que les bébés ne meurent plus de diarrhée, que les parents puissent nourrir sainement leurs enfants, que la nature soit comprise et respectée et qu'il fasse bon se baigner dans les rivières...

# Mode d'emploi

C'est à éclairer le débat, plutôt qu'à fournir des recettes ou des doctrines, qu'on s'attache ici. À l'École nationale des ponts et chaussées, grâce à Évelyne Lyons et Dominique Fougeirol, ainsi qu'à l'École polytechnique, les étudiants sont mobilisés dans un travail actif et collectif à travers les premiers jeux de rôles qu'aient connu ces deux écoles.

Il s'agit ici pour eux de débattre pour apprendre, non de débattre pour convaincre. Dans un débat qui est passé en quelques années du « café du commerce » aux réseaux sociaux planétaires, apprenons à ne pas être dupe des affirmations aussi péremptoires qu'éphémères : elles sont souvent dominées par des visions partielles ou à courte vue. Tout argument ne se vaut pas, même si tout peut être entendu. Sans prétendre être le seul juge omniscient de toute chose, chacun doit donc se renseigner, exercer son esprit critique et se remuer les méninges. Depuis quelques années, j'ai ainsi plaisir à voir des élèves m'interpeller en cours : « sur Internet, ils ne donnent pas les mêmes chiffres que vous ! ». Pour prétendre jouer un rôle dans une scène de négociation, il faut préalablement qu'ils s'y initient, comprennent les enjeux, définissent leurs objectifs, affûtent leurs arguments : c'est ce fonds général de « culture du sujet » que je leur propose en cours et qui est ici développé pour un public plus large.

L'École nationale des ponts et chaussées a permis de développer un outil aussi interactif et dynamique que je pouvais l'espérer, dans l'esprit de compagnonnage et d'apprentissage actif et responsable qui anime nos équipes enseignantes et nos étudiants. Ce manuel peut se lire de façon linéaire, dans l'ordre logique des chapitres, ou bien à la carte, selon les notions que le lecteur souhaite approfondir. Beaucoup de lecteurs sont déjà plus ou moins familiers de tel ou tel aspect du sujet : qu'ils n'hésitent donc pas à aller droit aux sujets qui les intéressent, en cheminant, si nécessaire, au gré des renvois pour revenir sur tel ou tel autre point. Chaque chapitre est ainsi conçu pour être autonome ; il est accompagné d'un dossier comportant les rubriques suivantes :

- **questions** : des exercices de réflexion auquel le lecteur est encouragé, avec des calculs très simples ;
- **études de cas** : des exemples qui permettent de concrétiser l'un des sujets développés ;
- **focus** : des annexes du cours, permettant d'aller plus loin sur un sujet important, dont la lecture n'est pas indispensable, mais recommandée.

**Partie 1 : L'eau et les hommes : appréhender l'échelle mondiale sans perdre de vue les enjeux locaux**

**Partie 2 : Alimentation, eau potable et assainissement : satisfaire les besoins essentiels d'une population croissante**

**Partie 3 : Gestion de l'eau comme un bien commun : progresser par l'implication de tous, des mécanismes financiers adaptés et la compréhension des écosystèmes**

**PARTIE 1**

---

## L'eau et les hommes

Appréhender l'échelle mondiale  
sans perdre de vue les enjeux locaux

Dans cette partie sont posées les premières bases d'une analyse des enjeux de la gestion de l'eau aux échelles globale et locale.

# 1

## Le cycle de l'eau

Comprendre les grands flux, les variations locales et temporelles et les évolutions

Le cycle de l'eau joue un rôle fondamental de régulateur thermodynamique de la planète. Les stocks et les flux d'eau présentent une grande variabilité temporelle et spatiale et il faut prendre en compte la non-stationnarité des climats accélérée par le changement climatique. Mais il faut aussi regarder l'eau dans toutes ses dimensions, sa composition chimique et les écosystèmes auxquels elle participe.

# 2

## Démographie, biodiversité et risques

Relever le défi de la soutenabilité

La dynamique des populations humaines et de leurs modes de vie voit s'aggraver les inégalités, bouleverse les équilibres entre continents et augmente les pressions anthropiques sur les écosystèmes. Il est urgent de forger un destin commun plus solidaire, plus robuste et plus résilient aux aléas, mais aussi plus responsable à l'égard des prochaines générations.

# 3

## Faire le bilan des usages et des ressources

Résoudre un casse-tête méthodologique

Faire des bilans besoins-ressources ou mesurer l'empreinte eau des activités humaines : ces questions apparemment simples recèlent de réelles difficultés méthodologiques. La finitude des ressources s'impose comme une évidence à une population humaine en forte croissance. Une surexploitation non soutenable des ressources en eau est d'ores et déjà constatée dans d'importants territoires, avec des conséquences humaines et environnementales dramatiques.

Dans cette partie sont posées les premières bases d'une analyse des enjeux de la gestion de l'eau aux échelles globale et locale.

# 1

## Le cycle de l'eau

Comprendre les grands flux, les variations locales et temporelles et les évolutions

Le cycle de l'eau joue un rôle fondamental de régulateur thermodynamique de la planète. Les stocks et les flux d'eau présentent une grande variabilité temporelle et spatiale et il faut prendre en compte la non-stationnarité des climats accélérée par le changement climatique. Mais il faut aussi regarder l'eau dans toutes ses dimensions, sa composition chimique et les écosystèmes auxquels elle participe.

# 2

## Démographie, biodiversité et risques

Relever le défi de la soutenabilité

La dynamique des populations humaines et de leurs modes de vie voit s'aggraver les inégalités, bouleverse les équilibres entre continents et augmente les pressions anthropiques sur les écosystèmes. Il est urgent de forger un destin commun plus solidaire, plus robuste et plus résilient aux aléas, mais aussi plus responsable à l'égard des prochaines générations.

# 3

## Faire le bilan des usages et des ressources

Résoudre un casse-tête méthodologique

Faire des bilans besoins-ressources ou mesurer l'empreinte eau des activités humaines : ces questions apparemment simples recèlent de réelles difficultés méthodologiques. La finitude des ressources s'impose comme une évidence à une population humaine en forte croissance. Une surexploitation non soutenable des ressources en eau est d'ores et déjà constatée dans d'importants territoires, avec des conséquences humaines et environnementales dramatiques.

# Chapitre 1 | Le cycle de l'eau

## Comprendre les grands flux, les variations locales et temporelles et les évolutions

### À RETENIR

**1** **Le cycle de l'eau est un transport de matière mue par l'énergie du soleil et la gravité.** Environ 40 000 Gm<sup>3</sup> d'eau

s'échangent annuellement entre les océans et les continents via l'atmosphère et l'écoulement des cours d'eau.

**C'est aussi en lui-même un très puissant transfert énergétique, essentiellement par les échanges de chaleur latente lors des transitions de phase liquide-gaz que constituent l'évaporation et la précipitation.** À l'échelle de la planète :

- ce transfert rafraîchit la surface du globe et les zones intertropicales ;
- il réchauffe aussi l'atmosphère et les zones septentrionales ;
- la couverture nuageuse contribue puissamment à l'effet de serre, mais également à la réduction du flux d'énergie entrant par l'effet parasol ;
- sans effet de serre, la température de la planète serait très basse ;
- le couplage des cycles de l'eau et du carbone ainsi que la production d'oxygène par la photosynthèse sont au cœur de la complexité des boucles de rétroaction qui gouvernent les climats de la planète ;
- le changement climatique, qu'on imaginerait spontanément se résumer, avec l'accroissement des températures, à une intensification du cycle de l'eau, se traduit paradoxalement dans certaines régions par une réduction des précipitations.

**2** L'eau dont nous parlons n'est pas chimiquement pure : on devrait dire « les eaux ». tant les eaux que nous fréquentons sont de compositions chimiques variées. Au-delà de sa composition chimique, l'eau est un milieu biologique. Dans une rivière et ses annexes, cette eau « vivante » forme un écosystème complexe, que l'on appelle ici « panarchique ». Il est sensible aux pollutions, capable d'une résilience parfois étonnante, et offre des services écosystémiques remarquables (c'est la principale « usine d'épuration » du monde). **Il n'y a de solutions d'aménagement durables que fondées sur la compréhension profonde de la dynamique de ces systèmes naturels complexes.**

**3** Les apports d'eau et les températures connaissent une incroyable variabilité spatiale et temporelle qui induit une très grande diversité de problématiques locales.

**4** L'adaptation durable ne passera pas par toujours plus de régulation artificielle des écoulements, mais par des mutations dans les usages générateurs des principaux besoins en eau.

Le changement climatique n'est qu'une des manifestations des pressions anthropiques sur l'environnement, dues notamment à l'accroissement de la population mondiale et de ses pratiques : il ne peut être isolé des autres grandes dimensions qui rendent le système hydrologique non stationnaire.

*Chapitre suivant : Démographie, biodiversité et risques : relever le défi de la soutenabilité*

Ce chapitre rappelle les principaux éléments du cycle de l'eau à l'échelle planétaire, de son histoire et de ce que l'on sait de ses évolutions possibles au sein des processus de changement climatique. Il permet notamment de se familiariser avec les ordres de grandeur des quantités qui seront manipulées dans les chapitres suivants.

## 1.1. Évolution des conceptions du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau<sup>1</sup> a été de tout temps un objet de fascination pour l'homme (Barraqué, Roche, 2010). L'échelle planétaire à laquelle il fonctionne le rend difficile à appréhender dans sa globalité. Cette eau qui tombe ou qui coule doit bien venir de quelque part, mais d'où ? De quel stock apparemment inépuisable ? Cet océan qui se remplit sans cesse par l'alimentation des rivières et pourtant ne déborde jamais, c'est l'« antique question » formulée dans l'Ancien Testament<sup>2</sup>. D'où vient l'énergie nécessaire à tout ce mouvement apparemment perpétuel ? Le rythme saisonnier, mais aussi la variabilité extrême de l'abondance et de la rareté des pluies, la violence des débordements brutaux des rivières, comment cela pourrait-il être autre chose que l'effet de la colère ou de la bienveillance des dieux ? Le mystère des profondeurs des lacs, la peur de la noyade comme le plaisir de la baignade, la présence souterraine de l'eau, son importance essentielle pour la vie, pour les écosystèmes comme pour les activités humaines, tout ceci a mis l'eau au centre des mythes de l'humanité, de ses cosmogonies, de ses philosophies autant que de ses rituels et de sa vie quotidienne (Roche, Miquel, Gaume, 2012)<sup>3</sup>.

## 1.2. Le cycle de l'eau : transferts d'eau et d'énergie

Les stocks d'eau (voir la figure 1) que l'on peut considérer comme participant au cycle de l'eau (ne sont pas pris en compte les stocks, mal connus, contenus dans le manteau, qui n'interviennent pas aux échelles de temps qui nous intéressent ici) sont essentiellement les océans et les glaces (cryosphère). Évaporation, précipitation et écoulement des continents vers les océans constituent les flux d'échange entre ces compartiments<sup>4</sup> (voir la figure 2). La proportion d'eau de pluie sur les continents qui provient des océans est elle-même très contrastée géographiquement (voir la figure 3 et Van der Ent *et al.*, 2010).

### VOIR FOCUS N°1

Le cycle de l'eau à l'échelle planétaire

1. Le lecteur se reportera très utilement pour de nombreux aspects traités ici à l'ouvrage collectif *L'eau à découvert* (Euzen, Jeandel, Mosséri, 2015).

2. L'humoriste Alphonse Allais, s'appuyant sur une réalité incontestable, reprenait à sa façon en 1891 la question dans son ouvrage *À se tordre, histoires chatnoiresques* : « Mon ami l'artiste me demande gravement comment, recevant toute cette eau, la Méditerranée ne déborde pas. Je lui fais cette réponse classique : que La Providence a prévu cette catastrophe et a mis des éponges dans la mer » (édition de Paul Ollendorff, 1891, disponible sur Gallica : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k691250/f7.item.textelimage>).

3. On y trouve en particulier une annexe qui passe en revue la place de l'eau dans les cosmogonies et dans les mythes. On y trouve également des éléments sur la façon dont le cycle de l'eau s'est établi, dont ont évolué les paléoclimats et quelques éléments sur la formation des précipitations. Ce livre est destiné principalement à présenter des notions d'hydrologie qu'il n'a pas été jugé utile de dupliquer ; il y sera fait fréquemment référence dans ce manuel dont il constitue un complément indispensable.

4. On utilise ici de façon générale le symbole  $Gm^3$  pour représenter un milliard de  $m^3$ . On trouve souvent aussi une convention d'écriture  $km^3$ , cube d'un kilomètre de côté.

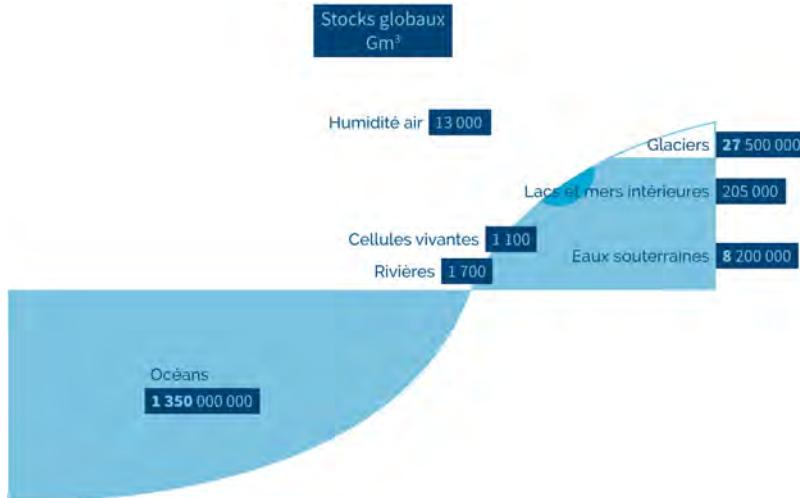


Figure 1 : Stock d'eau sur Terre (Gm<sup>3</sup>). Tirée de Roche, Miquel, Gaume, 2012.

### VOIR QUESTION N°1

Se représenter les stocks et flux d'eau à l'échelle planétaire

97 % de l'eau est salée et contenue dans les océans (voir Question n°1 également sur ce point). Au sein des 3 % d'eau douce, 75 % sont stockés sous forme de glace (glaciers et banquises).

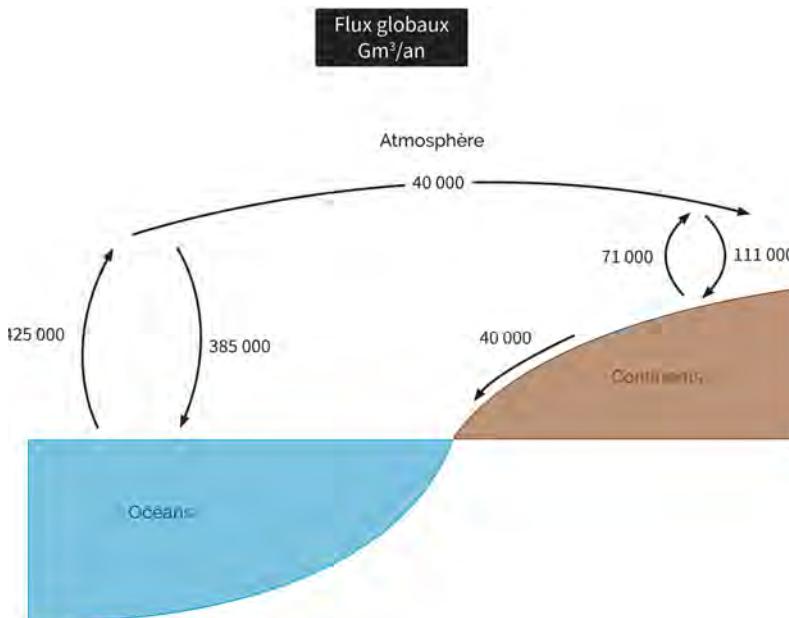


Figure 2 : Échanges et flux d'eau « terre-océans-atmosphère » (Gm<sup>3</sup>/an).

Tirée de Roche, Miquel, Gaume, 2012, d'après Shiklomanov, 1998.

Le flux d'échange entre océans et continents est de l'ordre de 40 000 Gm<sup>3</sup>/an. Le temps de résidence moyen dans l'atmosphère est très court (de l'ordre de huit jours). Les continents de notre planète reçoivent en moyenne 111 000 Gm<sup>3</sup>/an de précipitations (près de 800 mm/an), parmi lesquelles :

- 40 000 Gm<sup>3</sup>/an proviennent de l'excès de l'évaporation sur les précipitations au-dessus des océans : la même quantité retourne aux océans principalement *via* les fleuves et dans une moindre mesure *via* les nappes souterraines et la fusion des glaces polaires ;
- 71 000 Gm<sup>3</sup>/an proviennent de l'évapotranspiration à partir des continents eux-mêmes.

Ainsi, deux tiers des précipitations sur les continents sont utilisées par les écosystèmes terrestres ou directement ré-évaporées par les sols dans un « recyclage » permanent dont la maille est de l'ordre de quelques centaines de kilomètres<sup>5</sup>, et un tiers suivent un cycle plus long impliquant les océans (voir la figure 3).

**Continental precipitation recycling ratio  $\rho_c$**

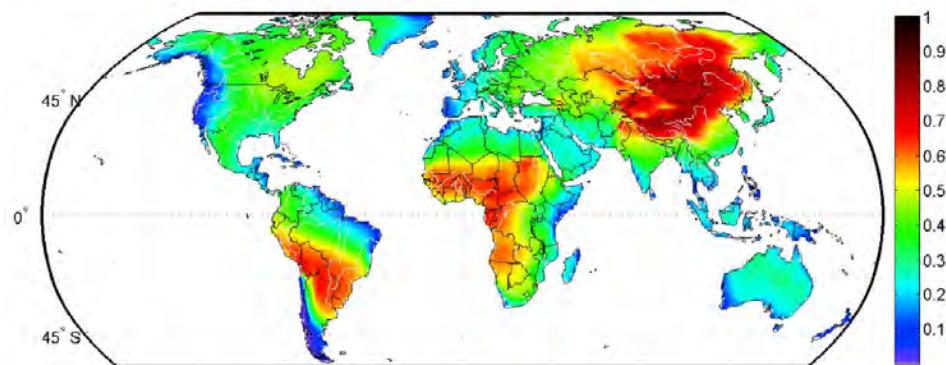


Figure 3 : En bleu, prépondérance dans les pluies continentales de l'eau évaporée au-dessus des océans ; en rouge prépondérance d'eau évapotranspirée sur les continents. Tirée de Van der Ent *et al.*, 2010.

Le cycle de l'eau est essentiellement une des grandes composantes de la régulation énergétique de l'ensemble terre-océan-atmosphère. Les flux d'échange d'eau sont en même temps de puissants mécanismes d'échange de chaleur latente (75 %) par le mécanisme d'évaporation et de précipitation de l'eau et de chaleur sensible (25 %) essentiellement par les courants marins. En transférant de l'énergie, tant entre les compartiments continent-océan-atmosphère qu'entre latitudes basses (intertropicales) et hautes (tempérées et circumpolaires), le cycle de l'eau, couplé au cycle du carbone, constitue le processus majeur du climat.

L'ensemble terre-océan-atmosphère fonctionne comme une machine thermodynamique de dégradation de l'énergie solaire. La partie d'énergie réfléchie est dépendante de l'albédo de l'atmosphère (d'autant plus fort que celle-ci est plus dense) et de la terre (d'autant plus fort que la surface est plus claire). Pour la partie non réfléchie, il reçoit de l'énergie à courte longueur d'onde

5. C'est-à-dire que l'évaporation en un lieu donné retombe en moyenne en pluie quelques centaines de kilomètres plus loin.

et réémet à plus grande longueur d'onde. Les longueurs d'onde d'émission sont pilotées par la température du corps réémetteur (loi de Stefan des corps noirs en  $T^4$ ).

Une Terre sans atmosphère, sans eau, sans vie et sans volcanisme, fonctionnant comme un corps noir exposé au rayonnement solaire incident, serait à une température d'équilibre stable comprise entre -18°C (en tenant compte de son albédo) et 5°C (si c'était un corps noir pur)<sup>6</sup>. Avec une couverture complète de glace, en cas de présence d'eau seulement en surface, elle serait autour de -50°C en raison de l'albédo important de la glace. La température moyenne de 15°C qu'elle connaît est donc le résultat d'un maintien dynamique « hors équilibre astronomique » par la combinaison de nombreux phénomènes.

Les différences d'absorption des rayonnements incidents par l'atmosphère et par la surface de la Terre créent un déséquilibre qui, en l'absence de mécanismes de transfert entre terre et atmosphère, se traduirait par de forts contrastes de température.

Trois phénomènes principaux contribuent ainsi à transférer de l'énergie :

- l'énergie réémise par la terre en rayonnement infrarouge est partiellement absorbée par l'atmosphère (la terre chauffe l'atmosphère par la base) : pour l'atmosphère, ce flux est plus important que l'absorption directe des rayons solaires de plus courtes longueurs d'onde qui la traversent avec peu d'interaction ;
- les échanges de chaleur latente : l'eau est ainsi le principal vecteur de régulation terre-atmosphère, évaporation et condensation assurant le refroidissement du globe et le réchauffement de l'atmosphère ;
- l'eau est en même temps le principal gaz à effet de serre, principalement par sa présence dans l'atmosphère sous forme liquide ou solide formant les nuages. Celui-ci fonctionne en sens inverse mais à des niveaux plus faibles : les émissions infrarouges de l'atmosphère du contre-rayonnement thermique réchauffent le globe.

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°1

La Terre « boule de glace »

### 1.3. Dans l'eau, y a pas seulement que de l'eau, y'a aut'chose...<sup>7</sup>

Gérer l'eau n'est pas gérer des flux et des stocks d'une matière interne et homogène. L'eau dans son parcours continental n'est pas le corps H<sub>2</sub>O chimiquement pur, mais elle est naturellement chargée de nombreuses substances dissoutes ou transportées. Il faudrait parler « des eaux », tant la composition chimique de ces eaux est variée et conditionne (notamment selon son pH, sa concentration en sels minéraux, la présence de substances toxiques..) ses aptitudes à remplir les besoins des organismes vivants qu'elle héberge (notamment les micro-organismes) et qu'elle alimente.

<sup>6</sup>. Voir pour le détail de calcul : WIKIPEDIA. Température d'équilibre à la surface d'une planète [en ligne]. Mis à jour le 13 octobre 2020. Disponible sur [https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature\\_d%27%C3%A9quilibre\\_%C3%A0\\_la\\_surface\\_d%27une\\_plan%C3%A8te](https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature_d%27%C3%A9quilibre_%C3%A0_la_surface_d%27une_plan%C3%A8te).

<sup>7</sup>. D'après *Les Tontons flingueurs*, film de G. Lautner (1963), dialogues de Jacques Audiard.

### 1.3.1. Eau et écosystème aquatique

L'eau forme des rivières, des lacs, des zones humides, etc. Elle ne s'écoule pas dans une géométrie définie, elle déplace des matériaux, elle façonne l'espace dans lequel elle s'écoule. Par conséquent, cette morphodynamique sédimentaire est en perpétuel remaniement.

Ses hôtes (végétaux et animaux) transforment cette même géométrie : par les processus biologiques de leur propre vie, ils consomment des nutriments apportés de l'amont, avant de produire des déchets qui sont transportés au-delà et en modifient, parfois radicalement, la composition chimique.

Ces interactions dynamiques à toutes les échelles spatiales et temporelles constituent le système de la rivière, y compris ses berges et ses annexes. On conçoit souvent une rivière comme de l'eau qui coule et qui héberge un écosystème (voir ci-dessus la notion d'« hôtes »). C'est une erreur : l'entité à laquelle nous avons affaire est un écosystème dont l'eau est une composante.

### 1.3.2. Comprendre ces systèmes dynamiques ouverts : la notion de panarchie

Le système de la rivière est ouvert et en interaction avec de nombreux autres compartiments. Les flux d'entrée à ses limites (eau, sédiments, substances chimiques et biologiques, migrateurs, etc.) et ses autres forçages, notamment climatiques (énergie solaire, vent, etc.) sont fortement saisonniers et variables dans le temps. Si l'on veut vérifier qu'il « fonctionne » correctement, ce n'est pas seulement des paramètres statiques (quantité d'eau, concentrations de diverses substances, etc.) que l'on devrait utiliser, mais des indicateurs montrant que sa *dynamique* est satisfaisante.

La directive-cadre sur l'eau qui, en Europe, cherche à organiser les mesures nécessaires pour retrouver un « bon état écologique », est fondée sur des grilles de paramètres statiques et laisse ainsi croire qu'il y aurait eu un bon état historique auquel il faudrait revenir. Pour efficace que soit cette vision dans l'immédiat pour corriger des défauts patents (pollutions diffuses, excès de toxiques ou de nutriments), elle peine à définir une stratégie dans une situation évolutive (par exemple face à des changements climatiques ou à la dynamique des torrents de montagne) et de surcroît, à rendre compte de la réalité des systèmes dynamiques.

Pour bien comprendre ces notions, on peut se référer au concept de panarchie, qui combine deux aspects majeurs : la notion de cycle adaptatif et d'échelles emboîtées (Roche *et al.*, 2005).

#### 1.3.2.1. Le cycle adaptatif

Les systèmes naturels interagissent au cours de transformations cycliques, avec des phases successives de croissance, de conservation, de destruction et de renouvellement. Ces cycles sont adaptatifs, c'est-à-dire que les systèmes considérés sont capables d'« innovations », cette capacité dépendant de trois propriétés :

- leurs potentialités (ou capital), c'est-à-dire leur aptitude à accumuler des ressources ;
- leur connexité, c'est-à-dire le lien entre leurs processus de contrôle interne ;
- leur résilience, c'est-à-dire leur aptitude à s'adapter à des perturbations, y compris soudaines et imprévues.

Aussi la trajectoire d'un cycle adaptatif comprend-elle deux périodes, l'une correspondant à une lente accumulation des ressources et l'autre à une destruction créatrice, relativement courte<sup>8</sup>. La résilience se réduit lors de la lente progression de la phase de croissance vers celle de conservation ; elle s'épanouit lors de l'accélération qui conduit de la phase de désorganisation vers celle de réorganisation. Autrement dit, minimale à maturité, quand le système est le plus rigide, la résilience devient maximale au renouvellement du système, quand il est le plus « inventif ».

### 1.3.2.2. L'emboîtement des échelles

L'emboîtement des échelles correspond à une organisation en poupées russes, dans laquelle un système d'ordre élevé comprend des sous-systèmes qui comprennent eux-mêmes d'autres sous-systèmes et ainsi de suite. Ainsi, le bassin-versant d'une rivière comprend différents sous-systèmes équivalents à la rivière qui le draine, à un secteur de cette rivière, à un habitat de ce secteur, jusqu'au micro-habitat, présent par exemple dans les interstices d'un banc de galets. Du fait de cette organisation hiérarchique, aucune échelle ne permet, à elle seule, de comprendre les causes et les conséquences de l'état d'une masse d'eau ou d'en prévoir les évolutions.

### 1.3.2.3. La panarchie

Associer la notion d'emboîtement des échelles et celle de cycle adaptatif correspond à la notion de panarchie.

Un niveau d'échelle supérieur, plus grand et plus lent, impose une contrainte à un niveau d'échelle inférieur, plus petit et plus rapide. Ainsi, un massif forestier modère les variations de température des ruisseaux qui le drainent et la banque de graines accumulée dans le sol d'une plaine inondable oriente la réorganisation d'une saulaie après une crue.

Chacun de ces niveaux présente sa propre dynamique, avec ses phases de croissance, de conservation, de destruction et de renouvellement. Enfin, les connexions possibles entre ces niveaux d'échelle sont multiples et pas seulement hiérarchiques. Par exemple, le déversement local d'un produit toxique dans une roselière contamine l'ensemble d'un écosystème lacustre.

### 1.3.2.4. Des configurations dynamiques plutôt que des états

Ainsi, l'état écologique des eaux continentales change sans cesse, tantôt progressivement, tantôt soudainement. Plutôt que d'« état » des milieux, il vaudrait mieux parler de configuration dynamique de celles-ci. Lorsque qu'une rivière remanie son lit en permanence, le faisceau de ses divagations possibles sans rencontrer d'obstacle naturel ou artificiel va définir dans quelle mesure les variations naturelles de cette configuration vont pouvoir s'opérer. Il y a un risque que, se trouvant confrontée à ces obstacles (par exemple à l'occasion d'une crue), l'écoulement ne prenne une nouvelle modalité et configuration, avec des pentes et des longueurs de parcours modifiées, occasionnant des effets sensiblement différents en amont (l'élévation du profil en long ou l'érosion régressive), sur le lieu (des ruptures de berges) ou en aval (le déplacement des lieux d'expansion de crue par exemple).

---

<sup>8</sup>. Dans un lac, par exemple, on assiste à une accumulation du capital de biomasse végétale, en même temps que, la connectivité augmentant, le contrôle interne exercé par l'écosystème devient plus complexe. Le système perd alors de sa souplesse ; il devient plus rigide et plus vulnérable face aux crises.

L'aptitude d'un système écologique à se maintenir dans une configuration dynamique dépend de sa résilience. Or, cette celle-ci change également, au fil des phases que parcourt chaque niveau d'échelle d'un système écologique, au gré des connexions possibles d'un niveau d'échelle à l'autre (de haut en bas, comme de bas en haut).

Ces configurations ne sont ni bonnes ni mauvaises intrinsèquement, mais apparaissent aux hommes désirables ou non, selon une appréciation qui varie selon leurs motivations.

## 1.4. Inégalités de répartitions des ressources en eau

La notion de « ressource en eau » se réfère classiquement aux eaux liquides en écoulement les plus facilement accessibles aux usages humains. Les ressources en eau se constituent à partir des 110 000 Gm<sup>3</sup>/an de précipitations, dont 40 000 Gm<sup>3</sup>/an d'eau douce rejoignent les cours d'eau via les nappes souterraines et s'écoulent *in fine* dans les océans : c'est ce dernier chiffre qui semble pouvoir constituer la première approche de ces ressources.

Une part importante des débits de ces cours d'eau s'écoule lors de crues ou dans des endroits peu habités. De plus, il faut que l'utilisation de cette eau ne mette pas en péril les équilibres et les dynamiques naturels, tant en ce qui concerne les écosystèmes de surface que les nappes souterraines : les ressources renouvelables utilisables sont estimées à seulement 10 000 à 12 000 Gm<sup>3</sup>/an.

Ces ressources en eau sont, en stock comme en flux, très inégalement réparties à la surface des continents. Les précipitations varient d'un facteur 1 000 entre les zones les plus arrosées et les plus sèches. Les précipitations annuelles (voir la figure 4) sont un indicateur simple qui met à lui seul en évidence une grande variété de situations et fait des questions de ressources en eau une problématique de grande diversité.

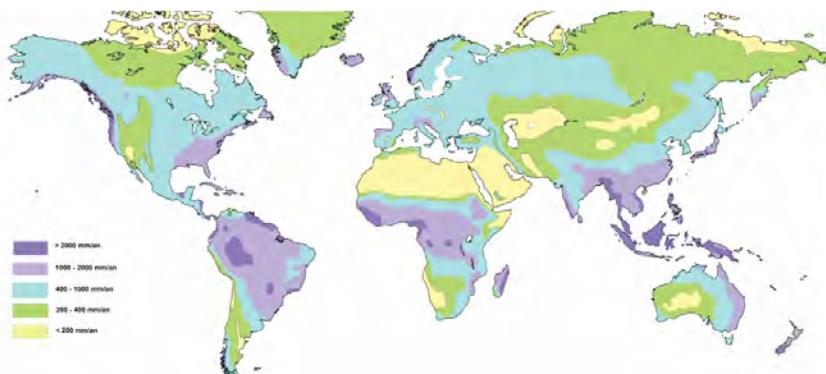


Figure 4 : Pluies annuelles moyennes. Tirée de Roche, Miquel, Gaume, 2012.

À ceci s'ajoutent le zonage de l'évapotranspiration et les conditions structurelles d'écoulement. Il coule deux fois moins d'eau en Afrique que sur la moyenne des autres continents. Mais surtout l'Afrique connaît elle-même des disparités internes majeures : le tiers de cet écoulement

se produit uniquement dans le bassin du Congo (au Zaïre<sup>9</sup>), qui couvre 12 % de la surface du continent. 40 % de la surface du continent ne connaît pas d'écoulement permanent et 13 % de la surface est endoréique<sup>10</sup>.

La variabilité interannuelle des ressources est considérable : les écoulements de la période de 1970 à 1990 ont ainsi été plus de deux fois inférieurs à ceux des vingt ans précédents dans le bassin du Sénégal et le Fouta-Djalon (Mahé, Olivry, 1995). Ceci rend la planification des aménagements et la rentabilisation des infrastructures particulièrement difficiles. La variabilité saisonnière est puissamment marquée dans les régions de climat méditerranéen<sup>11</sup>, mais aussi bien sûr pour les fleuves sub-sahariens (Sénégal ou Niger).

### VOIR FOCUS N°2

#### Climats et régimes hydrologiques

Les projections de long terme des précipitations sont encore incertaines, mais elles montrent de forts contrastes locaux qui ne font que renforcer les difficultés de régions déjà peu dotées de ressources (voir la figure 5).

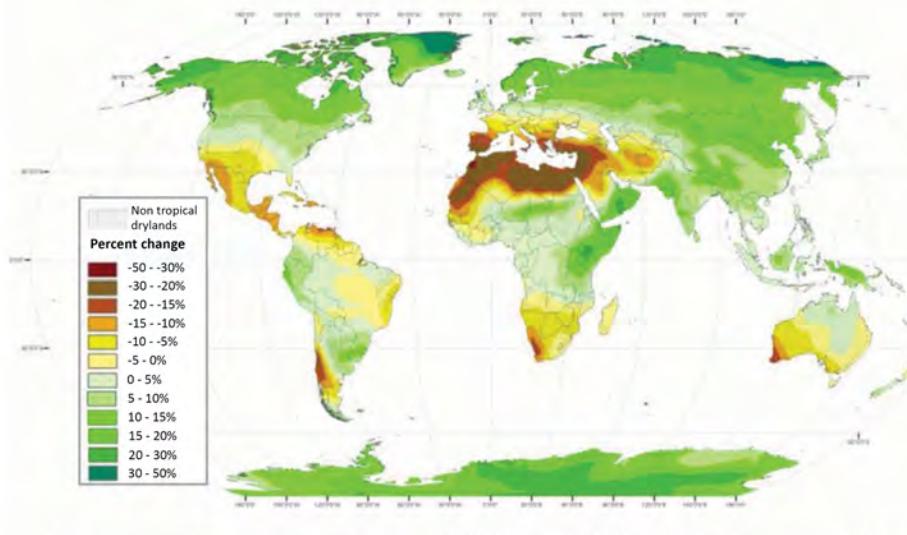


Figure 5 : Évolution des précipitations annuelles en un siècle (de 1980-1999 à 2080-2099).

Tirée de C. Prudhomme (Verdier, Viollet, 2015).

<sup>9</sup> Le Zaïre a un débit à l'embouchure qui varie de 20 000 à 70 000 m<sup>3</sup>/s, seulement dépassé par l'Amazone.

<sup>10</sup> Cela signifie qu'il n'y a pas de débouché dans la mer : notamment le Logone et le Chari terminent leur cours dans le lac Tchad et l'Okavango aboutit dans le désert du Kalahari.

<sup>11</sup> Au nord au Maghreb, avec les crues dévastatrices des oueds non permanents, ainsi que le remplissage rapide des retenues par le transport des sédiments, et au sud dans des bassins comme celui du Limpopo.

## 1.5. Changement climatique : atténuation et adaptation concernant la gestion de l'eau

### VOIR FOCUS N°3

#### Eau et changement climatique

Les travaux du GIEC<sup>12</sup>, qui se sont affinés au cours des années, constituent une source précieuse d'informations. Le Partenariat français pour l'eau<sup>13</sup> (PFE), dans un document de travail collectif, a résumé comme suit les éléments contenus dans le rapport du groupe II du GIEC sur les impacts, vulnérabilités et l'adaptation. Nous le reprenons ici avec quelques mises à jour, afin de passer en revue les différentes problématiques qui se posent sur les impacts du changement climatique sur la gestion de l'eau.

### 1.5.1. Leçon n°1 : impact sur la ressource en eau et augmentation des risques

#### 1.5.1.1. Réduction des ressources renouvelables en eau

Au-delà de 2°C de réchauffement du climat par référence à 1990, chaque degré de réchauffement pourrait entraîner une réduction des ressources en eau renouvelables de 20 % pour au moins 7 % de la population mondiale. Approximativement 80 % de la population risque d'être affectée par des insécurités hydriques en termes de disponibilité, de demande et de pollution (Vörösmarty *et al.*, 2010). Le changement climatique risque de réduire les ressources en eau renouvelable de la planète (de surface et souterraine), ceci exacerbant les conflits entre usages, notamment dans les zones subtropicales sèches. La biodiversité est particulièrement affectée par la réduction des zones humides, ceci pouvant provoquer la disparition de plusieurs espèces. De plus, la vulnérabilité des écosystèmes génère un potentiel important de pertes économiques.

Le GIEC confirme que l'accélération de la fonte des glaciers dans les prochaines décennies va entraîner un glissement des écoulements d'été vers le printemps, ainsi qu'un réchauffement du pergélisol (risques de libération de grandes quantités de CO<sub>2</sub> retenues dans le sol). L'accroissement des variabilités d'écoulements, de la fonte des neiges et des glaces réduit l'approvisionnement en eau « sûre » et peut conduire à devoir tirer parti des effets de stockage et de l'utilisation des eaux souterraines. La question de la disponibilité des eaux souterraines et de l'impact du changement climatique sur celles-ci doit être approfondie.

<sup>12</sup>. GIEC : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, soit en anglais *IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pour consulter le rapport et les traductions françaises disponibles : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Changement-climatique-Publication.html>

<sup>13</sup>. Le Partenariat français pour l'eau réunit les acteurs français (des institutions, des ONG, le secteur privé, le milieu académique) concernés par les enjeux internationaux de l'eau. Concernant l'eau et le climat, on trouve ses recommandations dans une note préparatoire à la COP24 Climat : <https://www.partenariat-francais-eau.fr/wp-content/uploads/2018/11/Messages-climat-COP24.pdf>

### 1.5.1.2. Risques d'inondations

À la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, le nombre de personnes soumises à des risques d'inondation pourrait tripler, générant un potentiel important de pertes économiques et des bouleversements sociétaux.

### 1.5.1.3. Réchauffement de l'eau et qualité de l'eau

L'augmentation des températures aura un impact sur la fonte des glaces, mais aussi sur le réchauffement des cours d'eau, ainsi que sur leur débit. Sur un échantillon de simulation de débits pour 200 grandes rivières, un tiers montre des évolutions sensibles d'écoulements. Elle agravera la qualité de cette ressource (acidification de l'eau) et affectera la potabilité de l'eau, ainsi que l'équilibre des écosystèmes. L'augmentation de la température de l'eau pour les lacs et les réservoirs accélère l'eutrophisation et le développement d'algues. Les océans ne sont pas épargnés : l'augmentation importante de la quantité de dioxyde de carbone génère une acidification importante des océans et une perte de la biodiversité marine. La variabilité des précipitations et des températures pourra avoir un impact sur l'érosion des sols (évapotranspiration des sols). Cependant le rapport du GIEC souligne le manque d'études et de recherche sur ce point.

### 1.5.1.4. Événements extrêmes

La réduction des ressources en eau renouvelable et la variabilité des précipitations accroissent les risques de sécheresse et d'inondations. Le réchauffement de la température et de l'eau augmente les effets d'évaporation et la potentialité d'événements extrêmes. Cependant, il manque des preuves des effets du changement climatique sur les événements extrêmes compte tenu de la faiblesse des séries de mesures sur le long terme. Il existe en effet très peu d'études qui évaluent les évolutions des sécheresses hydrologiques à cause de l'absence de longues séries d'observation non influencées par des interventions humaines.

## 1.5.2. Leçon n°2 : les impacts seront très variables géographiquement et sociologiquement

Les impacts seront particulièrement marqués dans des régions déjà fortement touchées par des phénomènes d'inondations (Sud-Est de l'Asie, Sibérie, Afrique tropicale, Nord de l'Amérique du Sud) ou de sécheresse (régions sèches subtropicales, Sud de l'Europe et Europe centrale, Sud et centre de l'Amérique du Nord, Amérique latine, Sud de l'Afrique et région méditerranéenne). Les populations les plus vulnérables, notamment dans les pays en développement, seront touchées.

## 1.5.3. Leçon n° 3 : du fait de l'incertitude des impacts du changement climatique, il faut réviser nos modes de planification

En hydrologie, les modèles servant de base aux travaux de planification sont traditionnellement fondés sur de fortes hypothèses structurelles de stationnarité même quand ils intègrent des évolutions (prolongation des séries passées). Il faut passer à des modèles établis pour divers scénarios d'émissions de rejets de gaz à effet de serre, tout en conservant le grand apport de la valorisation des séries historiques, notamment pour apprécier la grande variabilité des phénomènes.

## 1.5.4. Leçon n°4 : lien étroit entre les impacts du changement climatique et les impacts globaux

Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau peuvent avoir de fortes répercussions sur la situation politique, économique et sociale d'un pays. L'analyse des risques doit donc prendre en compte des paramètres variés. Le changement climatique s'exprime localement au regard de changements globaux et locaux. Ceci modifie leurs répercussions locales et complexifie leur interprétation. Ces interrelations impliquent de mettre en balance, pour les gestionnaires de ressources en eau, de nombreux autres critères (démographie, aménagement du territoire, urbanisation, irrigation, etc.) et les réactions adaptatives prévisibles des acteurs de l'eau et des populations.

## 1.5.5. Leçon n°5 : il faut se pencher particulièrement sur quatre secteurs

Le rapport met en avant l'obligation de développer des stratégies de résilience et de privilégier des solutions « sans regret » (c'est-à-dire qu'elles seraient déjà bénéfiques dans le contexte actuel<sup>14</sup>). Il s'agit par exemple de l'entretien de réseaux de drainage, la mise en place de systèmes d'alerte précoce pour le risque de sécheresse, la mise en place d'une gestion intégrée des zones côtières. Cela rejoint les travaux actuels sur le nexus « eau, changement global et climatique, agriculture, énergie », qui montre les interrelations entre ces différents secteurs et la nécessité d'une intégration forte des politiques concernées.

### 1.5.5.1. Agriculture

Les changements climatiques auront un impact sur la température atmosphérique ainsi que sur l'eau disponible pour l'agriculture. La double pression de la diminution des ressources en eau et de l'augmentation des températures menace la sécurité alimentaire. En effet, les changements climatiques (précipitations, température, radiations) vont accroître le besoin des plantes en eau. Des projections prévoient ainsi une augmentation de la demande d'irrigation en Europe, aux États-Unis et en Asie. Pour l'Inde, le Pakistan, et le Sud de la Chine, une légère réduction est prévue grâce à un accroissement des précipitations. Dans les régions qui comportent des sols riches, l'adaptation des plantes aux concentrations de CO<sub>2</sub> peut compenser les effets négatifs du changement climatique. Enfin, l'agriculture pluviale sera menacée par une plus grande variabilité des pluies. Dans les régions à moussons, il est prévu des perspectives de réduction des besoins en eau et une accélération du cycle végétatif du riz paddy. Ce secteur est abordé en détail [au chapitre 4](#).

---

<sup>14</sup>. Ce point mérite qu'on y insiste : nous ne sommes pas dans une situation de référence optimale que le changement climatique viendrait perturber. Nous sommes dans une situation où de forts déséquilibres méritent, indépendamment du changement climatique, d'être corrigés, et il se trouve que le changement climatique vient renforcer, dans la très grande majorité des cas, les conséquences de l'inaction.

### 1.5.5.2. Services municipaux

Les services municipaux et domestiques seront affectés par l'évaporation de l'eau et la raréfaction de la ressource, ainsi que par la variabilité du débit des cours d'eau. Des mesures de gestion d'équilibre des différents usages de l'eau et de stockage artificiel de l'eau devront être prises.

La qualité de l'eau pourra être fortement impactée par le réchauffement de celle-ci, ainsi que par la concentration des polluants. Ceci peut avoir un impact important sur les petites unités de traitement de l'eau en milieu rural (dans les pays développés) qui n'ont pas les capacités requises pour assurer un traitement renforcé. Les aléas climatiques comme les tempêtes et l'augmentation du niveau de la mer peuvent menacer les installations d'eau et sanitaires existantes, ainsi que les autres infrastructures (énergie, santé, communication, etc.). Ce secteur est abordé en détail au chapitre 5.

### 1.5.5.3. Énergie

L'hydroélectricité, l'électricité thermale, l'énergie nucléaire et les bioénergies requièrent de grandes quantités d'eau. Le changement climatique aura un impact sur l'hydroélectricité et l'électricité thermale à cause d'une plus grande baisse des étages, de la variabilité des débits des fleuves et rivières et des températures plus élevées des ressources en eau (par saison et sur l'année). Une augmentation du nombre de jours d'indisponibilité pour les eaux de refroidissement en Europe et aux États-Unis est prévue. Ce secteur est abordé en détail au chapitre 7.

### 1.5.5.4. Protection/conservation des eaux naturelles

La raréfaction de la ressource en eau aura un impact sur les zones humides, qui sont en nette réduction, en matière de biodiversité. Les zones littorales et leurs écosystèmes sont elles aussi menacées par la montée du niveau de la mer, accélérant l'érosion. Le rapport du GIEC pointe à ce titre, fort justement, les complémentarités possibles entre ces secteurs, mais aussi les cas potentiels de « mal-adaptation ». Des exemples de contradictions potentielles entre stratégies de réduction des gaz à effet de serre et adaptation sont cités : irrigation, cultures énergétiques, gestion des grands barrages, capture de carbone, bioénergie, etc. Ce sujet est abordé en détail au chapitre 8.

## 1.5.6. Leçon n°6 : le secteur de l'eau est concerné par les volets d'« atténuation » et d'« adaptation »

Les gouvernements commencent à développer des plans d'adaptation, mais les efforts restent isolés. La prise en compte de la gestion des risques dans un contexte d'incertitude est nécessaire pour s'adapter. Le GIEC met avant le potentiel des pays en développement d'engager des actions d'adaptation, mais il existe encore peu d'analyses et d'études sur le coût de cette adaptation du secteur de l'eau au niveau local.

### 1.5.7. Leçon n°7 : le coût exorbitant de l'adaptation au changement climatique

Des estimations (encore très sommaires et incertaines) des coûts globaux d'adaptation font état de sommes colossales. Pour maintenir les services d'eau actuels jusqu'à 2030 dans 200 pays, les coûts globaux d'adaptation en infrastructures additionnelles sont estimés à 531 milliards de dollars (dont 85 % pour les pays en développement).

Les couts annuels pour l'adaptation au changement climatique de l'Afrique sub-saharienne sont estimés entre 1,1 et 2,7 milliards de dollars pour l'infrastructure urbaine déjà réalisée, et entre 1 et 2,5 milliards pour de nouvelles infrastructures correspondant aux critères des objectifs de développement pour le millénaire.

### 1.5.8. Leçon n°8 : les conséquences géopolitiques

Le changement climatique peut indirectement augmenter les risques de conflits violents, comme les guerres civiles ou les affrontements intergroupes, en amplifiant les déterminants de ces conflits comme la pauvreté et les chocs économiques.

La question des réfugiés climatiques est réelle. Ce problème, bien identifié sur le secteur des petites îles menacées de submersion, est susceptible de concerner d'autres zones beaucoup plus importantes soumises demain à des phénomènes d'inondations récurrentes (au Bangladesh par exemple) ou des phénomènes de désertification.

### 1.5.9. Leçon n°9 : il n'est pas possible de s'adapter à tout

Une augmentation trop forte des températures ainsi que des variations trop accentuées du climat peuvent générer des situations irréversibles.

Le GIEC, dans son rapport spécial d'août 2019 (Malley, 2019)<sup>15</sup>, rappelle l'importance de traiter de la question de la ressource en eau en lien avec ses interactions avec d'autres secteurs clés comme l'agriculture et l'énergie. Aborder ces défis et garantir l'accessibilité de ces ressources passe nécessairement par une approche d'ensemble de la gestion de l'offre et de la demande pour aller vers un système de production qui soit à la fois résilient, productif et durable.

*Chapitre suivant : Démographie, biodiversité et risques : relever le défi de la soutenabilité*

---

<sup>15</sup>. Rapport coordonné par J Malley et établi sous la direction de : P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi.

# Pour approfondir

## QUESTIONS

N°1

Se représenter les stocks et les flux d'eau à l'échelle planétaire

## ÉTUDES DE CAS

N°1

La Terre « boule de glace »

## FOCUS

N°1

Le cycle de l'eau à l'échelle planétaire

N°2

Climats et régimes hydrologiques

N°3

Eau et changement climatique

N° 1

# Se représenter les stocks et les flux d'eau à l'échelle planétaire

## Comment se représenter 1 Gm<sup>3</sup> ?

On utilise comme unité de compte du cycle de l'eau à l'échelle planétaire le milliard de m<sup>3</sup>, noté ici Gm<sup>3</sup> (il est très souvent noté km<sup>3</sup>).

Entre 1 et 1 000 Gm<sup>3</sup> on trouve :

- les plus grands réservoirs construits par l'homme : en France, 3,5 Gm<sup>3</sup> à Petit-Saut en Guyane, 1,2 Gm<sup>3</sup> à Serre-Ponçon ; les dix plus grandes retenues artificielles du monde font entre 50 et 180 Gm<sup>3</sup> chacune ;
- les écoulements annuels de fleuves comme la Seine (à Paris, le débit moyen est de 328 m<sup>3</sup>/s soit 10,3 Gm<sup>3</sup>/an<sup>16</sup>) ou le Rhône (à Beaucaire, à l'aval, le débit moyen est de 1 690 m<sup>3</sup>/s soit 53,3 Gm<sup>3</sup>/an) ;
- les entrées-sorties annuelles du cycle de l'eau d'un pays comme la France : 503 Gm<sup>3</sup>/an d'eau sont apportés par la pluie et la neige, auxquels s'ajoutent en entrée 11 Gm<sup>3</sup>/an en provenance des pays voisins et en sortie 314 Gm<sup>3</sup>/an d'évaporation-évapotranspiration (à hauteur de 60 %) et 200 Gm<sup>3</sup>/an qui s'écoulent vers la mer ou les pays voisins.

## Comment cerner les ordres de grandeur ?

Pour se représenter les flux et les stocks d'eau planétaires, imaginons que la Terre soit une grosse boule de 10 m de diamètre, soit la hauteur d'un immeuble de trois étages (le diamètre de la Terre est de 12 742 km). Quelle taille feraient les stocks et les flux d'eau planétaires à cette échelle ?

- 1 Gm<sup>3</sup> deviendrait un cube de 0,78 nm de côté (1 nm = 10<sup>-9</sup> m) soit la taille de deux molécules d'eau ;
- l'eau totale sur la planète pourrait remplir un bel arrosoir (6,28 L), soit une pellicule de 2 mm si elle était répartie sur toute la boule ;
- l'eau douce remplirait presque un verre, soit 190 mL ;
- l'écoulement total annuel depuis les continents vers les océans représenterait 0,2 mL/an : il faudrait alors 100 ans d'écoulement pour remplir un dé à coudre (20 mL) et 1 000 ans pour remplir un verre.

Aussi gigantesques que peuvent sembler les chiffres du cycle de l'eau, à l'échelle de la Terre, le stock total (1,35 milliard de Gm<sup>3</sup>) participant au cycle de l'eau est très faible. Si l'on intègre les eaux profondes, on multiplie presque par trois ce volume : l'eau représente au total 3 milliards de Gm<sup>3</sup> environ, soit 0,023 % seulement de la masse de la planète. Par ailleurs, les flux sont extrêmement modestes. L'eau écoulée chaque année depuis les continents vers les océans représente à peine un peu plus d'un millième du volume d'eau douce, essentiellement stocké dans les calottes glaciaires.

<sup>16</sup>. Il faut garder en tête une conversion très utilisée : 1 m<sup>3</sup>/s = 31,536 Mm<sup>3</sup>/an

## Comment explique-t-on la salinité des océans ? Est-elle stable ou croissante et à quel rythme ?

Chacun sait depuis Edmond Halley (1715) que les écoulements sur les continents apportent, par dissolution, des sels minéraux dans les océans, alors que l'eau évaporée qui part en retour dans l'atmosphère est pure : est-ce que l'océan est comme la terre d'un pot de fleur, qui se salinise progressivement ? Si c'est le cas, à quel rythme ?

Sur la base d'une salinité moyenne de 35 g/L (35 kg/m<sup>3</sup>), pour un volume de 1,35 milliard de Gm<sup>3</sup>, les sels marins représentent une masse de l'ordre de 50 millions de Gt.

Pour les apports, on peut mettre de côté l'important flux évaporé qui retombe directement sur les océans en pluies : il n'est salé ni en sortie, ni en entrée. Pour faire un bilan en entrée et sortie des sels minéraux dans les océans, il faut donc multiplier le flux échangé d'eau par l'écart entre la salinité nulle de l'eau pure évaporée au-dessus des océans et celle de l'eau douce légèrement chargée qui vient des fleuves, si l'on suppose que ces flux constituent les seuls échanges.

Avec une salinité de l'ordre de 1 g/L, le flux d'eau douce de 40 000 Gm<sup>3</sup>/an y apporte de l'ordre de 40 Gt/an de sels. En seulement un million d'années, la quantité apportée est donc de l'ordre de grandeur de la quantité stockée. La concentration aurait donc dû augmenter très rapidement à l'échelle des temps géologiques. On peut supposer en première analyse que cette concentration aurait dû se stabiliser à un niveau égal à la solubilité de ces sels (c'est-à-dire plus de dix fois la concentration constatée) et que tous les sels apportés en excès précipiteraient en permanence. C'est à peu près le cas dans certaines mers fermées comme la mer Morte ou dans les salines.

En fait, la salinité moyenne des océans semble avoir été relativement constante depuis des milliards d'années, mais au niveau moyen de concentration et non au niveau de saturation indiqué ci-dessus. Les sels minéraux précipitent effectivement, mais bien avant le seul seuil de solubilité, car les processus et les formes chimiques impliqués sont très complexes : le sel est incorporé dans tous les sédiments, et particulièrement les dépôts d'évaporite (les « roches salines »), lors la « grésification » (le dépôt de sels dans l'eau interstitielle) et est absorbé par les réactions chimiques avec le basalte des fonds marins.

Que devient ce flux de sel exporté par les fonds océaniques ? On pourrait aisément se convaincre qu'il est recyclé via la tectonique des plaques vers les continents. Ces mouvements sont encore cependant loin d'être quantifiés.

[REVENIR AU COURS](#)

§ 1.2

N°1

## La Terre « boule de glace »

Dans les années 1960, Mikhaïl Boudyko (Boudyko, 1969) montra, avec un modèle simple, qu'en cas de refroidissement assez intense, si une glaciation atteignait 30° de latitude, le mécanisme s'emballerait alors par une boucle de rétroaction positive :

- l'albédo plus élevé de la glace augmenterait la part du rayonnement solaire qui est refléchie et non absorbée puis réémise par la Terre ;
- le rayonnement solaire, de courte longueur d'onde, traverse l'atmosphère avec peu d'interaction, alors que le rayonnement réémis, essentiellement infrarouge, est fortement absorbé par l'atmosphère : le flux refléchi est donc, tant sur le globe que dans l'atmosphère, moins absorbé ;
- cette réduction de l'énergie captée augmenterait le refroidissement et entraînerait encore l'extension de la glace, et ce, jusqu'à ce que la Terre entière ou presque soit recouverte et se stabilise dans un nouvel équilibre.

Cette situation d'équilibre<sup>17</sup> où la Terre reste couverte complètement de glace est appelée « Terre boule de neige » (*snowball Earth*) ou « Terre boule de glace » (*iceball Earth*). Comme cela semble aujourd'hui être l'hypothèse préférentielle, il pourrait en ce cas s'agir partiellement de glace de mer fondue auprès de l'équateur, ce qui donne le troisième terme employé : « Terre boule de névasse » (*slushball Earth*). Une telle situation aurait pu se produire au moins à trois reprises. Tout d'abord, cela aurait pu avoir lieu lors de la glaciation huronienne, il y a 2,4 milliards d'années (lors de la période dite Paléoprotérozoïque), en lien direct avec le « grand événement d'oxydation » (GEO) lors de l'apparition des cyanobactéries, dotées de la photosynthèse émettant de l'oxygène.

Ce phénomène aurait également pu se produire deux fois au Néoprotérozoïque supérieur : lors de la glaciation sturtienne qui s'enclenche il y a 720 millions d'années et lors de la glaciation marinoenne il y a 635 millions d'années. La période de ces deux dernières glaciations, le Cryogénien,

est parfois décrite comme formée d'une seule glaciation, la glaciation Varanger.

Cette hypothèse que le scénario de Boudyko aurait pu se produire effectivement a été avancée par des géologues pour expliquer la présence de sédiments qui seraient d'origine glaciaire dans la ceinture équatoriale. Cette hypothèse ne fait cependant pas consensus. Si cette situation d'équilibre glacé est intervenue, la sortie de cet état très stable est alors essentiellement imputée à l'accumulation du gaz carbonique émis par le volcanisme. Le CO<sub>2</sub> se concentrerait progressivement jusqu'à atteindre de l'ordre de 400 fois les teneurs actuelles : la très faible teneur en eau de l'atmosphère (uniquement alimentée par la sublimation des glaces et non plus par le puissant mécanisme d'évapotranspiration) ne permettrait en effet plus son lessivage, ni sa séquestration dans les océans couverts de glace. À cette teneur, l'effet de serre du gaz carbonique seul est alors suffisant pour réchauffer, jusqu'à l'enclenchement d'une rétroaction positive inverse de fonte des glaces et d'activation du cycle de l'eau. Des travaux récents considèrent que cet épisode aurait été extrêmement rapide<sup>18</sup>.

Cette histoire possible, non confirmée aujourd'hui, montre trois dimensions dominantes qu'il faut comprendre dans les relations entre eau et climat, qui sont des couplages en particulier avec le cycle du carbone :

- les précipitations lessivent partiellement l'atmosphère des autres gaz à effet de serre ;
- les océans séquestrent le carbone ;
- l'équilibre actuel de la température de la planète est dépendant de l'intensité des flux du cycle de l'eau et bien entendu, ceux-ci en dépendent également.

### REVENIR AU COURS

§ 1.2

<sup>17</sup>. Voir l'article très complet sur Wikipédia qui fait le point des débats sur ce sujet : WIKIPÉDIA. *Terre, boule de neige* [en ligne]. Mis à jour le 15 janvier 2021. Disponible sur [https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre\\_boule\\_de\\_neige](https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre_boule_de_neige)

<sup>18</sup>. Voir : JOEL, Lucas, 2018. Ancient Earth froze over in a geologic instant. *Science* [en ligne]. AAAS. 7 juin 2018 [consulté le 15.01.2021]. Disponible sur <http://doi.org/10.1126/science.aau4137>. Pour approfondir la paléoclimatologie, voir Foucault, 2016.

N°1

# Le cycle de l'eau à l'échelle planétaire

## 1. Grands flux océaniques

Les transferts d'énergie sont liés pour un quart aux courants océaniques et pour trois quarts à l'eau atmosphérique. La circulation océanique comprend deux modes distincts : un mode de surface, où le vent joue un rôle moteur, et un mode profond d'origine thermohaline, dépendant de la température et de la salinité. La force géostrophique (traduction des forces de Coriolis) participe des deux modes.

La circulation profonde prend naissance dans l'Atlantique nord (mers de Labrador et de Norvège) et en mer de Weddell par refroidissement et plongée d'eau tiède et salée au contact de l'air froid. Le flux moyen local est de  $50 \text{ W/m}^2$ . L'océan est donc un piège de froid. Le débit total de cette pompe d'eau froide avoisine  $10 \text{ Gm}^3/\text{s}$ , soit une quinzaine de fois celui de tous les cours d'eau : du point de vue thermique, il transporte vers les hautes latitudes quelques pour cent de l'énergie reçue par les océans tropicaux. L'eau profonde circule de 60 ans à 1 000 ans environ, durant lesquels sa salinité et sa densité diminuent, avant d'émerger dans les zones d'*upwelling* (Ouest de l'Afrique, Ouest des Amériques, Sud de l'Arabie et Corne de l'Afrique).

La circulation superficielle, en revanche, est rapide. Elle répond aux variations de la circulation atmosphérique. Les déplacements des courants chauds et froids, conjugués avec des variations de contexte aérologiques, sont responsables des cycles marqués de pluviométrie et de sécheresse que l'on observe depuis toujours dans certaines zones sous les tropiques. L'oscillation australe, appelée communément El Niño (épisode suivi de La Niña), est un exemple frappant du rôle majeur de la circulation océanique superficielle engendrée par les flux d'alizés dans les transports à grande distance de chaleur et d'humidité.

## 2. Pluie et évaporation

L'eau atmosphérique par échange de chaleur latente assure une forte régulation entre les océans et les continents. Les océans représentent 70 % de la surface du globe, le bilan des évaporations et des pluies est équilibré en masse.

Tableau 1 : Évaporation et précipitation moyennes sur les océans et les continents

	Évaporation (mm)	Évaporation : chaleur latente ( $\text{W/m}^2$ )	Précipitations (mm)	Précipitations : chaleur latente ( $\text{W/m}^2$ )
Océans	-1 250	-99	1 120	88
Continents	-410	-33	720	55

Mais si le total est équilibré, le bilan pluie-évaporation est déficitaire sur les océans et excédentaire sur les continents.

Tableau 2 : Valeurs globales des flux à l'échelle de la planète (en  $\text{Gm}^3/\text{an}$  et en lame d'eau en millimètres par an).

Évaporation sur les océans	425 000 $\text{Gm}^3/\text{an}$	1 250 mm
Évaporation sur les continents	71 000 $\text{Gm}^3/\text{an}$	410 mm
Précipitations sur les océans	385 000 $\text{Gm}^3/\text{an}$	1 120 mm
Précipitations sur les continents	111 000 $\text{Gm}^3/\text{an}$	720 mm

40 % des pluies sur les continents proviennent des océans et y retournent par l'écoulement des rivières.

Tableau 3 : Flux hydriques des continents aux océans (en Gm<sup>3</sup>/an).

Débit de ruissellement des rivières (débit de crue)	27 000
Débit de base total des nappes aux rivières et océans	10 500
Apport aux océans par la fonte des glaciers	2 500
<b>TOTAL</b>	<b>40 000</b>

Les flux d'eau atmosphérique combinent donc un mouvement de transfert d'eau et d'énergie zonal, depuis les océans vers les continents.

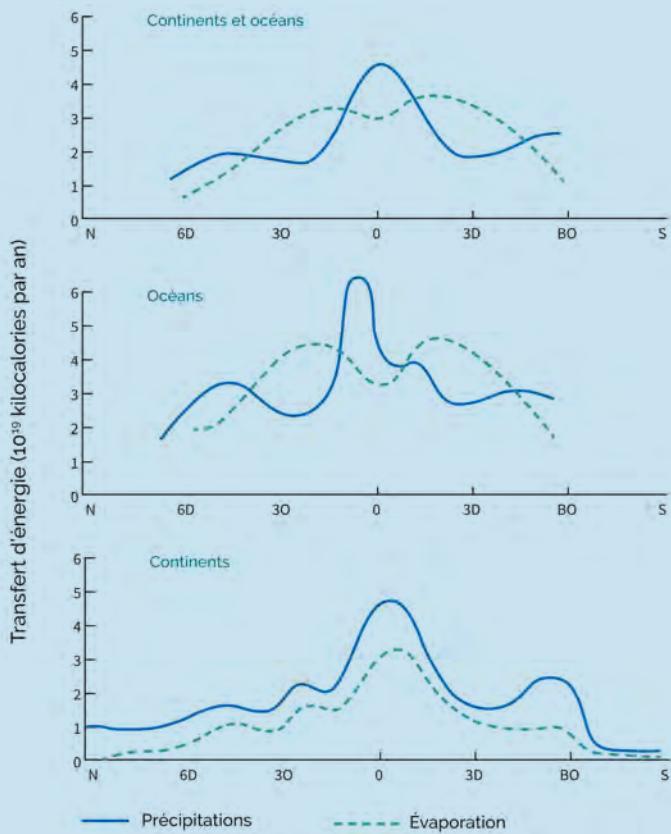


Figure 6 : Répartition zonale des précipitations et de l'évaporation pour les continents et les océans.  
D'après Frécault, Pagny, 1983.

C'est à travers le déplacement des masses d'air que se transporte la chaleur latente et c'est à l'occasion des variations de pression et de température de celles-ci que se déclenchent les précipitations. Ces grandes circulations atmosphériques sont d'une grande complexité : la compressibilité d'un gaz en fait le siège privilégié de processus turbulents. On a ainsi vu la variabilité de facteurs externes, tels que les rayonnements (flux de chaleur sensible) auxquels ces masses d'air sont soumises (cycle diurne, contrastes zonaux, différences océan-continent), à laquelle s'ajoutent l'effet de la rotation terrestre (force de Coriolis) et les effets d'un relief de quelques kilomètres d'altitude sur les continents<sup>19</sup>.

19. Au-delà d'une représentation simple des grandes circulations, voir Triplet, Roche, 1996, ouvrage ancien mais très accessible.

Aux basses latitudes, l'air réchauffé par le soleil s'élève. Cet air chaud se dirige en altitude vers les hautes latitudes. Il se refroidit et redescend vers 30° de latitude, puis rejoint l'équateur dans les basses couches de l'atmosphère. Cette circulation, dite de Hadley, existe tout autour de l'axe terrestre (voir la figure 7). L'air atmosphérique, chargé d'humidité au voisinage de l'océan équatorial, perd cette humidité dans la branche ascendante de la cellule de Hadley et redescend asséché aux latitudes plus élevées. Cela explique la présence d'une ceinture de déserts, dans chaque hémisphère, autour de 30° de latitude.

Dans les parties à haute altitude de la cellule de Hadley, les masses fluides se rapprochent de l'axe de rotation de la Terre et, comme une bille sur un manège, sont déviées vers l'est (pour donner, par exemple, les quarantièmes rugissants). En revanche, dans les parties basses de la cellule, comme une bille qui s'éloigne de l'axe de rotation d'un manège, les masses d'air se dirigent vers l'ouest, donnant les alizés des régions équatoriales.

Au-delà de la latitude de 30°, la composante verticale de la rotation terrestre devient plus grande, la circulation de Hadley devient instable. Il apparaît un régime d'ondes, dites *baroclines*, superposé à un écoulement général prograde et qui domine la circulation aux latitudes moyennes. Dans la direction horizontale, la force due au gradient de pression et la force de Coriolis due à la rotation s'opposent presque exactement. Cet équilibre, dit *géostrophique*, explique le fait que les vents tournent dans un sens (dit cyclonique) autour des *minima* de pression, dans le sens inverse (dit anticyclonique) autour des *maxima*, les sens de rotation s'inversant d'un hémisphère à l'autre. Les ondes baroclines évoluent en permanence et sont constamment régénérées sous l'effet de la variation de température selon la latitude.

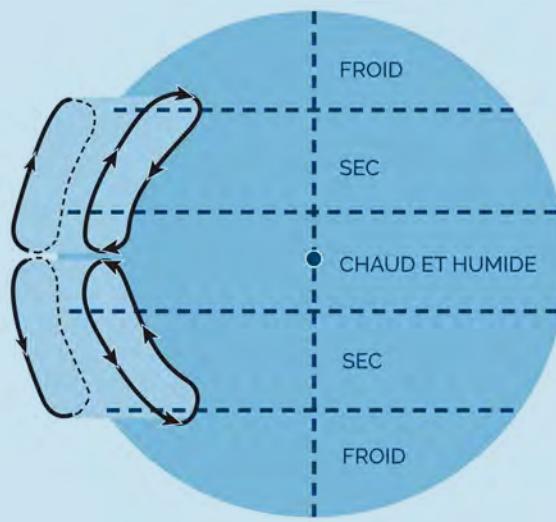


Figure 7 : Deux cellules de Hadley coexistent entre l'équateur et les latitudes moyennes.  
D'après Roche, Miquel, Gaume, 2012.

À l'équateur, les masses atmosphériques chauffées par le soleil montent dans la branche ascendante de la cellule de Hadley. Puis, à haute altitude, elles se dirigent vers les régions plus froides. Cet air sec et refroidi redescend vers la surface, puis retourne, à basse altitude, vers l'équateur, où il se charge à nouveau d'humidité.

Ceci a conduit à une représentation dite « tricellulaire » (voir figure 8 et figure 9). Ce schéma tricellulaire qui intéresse la troposphère comporte trois cellules par hémisphère : la cellule de Hadley, la cellule de Ferrel et la cellule polaire. La cellule de Hadley est une cellule directe. Elle transporte de la masse atmosphérique dans sa branche inférieure, en direction de l'équateur (mouvements alizéens) et en altitude, à l'inverse, c'est-à-dire des régions équatoriales en direction du pôle. Le raccordement se fait par ascendance d'air chaud dans l'auge des basses pressions équatoriales et plus précisément à

la faveur de l'équateur météorologique et par descendante d'air froid du côté du tropique. La cellule de Ferrel est une cellule indirecte qui conjugue sa branche descendante avec celle de la cellule de Hadley et sa branche ascendante avec le domaine du front polaire. Le front polaire sépare la cellule de Ferrel de la cellule polaire. Avec cette dernière, on retrouve une cellule directe (descendance du côté du pôle, ascendance du côté opposé). La cellule indirecte de Ferrel établit donc, aux latitudes moyennes, la transition entre la circulation méridienne des hautes latitudes et la circulation méridienne des latitudes subtropicales et intertropicales.

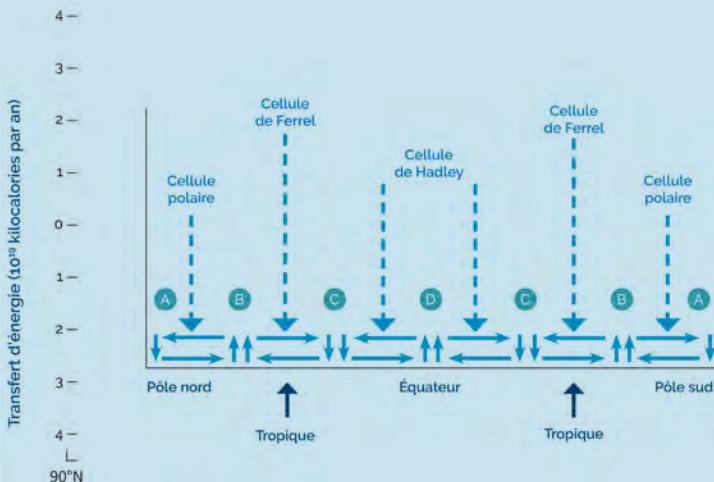


Figure 8 : Schéma tricellulaire, d'après Frécault, Pagney, 1983.

A : pôles ; en superficie, hautes pressions et subsidence ; B : zone du front polaire ; en superficie, tendances dépressions et ascendance ; atmosphère barocline ; C : latitudes subtropicales ; en superficie, hautes pressions et subsidence ; D : équateur météorologique ; en superficie, basses pressions et ascendance. C'est la limite énergétique des deux hémisphères.

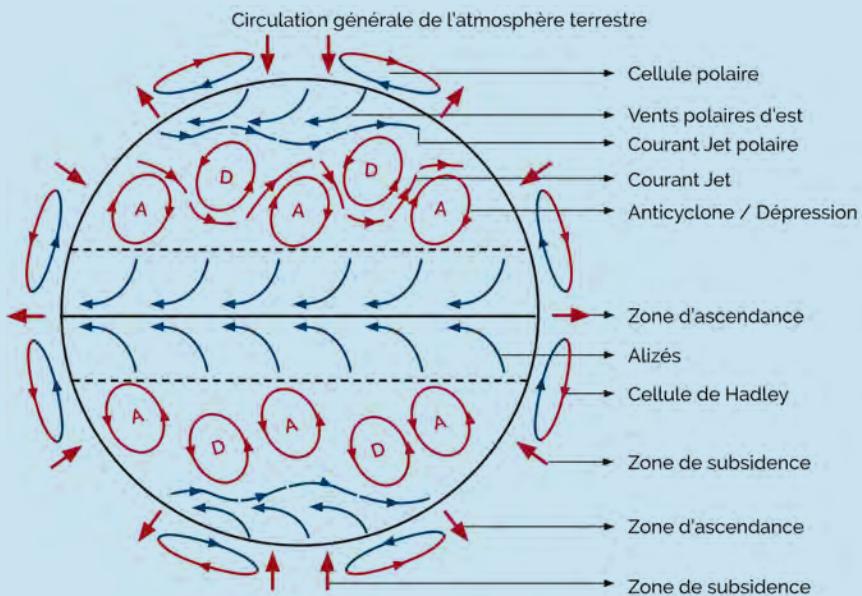


Figure 9 : Circulation générale de l'atmosphère. Source : Météo-France.

### 3. Précipitations

La description météorologique de la circulation des masses d'air, tout comme l'analyse des conditions de la pluviosité (formation des précipitations) est indispensable à la compréhension de la diversité de situation des différentes régions du globe, vis-à-vis de la température et des précipitations. Il s'agit cependant d'une description événementielle, même si la reproduction de certaines de ces circulations permet d'identifier un certain nombre de macro-entités (par exemple l'anticyclone des Açores). Dans les régions tempérées, le processus de formation de la pluie peut en général être décrit ainsi :

- détente adiabatique de l'air humide provoquant le refroidissement et la formation de microgouttelettes ;
- congélation d'une partie de celles-ci à des températures négatives et développement des cristaux (diffusion) ;
- chute lente des cristaux et fusion au passage de l'isotherme 0°C, avec agglomérations éventuelles ;
- chute plus rapide des gouttelettes formées et grossissement par coalescence, avec formation de gouttes d'un diamètre voisin du millimètre.

En ce qui concerne les averses provenant des nuages convectifs, les mécanismes sont similaires mais plus rapides et brutaux et la turbulence joue un rôle important, au même titre que les forts courants verticaux qui l'engendrent. Il peut même arriver que les gouttes formées soient reprises dans des jets d'air ascendants, emportées à des températures fortement négatives en restant surfondues, puis brutalement congelées lors de chocs sur des gouttes surfondues ou déjà gelées : on assiste alors à la formation de grêlons dont les dimensions peuvent atteindre plusieurs centimètres par suite de nombreux va-et-vient verticaux liés à l'existence de courants ascendants dépassant 10 à 20 m/s au sein des nuages d'orage.

Il est important de comprendre ainsi qu'il ne suffit pas que de l'air soit humide pour qu'il pleuve. Encore faut-il que les conditions d'un refroidissement soient créées, par l'alternance diurne-nocturne (généralement brouillards et rosée), ou par le déplacement de la masse d'air vers des régions plus froides, ou d'une ascension adiabatique de cette masse d'air, engendrant une baisse de pression sous l'effet du relief ou par la présence d'autres masses d'air. C'est ainsi que des flux d'humidité puissants peuvent parfaitement, de façon régulière et durable, survoler sur des centaines ou des milliers de kilomètres des territoires où il ne pleut pas.

En définitive, il pleut essentiellement sur les massifs montagneux (les « châteaux d'eau » de nos leçons de géographie). Cette circonstance est majeure pour la suite : elle permet ensuite l'écoulement gravitaire sur les continents. Non seulement le cycle de l'eau assure des régulations thermiques, mais il fournit aussi une énergie potentielle en montant l'eau en grandes quantités aux altitudes les plus élevées permises par le relief.

Par ailleurs, il pleut abondamment sur les côtes exposées aux influences humides dominantes, mais très peu à l'autre bout des continents. Dans l'hémisphère nord, ce gradient de décroissance des pluies est dans la direction est-ouest.

**REVENIR AU COURS**

§ 1.2

N°2

# Climats et régimes hydrologiques

Les processus hydrologiques résultent de la transformation des processus météorologiques, contrastés selon les régions, et souvent marqués par une forte saisonnalité, par un milieu intégrateur : le bassin-versant. Aux régions et saisons faiblement arrosées correspondent naturellement des écoulements de rivières faibles. L'étymologie (κλίμα : inclinaison du soleil sur l'horizon) traduit bien l'importance majeure de la latitude dans la zonation des climats.

## 1. Les climats

Un climat est une forme de caractérisation des variations saisonnières (et de leur variabilité interannuelle) des paramètres de précipitation, de pression et de température en un lieu déterminé. On utilise utilement le terme de « régime » pour traduire cette volonté de représentation statistique globale d'un ensemble de processus temporels. Il ne faut pas surestimer la portée de cette démarche qui permet la classification et le zonage : elle n'a aucun caractère explicatif, mais présente le grand intérêt de rendre synthétique la représentation de processus multidimensionnels complexes. Les limites en sont toujours arbitraires et le raffinement de certaines classifications laisse parfois songeur. Les liens entre climatologie et météorologie sont cependant étroits : plutôt que de ne faire qu'une simple analyse statistique de leurs chroniques, les climatologues se laissent souvent guider par une représentation des types de processus météorologiques « explicatifs » des caractéristiques trouvées<sup>20</sup>.

En définitive, c'est la botanique qui a servi de guide à la climatologie. La classification des climats la plus couramment utilisée est celle qu'a établie le botaniste Wladimir Peter Köppen en 1900 à partir des cinq zones climatiques utilisée par le botaniste suisse Alphonse Pyrame de Candolle (1806-1893). Elle a été mise à jour à plusieurs reprises : en 1961 par Rudolf Geiger (d'où son nom de Köppen-Geiger) et notamment en 2007 (voir Peel, Finlayson, Mc Mahon, 2007, ainsi que le tableau 4 et la figure 10).

**Tableau 4 : Les cinq grands types de climats. Classification de Köppen-Geiger. Avec des noms différents, elle reprend celle de Candolle. D'après Frécault, Pagney, 1983.**

Code	Type	Description
A	Climat tropical	Température moyenne du mois le plus froid de l'année > 18 °C. Pas de saison hivernale. Fortes précipitations annuelles (supérieure à l'évaporation annuelle)
B	Climat sec	Évaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles. Ce seuil est calculé de la manière suivante : si moins de 30 % des précipitations tombent en été (d'avril à septembre dans l'hémisphère nord) : précipitations annuelles moyennes (mm) < 20 × température annuelle moyenne (°C). Si plus de 70 % des précipitations tombent en été : précipitations annuelles moyennes (mm) < 20 × température annuelle moyenne + 280. Sinon : Précipitations annuelles moyennes (mm) < 20 × température annuelle moyenne + 140
C	Climat tempéré	Température moyenne du mois le plus froid comprise entre -3 °C et 18 °C. Température moyenne du mois le plus chaud > 10 °C. Les saisons été et hiver sont bien définies
D	Climat continental	Température moyenne du mois le plus froid < -3 °C. Température moyenne du mois le plus chaud > 10 °C. Les saisons été et hiver sont bien définies
E	Climat polaire	Température moyenne du mois le plus chaud < 10 °C. La saison d'été est très peu marquée

20. Par exemple, faut-il considérer que certains climats mexicains tropicaux sont des climats de « mousson » ? Si l'on met en avant une simple description des chroniques de températures et de précipitations, c'est sans doute le cas. Mais si l'on considère que la mousson est un phénomène météorologique bien identifié (traversée de l'équateur par les alizés), alors la réponse est négative.

La deuxième lettre caractérise le régime pluviométrique. Cela conduit à la nomenclature suivante :

- Af : climat équatorial ; Aw : climat de savane avec hiver sec ; As : climat de savane avec été sec ; Am : climat de mousson ;
- BS : climat de steppe (semi-aride) ; BW : climat désertique ;
- Cf : climat tempéré chaud sans saison sèche ; Cw : climat tempéré chaud avec hiver sec (chinois) ; Cs : climat tempéré chaud avec été sec (méditerranéen) ;
- Df : climat continental froid sans saison sèche ; Dw : climat continental froid avec hiver sec ; Ds : climat continental froid avec été sec (continental méditerranéen) ;
- ET : climat de toundra ; EF : climat d'inlandsis ; EM : climat subpolaire océanique.

Une troisième lettre précise dans certains cas les variations de température : a : été chaud ; b : été tempéré ; c : été court et frais ; d : hiver très froid ; h : sec et chaud ; k : sec et froid.

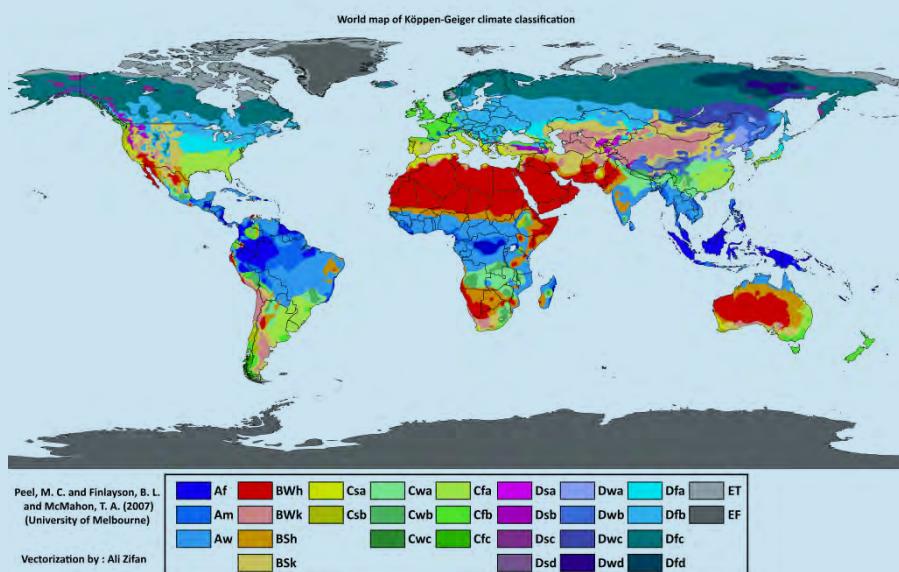


Figure 10 : Les principaux types de climat. Voir la nomenclature dans le texte.

Tirée de Peel, Finlyson, Mc Mahon, 2007.

## 2. Les régimes hydrologiques

Les régimes hydrologiques sont pour l'essentiel décrits par des variables d'entrée climatiques (précipitations et température). La différenciation liée aux caractéristiques des bassins-versants (surface, pentes, géologie, couvert végétal) lors de leur transformation en variables hydrologiques (tels que les débits des rivières) cède le pas devant les grands contrastes entre les grandes classes de situations climatiques. Les deux éléments structurants pour une classification hydro-climatique sont donc :

- l'influence déterminante des facteurs thermiques aux hautes et moyennes latitudes (là où peut se poser la question d'une partie de neige ou de glace et de leur fonte) ;
- le rôle quasi exclusif du rythme saisonnier des pluies dans les basses latitudes.

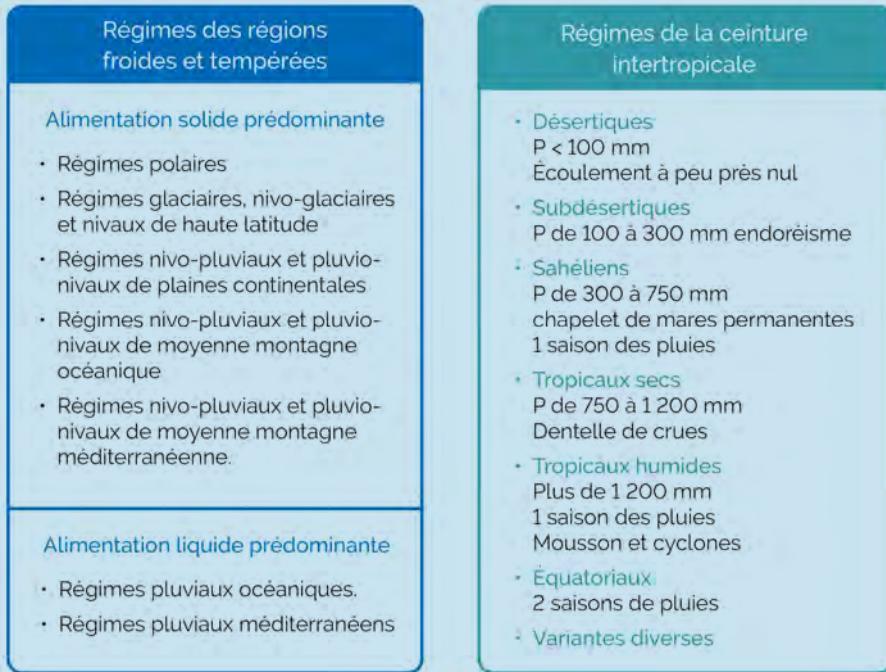


Figure 11 : Les régimes hydrologiques.

REVENIR AU COURS

§ 1.4

N°3

# Eau et changement climatique

## 1. L'eau : principal gaz à effet de serre

L'effet de serre représente globalement 150 W/m<sup>2</sup> de flux infrarouge piégé, dont 90 W/m<sup>2</sup> sont liés à la vapeur d'eau et 30 à 40 W/m<sup>2</sup> en rapport avec le gaz carbonique. Ainsi, le gaz qui contribue le plus à l'effet de serre est la vapeur d'eau (voir la figure 12).

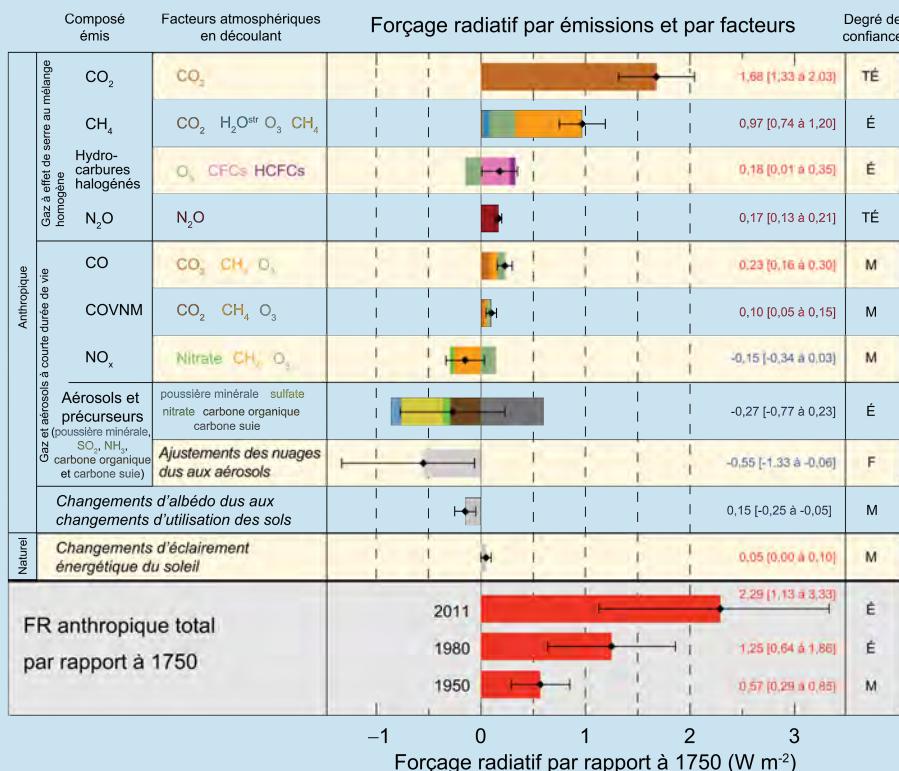


Figure 12 : Contributions à l'effet de serre des différents gaz présents dans l'atmosphère en 1992.

Tirée de GIEC, 1996, AR1.

Le cycle du carbone a des interactions fortes avec le cycle de l'eau (lessivage du CO<sub>2</sub> atmosphérique par les pluies, séquestration océanique, cycle végétatif, sols, etc.). Les travaux successifs du GIEC ont permis d'élaborer progressivement un premier tableau complet des effets constatés de tous les mécanismes en cause (voir la figure 13) :

- le forçage radiatif total est positif et a conduit à une absorption nette d'énergie par le système climatique ;
- la rétroaction nette, due aux changements combinés de la vapeur d'eau et des différences entre le réchauffement de l'atmosphère et de la surface, est positive et elle amplifie donc les changements climatiques ;
- le signe de la rétroaction radiative nette liée à tous les types de nuages combinés est probablement positif ;

- la plus grande contribution à ce forçage radiatif provient de l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en  $\text{CO}_2$  depuis 1750. Plus de la moitié de l'augmentation observée de la température moyenne à la surface du globe entre 1951 et 2010 est due à l'augmentation anthropique des concentrations de gaz à effet de serre et à d'autres forçages anthropiques conjugués ;
- la contribution des gaz à effet de serre au réchauffement moyen en surface se situe probablement entre 0,5°C et 1,3°C au cours de la période 1951–2010, les contributions des autres forçages anthropiques, y compris l'effet refroidissant des aérosols, se situant probablement entre -0,6°C et 0,1°C. La contribution des forçages naturels se situe probablement entre -0,1°C et 0,1°C et celle de la variabilité naturelle interne probablement entre -0,1°C et 0,1°C ;
- la somme de ces contributions estimées est cohérente avec le réchauffement observé d'environ 0,6 à 0,7°C, au cours cette période.

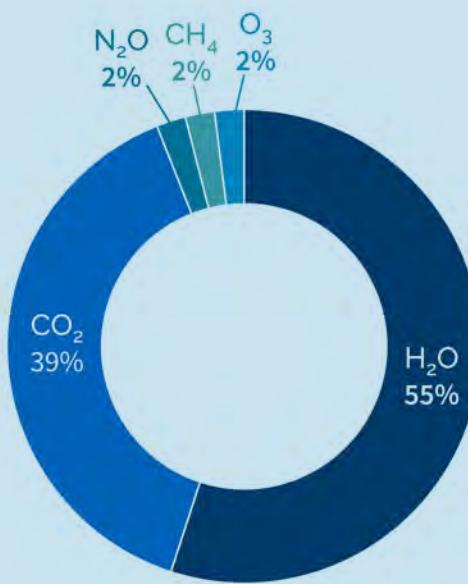


Figure 13 : Contributions de divers facteurs aux changements climatiques depuis 1750.

Source des données : GIEC, 2013, AR5, WGI.

## 2. Pluie, évaporation et régimes hydrologiques : les évolutions constatées

Le GIEC est prudent concernant les constats des évolutions du cycle de l'eau. Il indique dans son résumé pour les décideurs (AR5, WGI, 2013) :

« Il est probable que les influences anthropiques affectent le cycle mondial de l'eau depuis 1960. Les influences anthropiques ont contribué aux augmentations du contenu atmosphérique en vapeur d'eau (degré de confiance moyen) à des changements de la distribution spatiale des précipitations sur les continents à l'échelle du globe (degré de confiance moyen), à l'intensification des épisodes de fortes précipitations sur les régions continentales où les données sont suffisantes ».

### 2.1. Un paysage complexe et des effets en apparence paradoxaux

En effet, le tableau général des évolutions constatées est très différent de celui des températures et de ses effets directement liés (voir la figure 14).

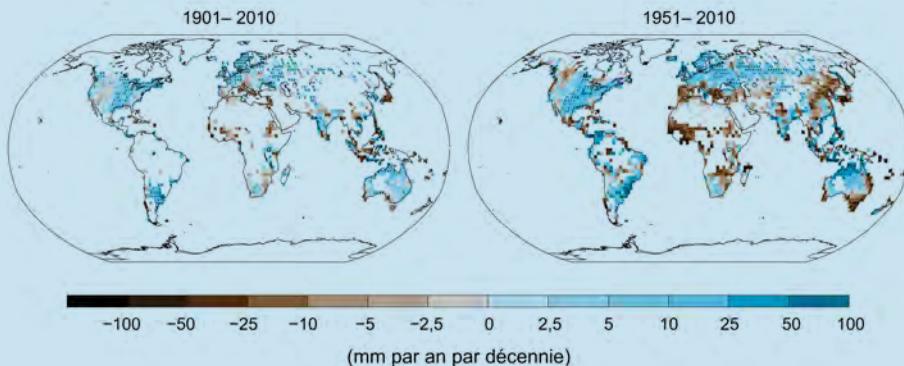


Figure 14 : Carte des changements observés dans les précipitations annuelles.

Tirée de GIEC, 2013, AR5, WGI.

La représentation la plus commune de l'évolution du cycle de l'eau en liaison avec la production anthropique de gaz à effet de serre (GES) procède d'une analyse séquentielle simpliste. Le cycle de l'eau serait rendu plus actif (plus d'évapotranspiration, plus de précipitations) par l'émission d'autres GES via le réchauffement induit par l'augmentation de l'effet de serre. Bien entendu, une telle logique doit être complétée en intégrant les boucles de rétroaction internes au cycle de l'eau et la nature complexe des interactions entre cycle de l'eau et cycle du carbone.

Par exemple une augmentation de la vapeur d'eau entraîne une augmentation de la nébulosité, ce qui a deux effets inverses :

- l'effet « parasol » augmente, c'est-à-dire que la réflexion du rayonnement solaire incident est accrue et donc l'énergie reçue par le système terre-atmosphère diminue, limitant le réchauffement ;
- l'effet de serre des nuages de vapeur d'eau est augmenté.

Le bilan global est aujourd'hui négatif (- 20 W/m<sup>2</sup>). L'effet parasol (- 50 W/m<sup>2</sup>) l'emporte sur l'effet de serre (+ 30 W/m<sup>2</sup>). Pour l'étude du changement climatique, il s'agit de comprendre dans quel sens évolue l'effet net (parasol – serre) de la nébulosité quand la température augmente : si l'effet de serre augmente plus vite que l'effet parasol, la rétroaction est positive (pour une élévation de température, l'augmentation de nébulosité diminuerait le prélèvement d'énergie opéré par la nébulosité). Aujourd'hui, le sens de cette rétroaction essentielle n'est pas clarifié, notamment compte-tenu du rôle des aérosols.

Un deuxième exemple concerne les variations d'albédo induites par l'évolution de l'occupation du sol.

Certaines rétroactions semblent simples ; la diminution des surfaces de glace conduit à une réduction forte de l'albédo. L'évolution plus rapide que prévu de la couverture du Groenland montre pourtant que c'est en soi déjà une difficulté. Pour d'autres, c'est bien plus complexe. La désertification du Sahel et la grande sécheresse ont été l'occasion d'appréciations erronées de ces rétroactions. Jule Gregory Charney a supposé que, la désertification augmentant l'albédo, la température du sol, du fait de ce déficit énergétique, s'abaissait. Dès lors, la montée des masses d'air aurait été réduite (l'air moins chauffé monte moins) et donc les précipitations auraient été inhibées (Charney, 1975). Cette analyse a d'ailleurs contribué à l'idée que reboiser ferait revenir la pluie. C'est tout ignorer de l'évapotranspiration, qui amène exactement la situation inverse : un couvert végétal conduit à une température de surface plus fraîche qu'un sol dénudé, même d'un albédo supérieur<sup>21</sup>.

Ceci est relativement troublant quand on sait le rôle effectif, justement, de ces précipitations sur les équilibres thermiques.

<sup>21</sup> Une autre idée commune sur ce sujet consiste à imaginer que le boisement augmente les ressources en eau dans le sol. Au contraire, en générant une forte évapotranspiration (supérieure à l'évaporation d'un sol nu) il contribue à son assèchement.

## 2.2. Les limites de la modélisation progressivement repoussées

Les modèles de circulation générale (MCG) développés depuis le début des années 1970 ont ainsi montré leurs limites. Ces MCG avaient une assez faible résolution horizontale (des mailles de 350 à 450 km) et ne pouvaient donc représenter correctement les processus hydrologiques, notamment par défaut de représentation des reliefs, essentiels dans la dynamique des basses couches. Dans les années 1980, des modèles complémentaires régionaux (MRC : modèle régional de climat) ont été développés, en utilisant les mêmes types de paramétrisation, mais avec des mailles mieux adaptées (10 à 50 km environ). La représentation des effets de nébulosité, intimement liés au détail de la microphysique des nuages, y est particulièrement déficiente. Ces outils surestiment globalement les variabilités naturelles. Les progrès de ces modèles étaient donc indispensables pour préparer des outils d'aide à la décision. La puissance de l'informatique aidant, il a été possible de faire fonctionner des modèles globaux à mailles de plus en plus fines et les modèles régionaux se sont également affinés. Des travaux du rapport 1 à ceux du rapport 5 du GIEC, c'est ainsi en quinze ans une fiabilité croissante de l'analyse qui a été possible. Dans son dernier rapport, le GIEC a finalement considéré qu'il pouvait commencer à se prononcer, avec prudence, sur les précipitations.

La figure 15 montre les évolutions constatées et modélisées des volumes annuels de précipitations depuis un siècle et la relative difficulté à simplement établir un diagnostic quantifié de ces variations. Si les différents jeux de données montrent une bonne cohérence dans la nature qualitative de ces évolutions, ils divergent quant à la quantification de ces écarts.

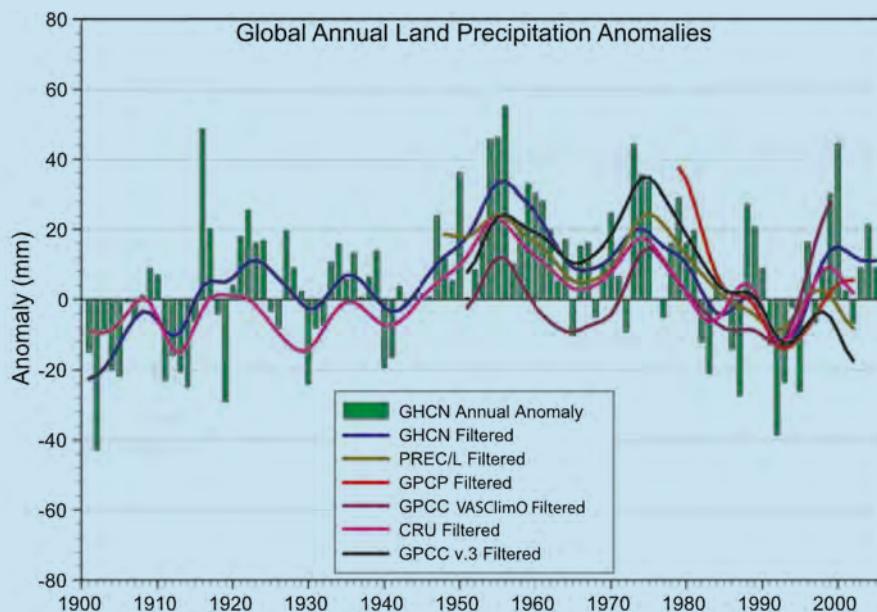


Figure 15 : Diverses reconstitutions des précipitations sur les continents (écart à la moyenne 1981-2000).  
Tirée de GIEC, 2007, AR4, groupe I.

La figure 16 montre l'évolution durant cette période de l'index synthétique de sécheresse de Palmer (ISSP ou « index synthétique de sévérité de la sécheresse » ; en anglais PDSI) : l'ISSP montre les carences et les excédents d'humidité à l'aide de paramètres adimensionnels, variant normalement entre -4 et 4, les valeurs négatives indiquant un manque d'eau et les valeurs positives un excédent d'eau. L'ISSP combine les conditions d'humidité du mois courant et celles des mois précédents. Bien que l'ISSP soit souvent considéré comme un indice météorologique, il convient plutôt de le considérer comme un indice de mesure des sécheresses à long terme, comme c'est ici le cas.

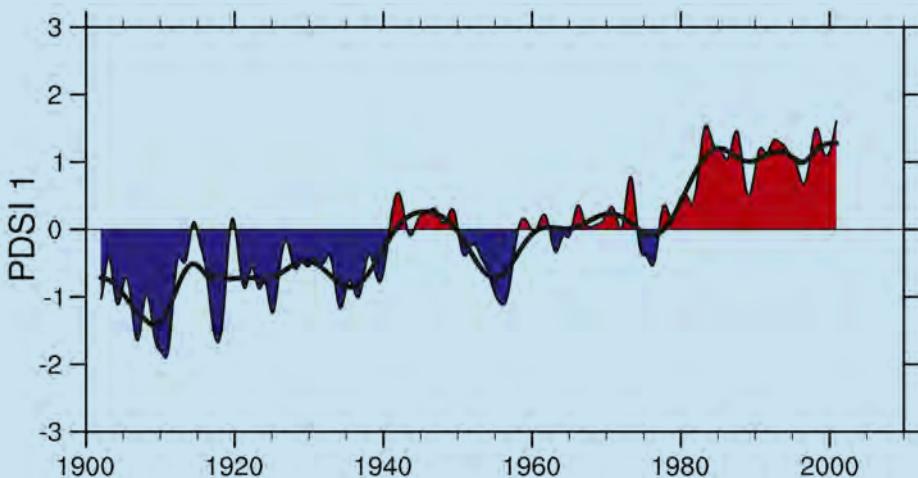


Figure 16 : Évolution de l'index synthétique de sévérité de la sécheresse de Palmer sur la période 1900-2005. Tirée de GIEC, 2007, AR4 Groupe I.

### 3. Les scénarios de changement climatique

Le GIEC a complètement repris ses travaux d'analyse de scénarios d'émissions futures après l'AR4. La modélisation permet d'associer à divers scénarios d'émissions les évolutions des concentrations dans l'atmosphère des GES (figure 17) et les effets sur les températures, ainsi que les effets liés.

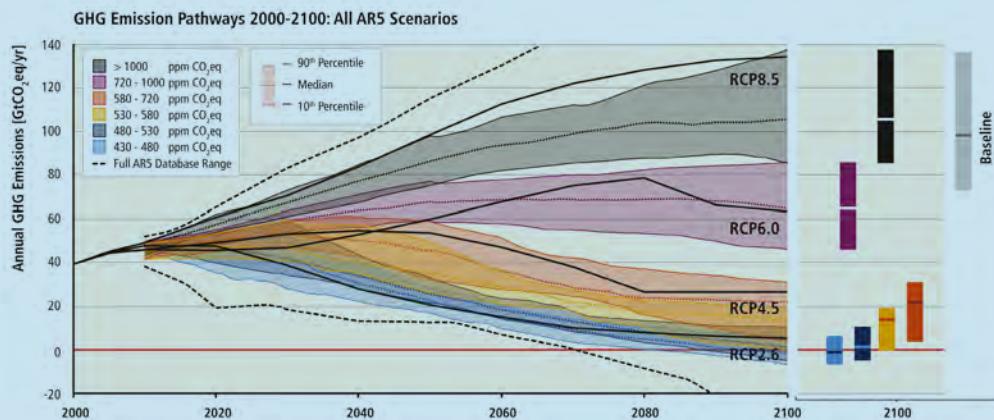
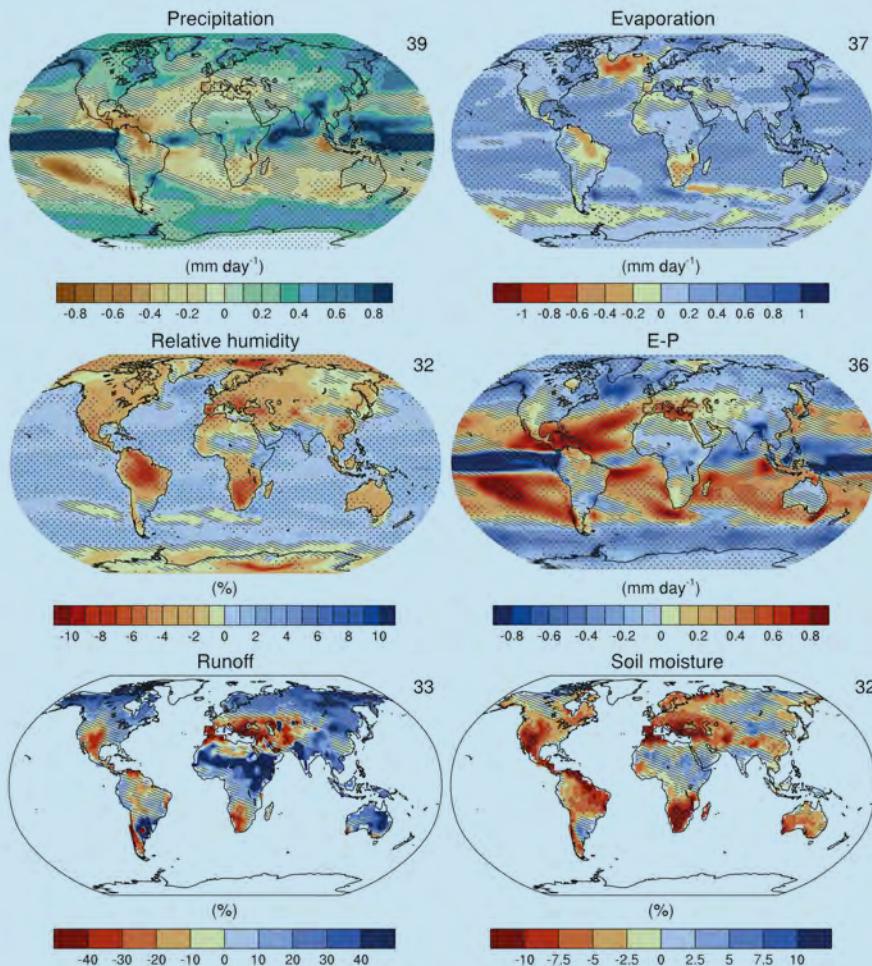


Figure 17 : Évolution des concentrations de gaz à effet de serre atmosphérique. Tirée de GIEC 2013, AR5, GT III.

Les effets sur les ressources en eau (voir la figure 18) comportent de fortes évolutions significatives pour l'évapotranspiration, en lien direct avec la température, mais plus incertain avec les bilans d'écoulement, où les précipitations jouent un rôle déterminant.



**TFE.1, Figure 3 |** Annual mean changes in precipitation ( $P$ ), evaporation ( $E$ ), relative humidity,  $E - P$ , runoff and soil moisture for 2081–2100 relative to 1986–2005 under the Representative Concentration Pathway RCP8.5 (see Box TS.6). The number of Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) models to calculate the multi-model mean is indicated in the upper right corner of each panel. Hatching indicates regions where the multi-model mean change is less than one standard deviation of internal variability. Stippling indicates regions where the multi-model mean change is greater than two standard deviations of internal variability and where 90% of models agree on the sign of change (see Box 12.1). [Figures 12.25–12.27]

**Figure 18 : Évolution des précipitations, évaporation, humidité relative et écoulement à échéance 2100.**

Tirée de GIEC, 2013, AR5, WGI.

Comme on pouvait s'en douter, on a une bonne concordance des évolutions prévues quant à l'évapotranspiration fortement pilotée par la température, avec une croissance à peu près généralisée et significative. Cependant, en lien avec l'évolution des flux de vapeur d'eau atmosphérique, c'est largement au-dessus des océans que l'évaporation augmente.

#### 4. Que dire des extrêmes ?

Les effets les plus notables à long terme sont localement des risques (voir la figure 19) d'accroissement des sécheresses aux latitudes moyennes (dont le pourtour méditerranéen), mais aussi de plus forte intensité des précipitations aux hautes latitudes, en liaison avec l'augmentation du contenu en eau atmosphérique total, susceptible d'être mobilisé dans des événements de précipitations intenses.

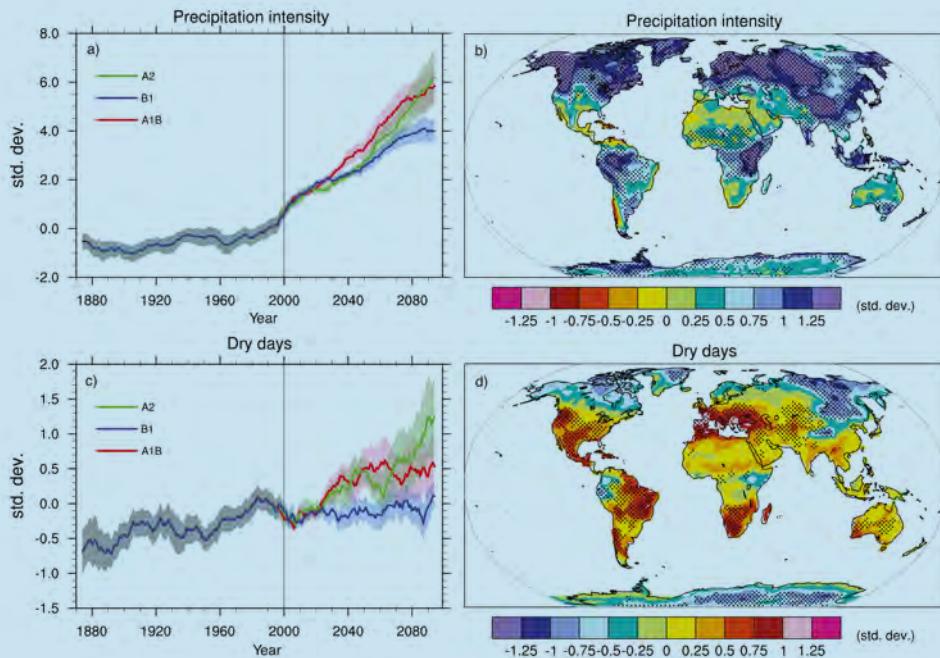


Figure 19 : Modifications de l'intensité des pluies et du nombre de jours secs.

Tirée de GIEC, 2007, AR4, groupe I.

REVENIR AU COURS

§ 15



# Chapitre 2 | Démographie, biodiversité et risques

## Relever le défi de la soutenabilité

### À RETENIR

#### 5 | Passer de 7,5 milliards à 9 ou 10 milliards d'habitants en 2050 est un défi pour la soutenabilité.

Outre ses effets environnementaux, la croissance démographique connaît des conséquences sociales contrastées : certains pays d'Asie, après une phase d'explosion démographique à faibles revenus, accompagnée de politiques volontaristes d'éducation et de santé, ont tiré les « dividendes de la transition démographique ». La même dynamique ne fonctionne pas en Amérique latine et en Afrique. La nécessité de modes de vie plus soutenables alimente le débat public dans de nombreux pays, **la question de la démographie se posera inéluctablement**. Elle est aujourd'hui encore largement occultée car elle véhicule de redoutables questions éthiques.

#### 6 | Les villes sont le réceptacle de cette croissance démographique.

La vague de fond de l'urbanisation se poursuit continûment et inexorablement, semble-t-il. Elle pourrait donc aboutir à ce que la proportion d'urbains, qui était d'un tiers en 1960, qui est déjà aujourd'hui de plus de la moitié, passe à deux tiers bien avant 2040. Depuis 60 ans, les zones urbaines absorbent continûment 90 % de l'augmentation de population.

#### 7 | Les enjeux sont immédiats et la pression anthropique ne s'exerce pas seulement via le changement climatique.

Les problèmes de gestion de l'eau ne sont pas des problèmes à résoudre dans le futur, qui seraient liés au changement climatique, mais des dysfonctionnements d'aujourd'hui (exposition excessive aux risques d'inondation, insuffisance d'accès aux services essentiels et à l'hygiène pour les plus pauvres, surexploitation non durable).

La croissance de la population mondiale et l'évolution de ses modes de consommation et d'exploitation des ressources ont certes des effets indirects via les émissions de gaz à effet de serre, mais ils ont en premier lieu des effets directs et immédiats sur l'eau.

#### 8 | L'essentiel de la population habite sur les côtes ou le long des fleuves et des rivières.

La modification des politiques d'occupation des sols et l'adaptation des systèmes urbains pour plus de résilience au risque d'inondation sont des urgences.

La fertilité des terres alluvionnaires, la facilité du puisage de l'eau et d'évacuation des déchets par l'eau des rivières, ainsi que l'aptitude extraordinaire de la navigation au transport de pondéreux et donc au développement commercial expliquent ensemble cet extraordinaire attrait. Cette concentration des activités humaines dans des zones exposées aux inondations accroît de façon massive les risques de dommages liés aux crues.

Il est essentiel d'inverser la tendance de cette exposition croissante des populations et des activités économiques au risque (alors que nos sociétés attendent toujours plus de sécurité). **Les changements climatiques ne feront qu'accroître les difficultés.**

#### 9 | Sous la pression anthropique, la dégradation de la biodiversité des écosystèmes d'eau douce a été dramatique dans les cinquante dernières années,

notamment en Inde, en Asie du Sud-Est, en Afrique subsaharienne et en Amérique latine.

**Infléchir cette évolution est une responsabilité majeure à l'égard des prochaines générations.**

Après avoir examiné dans [le chapitre 1](#) les stocks et les flux d'eau sur la planète ainsi que les évolutions possibles, on aborde ici une autre dimension essentielle du sujet : l'évolution de la population humaine et du contexte socioéconomique dans lequel se place, et peut se placer dans le futur, la confrontation des besoins et des ressources. Les objectifs généraux de la communauté internationale convenus en 2015 entre les pays au sein des Nations Unies, les objectifs de développement durable (ODD) pour 2030, tracent une feuille de route ambitieuse.

## 2.1. Atteindre neuf à dix milliards d'habitants en 2050 ?

L'ONU (UN-DESA)<sup>22</sup> produit trois scénarios prospectifs qui montrent de forts contrastes (voir la figure 20).

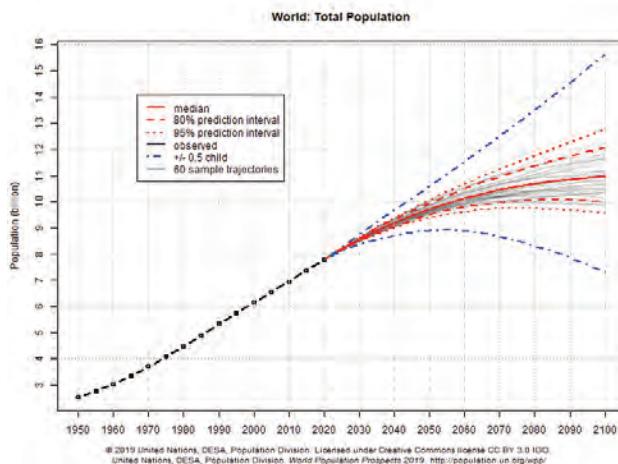


Figure 20 : Prévisions démographiques. Tirée de UN-DESA 2019.

L'incertitude est essentiellement liée au taux de fécondité. Il est actuellement de 2,5 enfants par femme. Le niveau entraînant une stabilisation est un taux de 2,1. Les scénario bas et haut sont à un taux de fécondité de +/- 0,5 enfant par femme par rapport au scénario médian. L'ONU retient le scénario médian et l'assortit d'intervalles de confiance qui limitent l'incertitude à +/- 500 millions en 2050 et +/- 1 milliard en 2100.

Alors que le cap des six milliards de Terriens était atteint vers 1999, l'ONU a d'abord supposé que la population pourrait se stabiliser à la fin du xx<sup>e</sup> siècle autour de 9,5 milliards (scénario moyen). Elle a ensuite révisé continûment à la hausse ce scénario médian. La dernière projection (2017) porte cette prévision du scénario médian pour 2100 à un peu plus de 11 milliards de personnes. En revanche, le scénario bas se traduit par une décroissance sensible de la population dès 2040 où elle culminerait à moins de 8,5 milliards alors qu'elle atteint déjà 7,6 milliards et augmente de l'ordre de 84 millions par an (0,12 %/an).

<sup>22</sup> Tous les deux ans, l'Organisation des Nations Unies (ONU) publie le rapport *World Population Prospects*.

Les évolutions envisagées par l'ONU des taux de croissance démographique sont sensiblement différentes selon les continents, même si elles sont toutes à la baisse, selon une tendance déjà amorcée (voir la figure 21).

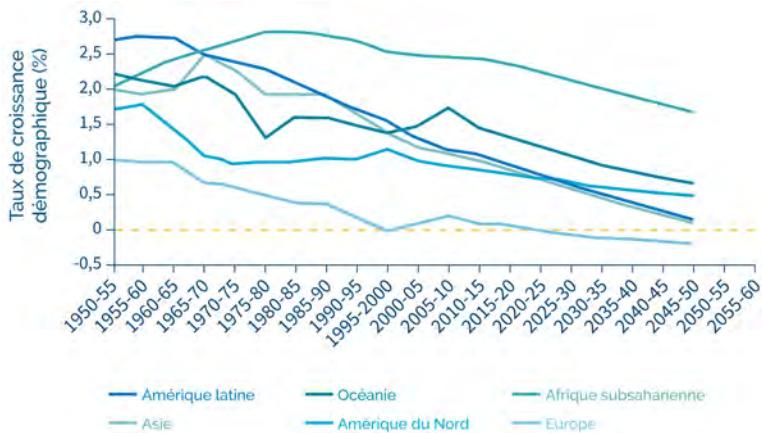


Figure 21 : Évolution des taux de croissance démographique par continents.

Tirée de Canning, Raja, Yazbeck, 2015, CC BY 3.0 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage).

## 2.1.1. Deux utopies contrastées : le pessimisme malthusien et l'optimisme de la théorie de la transition démographique

À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, Thomas Malthus avait émis l'hypothèse que les populations humaines augmentaient inexorablement du fait du besoin inné de procréer, alors même que la disponibilité en terres, le capital physique et les connaissances resteraient à un niveau inchangé ou augmenteraient à un rythme plus lent que celui de la population. Cela mettrait inévitablement une pression supplémentaire sur les ressources rares, en particulier sur la disponibilité alimentaire, conduisant à une aggravation de la faim, une mortalité élevée et des niveaux de vie réduits au minimum vital. Ce n'est qu'une fois atteint ce minimum vital que le taux de mortalité serait assez élevé pour juguler la croissance de la population (Malthus, 1798). Le scénario apocalyptique de Malthus n'a pas eu lieu, notamment grâce aux avancées des techniques agricoles et à l'industrialisation de l'agriculture, lesquelles ont augmenté la production de denrées alimentaires<sup>23</sup>.

Une vision inversement très optimiste de la croissance démographique a émergé dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, une grande population étant alors perçue comme stimulant l'innovation et les évolutions technologiques. La Banque mondiale a mis en avant le modèle de la *transition démographique* (voir la figure 22). On y considère que l'augmentation de population créée par la baisse des taux de mortalité enclenche une période intermédiaire de crise dans laquelle les

<sup>23</sup>. Dans ses travaux postérieurs, il a analysé les relations de l'offre et de la demande en économie, critiquant la vision de Jean-Baptiste Say de la création de la demande par l'offre et introduisant la notion de surproduction, analyse qui ensuite a conduit aux réflexions de Keynes sur les moyens de relance de l'économie. Dans le même temps, les théories et pratiques eugénistes d'une part et la fraction du mouvement anarchiste dénommée « néo-malthusienne » ont fini par céder la place aux mouvements en faveur de la régulation des naissances plutôt motivés par des questions de libre choix.

revenus sont faibles, mais où se construit une nouvelle économie productive et compétitive qui fait émerger une certaine prospérité. Celle-ci vient ensuite tempérer la croissance démographique par la baisse de la natalité. Ce processus est illustré à grande échelle par l'histoire de l'Asie, où les premières phases ont eu lieu dans la deuxième moitié du xx<sup>e</sup> siècle : la projection médiane des Nations Unies est fondée sur des hypothèses extrapolant cette dynamique (voir la figure 23).

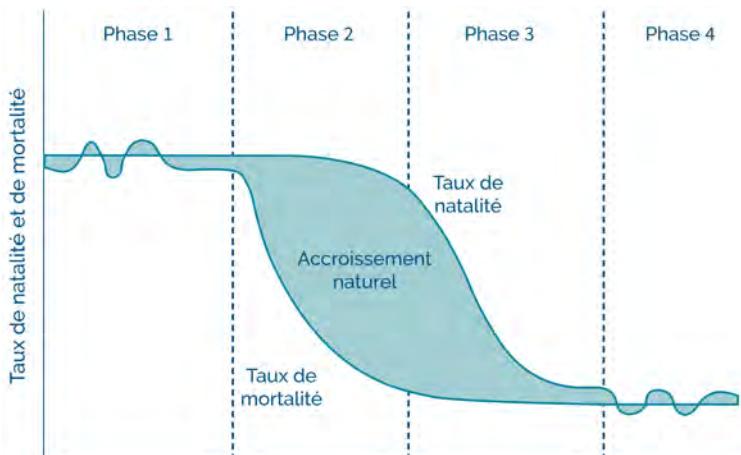


Figure 22 : Les phases de la transition démographique. Tirée de Canning, Raja, Yazbeck, 2015, CC BY 3.0 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage).

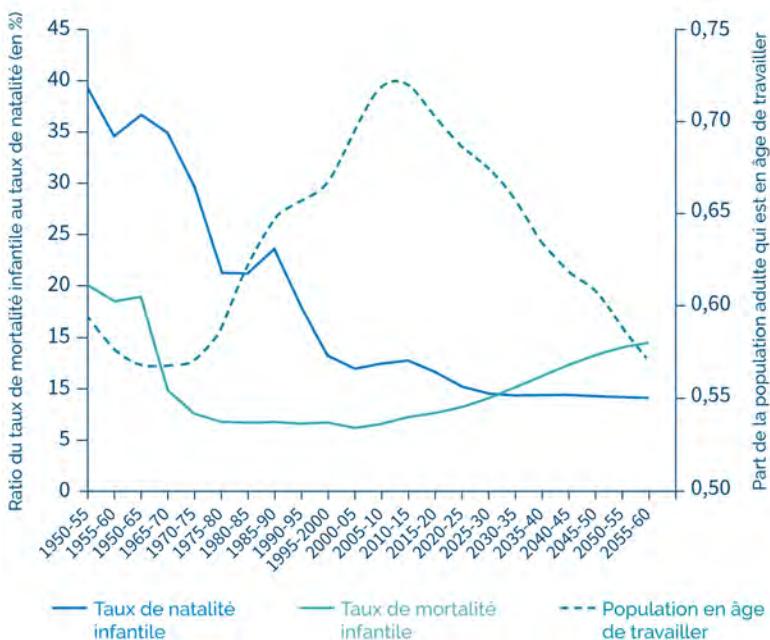


Figure 23 : L'Asie de l'Est : exemple de transition démographique. Tirée de Canning, Raja, Yazbeck, 2015, CC BY 3.0 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage).

La Banque mondiale relève cependant que l'Amérique latine a, dans le même temps, « raté ce rendez-vous des dividendes de la transition démographique ». Analysant les politiques publiques conduites par divers pays de ces deux continents, elle relève la différence :

« Un certain nombre de gouvernements d'Asie de l'Est ont promulgué des politiques pré-voyantes en matière d'éducation, de santé, de travail et d'économie, lesquelles leur ont permis de bénéficier pleinement du dividende démographique [...] l'Indonésie, la République de Corée, Singapour, Taïwan et la Thaïlande [...] L'échec de l'Amérique latine a été cuisant. Entre 1975 et 1995, la croissance annuelle du produit intérieur brut (PIB) par habitant de la région n'a été que d'un huitième de celui enregistré en Asie de l'Est (0,7 et 6,8 % respectivement). Si le Brésil, et nombreux d'autres pays d'Amérique latine, ont ensuite inversé cette tendance grâce à la hausse des cours mondiaux des matières premières et des changements de politiques sociales, il ne reste qu'une toute petite fenêtre d'opportunité pour une croissance économique tirant parti de facteurs démographiques favorables ».

Tirée de Canning, Raja, Yazbeck, 2015.

## 2.1.2. Revisiter la question de la démographie mondiale à l'aune des limites des ressources planétaires

Dans la mesure où l'ensemble des leviers d'action publics devra vraisemblablement être mobilisé pour faire face à l'accroissement des pressions anthropiques sur la planète et comme les mécanismes du développement ne parviennent pas à assurer les dividendes de la transition démographique, le débat sur les moyens permettant de tempérer la croissance de la population mondiale pourrait bien resurgir, au fur et à mesure que les difficultés s'accroîtront.

Dans les années 1970 déjà, le Club de Rome, *think tank* international, construisait un « modèle-monde » (Meadows *et al.*, 1972) annonçant une logique d'effondrement endogène, peu ou prou repris aujourd'hui par les thèses collapsologistes.

Dès les années 1980, notamment avec le célèbre rapport Brundtland (Brundtland, 1987), les messages concernant les enjeux de la politique de maîtrise des naissances se sont redéveloppés, tout en faisant l'objet de critiques justifiées (Tabutin, Thiltgès, 1992). C'est évidemment un débat délicat au plan éthique, le malthusianisme dévoyé ayant pu conduire aux pires excès.

Henri Léridon a comparé les projections du Club de Rome de 1972 avec la réalité constatée, qu'elles représentent assez fidèlement jusqu'à présent (ce qui s'explique bien par l'inertie des facteurs déterminants). Mais elles divergent radicalement des projections des Nations Unies émises en 2019 (Léridon, 2020) non seulement quantitativement mais aussi quant aux mécanismes en jeu : l'hypothèse basse des Nations Unies est liée à une faible natalité, alors que pour le Club de Rome elle est l'effet d'un puissant accroissement de la mortalité, résultant de la limitation des ressources.

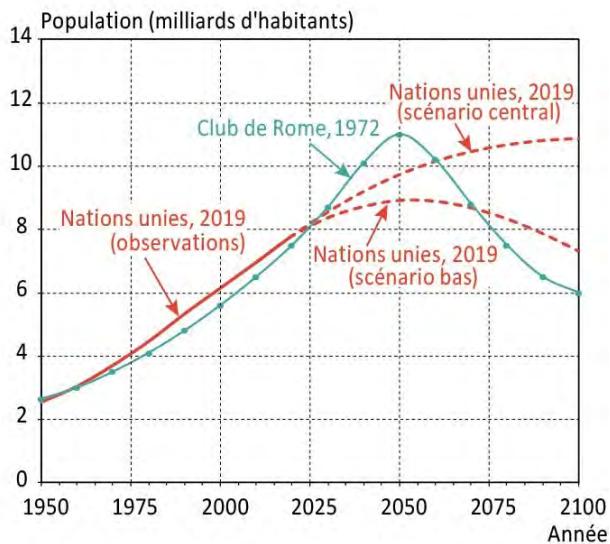


Figure 24 : Comparaison des projections du Club de Rome (1972) et des Nations Unies (2019).  
Tirée de Léridon, 2020.

### 2.1.3. Des contrastes régionaux qui conditionnent toute réflexion

Les inégalités que nous constaterons à travers les questions d'eau ne sont, si l'on veut bien y réfléchir, que le reflet des inégalités de situation des populations dans le monde : économiques et démographiques avant d'être environnementales. Les anamorphoses proposées par le site Worldmapper (accessible sur : <https://worldmapper.org>) les rendent aisément tangibles et leur consultation est fortement recommandée. Elles expliquent mieux qu'un discours pourquoi il est indispensable de s'attarder en particulier sur l'Afrique.

### 2.1.4. Plus de la moitié de la population mondiale est urbaine et cette part est croissante

Outre l'augmentation quantitative considérable que cela représente, il convient d'être conscient de la mutation majeure que représente l'urbanisation du tiers-monde. En 1960, deux tiers de l'humanité vivaient encore en milieu rural. Cette proportion atteignait la moitié de l'humanité en 2007 et son évolution ne montre à ce stade aucune inflexion (voir la figure 25).

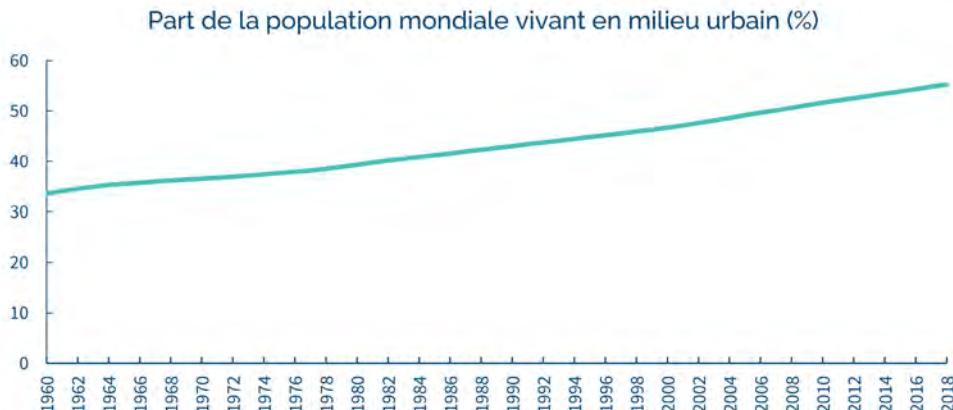


Figure 25 : Évolution de l'urbanisation dans le monde de 1960 à 2018. Source des données : Nations Unies.

Cette vague de fond de l'urbanisation pourrait donc aboutir à une proportion de deux tiers d'urbains bien avant 2040. Depuis 60 ans, les zones urbaines absorbent continûment 90 % de l'augmentation de population.

L'urbanisation s'est développée plus tôt en Amérique latine, manifestant des concentrations en mégapoles dès les années 1960-1970. La fin du xx<sup>e</sup> siècle a surtout vu l'Extrême-Orient s'urbaniser, en relation avec la croissance économique. Aujourd'hui, l'Afrique reste le siège d'un exode rural galopant. Où s'arrêtera cette tendance ? Les estimations se basent sur les taux atteints en Europe, en Amérique du Nord et du Sud, qui se stabilisent vers 75-85% d'urbains. Par ailleurs, le fléchissement de la natalité intervient souvent à la suite de l'exode rural.

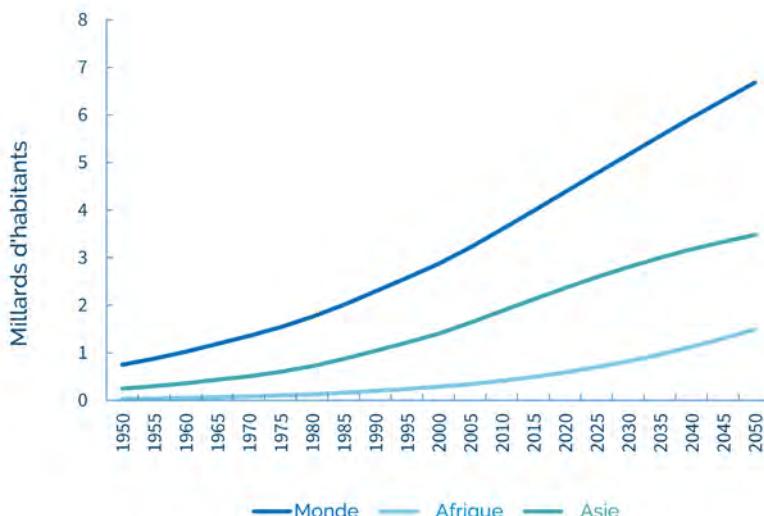


Figure 26 : Évolution de la population urbaine dans le monde, en Afrique et en Asie. Scénario médian pour les projections. Source des données : Nations Unies.

La concentration dans des aires métropolitaines de plus de 10 millions d'habitants se poursuit dans les pays émergents et en développement. En 1950, il y en avait 3 : New York, Tokyo et Londres. En 2015, elles étaient 45, dont huit dans des pays développés, dix-sept dans des pays émergents<sup>24</sup>, vingt dans des pays en développement.

En 2015, parmi les quatorze métropoles qui dépassaient 20 millions d'habitants, il y en avait :

- 2 au Japon (Tokyo : 42,8 ; Keihanshin - Osaka-Kyoto-Kobe : 19,8 en 2014) ;
- 2 en Chine (Shanghai : 24,2 ; Beijing : 21,7) ;
- 2 en Inde (Dehli : 26,4 ; Mumbai : 24,3) ;
- 3 ailleurs en Asie (Jakarta : 31,7 ; Séoul : 25,4 ; Manille : 24,1) ;
- 3 en Amérique (New York : 23,6 ; São Paulo : 21,1 ; Mexico : 20,9) ;
- 2 en Afrique (Le Caire : 23 ; Lagos : 22,8).

## 2.2. La pauvreté

### 2.2.1. L'Afrique, notamment l'Afrique subsaharienne, est confrontée à un défi majeur

La crise mondiale de l'eau trouve une dimension particulière dans le contexte africain (Roche, 2003a). En effet, l'Afrique accueillera dans les vingt prochaines années une population supplémentaire égale à celle de l'Europe aujourd'hui<sup>25</sup>. Avec la plus forte augmentation démographique prévue (voir la figure 21 ci-dessus) et un puissant mouvement de concentration urbaine, le continent africain est confronté à une mutation majeure, alors que la situation actuelle est d'ores et déjà plus que précaire<sup>26</sup>.

L'Afrique subsaharienne, qui a dépassé en 2010 un milliard d'habitants (17 % de la population mondiale), est censée voir sa population plus que doubler d'ici 2050 (2,2 milliards d'habitants, 24 % de la population mondiale) et atteindre 3,6 milliards d'habitants (35 % de la population mondiale) d'ici 2100. Sait-on se représenter le futur d'un pays comme le Nigéria, qui avait déjà 158 millions d'habitants en 2010 et qui atteindrait entre 400 et 600 millions d'habitants en 2060, dans quarante ans seulement ?

### 2.2.2. Les bidonvilles croissent

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°2

Comment caractériser la situation en Afrique ?

On considère généralement que près d'un tiers de la population urbaine dans les pays en développement vit dans un bidonville (une personne sur huit à l'échelle mondiale) et le taux atteint plus de 50 % par exemple à Mumbai et dans les villes d'Afrique subsaharienne. Cette proportion

<sup>24</sup>. La liste des pays émergents n'est pas établie de façon formelle. On a retenu ici les BRICS : Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud.

<sup>25</sup>. L'Afrique, qui comptait 2 fois moins d'habitants que l'Europe au début du xx<sup>e</sup> siècle, en compte 2 fois plus au début du xxi<sup>e</sup>.

<sup>26</sup>. Le PIB par habitant, quatre fois inférieur à celui de l'Europe occidentale en 1950, a stagné, voire décrû de 1980 à 1995, pour être aujourd'hui 12 fois plus faible qu'en Europe.

a décrue dans toutes les régions non développées du monde (voir la figure 27), tout en conservant de fortes disparités, mais ce progrès relatif n'a pas suffi à empêcher la population des bidonvilles de croître globalement de 689 millions en 1990 à 881 millions en 2014 (UN-Habitat, 2016 et UN-Habitat, 2020).

### VOIR ÉTUDE DE CAS N°3

#### Les bidonvilles

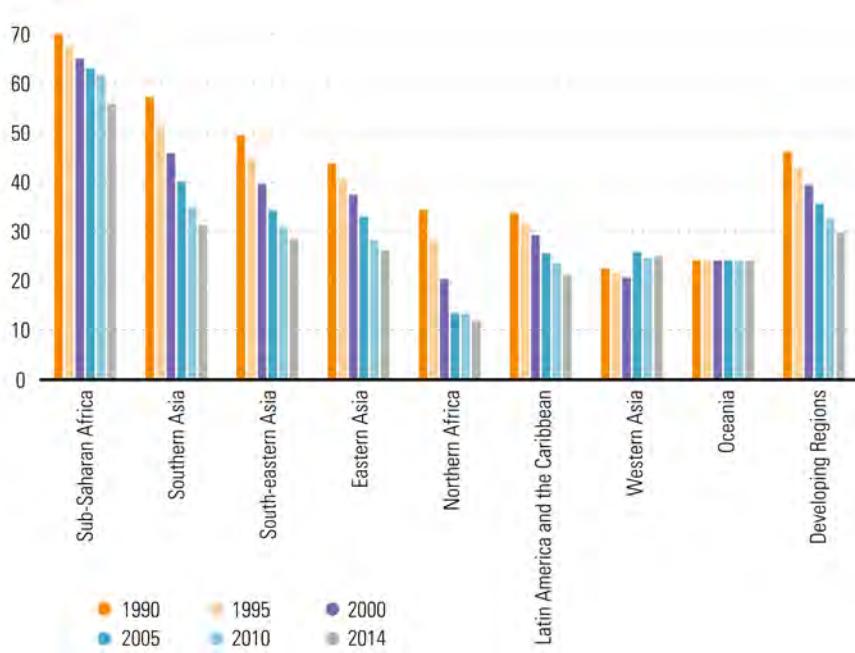


Figure 27 : Proportion d'habitants vivant dans des bidonvilles. Tirée de UN-DESA, 2016.

### 2.2.3. Le dénuement des zones rurales

La pauvreté n'est pas qu'urbaine, elle est en fait à 70% rurale. La Banque mondiale constate ainsi (Banque mondiale, 2016) :

« D'après les estimations les plus récentes, 10% de la population mondiale vivait avec 1,90 dollar par jour en 2015, contre presque 36% en 1990. Par rapport à 1990, le nombre d'habitants vivant dans l'extrême pauvreté a baissé de 1,1 milliard environ. En 2015, 736 millions de personnes disposaient de moins de 1,90 dollar par jour pour vivre, contre 1,85 milliard en 1990. Si toutes les régions du monde affichent une baisse des taux de pauvreté, celle-ci ne recule pas partout au même rythme : deux régions sont parvenues à ramener le taux d'extrême pauvreté à moins de 3 % (ce qui correspond à l'objectif fixé à l'horizon 2030) : l'Asie de l'Est-Pacifique (qui compte 47 millions d'habitants sous le seuil d'extrême pauvreté) et l'Europe-Asie centrale

(7 millions). L'Afrique subsaharienne abrite plus de la moitié de la population qui vit dans l'extrême pauvreté dans le monde. Dans cette région, le nombre d'habitants vivant avec moins de 1,90 dollar par jour a atteint 413 millions en 2015, soit un chiffre supérieur à l'ensemble des autres régions réunies. Si cette tendance se poursuit, l'Afrique subsaharienne concentrera en 2030 près de 90 % des personnes vivant dans l'extrême pauvreté. La population pauvre mondiale est majoritairement concentrée dans les zones rurales, peu instruite, employée dans l'agriculture et âgée de moins de 18 ans ».

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°4

Qui sont les pauvres ruraux ?

### 2.3. Exposition au risque d'inondation : une vulnérabilité qui s'accroît

La figure 28 montre qu'outre l'eau potable et l'assainissement, que nous aborderons en détail dans la deuxième partie, la question des inondations représente un enjeu majeur.

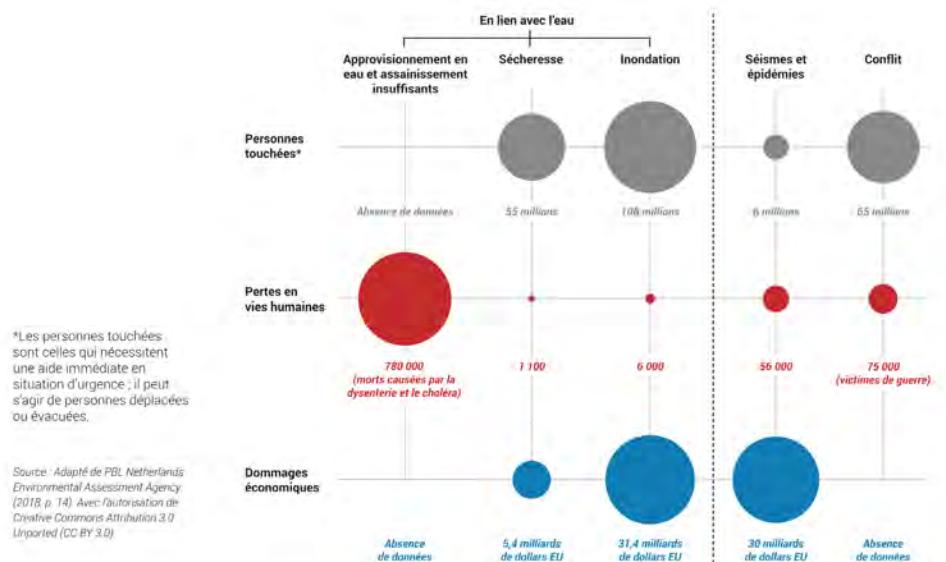


Figure 28 : Incidence annuelle, en moyenne, du manque de services d'eau potable et d'assainissement, des catastrophes liées à l'eau, des épidémies, des tremblements de terre et des conflits.

Tirée de UNESCO, 1999, CC BY-SA 3.0.

#### 2.3.1. Des impacts économiques et sociaux majeurs

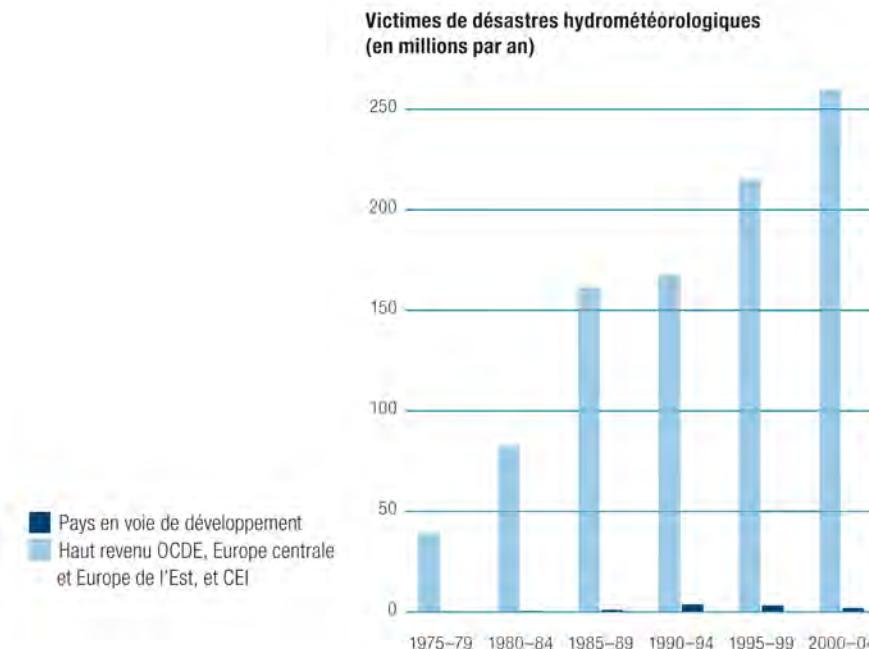
Les inondations peuvent coûter plusieurs pour cent du PNB et constituer une source de blocage du développement. Le bilan établi par la Croix-Rouge en 1997 indique que plus de 1,5 milliard d'individus ont été affectés par les inondations entre 1971 et 1995. Ce chiffre inclut 318 000 décès et plus de 81 millions de personnes déplacées. Entre 2000 et 2019, ont été recensés 651 milliards

de dollars de dommages, 1,65 milliard de personnes affectées et un peu plus de 100 000 morts (CRED, 2020).

Parmi l'ensemble des désastres naturels, la situation est extrêmement contrastée : pour un poids équivalent dans les dommages économiques, les inondations concernent plus de 12 fois plus de personnes que les tremblements de terre mais 6 fois moins de morts. Les dix pays qui ont été les plus affectés (nombre de morts par million d'habitants) sont essentiellement situés en Asie. L'incidence accrue de maladies hydriques et septiques fait partie du cortège qui les accompagne. Si les pays d'Asie comptent les inondations les plus dramatiques et les plus fréquentes, des pays au climat aride, tels que le Yémen, la Tunisie ou l'Algérie connaissent des crues rares, brutales et meurtrières.

Les dommages économiques liés aux inondations peuvent être du même ordre de grandeur dans les pays pauvres que chez les plus riches (30 milliards de dollars américains pour les crues de 1996 et de 1998 en Chine). Bien différentes sont les pertes en vies humaines : le nombre de morts pour 1 dollar américain de dégâts croît avec la pauvreté d'une nation. Les grands désastres nécessitant une aide internationale avaient déjà significativement augmenté entre les années 1950 et 1980 (Berz, 2001).

Les populations touchées par des désastres hydroclimatiques ont augmenté sensiblement et sont essentiellement situées dans les pays en voie de développement (voir la figure 29).



**Figure 29 :** Les catastrophes hydro-climatiques touchent une population croissante, essentiellement située dans les pays en développement. Tirée de PNUD, 2009, CC BY-SA 3.0 (image modifiée pour le présent ouvrage).

Les pertes sur capitaux assurés ont fortement augmenté depuis le début des années 1990. Les deux pays cumulant les plus grands montants de dommages, la Chine et l'Inde, ont connu une moyenne de respectivement vingt et dix-sept grandes inondations par an de 2000 à 2019, affectant au total 900 et 345 millions d'habitants, soit 55 % et 21 % du total mondial.

### 2.3.2. Effets du changement climatique

La part du changement climatique dans ces phénomènes constatés est sans doute faible. En effet, la concomitance de l'accroissement des dommages dus aux catastrophes avec l'amorçage du réchauffement climatique constaté traduit essentiellement le fait que ces deux phénomènes sont pilotés par des forces motrices identiques (accroissement démographique, évolution des modes de vie et des usages). La plus forte exposition aux risques des populations est directement l'effet d'une occupation accrue de zones exposées, en raison de la rareté de l'espace dans des zones à forte densité de population et suffit pour expliquer l'augmentation des dommages. Le maintien de bas niveaux de vie et d'équipements ne permet pas le recours à des solutions adaptées aux risques (construction dans des zones plus difficiles, mais moins exposées). L'accroissement des pertes sur des biens assurés, essentiellement dans les pays développés, traduit pour partie des expositions inconsidérées, des erreurs qui auraient pu être facilement évitées, mais aussi le renforcement des mécanismes assuranciels eux-mêmes.

La situation historique des installations humaines, y compris jusqu'à aujourd'hui, n'est donc pas en adéquation avec les risques d'inondations. La relative rareté des événements occasionnant les dommages les plus massifs conduit à un faisceau de comportements individuels et de décisions collectives qui ont été à l'origine d'une exposition excessive à ceux-ci. Corriger ces écarts n'est donc pas une obligation due au changement climatique mais un effort d'amélioration de la robustesse et de la résilience de nos activités et installations qui est nécessaire sans attendre (Roche, 2005).

Il ne fait cependant pas de doute que les évolutions climatiques seront de façon croissante des facteurs d'aggravation de situations déjà critiques et de crises déjà récurrentes.

### 2.3.3. Effets des aménagements

Indépendamment des évolutions climatiques, certains aménagements humains peuvent contribuer à l'aggravation des crues. Une déforestation massive contribue à une accentuation des pointes de crue en tête de bassin, de même que l'imperméabilisation des petits bassins urbanisés. Les aménagements hydrauliques peuvent avoir des effets sur le régime sédimentaire et la morphologie fluviale conduisant à des modifications sensibles des risques de débordements.

### 2.3.4. Diminuer la vulnérabilité des biens et des personnes

Le facteur principal d'évolution des coûts est sans conteste celui de la valeur des biens exposés dans les zones inondables, indépendamment de toute évolution des aléas. Au-delà de l'évolution générale du PNB, en l'absence de mesures draconiennes de maîtrise de l'occupation des sols, ces zones constituent en effet un territoire privilégié d'accueil des activités humaines et concentrent

dramatiquement les activités. Le bénéfice immédiat l'emporte sur toute autre considération. La concentration urbaine en accroît l'impact et la situation peut se résumer en quelques constats.

Malgré des efforts d'aménagements considérables, les villes des pays développés comme celles des pays pauvres sont mal adaptées à l'existence de ce risque pourtant prévisible, bien connu et facile à évaluer. Cette inadaptation tient certes pour une part à l'inconscience d'une extension urbaine relativement récente en zone inondable, mais plus fondamentalement, à l'existence de l'ensemble de l'agglomération autour du fleuve, depuis ses installations les plus anciennes, et au phénomène de boule de neige qui vient agglutiner aux installations existantes les nouveaux établissements. La fragilité des centres villes historiques est réelle et les centres de décision majeurs sont inondés en cas de crue importante.

Par ailleurs, c'est de plus en plus la complexité et la fragilité des systèmes et des réseaux urbains modernes qui transforment un épisode somme toute supportable en catastrophe humanitaire, par un effet de château de carte qui vient induire des conséquences économiques dans des périmètres très largement supérieurs à ceux qui sont réellement inondés. Les efforts d'aménagement et les politiques d'occupation du sol vertueuses engagées sont certes utiles et amplement souhaitables, mais ne s'appliquent en pratique que là où il y a le moins d'enjeu à les mettre en place et où ils ne modifieront pas sensiblement la scène et les enjeux. Inexistants dans les métropoles en pleine explosion démographique, ils concernent les périphéries d'agglomérations de pays développés dont les taux de croissance démographique sont faibles.

Enfin, les efforts d'adaptation des réseaux urbains et du dispositif de gestion de crise sont en général minimes au regard des enjeux, alors que l'efficacité économique de ces efforts est pourtant évidente et considérable.

C'est donc bien une inadaptation à trois niveaux qui doit aujourd'hui être constatée :

- structurelle : les avantages trouvés successivement dans l'occupation des zones inondées ont conduit à disposer aujourd'hui d'une ville qui occupe de façon inadéquate ces espaces ; si l'on savait aujourd'hui reconstruire, ce n'est pas cette urbanisation qui prévaudrait (ceci conduit notamment à la notion de *build back better* : mieux reconstruire après les catastrophes) ;
- fonctionnelle : la ville vit de plus en plus aujourd'hui sans prendre en compte le risque auquel elle est exposée et en multipliant artificiellement les conséquences d'une inondation par simple impéritie ;
- organisationnelle : l'impréparation de la gestion de crise vient ajouter la désorganisation et l'inadéquation potentielle des décisions à la vulnérabilité des systèmes.

## 2.4. Biodiversité : la dégradation des écosystèmes aquatiques terrestres est d'une rapidité et d'une ampleur inégalées

S'ils ne représentent que moins de 1 % de la superficie des terres émergées, les cours d'eau, lacs et zones humides rendent des services multiples, dits « services écosystémiques », dont les hommes sont immédiatement et visiblement tributaires (patrimoine génétique, épuration,

effet tampon pour les crues, loisirs nautiques, pêche, etc.), mais ils constituent par eux-mêmes un patrimoine exceptionnel<sup>27</sup>.

## 2.4.1. Des pertes avérées de biodiversité sous la pression anthropique

Les atteintes à ces milieux sont nombreuses. Alors que les volumes pêchés dans les eaux marines sont à peu près stabilisés depuis 1985 (80,5 Mt en moyenne de 1986 à 1995 et 96,4 Mt en 2018), la pêche dans les eaux continentales a doublé (de 6,4 Mt à 12,0 Mt)<sup>28</sup> dans la même période. Mais le phénomène le plus marquant est que l'aquaculture en eaux continentales est passée dans le même temps de 8,6 Mt à plus de 51,3 Mt, bien supérieure à l'aquaculture dans les eaux marines qui est passée de 6,3 Mt à 30,8 Mt (FAO, 2020).

Par ailleurs, 60 % des 227 cours d'eau les plus importants sont fortement ou modérément cloisonnés par des barrages, des dérivations ou des canaux.

L'épuration des eaux usées est encore largement défaillante, ce qui aboutit à une contamination généralisée du milieu dans de nombreux pays émergents ou en développement, où la densité de population et l'activité industrielle ne sont pas encore accompagnées des outils de dépollution adéquats.

Enfin, on estime qu'à l'échelle mondiale, 90 % des zones humides ont disparu depuis 1700, dont 50% durant le seul xx<sup>e</sup> siècle, jusqu'à ce que la convention de Ramsar<sup>29</sup> ne commence à les protéger en partie et à en modérer la dégradation là où elle est efficacement mise en œuvre.

Si l'on se réfère à l'évolution de l'indice planète vivante<sup>30</sup> (WWF, 2020), c'est dans le compartiment des eaux douces que la biodiversité a le plus décrue et cette perte a été massive. Pour les 3 741 populations suivies pour ces écosystèmes dans le monde, cet indice a diminué en moyenne de 84 % (la fourchette d'estimation est de - 89 % à - 77 %) entre 1970 et 2016. Pour l'ensemble des écosystèmes (incluant les forêts, les océans, etc.), cette perte moyenne est globalement de - 68 %. Cette perte semble s'infléchir depuis 2010 mais elle a été extrêmement marquée (en moyenne 4 % par an). Ce déclin concerne les reptiles, les amphibiens et les poissons ; elle est particulièrement élevée pour la mégafaune (esturgeons, poissons-chats du Mékong, dauphins de rivière, loutres, castors, hippopotames, etc.). Si toutes les écorégions sont concernées, le déclin

<sup>27</sup>. Pour une présentation complète de ces dimensions, et de nombreuses illustrations sur le cas français voir par exemple le rapport établi dans le programme EFESE (CGDD, 2018).

<sup>28</sup>. La FAO relève : « Cependant, cette tendance à la hausse continue de la production de la pêche continentale peut être trompeuse, car l'augmentation des captures peut être partiellement attribuée à l'amélioration de la notification et de l'évaluation au niveau des pays ».

<sup>29</sup>. Adoptée en 1971, la convention de Ramsar est entrée en vigueur en 1975 et regroupe aujourd'hui 169 pays, dont la France depuis 1986. En 2020, plus de 2400 sites à travers le monde sont reconnus d'importance internationale pour une superficie totale de plus de 2,5 M km<sup>2</sup> (presque cinq fois la surface de la France métropolitaine). À cette même date, la France comptait 46 sites inscrits sur la Liste Ramsar, pour une superficie totale de plus de 3,6 millions d'hectares. Les parties contractantes s'engagent à gérer ces sites afin de maintenir leurs caractéristiques écologiques et de conserver leurs fonctions et valeurs essentielles pour les générations futures.

<sup>30</sup>. L'indice planète vivante (IPV) suit désormais l'abondance de près de 21 000 populations de mammifères, d'oiseaux, de poissons, de reptiles et d'amphibiens dans le monde. L'indicateur se base sur les données concernant les populations d'animaux sauvages. Ces courbes démographiques sont rassemblées dans l'IPV afin d'obtenir depuis 1970 un indice égal à la moyenne des pourcentages de variation des populations.

est particulièrement marqué dans les Néotropiques<sup>31</sup> (- 94 %), l'Indo-Pacifique (- 82 %) and les Afrotropiques (- 75 %).

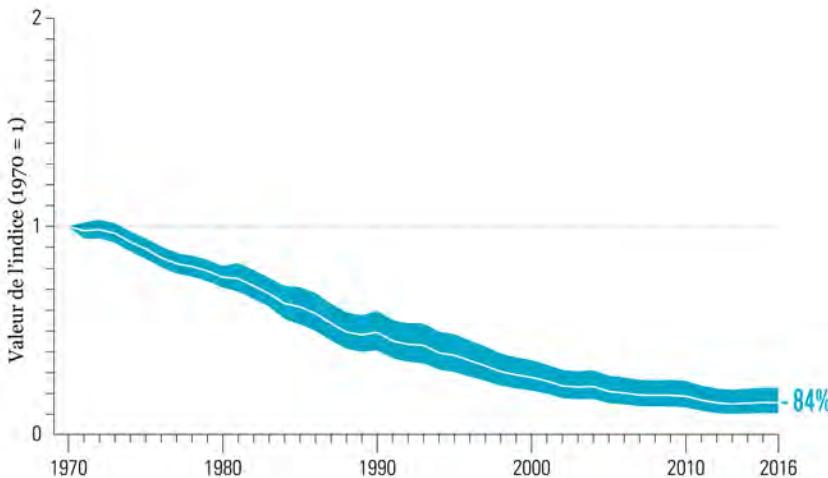


Figure 30 : Indice planète vivante pour l'eau douce de 1970 à 2016 © WWF, 2020. Tous droits réservés.  
Tirée de WWF, 2020.

## 2.4.2. Pourquoi les milieux naturels ne sont-ils plus une variable d'ajustement ?

Cette dégradation constatée est bien la résultante du peu de cas que les hommes ont fait au xx<sup>e</sup> siècle notamment des écosystèmes, considérant ces milieux comme des ressources à exploiter ou des espaces où s'étendre et bien peu comme un patrimoine à préserver. L'extrapolation de ces tendances n'est pas soutenable et il faut au plus vite infléchir cette courbe.

Aller vers plus de soutenabilité fait intervenir trois types de solidarités : la solidarité amont-aval, la solidarité internationale et la solidarité inter-générationnelle.

Tout d'abord, les milieux fluviaux subissent les dégradations tant qualitatives (pollutions) que physiques (modifications et limitations des espaces de mobilité des cours d'eau, ouvrages et modifications de flux de sédiments) en amont et sur tout le territoire des bassins et les répercutent plus en aval, jusqu'aux zones littorales. La gestion intégrée à l'échelle des bassins-versants et les solutions dites « fondées sur la nature » traitées au chapitre 8 sont conçues pour y apporter des réponses appropriées.

Au niveau mondial, dans un contexte de compétition internationale et de libre circulation des biens et des personnes, seuls les efforts consentis collectivement sont acceptés. Les pays ou territoires qui mèneraient des stratégies vertueuses, mais totalement autonomes, se voient

<sup>31</sup>. Néotropiques : Amérique latine ; Afrotropiques : Afrique subsaharienne et Afrique du Sud ; Indo-Pacifique : Inde, Asie du Sud-Est, Pacifique et Australie.

concurrencés par du *dumping* environnemental auquel ils ne peuvent résister : la question de l'alimentation développée [au chapitre 4](#) peut être considérée comme un exemple de ces difficultés.

Enfin, du point de vue inter-générationnel, malgré la résilience importante des milieux vivants, leur appauvrissement peut atteindre des seuils de non-restaurabilité. Leurs évolutions s'inscrivent dans le long terme pour plusieurs raisons :

- du côté des sociétés humaines : entre la prise de conscience, l'élaboration et l'adoption des mesures, ainsi que le fait que les décisions correctives n'aient que rarement des effets immédiats sur les pratiques, les corrections de trajectoire prennent souvent l'équivalent d'une génération ; raison de plus pour anticiper ;
- du côté des milieux : le temps de récupération peut être très long, notamment quand les eaux souterraines ont été polluées (plusieurs centaines d'années) ; ce temps est parfois si long qu'on peut considérer certains dégâts comme irréversibles.

*Chapitre suivant : Le bilan des usages et des ressources et l'empreinte eau*

# Pour approfondir

## ÉTUDES DE CAS

N°2

Comment caractériser la situation en Afrique ?

N°3

Les bidonvilles

N°4

Qui sont les pauvres ruraux ?

## N°2 | Comment caractériser la situation en Afrique ?

À regarder uniquement l'évolution du PIB par habitant de l'Afrique subsaharienne, on note une embellie depuis les années 2000. La Banque mondiale y voit l'effet de signes positifs durables :

« Trois éléments fournissent des indices sur le redressement économique qui a lieu depuis le milieu des années 1990 : la part de la population en âge de travailler a augmenté, le montant de capital par travailleur a fortement augmenté, en particulier de 2005 à 2010, et la productivité globale des facteurs (PGF) a fortement augmenté. Bien que l'éducation et la structure d'âge étaient favorables à la croissance, leurs effets sont lents et n'expliquent pas suffisamment l'essor actuel. Pour mieux comprendre les raisons de cet essor, il faudra regarder le taux d'investissement, les flux de capitaux et les progrès technologiques.

La croissance économique est étroitement liée à l'investissement public, sous réserve que les pays gèrent leur dette de manière durable. Pour cette raison, les investissements publics dans les infrastructures sont souvent utilisés pour stimuler l'économie et promouvoir la croissance. Cependant, compte tenu de leurs niveaux élevés de la dette et de l'espace budgétaire limité, les pays africains n'ont pas eu la possibilité d'utiliser l'investissement public pour stimuler l'économie et l'investissement privé a joué un rôle plus important que l'investissement public dans l'investissement global. Cela est peut-être en train de changer, puisque les pays ont peu de dettes, un environnement fiscal plus solide, des économies en général plus saines et de plus importants recettes tirées des ressources naturelles depuis la fin des années 2000 ».

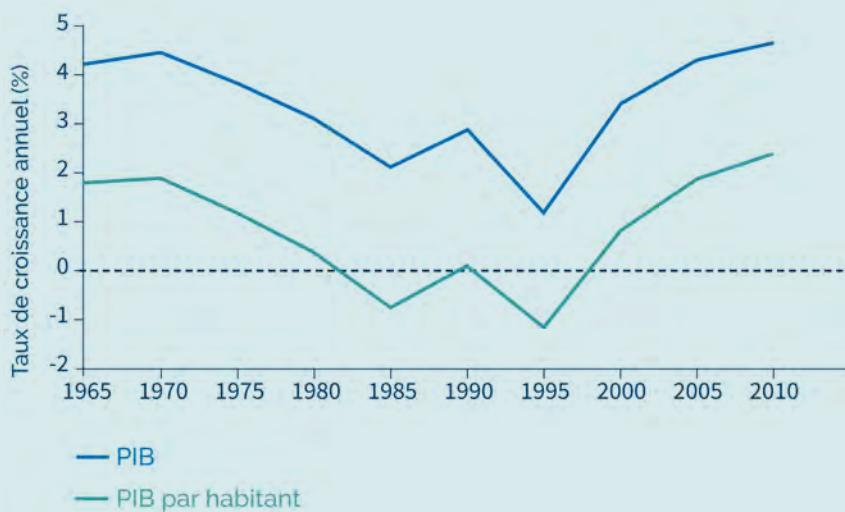


Figure 31 : Taux de croissance du PIB et du PIB/hab. de l'Afrique subsaharienne.  
Tirée de Canning, Raja, Yazbeck, 2015, CC BY-SA 3.0 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage).

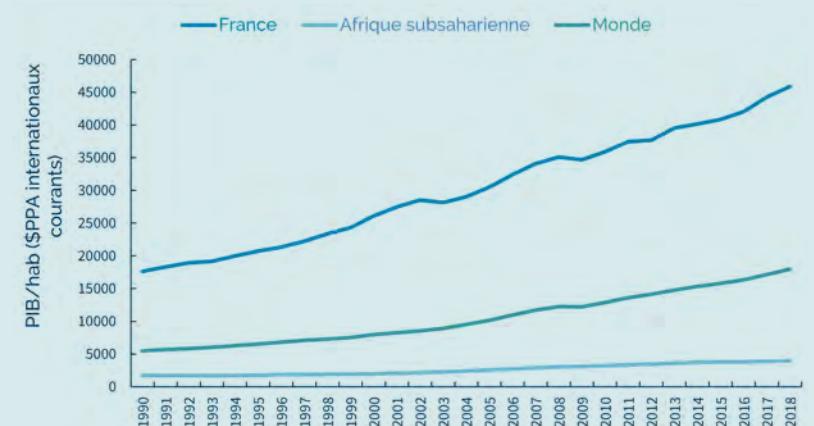
Selon l'indicateur qui traduit le moins mal possible le pouvoir d'achat collectif (PPA)<sup>32</sup>, on pourrait

se réjouir que sa stagnation de 1990 à 2000 ait été suivie de son doublement de 2000 à 2018

<sup>32</sup>. PIB par habitant basé sur les taux de parité des pouvoirs d'achat (PPA). Le PIB en PPA est le produit intérieur brut converti en dollars internationaux courants au moyen des taux de parité des pouvoirs d'achat (PPA). Un dollar international a le même pouvoir d'achat dans leur pays qu'un dollar américain aux États-Unis. Le PIB au prix des acheteurs est la somme de la valeur ajoutée brute de tous les producteurs résidents d'une économie à laquelle on ajoute toutes les taxes sur les produits et on retranche les subventions non incluses dans la valeur des produits. Elle est calculée sans effectuer de déductions pour la dépréciation des biens fabriqués, la perte de valeur ou la dégradation des ressources naturelles (source : Banque mondiale).

(de 2 à 4 k\$) si l'on ne constatait pas que dans le même temps le même indicateur est passé pour la France, par exemple, de 18 k\$ en 1990 à 45 k\$

(chiffre également moyen de l'Union européenne), soit un quasi-triplement, et que pour le monde entier il a plus que triplé (de 5,5 à 18 k\$).



40 % de la population de l'Afrique sub-saharienne vit en dessous du seuil de pauvreté de 1\$/jour. Parmi les 45 pays ayant les plus faibles indicateurs de développement humains, 35 sont en Afrique. La dette globale des pays représente 67,5 % du PIB, avec de grandes variations nationales.

La Banque africaine de développement (Kabbaj, 2001) considérait à la charnière du siècle que, pour réduire la pauvreté de moitié conformément aux objectifs du millénaire pour le développe-

ment, soit quatre millions de personnes passant chaque année au-dessus du seuil de pauvreté entre 2000 et 2015, il serait nécessaire que les pays à plus faibles revenus connaissent une croissance continue du PIB de 8 % par an. Ce n'est évidemment pas ce qui s'est passé.

Une partie de l'Asie a connu une situation similaire à celle de l'Afrique avant d'opérer sa transition démographique et de voir le décollage économique des tigres asiatiques (voir § 2.1).

## REVENIR AU COURS

### § 2.2.2

## N°3 | Les bidonvilles

L'urbanisation sauvage qui accueille la majeure partie des nouveaux habitants des mégapoles des pays en développement procède d'un phénomène sensiblement différent de ceux qui ont créé les développements urbains, même très spectaculaires, du XIX<sup>e</sup> et de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, dont le moteur avait été l'attractivité de l'emploi industriel en plein essor.

Aujourd'hui, sur fond de disqualification des productions paysannes, elle répond à un déséquilibre démographique majeur lié à la baisse relative de la mortalité infantile<sup>33</sup>, et se poursuit inexorablement, même en situation de crise économique, ne laissant aucun espoir d'emploi ni de revenus (les taux de chômage dans les mégapoles ont atteint jusqu'à 50 % dans les années 1980 et n'ont pas diminué depuis).

Aujourd'hui, la collectivité urbaine, loin de l'appeler de ses vœux, y voit une source de trouble et de déséquilibre qu'elle tente d'endiguer tant bien que mal. Certains de ces quartiers progressent de 10 % à 20 % par an.

Cette urbanisation spontanée, généralement sans support légal, exécutée par autoconstruction, se développe dans les pires conditions de site, en occupant en général les territoires les plus ingrats : fonds de vallées marécageux, zones exposées aux inondations, flancs de collines soumis au ruissellement, au ravinement, aux coulées de boues, etc. De ce fait, ce sont les plus coûteux à équiper en services publics, du fait de la longueur de canalisations, de l'instabilité des terrains, de la profondeur des fondations ou de l'importance des voiries nécessaires pour les transports publics. Dans ces lieux d'accueil par défaut de la grande pauvreté, la possibilité de prise en charge par les habitants y est la plus réduite et dans le même temps, ce sont ces territoires sur lesquels les investissements collectifs sont les plus faibles.

Les bidonvilles posent bien entendu le plus de problèmes, tant quantitatifs (énormité des populations déracinées), que juridiques et techniques, qui

mettent en échec les stratégies conventionnelles de raccordement. Les modes d'approvisionnement et l'assainissement doivent être adaptés aux diverses situations en sachant que le provisoire dure souvent longtemps. Il existe de nombreuses solutions légères pour approvisionner en eau et assainir en urgence. Dans les cas de bidonvilles « organiques » aux densités très fortes, la première contrainte est d'ailleurs souvent la mise à disposition de réserves de lutte contre les incendies.

Le premier obstacle à la fourniture de services d'eau aux quartiers d'habitat informel est parfois le refus des responsables techniques d'entériner la situation de fait que représente l'occupation illégale de terrains ou d'habitats. Le motif peut en être le droit de propriété publique ou privée : bien souvent, les propriétaires privés font mieux respecter leurs droits que les pouvoirs publics (les réserves foncières inutilisées en attente de financements sont une cible favorite des squatteurs..). Le motif peut être une insécurité du site interdisant d'y pérenniser des installations : à São Paulo, par exemple, mais aussi dans bien des villes, des familles se sont installées sur les échangeurs d'autoroutes, les berges de cours d'eau, les anciennes décharges. L'économie de la récupération dans les décharges en activité est une réalité commune et non l'exception.

Les stratégies de relogement systématique en grands ensembles d'habitat social ont fait place, au fil des années, à l'amélioration sur place quand c'est possible et à l'aide à l'autoconstruction. Des occupations de terrains ont pu être planifiées et accompagnées par des acteurs sociaux. Ainsi, l'autoconstruction a pu être assistée par des architectes qui ont facilité le développement de réseaux viaires adéquats : dans ce cas, des quartiers surgissent, déjà structurés, même si leur équipement est encore insuffisant. La régularisation juridique ouvre la voie d'une viabilisation définitive, avec la construction des réseaux souterrains.

<sup>33</sup>. Jusque dans les années 1930, le taux de natalité très élevé était équilibré par une mortalité infantile très élevée (notamment liée à la brutalité du sevrage du lait maternel). Le taux moyen de natalité pour les années 1990 est de 4,5 % (la moyenne mondiale est de 2,7 %), avec un taux de mortalité ramené à 1,5 %.

En cas de régularisation sur place, une approche systémique des services de base sera bien souvent profitable. En effet, on ne peut faire d'assainissement sans résoudre la question des déchets solides, sinon l'engorgement est garanti. De plus, l'installation sur des terrains instables est cause d'érosion et de glissements de terrains lors des pluies. La viabilisation et les terrassements sont généralement nécessaires. Enfin, la question des eaux pluviales (infiltration ou stockage possible des eaux de pluie) est également essentielle.

Les besoins communautaires sont donc à articuler avec la planification par filière technique, telle qu'elle se pratique dans les grands projets. On voit ici l'importance de la gestion au plus près des populations. C'est pourquoi l'agence des Nations Unies Habitat, entre autres, insiste tellement sur la décentralisation nécessaire des politiques urbaines.

#### REVENIR AU COURS

##### § 2.2.2

N°4

## Qui sont les pauvres ruraux ?

Source : FAO : <http://www.fao.org/reduce-rural-poverty/overview/qui-sont-les-pauvres-ruraux/fr/>

La plupart des pauvres ruraux sont des exploitants familiaux, des producteurs de subsistance ou des ouvriers agricoles sans terre. Ils vivent de la pêche, de l'élevage pastoral ou de la forêt et ont peu accès aux moyens de production.

Les familles vivant en milieu rural dépendent de plus en plus de revenus non issus de l'agriculture. Lorsque les infrastructures et les services de base font défaut, qu'il est difficile d'obtenir un crédit et que les institutions publiques sont déficientes, ce sont les petites entreprises rurales et les personnes qui vivent de revenus non agricoles qui en souffrent le plus.

Sans protection sociale, ce sont les pauvres qui sont les plus vulnérables, notamment en situation de handicap ou de grand âge. Les femmes rurales et les membres de ménages dirigés par une femme sont aussi aux prises avec des difficultés lorsqu'il s'agit de maintenir des moyens d'existence substantiels, car ces personnes sont plus susceptibles que d'autres d'être victimes de discrimination dans l'accès aux ressources productives (les terres par exemple), les services de vulgarisation (comme la formation technique) et les marchés.

#### REVENIR AU COURS

##### § 2.2.3



# Chapitre 3 | Faire le bilan des usages et des ressources

## Résoudre un casse-tête méthodologique

### À RETENIR

10

Comment faire le calcul de la quantité d'eau que l'on peut « cueillir » au passage ? Comment une ressource

sans cesse renouvelée, épurée par l'homme, ou naturellement par les écosystèmes et finalement « distillée » par le cycle évaporation-précipitation peut-elle être surexploitée ?

À peu près quoi que fasse l'homme, c'est sans effet notable sur la quantité d'eau présente sur la planète. Mais ce n'est pas sans effet localement. L'eau est lourde à porter alors que l'évaporation/précipitation la dépose sur les reliefs et la gravité la transfère gratuitement de haut en bas des bassins-versants. À de rares exceptions, certes spectaculaires, mais de peu de poids à l'échelle planétaire (transferts d'eau du Sud vers le Nord de la Chine), l'homme ne peut au mieux que la cueillir au passage de son cycle et la restituer le moins polluée possible. De même, il ne peut la dessaler qu'à un grand prix énergétique, alors que l'évaporation du cycle de l'eau le fait gratuitement. Quant à déplacer des icebergs, ce n'est pas une réponse crédible à grande échelle.

Il faut donc bien faire localement avec l'eau qui est disponible.

On estime généralement entre 10 000 et 12 000 Gm<sup>3</sup>/an cette ressource disponible pour les usages. Le système hydrologique est un tout : prélever dans les nappes souterraines influence évidemment les débits de surface.

Ressources et usages sont en fait indissociables et ne peuvent être évalués qu'en ensemble. La notion de ressource n'est en effet pas définie de façon absolue, mais relativement à l'usage qui en est fait.

11

La réutilisation des eaux usées, après des traitements d'épuration approfondis, ne cesse de se développer.

La façon la plus simple d'évaluer les impacts des activités humaines et d'étudier la façon de les concilier, est d'en mesurer les prélevements et les consommations.

Le prélevement (3,8 Gm<sup>3</sup>/an en 1995, 4 Gm<sup>3</sup>/an en 2014) est la quantité soustraite au milieu pour répondre à l'usage. La consommation (2,1 Gm<sup>3</sup>/an en 1995, 2 Gm<sup>3</sup>/an en 2014) est la partie de ce prélevement qui n'est pas restituée à ce même milieu : par exemple, pour un usage agricole, c'est la quantité d'eau évapotranspirée par les plantes durant leur culture et celle qui est exportée de ce milieu lors de la récolte.

Une prospective collective conduite autour de l'an 2000 (« Vision pour l'eau pour 2025 ») envisageait des croissances fortes dans un scénario tendanciel (*business as usual*). La réalité a été plus proche du scénario de maîtrise qui était alors envisagé, signe des efforts consentis pour économiser l'eau. Les prévisions établies récemment renouvellent cette mise en garde : sans mesures fortes, les consommations reprendront leur croissance.

La « Vision pour l'eau pour 2025 » introduisait également l'idée que la vulnérabilité des populations n'était pas mesurée que par un ratio d'« eau disponible par habitant » mais aussi par un degré de fragilité lié au contexte social, économique et de gouvernance des pays. Cette approche reste plus que jamais d'actualité.

**12****21 % de la population mondiale vit dans des territoires qui ne bénéficient que de 2 % du total des ressources en eau**

**en eau** : aussi paradoxal que cela puisse sembler, l'eau, aussi essentielle qu'elle soit, n'induit pas de migration massive vers les territoires les mieux dotés en ressources. Le diagnostic global masque, de ce fait, la très forte surexploitation des ressources dans de grandes régions, dont les symptômes les plus évidents sont la forte baisse des niveaux piézométriques des nappes souterraines, les intrusions d'eau de mer salée dans les aquifères littoraux, la baisse jusqu'à zéro des débits des cours d'eau à leurs embouchures et la dégradation des écosystèmes. Les exemples de surexploitation patente des ressources sont nombreux. Cette exploitation « minière » des stocks d'eau des nappes, bien au-delà de leur renouvellement, conduit à des situations non soutenables dont la fin est dramatique.

**13****Les ratios besoins/ressources de la littérature internationale communément employés donnent cependant**

**une image erronée**, car ils sont fondés sur des raisonnements triplement faux.

Tout d'abord, n'est généralement considérée « consommée » que de l'eau prélevée « artificiellement » dans le milieu (ou « eau bleue ») pour un usage. Pourtant, l'agriculture pluviale, non irriguée, la foresterie ou les milieux naturels eux-mêmes consomment de l'eau (« eau verte »), au sens où celle-ci est soustraite au bassin par évapotranspiration, sans qu'elle soit prélevée. Ces consommations peuvent être prépondérantes dans les bilans. L'agriculture pluviale et les pâtrages représentaient dans les années 2000 de l'ordre de 6,3 Gm<sup>3</sup>/an, un volume bien supérieur à toutes les autres consommations (qui se situaient à 2 Gm<sup>3</sup>/an), tout en ne produisant que 60 % des denrées alimentaires ;

Par ailleurs, le besoin est trop souvent caractérisé par un volume de prélèvement alors que la partie restituée au milieu peut, sous réserve de traitement avant rejet, être réemployée quasi-méthodiquement. La réutilisation est une des clés principales de soutenabilité pour des activités à très faible *ratio* évaporation/prélèvement comme

par exemple les services publics d'eau potable ; Enfin, l'aval, en particulier les écosystèmes littoraux et estuariens, ne sont pas pris en compte : quand un fleuve arrive sans eau à la mer, est-ce, comme certains le considèrent, le signe qu'il a été parfaitement géré, puisqu'aucune goutte d'eau n'a été « perdue », ou est-ce une catastrophe écologique pour les milieux estuariens ou côtiers ?

**14****Un bilan plus complet et plus pertinent (l'empreinte « eau ») suppose de surcroît d'intégrer, pour un territoire et une population donnée, les quantités d'eau ayant été nécessaires pour la production des biens importés (eau virtuelle).**

On distingue, sur un périmètre déterminé, quatre notions pour affiner le diagnostic : l'**eau bleue** est celle des milieux naturels ou des prélevements qui y sont opérés, l'**eau verte** est celle qui est évaporée ou évapotranspirée, l'**eau grise** est celle qui est restituée sur place après usage au milieu, la plupart du temps fortement dégradée en qualité et l'**eau virtuelle** est celle qui est liée aux consommations d'eau réalisées pour produire hors de ce territoire des biens importés pour les consommations de celui-ci.

Pour l'alimentation, il s'agit par exemple de comptabiliser les consommations de l'ensemble de la chaîne trophique. Ainsi, pour l'élevage, cela concerne l'évapotranspiration du fourrage, des compléments alimentaires et des prairies pâturées et sa consommation d'eau pour son abreuvement (pas toujours diminuée de l'eau des déjections). On peut ainsi faire une analyse de cycle de vie complète des produits et calculer une empreinte « eau » comme on calcule les empreintes « carbone ». Néanmoins, la prise en compte de la dégradation de qualité par les usages dans ces bilans est un exercice délicat.

Si l'on prend cet indicateur, cultures et pâtrages représentent plus de 80 % de l'empreinte eau de l'humanité. Les disparités mondiales de l'empreinte eau autour d'une moyenne mondiale de 1 250 m<sup>3</sup>/hab./an sont environ d'un facteur quatre : 2 500 m<sup>3</sup>/hab./an aux États-Unis, 1 800 m<sup>3</sup>/hab./an en France, 700 m<sup>3</sup>/hab./an dans un pays très pauvre comme l'Éthiopie.

**Chapitre suivant : Alimentation, agriculture et monde rural**

L'eau douce est une ressource un peu particulière. C'est un bien rare et essentiel, mais renouvelable. Après utilisation, elle est restituée au milieu terrestre (rivière ou nappe souterraine), encore trop souvent profondément dégradée en qualité, ce qui en obère les autres usages, ou bien renvoyée à l'atmosphère (notamment par évapotranspiration du couvert végétal). Elle rejoint alors le cycle global de l'eau entre continents, océans et atmosphère. Ce grand cycle planétaire,暮 par l'énergie solaire et la gravitation, assure un énorme processus de transport d'eau à grande échelle. Les usages font en quelque sorte une simple cueillette de cette eau ainsi « offerte ».

Malgré quelques tentatives historiques et des exemples locaux sur au plus quelques centaines de kilomètres ou pour des quantités faibles réservées à des usages spécifiques, l'eau ne se transporte guère artificiellement et s'utilise essentiellement à l'échelle locale. Il y a donc autant de problèmes de gestion que d'unités (bassins) hydrographiques, dépendantes des fluctuations et des évolutions des variables climatiques.

## 3.1. Les ressources « mobilisables »

La première approche consiste à interpréter les composantes du cycle de l'eau comme des ressources « mobilisables ». Pour cela il faut savoir distinguer les prélèvements et les consommations.

### 3.1.1. Unicité de la ressource

Si l'on retire les ressources de zones à très faibles densités de population (dans le Grand Nord, le haut bassin de l'Amazone, etc.) et les écoulements en période de crue difficiles à stocker, la ressource dite « mobilisable » est généralement estimée de 10 000 à 12 000 Gm<sup>3</sup>/an. Cette notion n'a cependant guère de sens global : d'amont en aval, cette eau prélevée puis rejetée est à nouveau disponible pour une réutilisation. Même si elle est évapotranspirée, elle est renvoyée dans le cycle atmosphérique et conduit à une précipitation ultérieure en un autre lieu. La notion de ressource mobilisable est donc essentiellement locale et destinée à un groupe d'opérateurs définis. Elle doit alors être étudiée à l'échelle du bassin-versant dans son ensemble ou intégrer comme contrainte les usages de l'aval ou d'autres composantes du cycle de l'eau (l'interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines par exemple). Comme le dit élégamment Jean Margat : « l'exploitation d'une ressource peut en gâcher une autre ». Enfin, l'hypothèse communément admise, parfois implicitement, que « toute l'eau accessible est disponible pour les usages humains » ignore purement et simplement le milieu naturel, les lacs, les rivières et les zones humides, mais aussi les écosystèmes côtiers : il est ainsi fréquent que l'équilibre d'une mangrove soit menacé par la diminution des apports en eau douce. Les aspects qualitatifs de l'eau viennent exacerber cette difficulté : la conciliation des usages suppose que l'eau disponible soit adéquate pour chacun d'entre eux.

### 3.1.2. Utilisation et réutilisation

On appelle communément ressource primaire la ressource mobilisée disponible pour l'usage à une époque donnée. Après usage, l'eau qui n'est pas consommée (incorporée ou évaporée)

passe à un autre usage ou retourne au milieu naturel. Grâce à la réutilisation, les prélèvements peuvent être supérieurs à la ressource renouvelable, mais la consommation globale ne peut pas excéder la ressource naturelle mobilisée. Faire la somme des prélèvements dans un bilan n'a donc pas de sens.

La réutilisation fait de plus en plus souvent partie intégrante des projets en permettant une rationalisation de l'usage des ressources secondaires. Les utilisations non consommatrices sont à l'origine d'une ressource secondaire, intéressante par sa localisation à proximité de lieux d'usage important (comme l'industrie ou les espaces verts). La prise en compte de la ressource secondaire peut être à l'origine de différences significatives dans les bilans hydrologiques. Ainsi, en Ouzbékistan, les prélèvements agricoles, industriels et domestiques, de 58 Gm<sup>3</sup>/an, excèdent largement les ressources renouvelables, même en tenant compte des apports externes. Ceci peut s'expliquer par l'importance du volume des eaux de drainage, dont une partie est directement réutilisée pour les besoins agricoles, l'autre partie étant dirigée vers la mer d'Aral ([voir § 3.2.1](#)).

À moins qu'elle ne soit en surplus, aucune eau de qualité supérieure ne devrait être employée pour un usage qui tolère une qualité inférieure. Partout où c'est possible, des eaux de moindre qualité, telles que les eaux usées, l'eau de drainage et les eaux saumâtres, doivent être considérées comme des ressources. Les agriculteurs de pays arides du Tiers-monde n'ont pas attendu que l'ONU, au sein de sa Commission économique et sociale, énonce ce principe en 1958 pour utiliser très largement la ressource des eaux usées urbaines en dépit de maints interdits. La valorisation agricole directe des déjections humaines pour des activités de maraîchage a été très active à Paris dans la deuxième partie du XIX<sup>e</sup> siècle. C'est à deux ingénieurs des ponts et chaussées, Adolphe-Auguste Mille et Alfred Durand-Claye, s'inspirant d'une méthode flamande, que l'on a dû la valorisation maraîchère des eaux d'égout à Clichy, puis à Gennevilliers avant qu'elle ne soit étendue à Achères (Barles, 2005)<sup>34</sup>. Il est certain que ce type d'épandage direct pose des problèmes sanitaires sérieux (notamment en raison des concentrations souvent élevées en métaux liées aux activités artisanales ou industrielles) et il ne saurait constituer une solution recommandable. En revanche, la réutilisation des eaux ou des boues issues d'un processus d'épuration de ces eaux, sous réserve d'un contrôle sanitaire et écotoxicologique adéquat, est une excellente solution<sup>35</sup>.

Cette réutilisation a pu se heurter à diverses interdictions, dont on comprend bien le sens sanitaire lorsqu'il ne s'agissait que de réutiliser les *excreta* humains ou animaux. Une *fatwa* a permis de préciser que l'usage d'une eau déjà utilisée est acceptable en irrigation, selon les normes coraniques, à condition qu'elle ait été rendue pure (*tahour*) par l'un de ces moyens : auto-épuration, dilution ou traitements physiques. De fait, de nombreuses réalisations existent en Arabie saoudite, en Jordanie et dans les pays du Golfe.

La réutilisation agricole est de loin la première instance de valorisation des eaux usées urbaines. La salinité des eaux usées est souvent inférieure à celle des eaux saumâtres disponibles.

<sup>34</sup>. « Le système hérité de l'Ancien Régime consiste à recueillir les urines et excréments dans les fosses d'aisances (supposées étanches) bâties sous les maisons, puis à vidanger celles-ci périodiquement. Les matières collectées sont acheminées vers les deux voiries de Paris, Montfaucon (au pied de la Butte Chaumont) et Bondy (au bord du canal de l'Ourcq, à quelques kilomètres à l'Est de la capitale) où elles sont transformées en poudrette, engras sec commercialisé auprès des agriculteurs » (Barles, 2005).

<sup>35</sup>. Un nouveau règlement européen pour la réutilisation des eaux usées traitées (Reut) a été validé en mai 2020 par le Parlement européen. Il précise les exigences de qualité pour utiliser en agriculture des eaux usées urbaines traitées, selon quatre classes d'usages. Ces mesures s'appliqueront courant 2023.

Elles apportent de plus des nutriments, réduisant les coûts de fertilisants chimiques, ainsi que des matières organiques dont les sols manquent souvent. En Inde, au Bangladesh, au Pérou et en Indonésie, les eaux résiduaires d'agglomérations sont très largement employées en aquaculture. La réutilisation des eaux usées retraitées des mégapoles de Santiago du Chili et Mexico génère sur des terres peu arrosées et sans ressource classique importante, une ressource secondaire régulière à l'origine d'une agriculture d'autant plus prospère que son marché de consommateurs est proche. Les eaux de la station d'épuration du Caire, construite en BOT (*build, operate and transfer*) par *Thames Water*, sert également à l'irrigation d'un nouveau complexe agricole.

Windhoek, capitale de la Namibie, parvient à satisfaire le quart des besoins de la ville grâce à la réutilisation de l'eau. Alors que la demande en eau (liée à la croissance de la population) est passée de 6 à 27 Mm<sup>3</sup> de 1967 à 2012, elle a mis en place dès 1970 deux boucles de réutilisation des eaux usées. L'une est dédiée à l'arrosage des espaces verts à partir d'eaux usées traitées, la seconde à l'alimentation en eau potable à partir d'eaux usées (et d'eaux de surface) traitées. Le surplus des années humides est alors injecté dans l'aquifère situé sous une partie de la ville, ce qui permet d'assurer une réserve pour les années sèches. Près de Los Angeles, la station de recyclage et de réutilisation d'eaux usées *Edward C. Little Recycling Facility* produit 240 000 m<sup>3</sup> d'eau par jour, avec un « *mix hydraulique* » comportant plusieurs types d'eaux pour différents usages : eaux industrielles, eaux de process pour les raffineries, usages municipaux, agriculture et recharge de nappes.

Des bénéfices environnementaux résultent également du non-déversement des eaux usées dans des milieux récepteurs fragiles et du soutien des nappes aquatiques côtières menacées d'intrusion saline.

### **3.1.3. Utiliser l'eau de mer**

Dans les cas extrêmes de tensions sur les ressources (îles, littoral densément peuplé, etc.), de l'eau peut être produite par dessalement. Cette technique est aujourd'hui parvenue à maturité et le coût, de l'ordre désormais de 0,5 \$/m<sup>3</sup>, est devenu raisonnable tant pour les usages industriels qu'urbains (Maksimović *et al.*, 2001). Ces techniques peuvent aujourd'hui répondre à des situations de surexploitation côtière, par exemple par afflux touristique, et sont de plus en plus valorisées par les décideurs confrontés à des contraintes majeures lorsqu'ils disposent d'une énergie (gaz ou pétrole) accessible.

L'Algérie a commencé à déployer à grande échelle des centrales de dessalement après la crise hydrique de 2001. Le littoral compte une dizaine de stations de dessalement d'eau de mer réparties sur plusieurs villes côtières. La capacité actuelle du pays est de 770 millions de m<sup>3</sup>/an (environ 2,1 millions m<sup>3</sup>/j) et il est envisagé d'atteindre 950 millions de m<sup>3</sup>/an (environ 2,6 millions de m<sup>3</sup>/j) à l'horizon 2030 (OSS, 2020).

Les progrès technologiques ont permis, dans les années 2005-2015, de diviser par deux la consommation énergétique globale des procédés, de les alimenter parfois intégralement en énergie solaire, comme c'est le cas à Masdar aux Émirats arabes unis, et de surveiller en temps réel que le processus de dilution en mer des rejets à la concentration renforcée en sel n'a pas d'effet excessif sur la biodiversité marine.

### 3.1.4. Transférer de l'eau sur de grandes distances

Une façon d'échapper au bilan interne à un bassin-versant est de réaliser un transfert d'eau entre bassins. Ceci n'a jusqu'à présent pas été réalisé sur de grandes distances, même s'il l'on peut citer de nombreux cas d'ampleur relativement faible. La plupart du temps, une solution essentiellement gravitaire est recherchée pour éviter des coûts prohibitifs. Les canaux établis par la société du canal de Provence (détournant les eaux de la Durance) ou du Bas-Rhône Languedoc ainsi que le captage de la Garonne pour alimenter le système Neste en sont des exemples français. En Égypte, un canal permettant de capter un important débit du Nil alimente des zones antérieurement désertiques.

En Chine, les deux tiers des terres arables et près de la moitié de la population se trouvent concentrés au Nord, qui ne dispose que de 14 % des ressources en eau du pays (voir la figure 40). La surexploitation des ressources y est patente. Ainsi, la nappe phréatique sous Beijing a été abaissée de 37 mètres par les prélèvements ; le tiers des puits d'eau potable utilisés depuis des millénaires par la population locale ont été asséchés, condamnant près d'une centaine de localités à vivre une grave pénurie d'eau. Les deux premières branches en service d'un projet gigantesque de grand transfert d'eau Sud-Nord de la Chine destinées à compenser ces déséquilibres constituent d'ores et déjà les plus grands transferts d'eau artificiels d'eau au monde.

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°5

En Chine, les plus grands transferts d'eau mondiaux

Peut-on exploiter des stocks souterrains profonds de très grands volumes par une exploitation de type minier (épuisement de la ressource) ? Quelques cas existent où la question a pu se poser.

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°7

Le système aquifère du Sahara septentrional

## 3.2. Faire un bilan besoin-ressources : l'approche habituelle

Le tableau 5 montre l'évolution des principales composantes de prélèvement et de consommation au xx<sup>e</sup> siècle. On estime globalement à 80 % environ la part de l'agriculture dans l'usage, en termes de prélèvements d'eau, proportion d'autant plus impressionnante que plus de la moitié de l'eau prélevée est évaporée et donc « consommée ». 20 % à 50 % des eaux prélevées retournent à la ressource (par les fuites des réseaux et le lessivage des champs). L'industrie utilise 20 % des ressources et les collectivités 10 % ; ces deux domaines d'usage ont un taux de consommation faible. La création de vastes plans d'eau suscite d'une part une régulation de la disponibilité des ressources (c'est leur objectif) mais aussi une évaporation supplémentaire. Ainsi un barrage « consomme de l'eau ». On estime à 6 000 Gm<sup>3</sup> la capacité globale des réservoirs dans le monde, couvrant une superficie totale d'environ 500 000 km<sup>2</sup> et générant une évaporation supplémentaire de près de 200 Gm<sup>3</sup>/an.

**Tableau 5 : Évolution de l'utilisation de l'eau au xx<sup>e</sup> siècle (en Gm<sup>3</sup>/an). Tiré de Shiklomanov, 1998.**

Bilan traditionnel (eau bleue).

Secteur (Gm <sup>3</sup> /an)	1900	1950	1995
Agriculture			
Prélèvement	513	1 124	2 504
Consommation	321	856	1 753
Industrie			
Prélèvement	22	182	752
Consommation	5	14	83
Eau domestique			
Prélèvement	44	53	344
Consommation	5	14	50
Réservoirs (évaporation)	0	11	188
Total			
Prélèvement	579	1 365	3 788
Consommation	331	894	2 074

### 3.2.1. Les déséquilibres locaux sont réels

La population mondiale est très loin d'être répartie sur la planète en tenant compte de la diversité des ressources en eau disponibles et l'on observe une concentration inverse de la population dans les zones arides : 21 % des habitants occupent des territoires qui ne bénéficient que de 2 % des ressources en eau. Contrairement à certaines idées reçues, il n'y a eu depuis plusieurs siècles qu'assez peu de « migrations climatiques ». Les situations de fortes tensions sont nombreuses (Tien-Duc, 1999 et Tien-Duc, 2004).

Le cas de la mer d'Aral est bien connu<sup>36</sup> : un bel exemple de mauvaise gestion de l'eau nous est donné par l'ancienne Union soviétique. C'était, jusqu'aux années 1960, la quatrième masse d'eau douce fermée du monde par sa superficie et un système écologique stable que se partageaient sept pays : l'Afghanistan, l'Iran et cinq pays de l'ex-URSS (Kazakhstan, Ouzbékistan, Turkménistan, Tadjikistan et Kirghizistan). La décision de détourner massivement, à des centaines de kilomètres, l'eau des deux plus grands fleuves d'Asie centrale qui s'y déversaient, le Syr-Daria et l'Amou-Daria, pour accroître les cultures industrielles du coton sur des terres irriguées, a abouti au tarissement quasi-total des fleuves à leur embouchure. Cela a eu une conséquence majeure : une baisse du niveau de la mer de deux tiers, transformant celle-ci en une vaste étendue d'eau salée qui a perdu la moitié de sa superficie et les trois quarts de son volume. Mouïnac, un ancien port de pêche, n'est plus qu'un vaste cimetière marin, à plus de 100 kilomètres du nouveau rivage. Une véritable catastrophe écologique s'en est suivie : il y a eu un assèchement des aires de reproduction des poissons, donc un effondrement des pêcheries qui constituaient de tout temps la principale activité économique de la région, condamnant à l'émigration 30 000 personnes

<sup>36</sup>. Voir, de Raphaël Jozan, « La mer d'Aral et le Gospel de la pénurie d'eau » (Barraqué, Roche, 2010) ou sa thèse (Jozan, 2010).

vivant de la pêche, ainsi qu'une dégradation de la végétation. Enfin, il y a eu un accroissement de la salinité des terres de culture et des maigres ressources d'eau souterraine utilisées par la population environnante depuis des millénaires, par dispersion par le vent chaque année d'une centaine de tonnes de sables salés : ce sont les « larmes sèches de l'Aral », issues du fond de la mer et exposées à l'air libre.

Dans un autre ordre d'idée, l'Ouest et le Sud de l'Inde connaissent une situation chronique de surexploitation des aquifères<sup>37</sup>, comme l'indiquait Binayak Das (Das, 2009) :

« Ainsi le Bureau central des nappes phréatiques (*Central Ground Water Board*) a enregistré une baisse annuelle de 2,5 à 3 m dans les niveaux des nappes des zones urbaines d'Ahmedabad où le taux d'exploitation des aquifères de la cité est de 123 %. Les États les plus affectés sont le Rajasthan, le Gujarat, certaines parties de l'Andhra Pradesh et l'Ouest du Madhya Pradesh où l'eau était disponible en abondance il y a dix à quinze ans. Le niveau des nappes phréatiques dans ces zones est tombé au-dessous de 300 m et la sécheresse est devenue un phénomène annuel. Les puits s'assèchent à grande vitesse, avec 25 % des puits du Rajasthan qui s'assèchent chaque année. Dans le bassin de l'Indus, le pompage des eaux souterraines excède les capacités de recharge de 50 %. En Inde, le nombre de puits à pompe peu profonds est passé de 3 000 en 1960 à 6 millions en 1990. »

Au Mexique, l'eau pompée dans l'aquifère sous Mexico dépasse de plus de 50 % les capacités de renouvellement de la nappe (Guillén, 2016)<sup>38</sup>, à tel point que les experts prédisent les pires difficultés d'approvisionnement de la ville d'ici une dizaine d'années, si le rythme d'extraction de l'eau n'est pas ralenti.

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°6

La surexploitation de l'aquifère de Mexico

Aux États-Unis, la nappe d'Ogallala, la plus grande réserve d'eau douce du pays<sup>39</sup> qui s'étend du Dakota du Sud jusqu'à l'enclave du Texas à travers six autres États<sup>40</sup>, se vide huit fois plus vite que la nature ne peut la remplir, épuisée par 200 000 puits qui fonctionnent de considérables

**37.** On propose de définir le degré d'exploitation des ressources souterraines comme le *ratio* entre les prélèvements non restitués (pour l'irrigation qui représente à peu près les deux tiers des prélèvements en nappe souterraine dans le monde, c'est l'essentiel du prélèvement, aux pertes près) et du flux de renouvellement du système aquifère : même lissé au niveau national à Gaza, en Égypte, en Libye, en Algérie, en Jordanie un *ratio* proche de celui-ci (prélèvement/renouvelable) est supérieur à 100 %, et s'en approche en Tunisie et en Israël. Au-delà de 100 % on entre dans une « exploitation minière » du stock. Cette exploitation minière est par définition non-soutenable, mais sans doute supportable si les échéances d'épuisement se comptent en siècles, et elle est mortifère si l'épuisement se compte en décennies. Pour éviter des confusions de langage, on trouvera un guide précieux dans plusieurs ouvrages de Jean Margat (Margat, 1993 ; Erhard-Cassegrain, Margat, 1979 et Margat 2008). Dans cette troisième référence, il fait remarquer qu'en 2000 les exploitations minières d'eau, qu'il estimait à 32 G m<sup>3</sup>/an serait de l'ordre de dix fois supérieures en volume aux exploitations minières d'hydrocarbure et que les prélèvements dans les nappes ont augmenté d'un facteur 5 à 10 en vingt ans dans plusieurs pays.

**38.** Quinze monographies des enjeux de grandes métropoles mondiales ont été réunies, à l'occasion d'un colloque accompagnant le sommet de Paris sur le climat, dans un ouvrage collectif coédité par UNESCO et l'association francilienne ARCEAU sous le titre « *Water, megacities and global change : portraits of 15 emblematic cities of the world* » (voir <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01449109/>). Cette manifestation a été l'occasion de lancer une « Alliance des mégapoles pour l'eau et le climat » (voir <https://fr.unesco.org/node/279166>).

**39.** On a estimé sa capacité à 4 000 Gm<sup>3</sup>.

**40.** La nappe d'Ogallala occupe une surface équivalente à la superficie de la France. Outre le Dakota du Sud et le Texas, elle s'étend également dans le Wyoming, le Nebraska, le Colorado, le Kansas, l'Oklahoma et le Nouveau Mexique.

quantités d'eau pour irriguer trois millions d'hectares de cultures, alimenter d'immenses zones d'élevage et faire tourner d'importantes industries<sup>41</sup>.

À Gaza, la nappe exploitée par de trop nombreux forages, au-delà de ses possibilités de renouvellement naturel, accuse une baisse spectaculaire de sa cote piézométrique en-dessous du niveau de la mer et il s'en est suivi une très forte augmentation de la salinité<sup>42</sup> due à l'intrusion d'eau de mer (biseau salé).

Enfin, pour clore ici une liste d'exemples qui pourrait être poursuivie pendant des pages entières, en Thaïlande, les pompages intensifs d'eau à usage industriel effectués sous le sol de Bangkok ont même pour résultat de voir certains quartiers de la ville s'effondrer jusqu'à une douzaine de centimètres par an (WWAP, 2003).

### 3.2.2. L'indicateur de Falkenmark

Un indicateur fréquemment utilisé depuis les travaux de Falkenmark dans les années 1960 est la ressource renouvelable par habitant (Falkenmark, Lindh, 1974). Il permet de repérer la richesse ou la pauvreté en eau et son évolution en relation avec la croissance démographique. 1 000 m<sup>3</sup>/hab./an (soit environ 3 000 L/j/hab.) est couramment considéré comme le niveau minimal permettant l'autosuffisance alimentaire dans des pays chauds dépendant de l'agriculture irriguée.

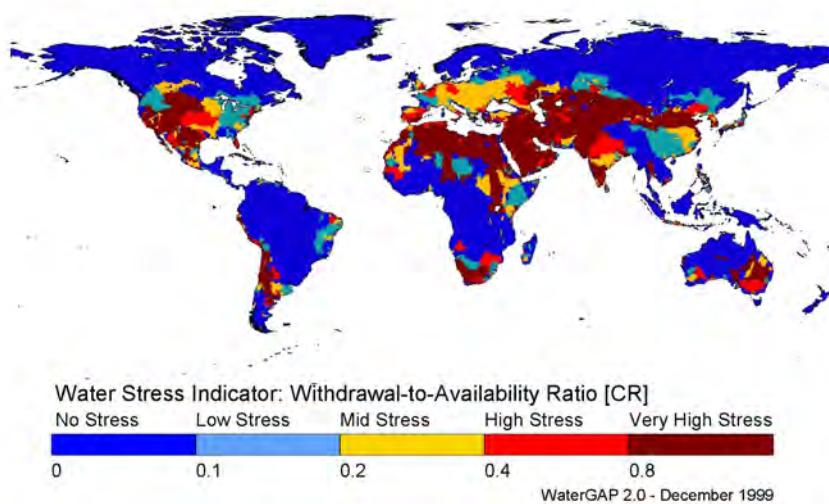


Figure 34 : Rapport prélèvement/disponibilité. Tirée de Cosgrove, Rijsberman, 2000.

41. « So far, 30 % of the groundwater has been pumped and another 39 % will be depleted over the next 50 years given existing trends. Recharge supplies 15 % of current pumping and would take an average of 500-1,300 years to completely refill a depleted aquifer » (Steward et al., 2013)

42. « Cl<sup>-</sup> ion has the highest variations in concentrations (78 to 10 318 mg/L with an average of 1 101 mg/L) with 80 % of the wells exceeded the WHO standards. Na<sup>+</sup>, the second major ion, ranges from 41 to 5 400 mg/L with an average of 621 mg/L. Around 75.4 % of the wells are above the standards ». Il convient de rappeler que la norme pour Na<sup>+</sup> Cl<sup>-</sup> de potabilité de l'OMS est de 25 mg/L (Abu-Alnaeema et al., 2018).

L'indicateur prélevement/ressource renouvelable (voir la figure 34) veut traduire, de façon très grossière et contestable, le degré d'exploitation de la ressource, face auquel les acteurs seront amenés à développer des stratégies « hydroéconomiques » (régulation de la ressource, répartition réglementée ou par le paiement, recherches d'économies d'eau, transferts interrégionaux, etc.).

### 3.2.3. Un exercice prospectif fondateur : la « Vision pour l'eau en 2025 »

Le premier Forum mondial de l'eau, réuni à Marrakech en mars 1997, chargeait le Conseil mondial de l'eau de lancer un exercice de prospective mondiale, la « Vision mondiale de l'eau », qui « s'appuyant sur les efforts internationaux passés, et sur la sagesse collective et les ressources de la communauté globale, [...] offrirait des conclusions pertinentes par pays et domaine, et des recommandations d'action à prendre par les responsables d'aujourd'hui en vue de préserver les moyens de répondre aux besoins des générations futures ».

Durant les trois ans préparant le 2<sup>e</sup> Forum mondial de l'eau (La Haye, 2000), de très larges consultations se sont déroulées, d'abord en vue de dessiner les grandes lignes qualitatives de trois scénarios d'évolution, puis de les quantifier, bien qu'avec une assez grande marge d'incertitude.

#### VOIR FOCUS N°4

Un exercice prospectif fondateur : la Vision pour l'eau en 2025

Il a notamment permis de mettre en avant qu'au-delà du stress hydrique physique, l'enjeu majeur était la capacité locale à faire face à la situation, en raison des disponibilités économiques, financières et les outils de gouvernance, mais aussi de caractériser les territoires les plus exposés à ces difficultés (voir la figure 35).

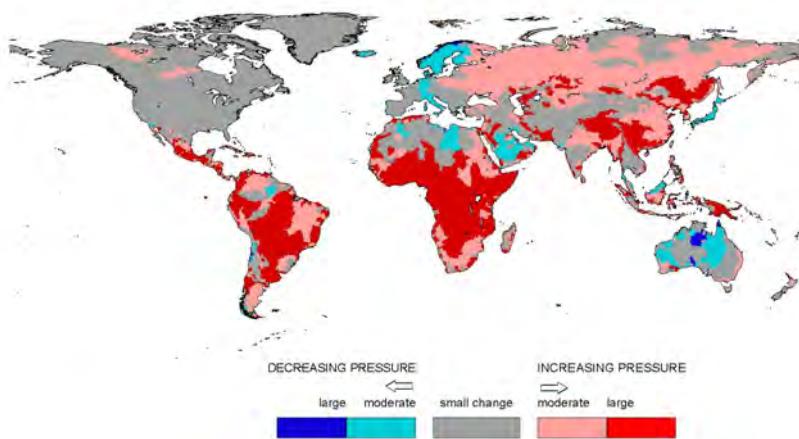


Figure 35 : Évolution des pressions liées aux difficultés économiques et de gouvernance.

Tirée de Cosgrove, Rijsberman, 2000.

### 3.2.4. Actualiser les travaux de la Vision pour 2040

Ces travaux sont régulièrement révisés et les horizons de prévision décalés, notamment par les travaux du *World Water Assessment Program* (WWAP) des agences des Nations Unies, qui éditent chaque année, sous l'égide de l'UNESCO, un rapport sur les ressources en eau (voir la figure 36).

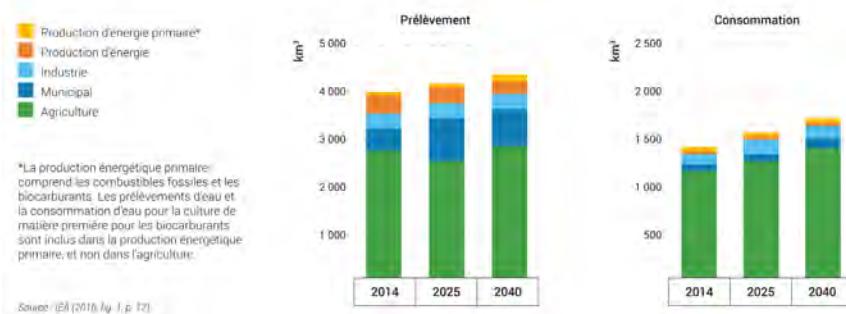


Figure 36 : Prospective des prélevements et des consommations en 2018. Tirée de UNESCO, 1999,  
CC BY-SA 3.0. Méthode traditionnelle de comptabilité limitée à l'eau bleue.

On constate que, selon le WWAP, les niveaux des prélevements en 2014 (4 000 Gm<sup>3</sup>/an) et des consommations (1 400 Gm<sup>3</sup>/an) sont sensiblement en retrait des prévisions du scénario « *business as usual* » de la Vision (respectivement 4 500 et 2 200 Gm<sup>3</sup>/an). C'est sans doute l'effet d'une évolution des méthodes d'estimation (on retient en effet le chiffre de 2 000 Gm<sup>3</sup>/an pour la consommation actuelle), mais aussi l'illustration que les efforts de productivité hydrique ont été réels et ont porté leurs fruits : l'évolution constatée est plutôt proche des scénarios les plus optimistes des années 2000 sur la maîtrise des prélevements et consommations.

## 3.3. L'empreinte eau : aller au-delà avec une méthodologie mieux adaptée

Ce travail de la Vision pour 2025, s'il a marqué la première occasion d'un grand travail collaboratif, s'est concentré sur l'« eau bleue », celle qui fait l'objet de prélevements et de rejets en rivière ou en nappe. Il n'a pas mis suffisamment en exergue deux composantes pourtant essentielles de ces analyses à l'échelle mondiale :

- le poids de la consommation d'eau par l'agriculture pluviale (« eau verte ») dans les bilans globaux, alors que celle-ci n'est pas décomptée comme un prélevement dans les exercices classiques ;
- les transferts majeurs introduits par les échanges de biens (« eau virtuelle »).

### 3.3.1. Intégrer l'eau verte (agriculture pluviale) dans les bilans

Le tableau 6, tiré des travaux de G. de Marsily, traduit l'importance d'une appréciation plus globale des impacts des activités humaines. En passant sous silence les consommations d'eau pluviale pour

l'agriculture non irriguée, la Vision pour l'eau sous-estime d'un facteur 4 l'impact de ces activités : ce n'est pas à la marge ! En « pesant » globalement 8 310 Gm<sup>3</sup>/an, l'activité humaine n'est donc pas une activité à la marge dans le cycle de l'eau, mais elle se situe dans des ordres de grandeur où elle marque significativement les équilibres de ce cycle, même de façon globale et moyenne.

Tableau 6 : Bilans continentaux pour l'an 2000, d'après Marsily, 2009.

	Population M habitants	Pluie Gm <sup>3</sup> /an	Écoulement Gm <sup>3</sup> /an	Consommation humaine hors pluvial Gm <sup>3</sup> /an	Consommation agriculture pluviale Gm <sup>3</sup> /an	Consommation globale par individu (m <sup>3</sup> /hab./an)
Europe	712	7 400	3 000	340	1 420	2 470
Asie	3 722	33 600	12 500	1 175	2 340	940
Afrique	853	21 300	4 000	120	400	730
Amérique du Nord	489	14 200	5 600	260	1 200	3 000
Amérique du Sud	367	30 000	9 800	70	820	2 425
Australie	30	6 500	1 900	15	150	5 500
TOTAL	6 200	113 000	36 800	1 980	6 330	

Pour la question des cultures et des pâturages pluviaux, G. de Marsily a complété les analyses de la « Vision pour l'eau » en intégrant ces composantes manquantes (voir le tableau 7) et en étendant l'exercice à l'échéance 2050. Ceci est d'autant plus crucial que l'agriculture irriguée produit 40 % de la nourriture en utilisant 17 % des surfaces. Si l'on regarde la consommation en eau, celle-ci pourrait passer de l'ordre de 2 000 Gm<sup>3</sup>/an à 2 300 Gm<sup>3</sup>/an en 2025 puis à 2 500 Gm<sup>3</sup>/an en 2050 pour la seule partie habituellement comptabilisée sur l'« eau bleue ». Mais lorsqu'on raisonne globalement en intégrant l'« eau verte », elle pourrait passer de 8 000 Gm<sup>3</sup>/an actuellement à 11 000 Gm<sup>3</sup>/an en 2025 puis à 13 000 Gm<sup>3</sup>/an en 2050.

L'analyse un peu différente qu'en font d'autres auteurs nous rappelle que ces calculs sont des ordres de grandeur et que les définitions détaillées et les hypothèses sous-jacentes aux calculs peuvent induire des écarts non négligeables (tableau 8).

### 3.3.2. L'empreinte eau : eau bleue, verte et grise

Le concept d'« empreinte eau » a été formalisé par Arjen Y. Hoekstra en 2002 à l'instigation de l'UNESCO. Hoekstra et Mekonnen proposent de tenir compte du fait que l'eau restituée au milieu, quand elle n'est pas évapotranspirée, est polluée par l'usage : ils appellent « eaux grises » ces restitutions dégradées au milieu naturel (voir le tableau 9). Cette approche « empreinte eau » retient donc les notions suivantes (Zimmer, 2013) :

- l'eau bleue : captée pour les usages industriels, domestiques et agricoles, elle est comparée dans les bilans habituels à une ressource dite accessible, exploitabile ou renouvelable, définie comme l'eau douce de surface ou souterraine (les lacs, les rivières et les aquifères) ;
- l'eau verte : il s'agit des variations de l'eau de pluie stockée dans le sol, de l'humidité et des flux d'évapotranspiration à l'exception des cultures irriguées ;
- l'eau grise : c'est l'eau polluée par les processus de production ou de consommation humaine.

Tableau 7 : Évolution des prélevements et des consommations. Tiré de Marsily, 2009.

	Unité	1900	1950	1980	2000	2025	2050
<b>Population</b>	M hab.	2 000	2 540	4 410	6 180	8 000	9 200
<b>Eau agricole</b>							
Surfaces irriguées	M ha	47	101	198	264	307	331
Prélèvements irrigation	Gm <sup>3</sup> /an	513	1 080	2 112	2 605	3 053	3 283
Consommation irrigation	Gm <sup>3</sup> /an	321	722	1 445	1 991	2 143	2 309
<i>Rapport consommation/prélèvement</i>	%	63	67	68	70	70	70
Surface agriculture pluviale	M ha	600	700	1 100	1 300	1 700	2 170
Consommation agriculture pluviale	Gm <sup>3</sup> /an	2 500	3 000	4 600	5 500	7 500	9 500
Consommation pâturages pluviaux	Gm <sup>3</sup> /an	300	350	600	840	900	1 000
<b>Eau industrielle</b>							
Prélèvements industriels	Gm <sup>3</sup> /an	44	204	713	776	834	875
Consommations industrielles	Gm <sup>3</sup> /an	5	19	71	88	104	116
<i>Rapport consommation/prélèvement</i>	%	11	9	10	11	13	13
<b>Eau domestique</b>							
Prélèvements domestiques	Gm <sup>3</sup> /an	21	87	219	384	522	618
Consommations domestiques	Gm <sup>3</sup> /an	5	17	38	53	74	86
<i>Rapport consommation/prélèvement</i>	%	21	19	17	14	14	14
<b>Autres</b>							
Eau évaporée barrages	Gm <sup>3</sup> /an	0,3	11	131	208	302	362
<b>Totaux</b>							
Prélèvements	Gm <sup>3</sup> /an	579	1 382	3 175	3 973	4 710	5 138
Consommation hors pluvial et barrages	Gm <sup>3</sup> /an	330	758	1 554	1 975	2 321	2 511
<i>Rapport consommation/prélèvement</i>	%	57	55	50	50	50	50
<b>Consommations totales</b>	<b>Gm<sup>3</sup>/an</b>	<b>3 130</b>	<b>4 108</b>	<b>6 754</b>	<b>8 315</b>	<b>10 721</b>	<b>13 011</b>

Tableau 8: Empreinte eau par secteur d'usage sur la période 1996-2005. Tiré de Hoekstra, Mekonnen, 2012.

Gm <sup>3</sup> /an	Cultures	Pâturages	Industrie	Eau « urbaine »	Total
Total	7 404	959	400	324	9 087
%	81,5	10,5	4,4	3,6	

L'empreinte eau est l'une des empreintes environnementales dont les méthodologies de calcul ont pour but de comptabiliser les effets des activités humaines. Elle s'appuie largement, pour les activités, sur les méthodologies d'analyse du cycle de vie (*from cradle to grave*, du berceau au tombeau) du ou des produits ou services concernés en mesurant tous les intrants et les effets nécessaires à chaque étape de ce cycle : production, transport-distribution, utilisation-consommation-usage, collecte après usage, recyclage, valorisation ou enfouissement (Boulay, Hoekstra, Vionnet, 2013). Cette démarche a fait l'objet d'une norme ISO en 2014<sup>43</sup>, mais cela n'épuise pas ses difficultés méthodologiques sérieuses (Chapagain, Tickner, 2012).

L'eau grise pourrait préférablement être mesurée comme la quantité d'eau nécessaire pour suffisamment diluer l'eau usée rejetée pour la rendre à nouveau disponible pour un autre usage. Mais cette notion suppose une connaissance approfondie des process de traitement de l'eau avant rejet et suppose une analyse fine des pollutions. En définitive, ce concept reste très imparfait car il continue à considérer le milieu naturel comme inerte et n'intègre pas la contribution du milieu, par exemple l'« autoépuration » (la consommation des flux d'azote et de phosphore rejetés par le milieu naturel).

C'est une autre façon de compter que la consommation nette. Son but consiste à mettre l'accent sur le caractère « non naturel » du flux, mais elle introduit des doubles comptes : la même eau, même restituée dégradée, peut être réutilisée.

**Tableau 9 :** Ventilation de l'empreinte eau par secteur d'usage en eau verte, bleue et grise, sur la période 1996-2005. Tiré de Hoekstra, Mekonnen, 2012.

Empreinte globale (Gm <sup>3</sup> /an)	Cultures	Pâturegnes	Industrie	Eau « urbaine »	Total	%
Eau verte	5 771	913			6 684	74
Eau bleue	899	46	38	42	1 025	11
Eau grise	734		362	282	1 378	15
Total	7 404	959	400	324	9 087	
%	81.5	10.5	4.4	3.6		

### 3.3.3. L'empreinte eau de nos modes de consommation

Il est intéressant de s'arrêter un instant sur nos propres pratiques de consommation. L'empreinte eau d'une tasse de café de 125 cl est de... 140 L, similaire à celle d'un bain, celle d'un bol de 100 g de riz est de 340 L, celle d'un hamburger est de 2,4 m<sup>3</sup>, celle d'un steak de 100 g de 1,5 m<sup>3</sup>, celle d'un tee-shirt en coton de 2 m<sup>3</sup>, celle d'un pantalon en toile de jean de 11 m<sup>3</sup>, celle d'une voiture de 30 m<sup>3</sup> !

#### VOIR QUESTION N°2

Comment un steak de 100 g peut-il avoir une empreinte eau de 1,5 m<sup>3</sup> ?

Le WWF a réalisé une analyse de l'empreinte eau de la France en 2012<sup>44</sup> à laquelle on renvoie le lecteur pour un cas pratique de calcul d'empreinte eau suivant la méthodologie exposée

<sup>43</sup>. ISO 14046, *Water footprint, principles, requirements and guidelines*, 2014

<sup>44</sup>. On y trouve également toutes les données sur l'empreinte de production, à 89 % agricole, dont plus d'une moitié pour la production de maïs.

ci-dessus (WWF, 2012). Cela nous réserve quelques surprises :

- les usages domestiques de l'eau (notre consommation au robinet) ne représentent que 2,6 % de notre empreinte eau : ce n'est ni en buvant, ni en faisant cuire les aliments, ni même en nous lavant que nous consommons de l'eau, mais à 86 % celle-ci est le fait des ressources nécessaires à nos consommations végétales et animales ;
- la viande représente en moyenne pour un Français 36 % de la totalité de son empreinte eau ;
- les produits industriels nécessaires à la totalité de nos activités (habillement, logement, transports..) ne représentent que 11 % de notre empreinte eau, mais le coton, en revanche, représente à lui seul 56 % de l'eau virtuelle que nous importons (voir § 3.3.4).

#### VOIR QUESTION N°3

Pratiques de consommation et empreinte eau : sur quoi faudrait-il agir ?

### 3.3.4. Intégrer l'eau virtuelle pour calculer l'empreinte eau d'un territoire

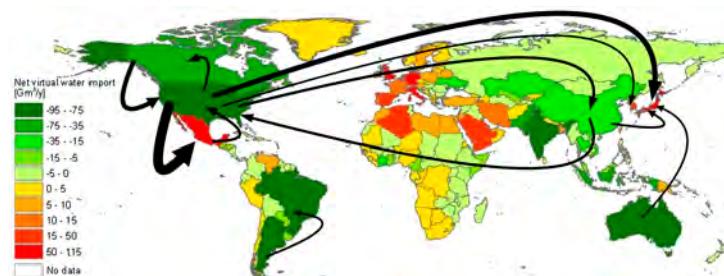
Pour réaliser le bilan de l'empreinte eau pour un territoire, il est important de tenir compte des flux importés et exportés, ce que l'on nomme « l'eau virtuelle », introduite pour la première fois par Tony Allan (Allan, 1998), bien avant le concept d'empreinte eau. On rappelle qu'il ne s'agit pas de calculer l'eau physiquement contenue dans les denrées échangées, mais de compter les ressources mobilisées pour les produire, les acheminer, les distribuer, les récupérer, les recycler ou les détruire. Les composantes mesurées pour un tel bilan d'empreinte eau à l'échelle nationale – la plus communément employée – sont résumées dans le tableau 10.

On remarquera que ces comptabilisations nationales comportent des doubles comptes entre pays : une eau virtuelle exportée par un pays lui est imputée, mais elle l'est également au pays de consommation.

Tableau 10 : Les composantes de l'empreinte eau pour une comptabilité nationale. Tiré de *Waterfootprint Manual*.



L'analyse des principaux flux mondiaux d'eau virtuelle retrace, comme on pouvait s'y attendre, les grands flux du commerce mondial de l'alimentation.



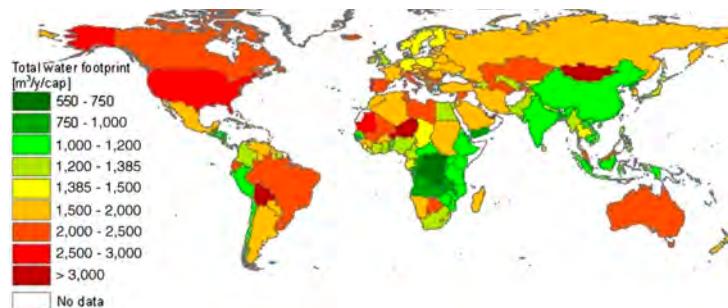
**Figure 37 :** Principaux flux mondiaux d'eau virtuelle ( $>15 \text{ Gm}^3/\text{an}$ ) entre pays liés aux échanges de produits industriels et agricoles, sur la période 1996-2005. Les pays sont teintés en fonction de leur flux net d'importation d'eau virtuelle : en vert, les exportateurs nets ; en rouge, les importateurs nets. Tirée de Hoekstra, Mekonnen, 2012.

On reviendra plus en détail dans le chapitre 4 sur les flux liés aux denrées agricoles. Ces flux d'eau virtuelle sont susceptibles de très fortes augmentations, comme le montre le cas de la Tunisie étudié en détail par G.de Marsily et Besbès (tableau 11).

**Tableau 11 :** Bilan de la Tunisie et prospective pour 2025. Tiré de Marsily, 2009.

Tunisie	Unité	2004	2025
Population	Millions	10	12,15
Demande alimentaire par habitant	$\text{m}^3/\text{hab./an}$	1450	1700
Demande alimentaire, volume total	$\text{Gm}^3/\text{an}$	14,5	20,6
Demande directe, AEP et industrie par habitant	$\text{m}^3/\text{hab./an}$	55	70
Demande directe, total	$\text{Gm}^3/\text{an}$	0,5	0,8
Volume d'eau d'irrigation	$\text{Gm}^3/\text{an}$	2	2
Agriculture pluviale, eau verte	$\text{Gm}^3/\text{an}$	8	9
Eau virtuelle importée (blé, orge)	$\text{Gm}^3/\text{an}$	4,5	9,9
Besoins en eau totaux	$\text{Gm}^3/\text{an}$	15	21,4
Taux de dépendance en eau importée	%	30	46

Autour d'une moyenne mondiale de  $1\,250 \text{ m}^3/\text{hab./an}$ , les disparités mondiales de l'empreinte eau sont environ d'un facteur 4 :  $2\,500 \text{ m}^3/\text{hab./an}$  aux États-Unis,  $1\,800 \text{ m}^3/\text{hab./an}$  en France,  $700 \text{ m}^3/\text{hab./an}$  dans un pays très pauvre comme l'Éthiopie.



**Figure 38 :** Empreinte eau moyenne par pays ( $\text{m}^3/\text{hab./an}$ ). Les pays au-dessus de la moyenne mondiale sont colorés du jaune au marron et ceux en-dessous du vert au jaune. Tirée de Hoekstra, Mekonnen, 2012.

*Chapitre suivant : Alimentation, agriculture et monde rural.*

# Pour approfondir

## QUESTIONS

N°2

Comment un steak de 100 g peut-il avoir une empreinte eau de 1,5 m<sup>3</sup> ?

N°3

Pratiques de consommation et empreinte eau : sur quoi faudrait-il agir ?

## ÉTUDES DE CAS

N°5

En Chine, les plus grands transferts d'eau mondiaux

N°6

La surexploitation de l'aquifère à Mexico

N°7

Le système aquifère du Sahara septentrional

## FOCUS

N°4

Un exercice prospectif fondateur : la « Vision pour l'eau en 2025 »

N°2

## Comment un steak de 100 g peut-il avoir une empreinte eau de 1,5 m<sup>3</sup> ?

Ce chiffre impressionnant est à manier avec précaution et ce sujet fait l'objet de nombreuses polémiques, qui touchent aux méthodes de comptabilisation de l'empreinte. Un bœuf boit durant sa vie de l'ordre de 240 L/kg de viande. L'écart est donc considérable : l'eau nécessaire pour son élevage est essentiellement celle de la production de son alimentation et non celle de son abreuvement.

Le calcul qui conduit au chiffre de 15 m<sup>3</sup>/kg que l'on trouve couramment dans la littérature est le suivant :

- un bœuf arrivé à l'âge adulte peut produire 200 kg de viande. On néglige ici les autres valorisations que la viande ;
- il aura bu 24 m<sup>3</sup> d'eau (donc de l'ordre de 240 L/kg de viande ; on lit parfois 200L/kg) et l'on peut compter également qu'environ 7 m<sup>3</sup> auront servi à son entretien. Ce chiffre ne tient pas compte du fait qu'il urine une part importante de l'eau bue : l'effet en terme d'empreinte doit en réalité distinguer une très faible part d'empreinte eau « bleue » et une forte part « grise », mais de toute façon, ce chiffre est négligeable ;
- s'il a mangé 1 300 kg de grains et 7 200 kg d'herbe, la production de cette nourriture représente une consommation d'eau de l'ordre de 3 000 m<sup>3</sup>.

En somme, cela signifie qu'il faut 15 m<sup>3</sup> d'eau pour produire 1 kg de viande et que son abreuvement représente certainement moins de 1 % et vraisemblablement plutôt 0,1 % de son empreinte.

S'il est alimenté de tourteaux de soja importé, provenant d'une agriculture irriguée, il ne fait de doute pour personne de compter l'eau nécessaire à leur production dans son empreinte. Quand il est élevé en pâture et consomme durant l'hiver du fourrage de prairies locales, certains défendent qu'il n'y a pas lieu de lui imputer cette « eau verte », au motif qu'en l'absence de cette consommation, le couvert végétal aurait de toute façon évapotranspiré naturellement la même quantité. Ce raisonnement ignore que le but de la démarche est bien de mesurer ce qui a été réellement prélevé au milieu : elle n'a pas pour objet de réaliser un bilan net par rapport à une situation de référence dite « naturelle » qu'il serait en général difficile d'établir. Il est en revanche vrai que cette alimentation « au pré » a un impact environnemental plus faible que celle d'une alimentation à base de tourteaux de soja importés.

En tout cas il faut retenir que ces chiffres sont soumis à des variations importantes dues à la nature précise de la question à laquelle on souhaite répondre, à la démarche utilisée pour conduire le calcul et à de nombreuses hypothèses que les documents qui citent des chiffres dans ce domaine ont tendance à occulter. Les bilans distinguent les empreintes en eau bleue (consommation directe de ressource), en eau verte (incluant l'évapotranspiration des cultures et prairies non irriguées) et les eaux grises.

L'empreinte eau du transport des denrées d'alimentation du bétail, essentiellement par navires de fort tonnage, est négligeable dans ces bilans.

L'écart avec l'empreinte carbone est frappant : un steak de 100 g a une empreinte carbone de 2,8 kg de CO<sub>2</sub> et une empreinte eau de 1,5 t d'eau.

[REVENIR AU COURS](#)

§ 3.3.3

§ 4.1.2

## Pratiques de consommation et empreinte eau : sur quoi faudrait-il agir ?

Si l'on veut développer une campagne de mobilisation dont l'objectif serait de réduire significativement l'empreinte eau des Français en tant que consommateurs, quelles seraient les évolutions de leurs modes de vie qu'il faudrait leur proposer pour diminuer d'un quart leur empreinte eau ?

Lister trois ou quatre gestes quotidiens qu'il faudrait recommander plus particulièrement.

Les calculs faits par le WWF en 2012 sur une moyenne d'une dizaine d'années précédentes d'une empreinte eau, toutes consommations comprises, donne en moyenne pour un Français une empreinte eau de 1786 m<sup>3</sup>/hab./an. Elle se répartit comme suit (tableau 12 et figure 39).

Tableau 12 : Empreinte eau de consommation de la France (métropolitaine) en Gm<sup>3</sup>/an © WWF 2012.

	Produits agricoles						Produits industriels				Usages domestiques	
	Interne			Externe			Interne		Externe			
	Verte	Bleue	Grise	Verte	Bleue	Grise	Bleue	Grise	Bleue	Grise	Bleue	Grise
Empreinte eau de consommation	43,7	1,4	3,8	36,7	4,6	2,1	0,9	3,3	0,6	6,3	0,6	2,2

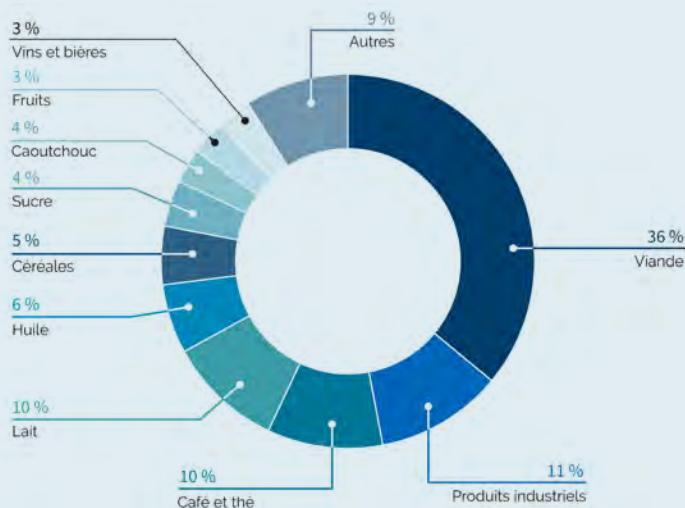


Figure 39 : Empreinte eau de consommation des Français par produit. Source des données : WWF, 2012.

Si l'objectif de la campagne de communication était d'aider le consommateur à réduire sa facture d'eau on pourrait lui faire les recommandations suivantes :

- interroger l'opérateur de son réseau d'eau potable pour réduire les fuites avant compteur quand elles sont supérieures à 10 % (ces fuites représentent, dans des cas pathologiques, mais pas pour autant rares, de l'ordre de 40 % des volumes d'eau injectés dans les réseaux de distribution<sup>45</sup> ;
- veiller à éviter les fuites chez lui après compteur qui, elles, affectent directement la facture, essentiellement en entretenant correctement sa robinetterie. Ces pertes coulent 24h/24h et 7j/7. Même de débit modeste, elles représentent des volumes significatifs : un robinet qui goutte, c'est de l'ordre de 120 L/j, donc presque la consommation d'une personne ; une chasse d'eau qui fuit, c'est 600 L/j de perte, soit la consommation d'une famille de quatre personnes ;
- réduire le nombre de bains au profit de douches ; réduire le nombre et la durée des douches ; il n'est pas impossible ainsi de diminuer sans dommage sanitaire sa consommation d'eau de 10 % à 20 % ;
- en pavillon, ne pas arroser avec l'eau distribuée et se contenter de l'eau de pluie récupérée des toitures, conservée proprement ; ne pas utiliser de piscine privée.

Les mesures suivantes, de bon sens, ont des effets beaucoup plus modestes :

- diminuer le volume de la chasse d'eau des toilettes ;
- fermer le robinet pendant le lavage des dents ou des mains.

En période de sécheresse ou dans des zones tendues, la restriction des usages domestiques a une utilité locale.

Dans certaines circonstances particulières (sites isolés en montagne, îles, littoral en période estivale), la quantité prélevée sur le milieu peut jouer un peu sur la disponibilité de la ressource pour d'autres usagers. Des mesures saisonnières

peuvent être utiles en situation de sécheresse : suppression de l'arrosage des jardins, lavage des voitures uniquement dans des installations professionnelles dont le taux de recyclage est très élevé, non-remplissage des piscines. Ces mesures sont souvent instaurées par arrêté préfectoral en période de sécheresse, souvent plus par souci d'équilibre (tous les usagers font des efforts et la priorité donnée à l'eau potable n'est pas un droit à gaspiller celle-ci) et d'acceptabilité par les agriculteurs des restrictions d'irrigations, qui sont, elles, les seules à porter sur des volumes importants de prélèvement. Mais ceci est sans effet à une échelle dépassant les enjeux strictement locaux et fait l'objet, en général, d'une campagne de sensibilisation *ad hoc* : ce n'est pas l'objet de la campagne évoquée.

Aucune de ces mesures, souvent mises en avant comme des gestes citoyens, voire comme une contribution personnelle quotidienne pour sauver la planète, n'a cependant d'effet tangible sur l'empreinte eau citée ci-dessus. Ceci est d'autant plus vrai que les chiffres cités concernent des volumes de prélèvement (même si on parle dans la vie courante de consommation). L'empreinte en eau bleue est d'environ 10 % de ces chiffres, le reste étant au pire à classer dans l'empreinte grise (eau restituée mais dégradée en qualité) compte tenu de la restitution de l'eau au milieu localement s'il n'y a pas de traitement adéquat. Si l'on intègre, pour les 150 L/j de consommation d'eau du robinet, un taux de dépollution raisonnable de 80 % et d'évaporation de 10 %, l'empreinte est donc de 15 L/j/hab. d'eau bleue et 27 L/j/hab. de transformation d'eau bleue en d'eau grise. Or, un steak de 100 g de viande de bœuf alimenté à partir de tourteaux de soja est, en empreinte eau verte et bleue, l'équivalent de trois mois de consommation d'eau potable, tous usages compris.

Ce n'est donc pas au robinet qu'on « sauve la planète ». La campagne devrait donc se concentrer sur le principal facteur qui pèse sur l'empreinte eau : le régime alimentaire, qui de plus comporte des variables d'ajustement raisonnablement mobilisables.

Les facteurs de consommation comme l'habitation et les transports ne peuvent également, même

<sup>45</sup>. Ces volumes non vendus, d'une eau de qualité ayant été traitée pour être rendue potable, ont un coût : si le volume des pertes n'est pas directement imputé au consommateur, il pèse sur les charges de production de la collectivité et de son opérateur. Ayant à équilibrer les recettes et les dépenses (en France il est interdit de subventionner le budget annexe d'eau et d'assainissement à partir du budget général de la collectivité, sauf exceptions très particulières) ils doivent donc ajuster les tarifs unitaires pour couvrir ces coûts : c'est donc bien l'abonné qui les paie *in fine*.

avec des mesures drastiques et difficiles à mettre en œuvre, que faire évoluer de façon très marginale les effets de cette empreinte.

Examiner la question de l'habillement suppose que l'on entre plus précisément dans la cartographie de l'eau virtuelle importée qu'il représente. Les importations françaises de coton proviennent en proportion non négligeable de bassins hydrologiques qui sont répertoriés comme des « points chauds » de l'équilibre des ressources en eau, atteignant plusieurs mois par an des situations de rareté sévère et c'est justement la production de coton qui en est la cause principale ou une cause significative : en Ouzbékistan (mer d'Aral), au Pakistan (Indus), en Turquie, en Syrie, en Irak (Tigre et Euphrate).

Cette campagne pourrait donc recommander de :

- réutiliser et user autant que possible ses vêtements, mais aussi veiller à leur recyclage : ce sont les mesures les plus efficaces à la portée de tout un chacun ;
- s'assurer que le lieu de provenance du coton utilisé pour fabriquer ses vêtements est suffisamment pourvu de ressources en eau pour ne pas porter préjudice à d'autres usages ni au milieu naturel ; pour être efficace, cette information, qui n'est pas disponible pour le consommateur, devrait lui être indiquée.

C'est principalement sur l'évolution du régime alimentaire que l'effort utile se porterait. Deux mesures à recommander suffisent à atteindre l'objectif de réduction d'un quart de l'empreinte eau totale. En tout premier lieu, il s'agit de s'adresser aux consommateurs de viande : modérer celle-ci au profit d'autres protéines animales ou, encore mieux, végétales. En passant de 220 g/j de viande (la consommation moyenne actuelle), à la moitié, les consommateurs diminueraient de 15 à 20 % leur empreinte eau totale. Il est indispensable pour mettre au point une telle démarche de la concerter préalablement et de bien analyser les tendances des consommations actuelles (Tavoularis, Sauvage, 2018). Plus modestement, si on conseille de diviser par deux les quantités de thé et de café, de bière et de vin bues chaque jour en les remplaçant par de l'eau, alors les consommateurs diminueraient de 5 à 10 % leur empreinte eau, tout en améliorant leur propre santé.

Bien entendu, il est possible de proposer d'aller au-delà de ces objectifs choisis ici pour être parfaitement atteignables et « indolores » pour le consommateur. Comme pour le coton, l'analyse peut être raffinée en tenant compte de la provenance des produits.

#### REVENIR AU COURS

§ 3.3.3

§ 4.1.2

N°5

## En Chine, les plus grands transferts d'eau mondiaux

Les contrastes de pluviométrie en Chine (figure 40) et la répartition des activités humaines consommatrices d'eau coïncident mal. Le grand projet de transfert d'eau en Chine du Sud vers le Nord (figure 41), dont Mao Ze Dong avait dit la nécessité dès 1952, a été lancé par le Conseil des affaires d'État (le gouvernement chinois) le 23 août 2002. Il comprend trois dérivations entre le Yang Tsé et le Nord, soit au total 4 350 km de canaux et de tunnels.

La branche Est de 1 156 km, qui s'étend du fleuve Yang Tsé inférieur à Tianjin, dont un premier tronçon incomplet a été ouvert en 2013, suivra par endroits des lacs naturels et le tracé du Grand Canal impérial, creusé il y a 2 500 ans entre Hangzhou et Beijing pour la navigation. Elle comportera une vingtaine de stations de pompage et un tunnel sous le fleuve Jaune. L'objectif à terme est de 14,8 Gm<sup>3</sup>/an.

La branche centrale de 1 432 km, du fleuve Han à Danjiangkou à Beijing, a été ouverte fin 2014 et a demandé le creusement d'un tunnel encore plus profond sous le fleuve Jaune. L'objectif à terme est de 13 Gm<sup>3</sup>/an. Actuellement, le transfert serait de l'ordre de 3,6 Gm<sup>3</sup>/an, ce qui correspond à un débit moyen de 115 m<sup>3</sup>/s, soit environ le tiers du débit moyen de la Seine à Paris.

Enfin, une branche Ouest pourrait un jour relier les sources des fleuves Yang Tsé et Jaune à travers le plateau de haute altitude Qinghai-Tibet. Les branches orientale et centrale sont en service et la branche Ouest reste à l'état de projet. Il s'agit d'alimenter en eau le Nord du pays, qui allie de faibles ressources en eau, une population très dense et des activités fortement consommatrices, en prélevant des ressources du Sud du pays. L'objectif à terme est de 17 Gm<sup>3</sup>/an.

Le fleuve Jaune au Nord de la Chine est asséché une grande partie de l'année<sup>46</sup>. Beijing ne dispose que de 150 m<sup>3</sup>/hab./an soit 1/14 de la moyenne en Chine et 1/50 de la moyenne mondiale.

Sont aussi concernées :

- la province du Hebei (notamment les aciéries), avec une ressource par habitant de 1/5 de la moyenne en Chine ;
- la province du Henan, l'un des deux principaux producteurs de céréales de Chine depuis 2000 (59 Mt en 2016), et Tianjin, pôle de fabrication de haute technologie.

Le projet prévoit le transfert de 44,8 Gm<sup>3</sup>/an du Sud au Nord, environ l'équivalent du débit annuel du fleuve Jaune, mais aussi de l'eau nécessaire à la production au Nord de la nourriture transférée vers les provinces du Sud. Les difficultés rencontrées en matière de qualité des eaux et de protection environnementale ont occasionné des dépenses qui n'avaient pas été prévues dès l'origine et induit quelques délais supplémentaires. Fin 2014, les investissements cumulés avaient atteint un peu plus de 2 milliards d'euros. En 2018, environ 3,6 Gm<sup>3</sup>/an semblaient avoir été transférés et les autorités chinoises indiquaient qu'à Beijing le niveau de la nappe, moins surexploitée, serait remonté de 50 cm.

### REVENIR AU COURS

§ 3.1.4

<sup>46</sup> En 1972, pour la première fois, le débit du fleuve Jaune a été nul à son embouchure pendant quinze jours. En 1980, son cours inférieur était de nouveau à sec, pendant sept jours, sur 150 km. La période de fort étiage s'est maintenue sur 700 km, pendant 136 jours en 1996 et 226 jours – plus de la moitié de l'année – en 1997.

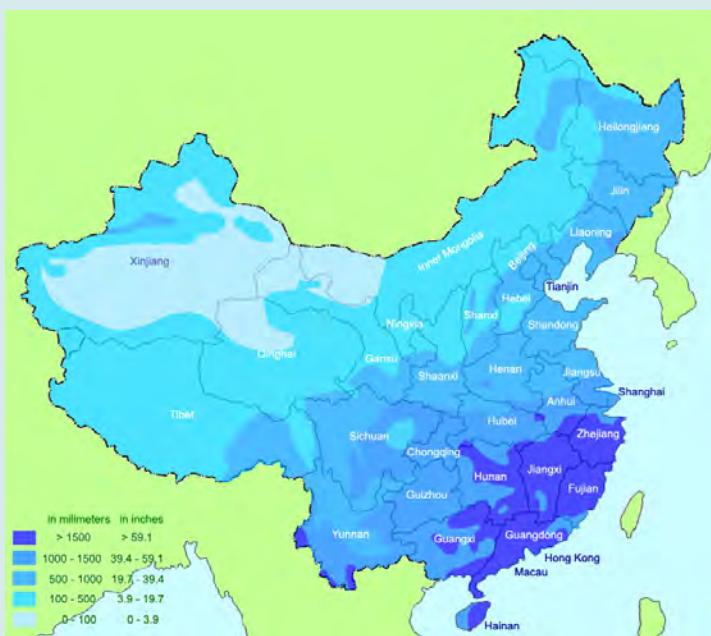


Figure 40 : Les contrastes de pluviométrie en Chine. Auteur : Alan Mak, 2006, CC BY-SA 3.0  
(source : Wikipedia).



Figure 41 : Les trois branches du projet de transfert Sud-Nord d'eau en Chine.  
Auteur : Maximilian Dörrbecker (Chumwa) Pline, 2020, CC BY-SA 2.0 (source : Wikipedia).

N°6

## La surexploitation de l'aquifère à Mexico

D'après Guillén, 2016.

À Mexico (district fédéral), la principale source d'eau du bassin est très majoritairement souterraine. Des explorations ont permis la découverte d'aquifères constitués de coulées de lave, de matières alluviales et de dépôts de lacustres dont l'épaisseur va en grandissant depuis les flancs de la montagne jusqu'au centre de la vallée, pour atteindre plus de 2 000 mètres.

L'exploitation des aquifères à grande échelle a débuté au xix<sup>e</sup> siècle, lorsque les sources d'eau de surface ne suffisaient pas à satisfaire les besoins croissants en eau. On a d'abord construit une grande quantité de puits peu profonds. Toutefois, il a fallu creuser de plus en plus profondément pour atteindre la nappe phréatique : au début du xix<sup>e</sup> siècle, la profondeur moyenne des puits souterrains était de quelques dizaines de mètres. Aujourd'hui, elle se situe entre 100 mètres et plus de 400 mètres. Avec le temps, l'usage public urbain est devenu prépondérant.

De nos jours, les aquifères du bassin sont les principales sources d'eau et fournissent les deux tiers de l'eau de la région métropolitaine de Mexico. On extrait environ 54 m<sup>3</sup>/s d'eau souterraine, dont 80 % va à l'usage public urbain, 9 % à l'agriculture, 7 % à l'industrie et 4 % à l'élevage.

On estime que l'extraction a fini par dépasser le taux de réalimentation des aquifères au milieu

du xx<sup>e</sup> siècle. Actuellement, le volume de réalimentation est d'environ 23,8 m<sup>3</sup>/s, sans compter l'eau provenant des fuites des réseaux urbains de distribution d'eau, qui ne peut être comptabilisée compte tenu de l'absence de données fiables. Toutefois, les taux de réalimentation naturelle ont radicalement baissé à cause de l'urbanisation.

On estime également que les fuites représentent entre 35 % et 40 % du volume d'eau distribué dans la région métropolitaine de Mexico. Elles sont dues à la vétusté des réseaux de distribution et d'assainissement, ainsi qu'au déboîtement et à la fissuration des canalisations causés par l'affaissement des sols. On ignore cependant la part de déperdition d'eau dans le réseau d'assainissement et la quantité de cette eau polluée qui est réinjectée dans les aquifères.

Dans tous les cas, la surexploitation des aquifères, à un taux d'environ 28 m<sup>3</sup>/s, est le principal problème du bassin en matière d'eau et la source de bien d'autres problèmes urbains. Lors des 60 dernières années, le niveau des nappes phréatiques, qui atteignaient autrefois la surface, a largement baissé et se trouve actuellement entre 50 et 70 mètres de profondeur. De plus, l'épuisement progressif des aquifères a consolidé les couches argileuses et ainsi provoqué l'affaissement des sols.

**REVENIR AU COURS**

§ 3.2.1

Le système aquifère du Sahara Septentrional constitue l'une des plus grandes réserves souterraines d'eau douce du monde, néanmoins bien loin derrière les grès de Nubie qui représentent un stock près de dix fois supérieur encore (figure 41). Il s'étend sur plus d'un million de km<sup>2</sup>, dont 60 % en Algérie, 10 % en Tunisie, et 30 % en Libye, et possède deux nappes principales : celle du Continental Intercalaire en profondeur et celle du Complexe Terminal, moins profonde. S'étendant jusqu'à plus de 2 000 m de profondeur, les réserves aquifères sont énormes : estimées à

30 000 Gm<sup>3</sup> dans les années 2000, elles sont maintenant chiffrées à 60 000 Gm<sup>3</sup>, avec une réalimentation faible de 1 Gm<sup>3</sup>/an. Cependant, seule une faible fraction peut être exploitée par pompage, en raison des coûts élevés d'exhaure si la profondeur du niveau d'eau devient supérieure à 200 m. Les eaux sont en partie anciennes, rechargeées par les précipitations sous les climats plus humides qui régnaient au Sahara jusqu'à il y a moins de 5 000 ans. L'alimentation de la nappe se concentre notamment sur le flanc sud de l'Atlas en Algérie (Besbes et Marsily, *in* Marsily, 2005).

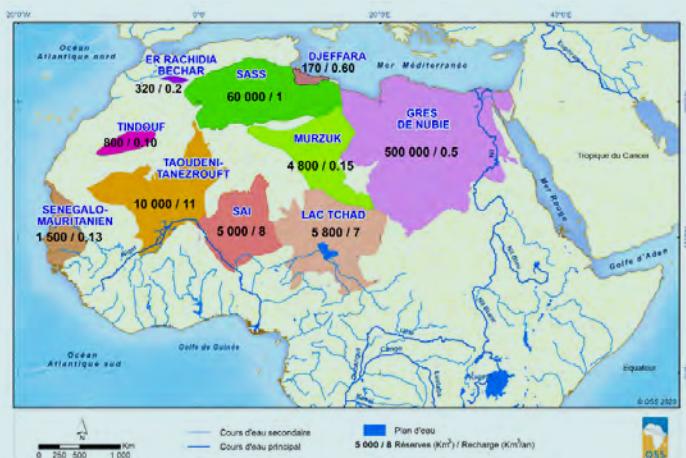


Figure 42 : Les grands systèmes aquifères de l'Afrique du Nord et du Sahel. Tirée de OSS, 2020.

L'aquifère est fortement exploité dans les trois pays, soit par pompage, soit par sortie naturelle dans les oasis. On estimait en 2000 les pompages à 70 m<sup>3</sup>/s (2,2 Gm<sup>3</sup>/an) et en 2018 ces prélèvements étaient chiffrés à 3 Gm<sup>3</sup>/an ; voir OSS, 2020), auxquels il faut ajouter les écoulements aux exutoires naturels et des pertes par évaporation dans les Chotts, estimés à 15 m<sup>3</sup>/s. Observant que les niveaux piézométriques sont en baisse continue depuis plusieurs dizaines d'an-

nées, que la majorité des sources alimentant les oasis tarissent et doivent être remplacées par des pompages, les trois pays se sont entendus pour réaliser conjointement une étude (Besbes, 2003). Menée sous l'égide de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS)<sup>47</sup> à Tunis, elle a pour but d'évaluer la ressource, de recenser les prélèvements et de construire un modèle numérique permettant de prévoir l'impact des politiques de prélèvement envisagées par chaque pays. Cette étude a établi

47. L'Observatoire du Sahara et du Sahel est une organisation intergouvernementale internationale à vocation africaine, qui a été créée en 1992. Voir son site : <http://www.oss-online.org/fr>

que la poursuite de ces prélèvements, et *a fortiori* l'augmentation des prélèvements dans chaque pays, conduiraient dans un avenir proche à plusieurs phénomènes :

- l'inversion du sens des circulations entre la nappe du Complexe Terminal et les Chotts<sup>48</sup> algériens et tunisiens : au lieu que les Chotts constituent un exutoire de la nappe, l'eau salée des Chotts s'infiltrerait vers la nappe et conduirait rapidement à sa salinisation ;
- les sources et autres exutoires naturels vont également tarir ;
- les prélèvements effectués par chaque pays affectent la nappe dans les pays voisins ;
- le niveau d'artésianisme va considérablement diminuer dans les régions où la nappe est jailissante ;
- les profondeurs de pompage de l'eau vont dans certaines régions devenir trop importantes, engendrant des coûts d'exhaure trop élevés pour une utilisation agricole de l'eau, comme c'est le cas actuellement.

En revanche, l'étude a montré qu'il était possible de faire passer les exploitations par pompage de  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  à  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ , à condition de déplacer les points de prélèvement dans des zones où la nappe est libre, mais où n'existe actuellement aucune implantation humaine. Au terme de cette étude, les trois pays, qui ont mis en commun leurs connaissances et leur expertise pour la mener à bien, ont convenu de mettre en place un organisme de concertation afin de décider de façon conjointe des politiques ultérieures d'exploitation de la nappe.

## REVENIR AU COURS

### § 3.1.4

Il faut noter que cette exploitation de type minier (les prélèvements prévus excèdent d'un facteur 8 environ la recharge annuelle estimée) pourrait se poursuivre pendant des siècles, tant la réserve est importante. C'est le même raisonnement qu'avait fait le gouvernement de M. Khadafi en Libye dans l'exploitation d'un autre système aquifère du Sahara par le transfert dit « de la Grande Rivière artificielle ».

Ces deux cas distinguent les réserves du Sahara de celles des aquifères de l'Inde, par exemple, qui sont également surexploités depuis une vingtaine d'années, mais dont les réserves sont bien plus petites et devraient s'épuiser en une ou deux décennies, si les prélèvements ne sont pas diminués, ou si une alimentation artificielle n'est pas mise en place, en utilisant par exemple une partie des ruissellements perdus pendant la mousson.

**48.** Les Chotts sont en Afrique du Nord des lacs ou étangs saumâtres endoréiques permanents, comme la mer d'Aral, le mot « Chott » désignant littéralement en arabe le rivage, fortement changeant selon le niveau de ces étendues d'eau. Les dépressions qui accueillent ces eaux saumâtres sont appelées *sebkha*. Le Chott le plus grand est le Chott El-Jérid, prolongé par le Chott El-Fejaj en Tunisie, d'une surface de  $5\ 360 \text{ km}^2$  et d'une longueur de 250 km.

N°4

# Un exercice prospectif fondateur : la « Vision pour l'eau en 2025 »

## 1. Origine du projet

Depuis 50 ans, il n'a pas manqué de prévisions alarmistes sur l'évolution des besoins en eau. L'évolution réelle constatée a été plutôt modérée, mais a tout de même conduit à des croissances très significatives. Le premier Forum mondial de l'eau, réuni à Marrakech en mars 1997, chargeait le Conseil mondial de l'eau de lancer un exercice de prospective mondiale, la Vision mondiale de l'eau, qui « s'appuyant sur les efforts internationaux passés et sur la sagesse collective et les ressources de la communauté globale, [...] offrirait des conclusions pertinentes par pays et domaine, et des recommandations d'action à prendre par les responsables d'aujourd'hui en vue de préserver les moyens de répondre aux besoins des générations futures ».

Durant les trois ans préparant le 2<sup>e</sup> Forum mondial de l'eau (La Haye, mars 2000), de très larges consultations se sont déroulées, d'abord qualitatives en vue de dessiner les grandes lignes de trois scénarios d'évolution, puis quantitatives, bien qu'offrant une assez grande marge d'incertitude. Des groupes sectoriels et régionaux ont exploré les retombées quantitatives de ces scénarios dans leurs domaines respectifs, avec une recherche de consensus au moyen d'itérations entre les groupes. Ces scénarios ont servi de base pour diverses simulations recouvrant les compartiments majeurs du système de gestion des ressources en eau (les trois plus importants étant bien entendu : l'agriculture, les besoins des villes et la nature). Parmi les principaux outils de quantification utilisés, on peut citer :

- PODIUM, de l'*International Water Management Institute* ou IWMI (Colombo), le centre de recherche international à l'origine de la notion de « révolution verte » (Seckler *et al.*, 1998) ;
- Water GAP, de l'université de Kassel ;
- IMPACT, de l'*International Food Policy Research Institute*, de Washington (Rosegrant, Cai, Cline, 2002).

## 2. Construction des scénarios

Un premier scénario correspond à la prolongation des politiques actuelles (*business as usual* : BAU). Les autres scénarios ont été :

- TEC : « *technology, economics and the private sector* ». La recherche et le développement sont conduits par le secteur privé, les droits d'eau sont commercialisés et la mondialisation soutient le développement économique d'une façon rationnelle, intégrant la rareté des ressources en eau, mais en laissant de côté les aspects sociaux ;
- VAL : « *values and lifestyles* » (valeurs et modes de vie). Ce scénario est concentré sur le développement durable, avec un effort particulier pour les pays les plus pauvres ; transparence, équité et solidarité sont alliés à une évolution technologique maîtrisée.

Plusieurs critiques ont été faites depuis ce travail. Tout d'abord, il ne prend en compte que faiblement la réutilisation. Cet oubli de la ressource secondaire oblige à forcer le trait, en accroissant les déficits. De plus, les perspectives de grands transferts de bassin à bassin n'ont pas été prises en compte (par exemple en Chine, au Zambèze, etc.). Par ailleurs, la pression migratoire liée à l'insuffisance de ressources constitue un facteur d'adaptation possible. Soit qu'on la voie réduite par de meilleures politiques, soit qu'elle se heurte à des barrières renforcées dans le scénario TEC, les flux qui lui sont liés ne sont guère pris en compte. De même, les variations climatiques liées aux émissions des gaz à effets de serre ne sont pas incluses. Enfin, les chiffrements reposent sur des données mal contrôlées et sujettes à caution, tant pour les besoins et les ressources, que pour les coûts et l'économie.

### 3. Résultats globaux

En extrapolant de façon raisonnable les tendances actuelles, cette prospective de 2000 envisageait que les prélevements dans les ressources se situeraient à l'horizon 2025 à 5 200 Gm<sup>3</sup>/an, contre 3 800 Gm<sup>3</sup>/an en 1995 (figure 43 et figure 44).

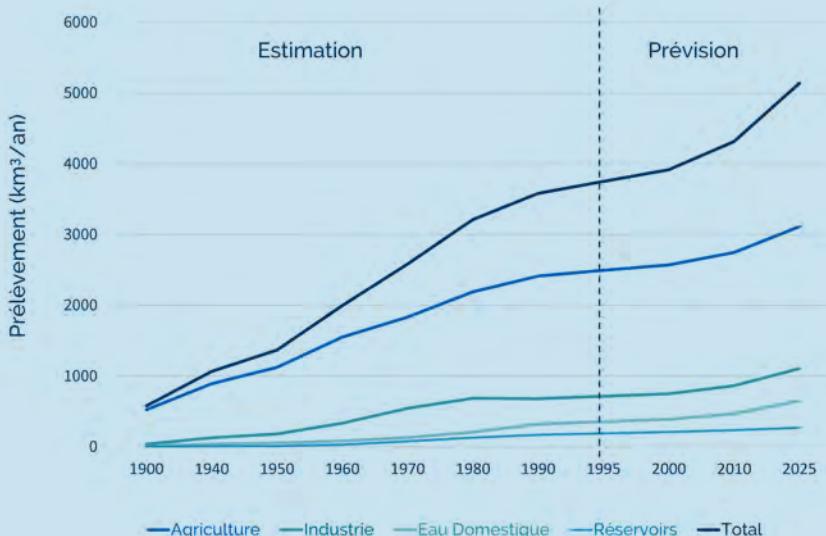


Figure 43 : Scénario d'extrapolation des politiques actuelles (BAU) : évolution des prélevements.

Source des données : Cosgrove, Rijsberman, 2000.

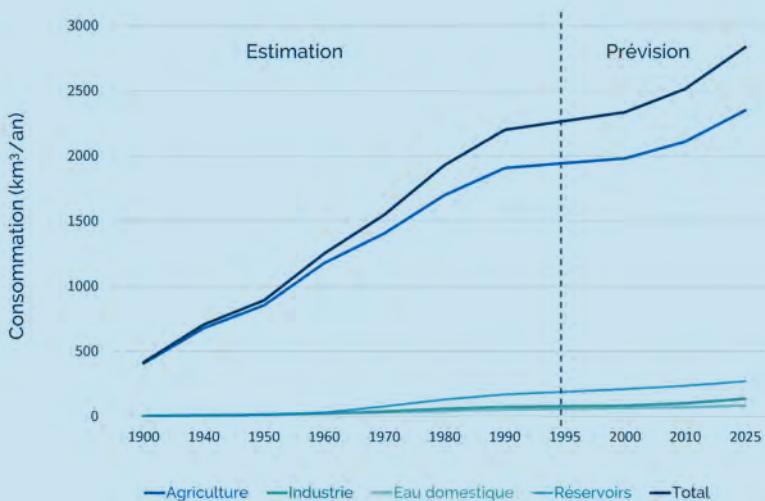


Figure 44 : Scénario d'extrapolation des politiques actuelles (BAU) : évolution des consommations.

Source des données : Cosgrove, Rijsberman, 2000.

Le scénario « technologie » TEC et le scénario « valeurs » VAL donnent, quant à eux, des résultats sensiblement plus modérés et assez proches. C'est normal, puisqu'ils ont en commun de prendre les

ressources comme données d'entrée de leurs développements. En revanche, ils se distinguent par leur méthode et par leur répartition des richesses. Le facteur majeur commun est une maîtrise draconienne des consommations agricoles. Cela permet une croissance de l'alimentation en eau potable et (dans une plus faible mesure) de l'industrie, dans les zones où celle-ci est encore peu développée, mais cela permet surtout de maîtriser le volume global à un niveau de l'ordre de 4 500 Gm<sup>3</sup> de prélèvement et de 2 250 Gm<sup>3</sup> de consommation. Lors de la conférence de Bonn de 2001, en préparation de celle de Johannesburg, la FAO envisageait 34 % d'augmentation des surfaces irriguées, augmentant de 12 % les prélèvements hydriques grâce aux progrès de productivité, 29 %, se traduisant par 17 % de prélèvements supplémentaires. On a donc assisté lors de cet exercice à une certaine convergence des estimations de demandes supplémentaires d'eau pour l'irrigation (IWMI, 1999).

#### 4. Répartition régionale du stress hydrique

Si la ressource renouvelable disponible par habitant passe globalement en scénario moyen de 7 800 m<sup>3</sup>/hab./an à 4 800 m<sup>3</sup>/hab./an, c'est d'abord l'effet direct de l'évolution démographique, qui est amplifié par l'évolution des modes de consommation pour accroître très sensiblement les demandes dans les pays du Sud. La répartition régionale des ressources conduit alors à une situation extrêmement contrastée (sur l'évolution des pressions, voir la figure 45). L'indicateur pris ici est le facteur de criticité : prélèvements/ressource disponible ou primaire. Un pays peut être limité dans son développement de nouvelles adductions par manque de ressources économiques. C'est un des intérêts de l'exercice Vision que de bien distinguer le stress naturel (ou absolu) et le stress économique.

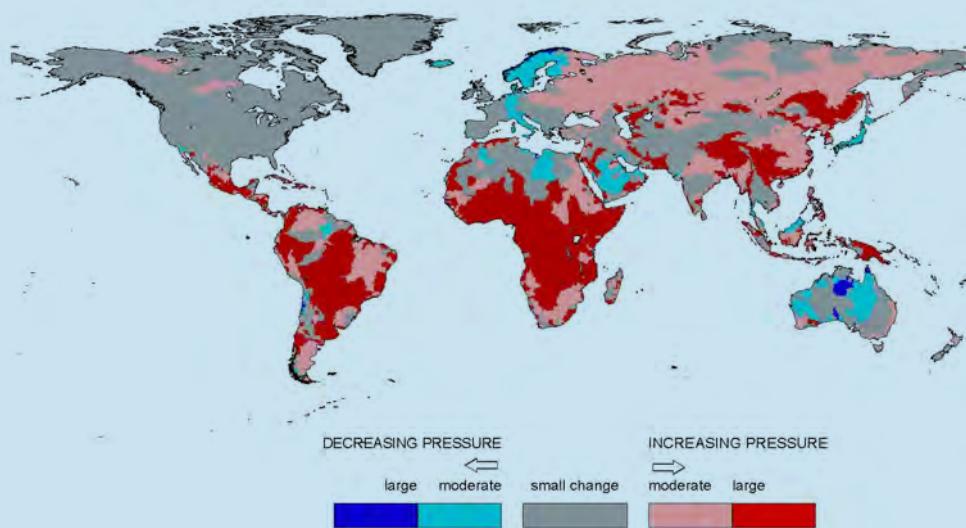


Figure 45 : Évolution des pressions sur les ressources en eau. Tirée de Cosgrove, Rijberman, 2000.

Quelques exemples, évidemment très simplifiés sont passés rapidement en revue ci-dessous.

Du point de vue du stress économique, une situation marquante est celle de l'Afrique subsaharienne. Selon le scénario tendanciel (*business as usual*), les prélèvements d'eau augmentent, passant de 10 Gm<sup>3</sup>/an en 1995 à 42 Gm<sup>3</sup>/an en 2025. En effet, des revenus plus élevés accroissent les consommations domestiques individuelles, même si l'efficacité de l'usage croît. L'usage domestique en Afrique de l'Ouest s'établit à 34 m<sup>3</sup>/hab./an, soit 2,1 fois la valeur 1995, mais encore très inférieure à l'usage en Europe de l'Ouest, qui est de 105 m<sup>3</sup>/hab./an. L'usage industriel croît également, de 3 Gm<sup>3</sup>/an environ à 16 Gm<sup>3</sup>/an. Les pluies abondantes apportent suffisamment d'eau pour couvrir la croissance des usages domestiques et industriels. La question porte en fait sur l'expansion des systèmes de distribution : sera-t-elle assez

rapide pour couvrir les besoins croissants ? La capacité des services d'eau devrait en effet croître de 5,5 % par an et la ressource offerte à l'industrie de 7,1 % par an.

En matière de stress absolu, les tensions en Extrême-Orient croissent avec la prospérité. Le scénario tendanciel n'offre qu'une faible croissance aux superficies irriguées entre 1995 et 2025, tandis que l'efficience de l'irrigation s'améliore. L'effet est donc une décroissance de cet usage, de 1 359 Gm<sup>3</sup>/an à 1 266 Gm<sup>3</sup>/an. Dans le même temps, les besoins domestiques croissent, conséquence de la prospérité croissante, de 114 Gm<sup>3</sup>/an à 471 Gm<sup>3</sup>/an. Ceci laisse prévoir une aggravation de la pression sur les ressources : les zones en fort stress hydrique devraient passer de 6,5 M km<sup>2</sup> en 1995, à 7,9 M km<sup>2</sup>, alors que le nombre d'habitants de ces mêmes zones passera de 1,1 à 2,4 milliards.

Certains pays cumulent plusieurs difficultés comme au Nord de l'Afrique et au Moyen-Orient où le stress absolu se double, pour beaucoup, d'un stress économique. Dans l'ensemble, ces pays combinent des ressources limitées avec une faible industrialisation et une forte natalité. Ils sont déjà fortement stressés : le ratio prélèvements/ressources renouvelables dépasse déjà souvent 80 %, l'agriculture consommant 89 % de la ressource, l'industrie 4 %. 45 % des ressources superficielles proviennent de pays extérieurs à la zone. La ressource est insuffisamment connue : les données sont parcellaires, souvent incohérentes. Ainsi, selon les estimations, les ressources superficielles atteignent pour l'ensemble de la région de 154 Gm<sup>3</sup>/an à 300 Gm<sup>3</sup>/an et les ressources souterraines renouvelables vont de 20 Gm<sup>3</sup>/an à 68 Gm<sup>3</sup>/an (le facteur d'incertitude sur les ressources superficielles passe de 2 à 1,70 si l'on exclut les pays en désaccord avec leurs voisins : Syrie, Iraq, Palestine, Mauritanie). Les problèmes institutionnels, légaux et financiers ne manquent pas. L'extrême manque de ressources et la détérioration de leur qualité appellent la mise en œuvre d'idées innovantes pour équilibrer demandes et besoins.

Cette réflexion collective conclut que la soutenabilité des politiques internationales suppose de prendre les mesures suivantes :

- optimiser l'offre : accords internationaux, exploration des nappes profondes, transferts inter-bassins, réalimentation des nappes, ressources non-conventionnelles ;
- rationaliser les choix agronomiques pour mieux profiter de l'eau de pluie ;
- clarifier les stratégies concernant les ressources et, au premier chef, clarifier les conceptions de sécurité alimentaire (relative ou absolue) ;
- conserver et protéger les ressources.

## REVENIR AU COURS

### § 3.2.3



## PARTIE 2

---

# Alimentation, eau potable et assainissement

## Satisfaire les besoins essentiels d'une population croissante

# 4

## Alimentation, agriculture et monde rural Trouver un chemin soutenable

L'équilibre alimentaire touche des enjeux de santé publique (obésité, carences, etc.) et les besoins évoluent avec les modifications de régimes alimentaires, notamment le poids des régimes carnés. Les besoins en eau et les effets sur l'appauvrissement des sols peuvent être modérés par le développement de l'agroécologie. Réussir un développement rural qui assure des revenus décents aux paysans est un enjeu majeur d'un peuplement mieux équilibré des territoires.

# 5

## Eau potable et assainissement Assurer le respect des droits de l'homme

L'accès à l'eau potable et à l'assainissement est indispensable à la santé et à la dignité des personnes. Il est reconnu comme un droit de l'homme, mais cet objectif est encore très loin d'être atteint. Pour progresser concrètement, il faut bien comprendre cette activité de service public et le rôle des régulateurs, des autorités organisatrices et de leurs opérateurs, publics ou privés, les enjeux de renouvellement du patrimoine et les questions délicates de tarification.



# Chapitre 4 | Alimentation, agriculture et monde rural

## Trouver un chemin soutenable

### À RETENIR

15

C'est principalement l'agriculture qui pèse sur les ressources en eau.

L'évolution de la population mondiale et la nécessité de répondre à ses besoins alimentaires sont particulièrement prégnantes pour l'eau et les sols. À cet enjeu nutritionnel s'ajoute désormais la concurrence des cultures énergétiques pour la production de biocarburants.

16

Les pratiques alimentaires ont déjà profondément évolué. **Simultanément avec une réduction des famines et de la sous-alimentation, des déséquilibres alimentaires majeurs se sont développés dans les populations les plus pauvres, entraînant surpoids (2 milliards d'habitants sont concernés, dont 1 milliard dans les pays en développement) et obésité.** L'évolution des régimes alimentaires, notamment de **la part d'alimentation carnée** dans l'apport protéique, est cruciale quant à l'amplification de la pression sur les ressources.

17

La « révolution verte » a été initiée dans les années 1950 : plus de production par mécanisation, apport accru d'intrants eau et engrais, plus de sécurité de production par apport de produits phytosanitaires et amélioration des conditions de conservation des récoltes et d'acheminement dans les circuits de commercialisation. Alors que les règles de l'art étaient parfaitement connues, des millions d'hectares de terres arables ont néanmoins été stérilisés pour plusieurs décennies par le fait d'irrigations mal conduites sans le drainage nécessaire pour éviter la concentration progressive de sels minéraux dans le sol. Nombre de réseaux d'irrigation sont aujourd'hui vétustes et peu efficaces.

18

Désormais il faut des cultures plus résistantes et plus résilientes à la chaleur et à la sécheresse, ainsi que plus efficaces dans leur consommation d'eau, mais aussi des pratiques agroécologiques assurant la conservation des sols.

Les différences de productivité hydrique sont très fortes selon les métabolismes des plantes. Une révolution des pratiques agronomiques, notamment de conservation des sols, mais aussi une recherche intense pour concentrer les innovations sur la minimisation des intrants de toute nature sont nécessaires. L'idée que l'agriculture pluviale serait plus respectueuse de la nature est cependant unurre : l'irrigation bien conduite avec un drainage adapté présente une empreinte eau plus faible. Une irrigation « de résilience », mieux maîtrisée, paraît indispensable.

19

70 % de la population la plus pauvre habite dans le monde rural et a une activité de subsistance agricole ou en dépend directement.

Le maintien ou l'évolution de ces systèmes fragiles de production-distribution conditionne le maintien des populations sur ces territoires. Ils sont très souvent dépendants de ressources surexploitées dont la durabilité n'est pas assurée et nécessitent un effort accru d'aménagement du territoire pour les conforter (peuplements, migrations, emplois et revenus, vie rurale). S'y ajoutent des enjeux géopolitiques (indépendance et autosuffisance alimentaire). La crise des prix de 2008 a été de ce point de vue un signal d'alerte majeur.

## 4.1. Rééquilibrer les régimes alimentaires

La question de l'alimentation semble à première vue une question de marché, de circuits de distribution et de revenus des acheteurs. On aborde d'abord les questions de nutrition et d'agronomie, puis l'organisation des marchés et l'évolution des pratiques alimentaires pour revenir enfin sur les conditions d'un développement rural, en se concentrant plus particulièrement sur le continent africain.

### 4.1.1. L'alimentation est un enjeu de santé publique

Les problèmes majeurs se sont élargis : ce ne sont plus seulement la sous-alimentation et la malnutrition, mais désormais aussi l'obésité et le surpoids.

Les images de famine et d'exode de l'Éthiopie en 2011, liées à la sécheresse, ont rappelé les catastrophes antérieures gravées dans nos mémoires. Près de 38 millions de personnes y avaient été atteintes par la famine en 2002. En 2016-2017, la sécheresse due à un épisode d'El Niño a affecté plus de 20 millions d'habitants en Afrique de l'Est, dont plus de 10 millions en Éthiopie. En vingt ans, les pertes liées aux sécheresses ont été estimées à 128 milliards de dollars.

La production vivrière est le moyen essentiel de subsistance en milieu rural et conditionne le maintien du peuplement rural. Ces deux enjeux majeurs – alimentation et ruralité – sont évidemment liés. En 2000, alors que la population était de 6,2 milliards d'habitants, la FAO estimait à 800 millions le nombre de personnes sous-alimentées, chiffre égal à celui de 1990. En 2009, ce chiffre était un peu supérieur (830 millions) après la crise des prix de 2008 pour une population totale de 6,9 milliards.

Ainsi, la proportion de personnes sous-alimentées dans la population mondiale diminue progressivement (elle est passée de 20 % en 1990 à 15 % en 2020). Certains pays ont fait exception : c'est le cas de la République démocratique du Congo en raison de nombreux conflits. En Afrique sub-saharienne, 30 % de la population reste sous-alimentée. 30 des 50 pays comptant plus de 20 % de malnutris sont africains<sup>49</sup>. Le nombre de ceux-ci y est passé de 100 à 200 millions dans les 40 dernières années.

La malnutrition (sous-alimentation, mais aussi carences en micronutriments : fer, vitamine A et zinc essentiellement) est responsable de la mort de 3,5 à 5 millions d'enfants de moins de 5 ans (un tiers des décès) et affecte un tiers de la population mondiale dans son développement.

Aussi paradoxal que cela puisse paraître, un deuxième danger menace la santé des plus pauvres : l'obésité. Autour de 2 milliards d'habitants sont en surpoids et 700 millions souffrent d'obésité. Ce dernier chiffre a triplé depuis 1975. Dans le même temps, pour les enfants et adolescents, la croissance a été d'un facteur 10. Près d'un milliard de personnes en surpoids, vivent dans des PED. Ce phénomène y était inconnu il y a une quarantaine d'années : il est maintenant en pleine explosion avec l'élévation des niveaux de revenus des couches les plus pauvres de la population<sup>50</sup>.

<sup>49</sup>. Dont 18 des 23 pays comptant plus de 34 % de mal nourris (Banque mondiale, 2016).

<sup>50</sup>. De 2007 à 2014, le nombre d'obèses est passé de 460 millions à 640 millions et celui des personnes en surpoids de 1,510 milliard à 1,930 milliard (OMS, 2017).

Cette « surnutrition des pauvres » est due à des régimes alimentaires totalement déséquilibrés, les aliments les plus accessibles étant des produits industriels ultra transformés à forte densité énergétique (plats prêts à cuire ou à consommer, confiseries, sodas, etc.) contenant essentiellement sucres et lipides (graisses animales maintenant après un puissant développement des graisses végétales) et très pauvres en micronutriments<sup>51</sup>, au point de générer des régimes à la fois sur-énergétiques et carencés. Les pratiques d'alimentation hors du domicile, qui tendent à se généraliser en milieu urbain, contribuent à ces consommations déséquilibrées.

Ces mutations actuelles dans les PED s'opèrent beaucoup plus rapidement (250 millions de personnes en surpoids en 1980 et 904 millions en 2008) qu'elles ne sont intervenues antérieurement dans les pays industrialisés. Une réponse appropriée aux besoins alimentaires en 2050 nécessite un quasi-doublement de la production alimentaire, tout en réduisant les pertes des circuits de commercialisation<sup>52</sup> et en adoptant des politiques nutritionnelles vertueuses.

#### **4.1.2. Assurer un apport en protéines moins fondé sur la consommation de viande**

L'eau virtuelle consommée à travers notre alimentation dépend de la composition de notre bol alimentaire, notamment de l'origine des protéines. On a vu à quel point les régimes carnés et notamment la viande de ruminants pesaient dans l'empreinte eau des consommateurs ([voir § 3.3.3](#)). Dans le bilan protéiné, il ne faut pas négliger l'apport de la pêche et de la pisciculture dont on a vu qu'elle s'était très fortement développée avec des effets importants sur les écosystèmes aquatiques ([voir § 1.3.2](#)). Le poisson est une source de protéine à bon marché. Il représente 40 % des apports protéinés en Afrique australe et 60 % de la ration protéinée dans les quatre pays du Mékong aval. Les milieux aquatiques et les zones humides sont nettement plus productifs que les milieux terrestres mais plus vulnérables aux pollutions accidentelles. Même les pays sans accès à la mer peuvent développer la pisciculture d'eau douce. L'élevage de tilapia en Afrique ou en Asie s'est fortement développé. On connaît la *success-story* du Nord-Est de la Thaïlande, où la production de poissons dans les paddy de riz a atteint une tonne par hectare et par an.

##### **VOIR QUESTION N°2**

Comment un steak de 100 g peut-il avoir une empreinte eau de 1,5 m<sup>3</sup> ?

##### **VOIR QUESTION N°3**

Pratiques de consommation et empreinte eau : sur quoi faut-il agir ?

**51.** Les lipides et les sucres ont cette particularité d'avoir une affinité gustative quasi universelle et leur consommation n'est pas régulée par la satiété comme les aliments riches en amidon.

**52.** 30 % à 40 % de la nourriture produite n'est pas consommée : pertes à la production dans les PED et dans les circuits de transformation et de distribution dans les pays industrialisés.

## 4.2. L'eau consommée pour l'alimentation humaine

### 4.2.1. L'agriculture, principale consommation d'eau... jusqu'à surexploiter les ressources

L'épuisement des ressources disponibles pose directement un problème d'autosuffisance alimentaire aux pays les plus démunis de ce point de vue. Il atteste l'ampleur des efforts qui restent nécessaires pour une gestion responsable et maîtrisée des prélèvements agricoles.

Dans le monde, 20 % des aquifères sont déjà surexploités. Plus d'1,8 milliard de personnes vivent dans des régions où les nappes souterraines sont surexploitées. Le nombre de personnes vivant en zones de stress hydrique est bien supérieur : deux tiers de la population mondiale pourrait être affectée par des situations de stress hydrique.

L'agriculture représente aujourd'hui 85 % des prélèvements en eau en Afrique (9 % pour les collectivités et 6 % pour l'industrie). Ce taux est d'autant plus fort que le pays est plus aride, l'irrigation étant alors indispensable à la culture. La gestion intégrée des ressources en eau est donc très étroitement liée à l'avenir de l'agriculture africaine. 40 % du PIB (60 % en Éthiopie et en Somalie) est produit par le secteur agricole, qui emploie 60 % de la main d'œuvre. L'Afrique était exportatrice avant 1960, mais son alimentation dépend maintenant pour 17 % de ses importations et de l'aide alimentaire.

### 4.2.2. Trois métabolismes végétaux conditionnent l'eau consommée par les plantes

Si l'agriculture représente une telle proportion de nos usages de l'eau, ce n'est pas parce que les plantes et les produits végétaux contiennent de grandes quantités d'eau, c'est parce que les plantes « perdent » (évapotranspirent) beaucoup d'eau pour absorber du CO<sub>2</sub>. Plusieurs métabolismes sont à l'œuvre (C3, C4 et CAM).

#### VOIR FOCUS N°5

Les différents métabolismes de la photosynthèse

Pour produire de la matière sèche végétale, les plantes transpirent donc des quantités d'eau importantes (tableau 13). L'ordre de grandeur à retenir est celui de 1 m<sup>3</sup> d'eau transpirée par kg de matière brute végétale produite. En pratique, les quantités d'eau requises varient beaucoup selon les produits. Les plantes dites en C4 requièrent moins d'eau que les plantes dites en C3, les pommes de terres battent les records de sobriété, les produits maraîchers sont également bien placés.

### 4.2.3. L'alimentation carnée est la plus consommatrice en eau

Les produits transformés et les animaux requièrent des quantités d'eau encore supérieures du fait du rendement de la transformation ou de la consommation intermédiaire de produits végétaux.

Les biocarburants ont également une empreinte eau importante :

- le maïs : plus de 250 m<sup>3</sup> par tonne d'équivalent pétrole (Tep) d'éthanol ;
- le soja : plus de 150 m<sup>3</sup>/Tep de biodiesel.

**Tableau 13 : Ordres de grandeur des quantités d'eau requises en m<sup>3</sup>/t (ou L/kg) pour produire quelques-unes des denrées de base de notre alimentation. Les poids correspondent à la partie consommée (non exprimée en matière sèche) des différents produits. Diverses sources.**

Produits végétaux		Produits animaux et transformés	
Riz	3 000	Huiles	5 000
Blé et autres céréales C3	1 000	Volaille	3 900
Maïs et autres céréales C4	700	Bœuf	15 000
Pommes de terre	100	Oeufs	2 700
Maraîchage	200-400	Lait	800
Agrumes	400		

Pour l'avenir, outre l'augmentation de population, l'évolution des régimes alimentaires jouera un rôle primordial. On a ainsi évalué à 2 200 Gm<sup>3</sup>/an la quantité d'eau nécessaire pour vaincre aujourd'hui la malnutrition (Falkenmark, Rockström, 2004). Si chaque être humain consommait comme un Nord-Américain ou un Européen, il faudrait aujourd'hui 5 200 Gm<sup>3</sup>/an d'eau en plus pour produire nos aliments.

Quel sera le poids de l'alimentation carnée dans les habitudes alimentaires futures en Chine, déjà sensiblement carnées, et en Inde, beaucoup plus végétarienne ? Les pays asiatiques, avec des régimes alimentaires très végétariens, n'utilisent que 1 000 m<sup>3</sup>/hab./an alors qu'en Amérique du Nord et en Europe, on atteint 2 000 m<sup>3</sup>/hab./an avec un régime beaucoup plus carné. Le basculement vers une alimentation plus carnée de populations importantes, notamment en Inde, est certainement le facteur qui aurait les conséquences les plus massives sur les ressources en eau dans les prochaines décennies.

Inversement, la croissance des diverses formes de végétarisme dans les pays riches se poursuivra-t-elle ? Dans ces pays, la tendance actuelle à la diminution de la consommation de viande rouge au profit de la viande blanche génère d'importantes économies d'eau. En 2000, Renault et Wallender avaient déjà estimé à 400 L/hab./j l'économie d'eau entraînée par cette tendance jointe à une légère diminution des apports carnés et énergétiques moyens (Renault, Wallender, 2000). Le développement de l'étiquetage éthique des produits devrait aussi à terme aider les consommateurs soucieux de leur empreinte écologique à s'y retrouver.

## 4.3. Quelles pratiques agronomiques ?

### 4.3.1. Agriculture pluviale et agriculture irriguée : quel choix ?

#### 4.3.1.1. Le rendement des cultures trop sèches est très faible

La productivité hydrique est le poids de la récolte rapporté, non pas à la surface comme habituellement (t/ha), mais à la quantité d'eau consommée (t/m<sup>3</sup>). La relation entre évapotranspi-

ration et rendement n'est pas linéaire (Rockström, 1997 et Rockström, 2015), sauf dans la plage limitée des rendements moyens et élevés (figure 46). Dès que les rendements sont inférieurs à 3 t/ha, l'évapotranspiration est proportionnellement plus élevée, notamment parce que les plantes couvrent mal le sol. À partir d'un certain niveau, cette productivité hydrique (pente de la courbe sur le graphique) décroît à nouveau, au fur et à mesure que l'on approche de l'optimum de la production maximale.

Rockström estimait qu'en 2000, l'agriculture pluviale consommait 5 000 Gm<sup>3</sup>/an d'eau « verte » et l'agriculture irriguée 1 800 Gm<sup>3</sup>/an d'eau « bleue », soit un total de 6 800 Gm<sup>3</sup>/an. Il estimait aussi que la non linéarité de la relation induisait une perte par surconsommation de 1 500 Gm<sup>3</sup>/an (soit 22 % du total) principalement en agriculture pluviale, où l'on observe les rendements les plus faibles, ce qui constitue une source de gain potentiel.

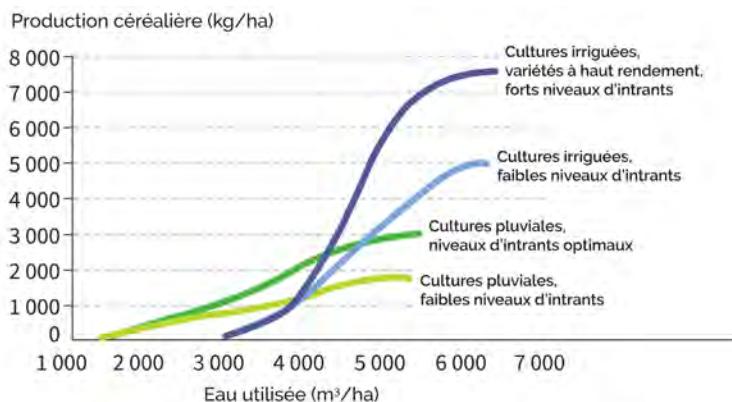


Figure 46 : Rendements et besoins en eau de l'agriculture irriguée et de l'agriculture pluviale. Source : FAO.

À partir de la base de données de la FAO et d'une relation linéaire entre productivité et rendement, Zimmer et Renault (Zimmer, Renault, 2003) estiment à 5 200 Gm<sup>3</sup>/an la consommation totale d'eau minimale nécessaire à la production alimentaire mondiale, dont 3 700 Gm<sup>3</sup>/an pour les cultures pluviales. Bien que basées sur des méthodes différentes, les deux estimations sont très proches, la différence entre 6 800 Gm<sup>3</sup>/an et 5 200 Gm<sup>3</sup>/an correspondant environ aux 1 500 Gm<sup>3</sup>/an de perte par surconsommation telle qu'évaluée par Rockström. Ces valeurs ne prennent en compte que la consommation par évapotranspiration et négligent l'évaporation des barrages construits pour l'irrigation (200 Gm<sup>3</sup>/an). Il est logique qu'elles n'intègrent pas les « pertes » hydrauliques dans les périmètres irrigués (800 Gm<sup>3</sup>/an), qui sont restituées sur place au milieu.

Des collègues du CGEDD et du CGAAER (Ayphassorho *et al.*, 2020) résument en une formule ces effets : « à l'échelle mondiale, par rapport à l'agriculture pluviale, l'agriculture irriguée valorise la surface quatre fois mieux et l'eau deux fois mieux ».

#### 4.3.1.2. L'irrigation et le drainage sont indissociables

L'eau d'irrigation qui est apportée en complément de l'eau de pluie pour maintenir artificiellement l'humidité des sols contient plus de substances dissoutes que celle-ci et pose un difficile problème

de gestion dans la durée de la teneur en sels minéraux du sol. En dessous de 400 ppm de sels dissous totaux (TDS), l'eau est bonne pour toutes les plantes. Au-dessus de 1 500 ppm, aucune culture commune ne les supporte. Entre les deux, les espèces et les variétés sont plus ou moins sensibles à divers composants ioniques. Les animaux et les hommes sont moins sensibles à la salinité que les plantes.

Dans le désert, sans possibilité de lavage régulier du sol par les pluies ou les crues, un lessivage minimum de l'ordre de 7 à 10 % de l'apport à la parcelle doit être garanti aux plantes, pour éviter la montée en salinité au voisinage des racines. Une nappe phréatique trop haute (engorgement ou, en anglais, *waterlogging*) entraîne aussi une salinisation des sols par évaporation.

L'irrigation suppose dès lors le drainage des parcelles et si cet ensemble est mal géré, cela conduit à la stérilisation de terres fertiles. On estime à 15 % la proportion des terres irriguées affectée par une salinité excessive.

Les besoins en irrigation dépendent de multiples facteurs, notamment climatologiques : présence ou non de pluies durant la saison de croissance, vent, humidité et température spécifiques, etc. L'efficacité à la parcelle se définit comme la part d'eau apportée réellement utilisée par la croissance des plantes. L'irrigation au goutte à goutte, qui économise à la fois l'eau et l'énergie, demande d'avantage d'entretien, notamment pour la surveillance du colmatage. Dès les années 1990, ces pratiques étaient à l'honneur dans les ouvrages spécialisés (tableau 14).

**Tableau 14 :** Coûts et performances des techniques d'irrigation. Tiré de Hillel, 1987.

	Efficacité à la parcelle (%)	États-Unis : coût (US\$ par ha)	Inde : coût (US\$ par ha)
Gravitaire	40 à 70	Inv. : 1 000 à 1 400	
Aspersion	60 à 80	Inv. : 2 000 Fonct. : 300 à 350/an	Inv. : 850 Fonct. : 800 à 900/an
Goutte à goutte	70 à 85		Inv. : 400 à 700 (arbres) ; 1 000 (céréales)

Au-delà de la parcelle, l'efficacité se mesure à l'échelle du périmètre irrigué en incluant dans le bilan les pertes dans les réseaux d'amenée et de distribution qui peuvent être considérables. Entre différences climatiques, choix des spéculations culturales et efficacité des réseaux, la quantité d'eau prélevée pour irriguer un hectare varie de deux ordres de grandeur (tableau 15).

**Tableau 15 :** Ordre de grandeur des prélèvements d'eau pour un hectare irrigué.

	Prélèvement (m <sup>3</sup> /ha/an)
Europe du Nord	300-5 000
Europe du Sud et de l'Est	7 000-11 000
États-Unis	8 000-10 000
Asie, Amérique Latine	5 000-17 000
Afrique	Jusqu'à 25 000

### 4.3.1.3. L'irrigation de complément, outil de l'agriculture sous contrat

Conduite selon les règles de l'art avec un drainage adapté à la nature des sols, l'irrigation permet de dépasser le seuil de stress hydrique en-dessous duquel les rendements sont très faibles, ainsi que la précarité de l'agriculture pluviale.

Pour s'inscrire dans des circuits commerciaux dépassant l'échelle locale, les agriculteurs sont la plupart du temps dépendants de contrats auxquels ils ont souscrit avec des collecteurs. Le principe est de leur assurer des prix d'achat garantis en contrepartie d'engagements sur la régularité de volume et de qualité de la production : l'irrigation de complément, même dans des régions où elle ne semble pas *a priori* indispensable, devient la règle.

### 4.3.1.4. Réduire les « pertes », un enjeu d'économie agricole plutôt qu'environnemental

Comme l'eau distribuée dans les périmètres irrigués n'est que très rarement tarifée à un prix incitatif aux économies d'eau, les « pertes » d'eau sont très élevées (eau prélevée dans le milieu mais non évapotranspirée par les plantes cultivées).

Au-delà de la mesure de l'efficacité de l'irrigation au niveau local (parcelle, périmètre irrigué), il faut considérer l'efficience globale de cet usage au niveau d'un bassin. Il faut alors prendre en compte les retours en nappe ou en drainage d'eau non évaporée qui servent de nouveau en aval. Ainsi, vers 1990, l'efficience globale du bassin du Nil en aval d'Assouan était de 75 %, alors que l'efficacité à la parcelle ne dépassait pas 50 % : l'essentiel des « pertes » par infiltration retournaient au fleuve et étaient réutilisées à l'aval.

Les politiques publiques en vigueur ont largement privilégié le développement de périmètres irrigués de grande taille, sans en assurer une gestion satisfaisante.

De façon générale, les gouvernements apportent des aides directes ou indirectes massives qui réduisent à presque rien le coût de l'eau d'irrigation. En Inde, par exemple, les subventions directes représentent 800 millions de dollars par an et, en incluant les subventions indirectes, on atteint 4 milliards de dollars par an. Les aquifères, rendus plus facilement accessibles grâce aux possibilités de pompage individuel (à l'énergie subventionnée), voient souvent leur niveau piézométrique chuter de plusieurs mètres par an. On estime à 10 % la part de la consommation globale d'eau provenant de leur surexploitation.

## 4.3.2. Les impasses actuelles

### 4.3.2.1. Désertification et dégradation des sols

La dégradation des sols (qui a affecté au moins 500 millions d'hectares de surfaces cultivées dans le monde<sup>53</sup>, soit la moitié de la surface de l'Europe) et la forte variabilité climatique menacent drastiquement les capacités de production agricole. La situation de l'Algérie est illustrative des

<sup>53</sup>. Au niveau mondial la surface des terres cultivées est de l'ordre de 1,5 milliard d'hectares, dont 270 millions d'hectares irrigués et 1,2 milliard d'hectares non irrigués. La dégradation des sols est le fait à la fois d'un drainage insuffisant (environ 50 millions d'hectares sont concernés, soit presque la surface de la France métropolitaine ; cela représente 10 % de la surface dégradée et qui est très difficile à restaurer) et des pratiques de travail des terres.

difficultés de la région à poursuivre les modèles antérieurs de développement de l'agriculture et de l'élevage.

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°8

##### L'irrigation en Algérie

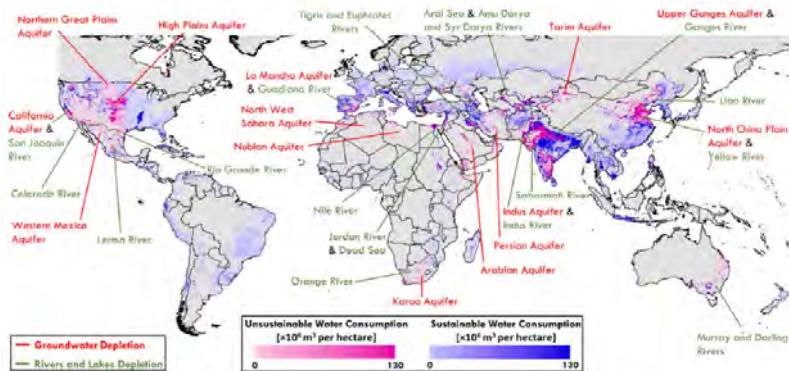
Ce problème n'est pas spécifique à l'Algérie. En Tunisie, par exemple, les ressources du sol sont très fragiles : 3 millions d'hectares de terres du Nord et du centre subissent une forte érosion. Par ailleurs, plus de 7 millions d'hectares des terres du Sud sont affectés par les processus d'ensablement, de déflation éolienne et de salinisation secondaire.

Le rapport spécial du GIEC (Malley, 2019) met en avant l'importance de la dégradation de sols et de la désertification :

*« About a quarter of the Earth's ice-free land area is subject to human-induced degradation (medium confidence). Soil erosion from agricultural fields is estimated to be currently 10 to 20 times (no tillage) to more than 100 times (conventional tillage) higher than the soil formation rate (medium confidence). Climate change exacerbates land degradation, particularly in low-lying coastal areas, river deltas, drylands and in permafrost areas (high confidence). Over the period 1961–2013, the annual area of drylands in drought has increased, on average by slightly more than 1 % per year, with large inter-annual variability. In 2015, about 500 (380–620) million people lived within areas which experienced desertification between the 1980s and 2000s. The highest numbers of people affected are in South and East Asia, the circum Sahara region including North Africa, and the Middle East including the Arabian peninsula (low confidence). Other dryland regions have also experienced desertification. People living in already degraded or desertified areas are increasingly negatively affected by climate change (high confidence). »*

#### 4.3.2.2. Non soutenabilité de certaines exportations de produits agricoles

En 2019, est parue une étude très précise des flux d'eau virtuelle (voir § 3.3.4), essayant d'affiner ceux qui correspondent à une exploitation réputée non soutenable. Elle a comparé la situation de l'an 2000 et celle de 2015 (Rosa *et al.*, 2019). Les auteurs concluent notamment que 52 % de la consommation d'eau mondiale pour l'irrigation était, selon leur critères, « non durable » et en augmentation de 8 % par rapport à 2000. Ils constatent également que la géographie de l'eau virtuelle s'est transformée, avec un poids croissant de la Chine comme importateur d'eau virtuelle et de l'Inde comme exportateur (l'augmentation d'un flux de l'Inde vers la Chine lié essentiellement au coton). L'étude souligne que 30 % de l'accroissement des flux virtuels concerne des exploitations de ressource non soutenables. Cette étude reprend plusieurs travaux antérieurs sur ce qu'il est convenu d'appeler les « points chauds » (*hotspot*) de la surexploitation des ressources à des fins d'exportations agricoles (figure 47).



**Figure 1.** Global hotspots of unsustainable water consumption for irrigation. The map shows sustainable and unsustainable irrigation water consumption volumes and lists some of the freshwater stocks (aquifers, rivers, lakes) that are being depleted to grow crops (Richter 2014, Richey et al 2015, Jägermeyer et al 2017).

**Figure 47 :** Hotspots de la consommation non soutenable de l'irrigation. La carte met en avant les sites où les ressources en eau disponible pour d'autres usages et les milieux naturels sont en forte diminution. Tirée de Rosa et al., 2019, CC BY-SA 3.0.

Les évolutions concernant les États-Unis sont également spectaculaires (tableau 16) : elles donnent la mesure du caractère non soutenable d'une part significative de l'irrigation d'exportation aux États-Unis.

**Tableau 16 :** Cinq principaux flux d'import et d'export d'eau virtuelle provenant de l'irrigation non soutenable des États-Unis en 2000 et 2015, faisant partie des quinze flux mondiaux les plus importants.

Tiré de Rosa et al., 2019.

Destinations des exportations d'eau des États-Unis	En 2000 (Gm <sup>3</sup> /an)	En 2015 (Gm <sup>3</sup> /an)
Mexique	4,5 : coton (53 %) ; sorgho (16 %) ; maïs (12 %) - 2,2 (importations) : coton (62 %) ; canne à sucre (12 %)	3,0 : coton (47 %) ; maïs (20 %) - 4,6 (importations) : agrumes (50 %) ; fruits et légumes (20 %) ; canne à sucre (13 %)
Chine	2 : coton (37 %)	5,2 : coton (50 %) ; soja (20 %)
Canada	2,5 : coton (36 %) ; autres plantes annuelles (34 %)	1,7 : fruits et légumes (44 %) ; coton (19 %)
Japon	2,9 : maïs (38 %) ; coton (16 %) ; blé (10 %)	1,5 : maïs (41 %) ; coton (16 %)

### 4.3.3. Poursuivre la révolution verte ou passer à une irrigation de résilience ?

#### 4.3.3.1. Augmenter les surfaces cultivées

La « révolution verte » de la deuxième moitié du xx<sup>e</sup> siècle a permis d'éviter la catastrophe liée à l'explosion des besoins nutritionnels d'une population mondiale passée de 3 à 6 milliards d'habitants de 1960 à 2000 (en laissant tout de même 800 millions d'habitants dénutris...). Ceci a été obtenu par une agriculture intensive, consommatrice d'eau, d'engrais et de produits phytosani-

taires, concentrée sur une surface relativement faible, dans les « greniers » du monde (Amérique du Nord, Chine, Inde et Europe).

Comme il a été indiqué ci-dessus, une réponse aux besoins nutritionnels de la population mondiale d'ici 2050 ne pourra pas se limiter aux seules améliorations de l'efficacité des circuits de distribution et aux modifications de régime alimentaire ; il faudra bien aussi augmenter la production végétale.

Nous allons d'abord examiner comment les pratiques actuelles, extrapolées, peuvent répondre à ces enjeux, avant d'évoquer les progrès des pratiques agronomiques reposant sur des mutations plus profondes. Tout ceci pourrait constituer une sorte de « révolution bleue ».

Il s'agit d'augmenter les superficies cultivées ou le nombre de récoltes annuelles sur une superficie donnée ou encore les rendements de chaque récolte. Selon la FAO (FAO, 2003), entre 1960 et 2000, un tiers des augmentations de production a été imputable à l'accroissement des superficies ou du nombre de récoltes et deux tiers à l'augmentation des rendements. La situation est cependant contrastée :

- l'Afrique et l'Amérique Latine utilisent environ 20 % de leurs terres potentiellement cultivables, le reste étant occupé essentiellement par la forêt ou la prairie ;
- les autres continents, notamment l'Asie du Sud et le Moyen-Orient, sont d'ores et déjà dans une situation de pression très forte avec plus de 85 % de leurs ressources en sols cultivables utilisées pour l'agriculture.

#### 4.3.3.2. Cultures pluviales et irriguées : l'irrigation poursuit son développement

Augmenter les rendements de l'agriculture pluviale sans irrigation au-delà de 3 t/ha suppose de lever les facteurs limitants liés à la fertilité des sols. Les gains totaux maximaux estimés en 2000 seraient de l'ordre de 1 500 Gm<sup>3</sup>/an d'eau « verte ». Mais cette augmentation des rendements nécessiterait l'apport de nutriments, voire de produits phytosanitaires, avec des conséquences potentielles sur l'environnement.

Dans le cas de l'agriculture irriguée, la première action indispensable est d'améliorer significativement l'efficience dans les périmètres irrigués et notamment de diminuer les pertes des réseaux de transport et de distribution d'eau<sup>54</sup>. L'amélioration de l'efficience de l'irrigation a déjà été de l'ordre de 30 % dans les vingt dernières années (OCDE, 2015). Cette augmentation de l'efficience hydraulique a des effets économiques positifs sur l'équilibre des exploitations, si l'eau est considérée à un prix reflétant sa rareté ; elle permettrait sans doute de gagner beaucoup sur les volumes de prélevements, mais seulement quelques milliards de m<sup>3</sup> par an de consommation nette.

En revanche, tout comme dans l'agriculture pluviale, des gains de rendement restent possibles. Ces gains ne produiront d'augmentation de l'efficience de l'eau que dans les situations où les rendements initiaux étaient faibles.

<sup>54</sup>. Le bilan de l'efficacité hydrique est cependant difficile à établir car ces pertes d'eau (fuites) s'infiltrent et alimentent les nappes dans lesquelles on pompe bien souvent. La réduction des fuites, même si elle est directement bénéfique pour les coûts d'énergie s'imputant sur le bilan d'exploitation, a donc un effet difficile à mesurer sur l'efficacité hydrique du système.

La FAO prévoit des augmentations d'environ 0,5 % par an en moyenne des surfaces irriguées, en concordance avec la poursuite des tendances actuelles. En 2000, les superficies irriguées occupaient 21 % des superficies cultivées (265 M ha) et représentaient 40 % de la production. Entre 2000 et 2030, les prélèvements annuels d'eau pour l'agriculture irriguée étaient censés croître de 300 Gm<sup>3</sup>, et les superficies irriguées de 40 à 50 millions d'hectares<sup>55</sup>.

Les augmentations de superficies cultivées peuvent donc fournir une partie de la solution, particulièrement pour l'Afrique et l'Amérique latine, où les ressources en terre restent abondantes, mais ce serait aux dépens des écosystèmes naturels. Dans les autres continents, l'extension des superficies agricoles se fera nécessairement aux dépens d'écosystèmes « naturels » terrestres déjà beaucoup plus contraints (Leridon, Marsily, 2011).

#### 4.3.3.3. Où trouver l'eau pour l'irrigation ?

La dynamique du système hydrologique d'un bassin-versant opère un transfert des pluies tombées dans les saisons des pluies vers des écoulements en saison sèche, par l'ensemble des stockages et déstockages dans les divers compartiments du bassin-versant (Roche, Miquel, Gaume, 2012). Il est donc logique de chercher à accompagner ce système naturel dans son rôle régulateur en créant des réserves artificielles qui amplifient ces stockages pour rendre l'eau disponible au moment voulu. C'est ce qui a été fait dès les premières irrigations dans l'Antiquité.

La plupart des réservoirs ainsi constitués sont de petite taille (quelques milliers à quelques millions de m<sup>3</sup>) et de construction parfois artisanale (on abordera la question des grands ouvrages en partie 3). De même que les pompages individuels dans les aquifères, d'initiative individuelle ou communautaire, la prolifération de ces petites retenues (souvent qualifiées de collinaires) peut conduire à un pourcentage très élevé de régulation du débit des cours d'eau (allant fréquemment jusqu'à 50 % des écoulements). Au final, cela signifie qu'en aval du secteur irrigué, l'écoulement moyen annuel est réduit d'autant.

La philosophie des débits réservés au droit des prises d'eau ou des débits d'objectifs d'étiage dans des points cible aval après les consommations, telle qu'elle est pratiquée par exemple en France, consiste à considérer que les écosystèmes sont préservés dès lors que les plus faibles débits ne descendent que rarement en-dessous de certains seuils. En d'autres termes, en saison des pluies, tout le surplus est mobilisable pour être utilisé, en l'occurrence stocké pour être évapotranspiré à une autre saison et non restitué au milieu<sup>56</sup>. Certains gouvernements considèrent même que toute eau qui arrive à la mer est une eau perdue, que l'on aurait pu consommer plus utilement.

En France singulièrement, le débat autour de ces questions n'est pas serein. Si des professionnels agricoles considèrent ces aménagements comme un dû pour leur permettre de réaliser leurs activités, un certain nombre d'ONG s'opposent systématiquement à ces ouvrages. L'exemple du

<sup>55</sup>. L'irrigation en Europe atteint 10 % à 25 % de la surface agricole utile (SAU) dans les pays méditerranéens, mais elle est inexistante et ne dépasse pas 2 % dans les pays septentrionaux. La France, à hauteur de 6 %, est à la moyenne européenne. Elle connaît une baisse tendancielle de cet indicateur de l'ordre de 2 %/an sur les dix dernières années, sachant que les volumes de prélèvement diminuent plus fortement, de l'ordre de 7 %/an, ce que l'on peut sans doute imputer à l'évolution des mécanismes de subvention (Ayphassorho *et al.*, 2020).

<sup>56</sup>. En cela l'usage agricole se distingue fondamentalement de l'usage hydroélectrique ou de la régulation des crues : certes, ceux-ci prélèvent et stockent aussi, mais ils restituent dans le milieu les volumes stockés, évaporation de la retenue déduite.

drame des affrontements autour du projet abandonné de barrage de Sivens illustre jusqu'à quel point d'incompréhension, sur la base de diagnostics mal établis et non partagés, les protagonistes de cette confrontation pouvaient aller (Forray, Roche, 2015 et Roche, 2017). Cette question de l'aménagement à l'échelle des bassin-versants ne peut donc être abordée de façon sectorielle : on y reviendra dans la conception de la gestion intégrée des ressources en eau en partie 3.

### 4.3.4. Une agroécologie fondée sur la qualité des sols et adaptée au changement climatique

Un développement agricole durable (qu'on appelle souvent « agroécologie »<sup>57</sup>) suppose en premier lieu que les pratiques respectent et entretiennent la qualité des sols : la principale rareté du futur n'est ni l'eau, ni la surface susceptible d'être mise en culture, mais la qualité des sols cultivés (Chaumet *et al.*, 2009). Cette révolution bleue nécessite également que les cultures de chaque territoire s'adaptent aux conditions climatiques nouvelles, notamment à l'augmentation de la température : ces enjeux se combinent et vont dans le même sens.

#### 4.3.4.1. Un facteur aggravant : le changement climatique impose des adaptations significatives

Le changement climatique (qui aura pour effet des températures plus élevées et une plus forte activité du cycle de l'eau) peut sembler en première appréciation extrêmement favorable au développement de la production agricole, notamment en donnant la possibilité significative de mobiliser des terres qui sont trop froides aujourd'hui. En revanche, bien d'autres régions se verront soumises à un double stress supplémentaire, d'abord en raison des températures, ensuite en raison du besoin accru d'évapotranspiration, mais aussi par l'appauvrissement des apports durant ces périodes.

Dans les zones connaissant actuellement des climats chauds arides ou semi-arides voire tempérés, la première difficulté rencontrée par les cultures est celle de l'élévation de la température. Cela concerne en particulier les céréales, base de l'apport énergétique de la nutrition humaine, notamment durant la phase de maturation (remplissage des grains) quand la température dépasse 25°C à 30°C. La culture est alors « grillée » (on dit « échaudée ») et rien n'y fait : lui apporter de l'eau ne la sauve pas. Le nombre de jours ainsi « échaudants » augmenterait en France, selon les simulations du modèle Climator, de 15 % à 30 % dans un avenir proche et de 40 % à 50 % à plus long terme.

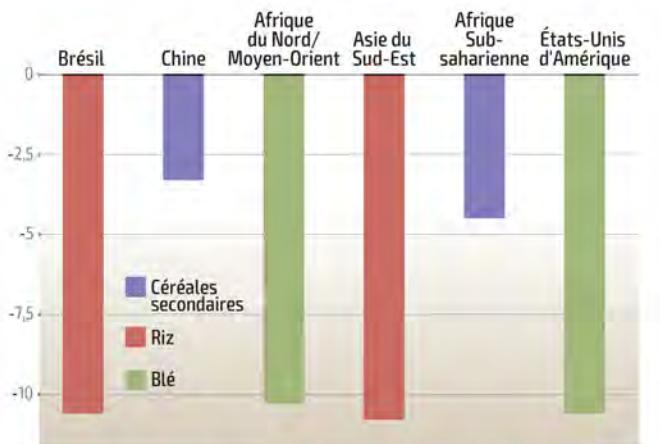
La première adaptation sera donc nécessairement de faire évoluer ces cultures de périodes caniculaires (estivales en France) vers des cultures mieux adaptées à ces nouvelles températures. Bien entendu, ce sujet ne se pose pas pour les cultures de période hivernale en France, ou plus généralement de saison froide dans d'autres régions.

La plus forte évapotranspiration liée à l'augmentation de température est le deuxième facteur de difficulté. Dans un sol donné, la réserve en eau dans laquelle puisent les racines est plus vite épuisée en l'absence de pluie. Sans irrigation, en période de croissance, le stress hydrique se

<sup>57</sup>. Pour approfondir les notions d'agroécologie, voir *Le dictionnaire d'agroécologie*, accessible sur : <https://dicoagroecologie.fr/>

développe plus vite, avec une perte de rendement voire de récolte. À culture identique, il ne fait donc pas de doute que le changement climatique accroît l'incitation à apporter une irrigation de complément.

Au final, la FAO anticipe une perte globale de rendement, à pratiques constantes, fortement différenciée selon les régions (voir FAO, 2016 et figure 48).



\* Par rapport aux valeurs de référence de 2050 en l'absence de changement climatique; résultat moyen de trois modèles de circulation générale

Figure 48 : Baisses (en pourcentage) des rendements céréaliers prévues en 2050 en raison du changement climatique si aucune mesure d'adaptation n'est prise. Tirée de FAO, 2016.

La FAO a développé l'idée d'agriculture climato-intelligente (ACI) pour synthétiser toutes les démarches souhaitables d'adaptation du secteur (FAO, 2018).

#### 4.3.4.2. Les démarches de progrès : un panel de solutions

Cette « révolution bleue » doit donc faire face à un triple défi :

- corriger des déséquilibres majeurs constatés aujourd'hui (la surexploitation) et restaurer des situations profondément dégradées (les pertes de qualité des sols) ;
- faire face à des besoins massifs nouveaux en raison de la croissance de la population et de la nécessité d'améliorer la qualité d'une alimentation aujourd'hui mal équilibrée ;
- s'adapter à des conditions climatiques sensiblement différentes, notamment en ce qui concerne les températures (entraînant une augmentation de l'évapotranspiration du couvert végétal) et, de façon moins bien établie et plus complexe, en ce qui concerne les précipitations.

Personne n'est sans doute aujourd'hui en mesure de dresser un tableau bien établi des évolutions à venir, mais de nombreux travaux de prospective tentent de prendre en compte l'ensemble de ces facteurs. Comme l'OCDE le souligne, il ne sera possible de faire face à la multiplicité de ces défis que par un panel de solutions ajustées aux conditions locales.

### 4.3.4.3. L'agriculture de conservation des sols

L'idée que le sol serait un substrat stérile auquel on apporterait les nutriments (engrais) nécessaires aux plantes pour leur développement ne prévaut plus depuis longtemps. Les organismes qui vivent dans le sol ont besoin d'oxygène et donc d'air : le sol n'est vivant que s'il contient de l'eau et de l'air en quantité suffisante et non excessive (il y a asphyxie si l'eau est entièrement substituée à l'air, par exemple).

La matière organique, outre son apport nutritionnel (fertilité), améliore la stabilité, la résistance à l'érosion et la réserve en eau facilement utilisable (RFU) du sol en fonctionnant un peu comme une éponge. La FAO a popularisé l'agriculture de conservation des sols (ACS) comme un « système cultural qui peut empêcher la perte de terres arables tout en régénérant les terres dégradées ». Reconnaissant le sol comme un milieu vivant, l'ACS est fondée sur une forte évolution des pratiques culturelles :

- réduire, voire supprimer le travail du sol ;
- faire évoluer les rotations : intégrer de nouvelles cultures à la rotation des sols (assoulements) via plus de cultures de saison des pluies ou des modifications des cultures de saison sèche ;
- assurer une couverture permanente des sols (cultures compagnes, maintien au sol des litières de feuilles, de tiges et de racines décomposées).

### 4.3.4.4. L'agriculture de précision et les améliorations technologiques

L'amélioration, par exemple, de la production du riz, suppose le développement de technologies avancées pour assurer un excellent nivellement des parcelles.

#### VOIR FOCUS N°6

Produire plus de riz sur moins de terres avec moins d'eau

De nombreuses autres améliorations technologiques contribuent à optimiser les productions (Aypahssorho *et al.*, 2020). Tout d'abord, il s'agit d'apporter la « bonne dose au bon endroit ». La géolocalisation, les capteurs, la modélisation agroclimatique fournissent des informations exploitables en temps réel aux systèmes automatisés et d'optimisation permettant un suivi différencié des parcelles. Cette technique présente de très nombreux avantages sur l'énergie consommée et les intrants utilisés, mais aussi sur la qualité du travail et l'exposition aux risques des agriculteurs, ainsi que sur la réduction des charges d'investissements des entreprises agricoles.

De plus, il convient de développer les « infrastructures agroécologiques » (haies, fossés, banquettes enherbées, hydraulique douce, agroforesterie, etc.), de réutiliser l'eau traitée (« Reut », voir § 3.12), ou encore d'optimiser l'irrigation<sup>58</sup>. Dans ce dernier cas, il s'agit de concevoir cette irrigation, partout où c'est possible, comme une « irrigation de résilience », d'appoint et de sécurité. Il ne s'agit alors plus que d'apporter des quantités d'eau limitées à des phases cruciales en acceptant de ne pas chercher la productivité maximale en quantaux à l'hectare (irrigation « star-

<sup>58</sup>. On se reportera pour approfondir les possibilités techniques d'amélioration de l'irrigation au rapport récent de l'IRSTEA (Serra-Wittling, Molle 2017).

ter», irrigation de sécurisation d'une culture compagne, etc.). Il est possible, pour diminuer les besoins, de développer l'esquive et l'évitement de la sécheresse : la gestion de la disponibilité en eau peut consister en une maximisation du stockage de l'eau au semis, la modification du positionnement du cycle cultural pour esquerir la sécheresse (date de semis anticipée, variétés précoces) ou la réduction des besoins en eau des cultures par une stratégie de rationnement (densité de peuplement, fertilisation).

#### 4.3.4.5. L'évolution des plantes vers plus de résilience et moins de consommation

Les bio-technologies (OGM ou autres) sont fréquemment évoquées comme des solutions pour les problèmes d'alimentation du monde de demain, notamment pour<sup>59</sup>:

- augmenter la résistance à la chaleur et à la sécheresse des cultures. Le principal intérêt serait de garantir un rendement minimum en conditions de fortes chaleurs et de stress hydrique. Ceci pourrait permettre d'augmenter les rendements les plus faibles en accroissant la part de la transpiration dans l'évapotranspiration. En revanche, il ne semble pas que l'efficience de l'échange eau-carbone soit significativement meilleure chez les plantes résistant à la sécheresse ;
- atteindre une meilleure efficience physiologique de l'échange eau-carbone au niveau des stomates. L'analyse des plantes en C3 et C4 ([voir Focus n°5 : Les différents métabolismes de la photosynthèse](#)) révèle que toute une partie de la physiologie des plantes est impliquée et que des changements importants de cette efficience se paient de changements importants du génome. Il est donc vraisemblable que peu de progrès seront obtenus sur ce plan dans les prochaines années.

##### VOIR FOCUS N°7

*Les New Breeding Technologies (NBT) : OGM ou pas OMG ?*

### 4.4. Filières, marchés et développement rural : quelle cohérence ?

#### 4.4.1. Aspects économiques et stratégiques

Les analyses d'évolution du marché mondial faites par l'IFPRI (Rosegrant, Ringler, 1999) concluent à un développement massif du commerce international (triplement pour la viande, doublement pour le soja et augmentation de deux tiers pour les céréales). En effet, la rareté de l'eau et des sols fertiles (ressources limitantes dans les régions à fort développement démographique) conduit à une logique d'importation massive de la nourriture. La même analyse montre que ceci pourrait satisfaire l'augmentation de la demande mondiale, mais n'aurait que peu d'effet sur le nombre des

<sup>59</sup>. Nous n'examinons pas ici les apports possibles des biotechnologies à la production agricole dans son ensemble. Cette question nécessiterait en effet des développements importants qui dépasseraient le cadre de ce manuel.

malnutris. La limitation du marché réside dans la capacité des pays les plus pauvres à supporter la charge des importations en devises étrangères (IWMI, 1999 et Rosegrant, Cai, Cline, 2002).

Dans quelle mesure la production d'un aliment sur place peut-elle être échangée contre le même aliment produit ailleurs, dans un contexte de ressources en eau moins limitantes ? L'importation d'eau virtuelle (*voir § 3.3.4*) résulte de la convergence de divers angles d'approche :

- alimentaire : assurer plus de production ;
- libérale : mieux profiter des avantages comparatifs ;
- environnementaliste : soulager la pression sur les ressources en eau et en sol les plus exposées en utilisant les lieux de production les plus propices.

Le critère selon lequel s'établit la spécialisation géographique n'est pas seulement lié aux ressources en eau : cela va parfois même à son encontre : c'est à la fois l'histoire et la nature des sols qui a induit la spécialisation du Nord de la Chine, dont une part significative est « exportée » au Sud, alors que c'est inversement au Sud que sont disponibles les ressources en eau, la solution trouvée étant alors celle du transfert d'eau (*voir § 3.1.4*).

D'ores et déjà la région Maghreb-Machrek (ou MENA, selon la terminologie onusienne) importe une part importante de sa consommation en céréales (33 % en 1995). Rapportée aux conditions de la Californie, celle-ci représente 40 Gm<sup>3</sup>/an d'eau virtuelle. En tenant compte d'une productivité moindre de l'eau sur place, c'est au moins l'équivalent de l'écoulement du Nil en Egypte (56 Gm<sup>3</sup>/an) qui est ainsi, selon le point de vue d'où on se place, « économisé » ou « acheté » à l'étranger.

La spécialisation géographique impliquerait une garantie de sécurité d'approvisionnement reposant sur des accords-cadres très solides garantissant la stabilité des prix. La fiabilité de l'accès à la nourriture de base est une condition stratégique structurante. Aujourd'hui, les crises récurrentes des prix et de restriction des exportations en situation de rareté montrent que cette sécurité n'est pas apportée aux pays et aux populations les plus pauvres. Il pose la question des échanges en sens inverse pour favoriser le développement économique du pays importateur.

Le développement rural dépend de la création de filières de production capables d'affronter la concurrence des marchés mondiaux, en apportant des revenus suffisants pour justifier le choix de cette implantation plutôt que celui de l'exode vers la ville, susceptible *a priori* d'offrir une gamme des services et d'emplois plus riches. Il peut être naturel de se tourner vers la valorisation des atouts locaux en recherchant des cultures apportant la meilleure valeur ajoutée : en général des cultures d'exportation à forts besoins de main d'œuvre (comme les haricots verts et les fleurs du Kenya, produits sous serre dans les environs de l'aéroport international Jomo-Kenyatta de Nairobi). On est alors confronté aux difficiles débats autour de l'OMC<sup>60</sup>.

Plongée dans un monde dont elle subit les règles, avec un taux de croissance de 1 %/an, l'agriculture africaine ne suit pas l'évolution démographique. L'Afrique est le seul continent au monde où la production *per capita* diminue. Le poids économique de l'agriculture s'y affaiblit : 17 % du PIB pour deux tiers de la main d'œuvre. Les conflits constituent un élément d'explication. L'agriculture est en Afrique sub-saharienne synonyme de pauvreté, de dénuement, d'exode

<sup>60</sup>. Les deux tiers des exportations reposent sur seulement quelques denrées (cacao, café, sucre, tabac et thé). Le café et le cacao comptent pour la moitié. La chute des cours a entraîné des pays entiers dans la ruine. C'est le cas de la Côte d'Ivoire — 42,5 % de la production africaine — confrontée à une division par trois du cours du cacao de 1999 à 2000.

finalement. Une agriculture vivrière autarcique de subsistance, à l'abri des marchés, mais en dépendance totale des fluctuations climatiques, reste dans bien des cas la seule survie rurale.

Il ne faudrait cependant pas s'en tenir à cette seule image. La culture la plus répandue en Afrique est le riz, qui représente à lui seul près d'un tiers des productions<sup>61</sup>. L'exemple du péri-mètre irrigué de l'office du Niger (Kuper, Tonneau, Bonneval, 2002) montre l'ensemble des enjeux qui se lient pour un développement durable d'une production rizicole en Afrique : le marché intérieur et une production moderne, gérée de façon performante à la parcelle, peuvent se rejoindre, si les circuits de distribution sont organisés, si chaque acteur est en responsabilité et si les taux de change assurent une compétitivité sur le marché intérieur. Les prélèvements de l'Office du Niger dans le fleuve Niger sont encore loin d'être optimisés : si la gestion à la parcelle est extrêmement scrupuleuse, il n'en est pas de même de l'ensemble des canaux d'aménée.

Malheureusement, l'instabilité de la région et la guerre contre Aqmi (Al-Qaida au Maghreb islamique), le Mujao (Mouvement pour l'unicité et le jihad en Afrique de l'Ouest) ainsi que la rébellion touarègue Ansar Dine (Les défenseurs de l'islam) ruinent dans le contexte de guerre ces initiatives, ces efforts patients et ces espoirs.

#### 4.4.2. Une production créatrice d'emplois en milieu rural

À l'instar de ce qui s'est produit en Europe à partir du XVII<sup>e</sup> siècle, l'exode rural peut trouver l'une de ses causes dans une plus grande productivité agricole, créant soit une surpopulation structurelle dans les campagnes (dès lors que l'agriculture réclame moins de bras), soit plus généralement une perte de compétitivité des territoires les plus fragiles, conduisant à l'impossibilité d'y maintenir les anciennes activités. Pour éviter la poursuite de ce que certains baptisent le « syndrome de São Paulo », il faut absolument compléter la formule de l'efficacité hydrique « *more crop per drop* » (« plus de récolte par goutte d'eau ») par celle de l'efficacité sociale « *more job per drop* » (« plus de travail par goutte d'eau » ; voir Van Koppen, 1998).

#### 4.4.3. Les investissements responsables et inclusifs : condition de succès

L'expérience est universelle : aucun progrès n'a pu se consolider sans une gestion par ceux qui en sont les bénéficiaires, maîtrisant tant les outils communs de production que l'accès aux circuits de distribution. Les grands périphériques irrigués gérés par des administrations ou des para-administrations ont été bien souvent des modèles d'inefficacité. Si la construction des infrastructures peut dépasser la capacité technique de communautés locales, celles-ci ne peuvent pas pour autant en être écartées et les mécanismes de renforcement de capacités et de transfert de gestion doivent être scrupuleusement préparés dès l'amont.

C'est toute la logique des démarches dites « *impact investment* », investissement social inclusif et responsable, sur laquelle nous reviendrons en partie 3, car ils ne sont pas spécifiques au secteur agricole.

*Chapitre suivant : Eau potable et assainissement : assurer le respect des droits de l'homme*

<sup>61</sup> On observe cependant une grande disparité entre les régions. Cultivé principalement dans les marais et les bas-fonds, le riz est majoritaire dans les zones humides du golfe de Guinée et de l'Est. Il est également très développé sur les plateaux de Madagascar.

# Pour approfondir

## ÉTUDES DE CAS

N°8

L'irrigation en Algérie

## FOCUS

N°5

Les différents métabolismes de la photosynthèse

N°6

Produire plus de riz sur moins de terres avec moins d'eau

N°7

*New Breeding Technologies (NBT) : OGM ou pas OGM ?*

N°8

## L'irrigation en Algérie

La superficie irriguée en Algérie est de l'ordre de 454 000 ha, soit 5,2 % de la surface agricole utile. Dans les grands pérимètres irrigués (100 000 ha), seulement 30 000 à 40 000 ha ont été irrigués en moyenne au cours des vingt dernières années.

Ce décalage important est lié à :

- la réduction tendancielle des ressources en eau affectées à l'irrigation, conséquence à la fois de la priorité accordée à l'alimentation en eau potable et industrielle, mais aussi de la sécheresse ;
- l'état vétuste des infrastructures des anciens pérимètres équipés en réseaux gravitaires il y a plus de 50 ans (Habra, Sig, Cheliff, Hamiz).

Pour les pérимètres de petite et moyenne hydraulique, irrigués principalement par des eaux souterraines, les besoins en eau sont estimés à 2,1 Gm<sup>3</sup>/an et sont actuellement couverts à 70 %.

Sur les 900 retenues collinaires réalisées durant les années 1980, seulement 400 étaient en exploitation en 2000 (capacité de stockage de 72 millions de m<sup>3</sup>), permettant d'irriguer une superficie totale de 18 000 ha. Les 500 autres retenues ont été détruites par les crues ou envasées. Un premier programme a alors porté sur la réalisation d'une centaine de retenues collinaires d'une capacité totale de 30 millions de m<sup>3</sup> pour l'irrigation d'une superficie de 12 500 ha. Puis un plan national de l'eau prévoyait de nombreux ouvrages et transferts, ainsi que plus de 1 000 nouvelles retenues collinaires. En 2019, l'Algérie dispose de 84 grands barrages d'une capacité de 9 Gm<sup>3</sup>. La réalisation de onze stations de dessalement, d'une

capacité de production de 2,2 m<sup>3</sup>/j, a permis de réaffecter à l'agriculture les eaux des barrages initialement utilisées pour l'alimentation en eau potable.

La désertification est partout présente et affecte directement l'activité pastorale. 20 millions d'hectares sont soumis à :

- un surpâturage, entraînant la régression de la productivité des parcours de 120-150 unités fourragères par hectare en 1978 à moins de 60 ;
- une céréaliculture aléatoire et mécanisée, induisant la dégradation des sols fragiles à l'érosion éolienne. Par cette voie, on assiste à une perte des superficies praticables pour les parcours pastoraux estimée entre 300 000 et 350 000 ha/an.

L'Algérie prévoit, à long terme, d'étendre l'irrigation à 1 million d'hectares, dont 400 000 ha en grands pérимètres et 600 000 ha en petite et moyenne hydraulique. L'analyse des conditions de remplissage, la prise en compte des aléas et des possibilités de modification des statistiques d'apports<sup>62</sup> en liaison avec des changements climatiques à l'échelle des durées de vie de ces ouvrages, méritent d'être particulièrement étudiées. La soutenabilité de cette exploitation des ressources en eau pose question (Ouanouki, Kettab, 2015).

[REVENIR AU COURS](#)

§ 4.3.2.1

<sup>62</sup> Depuis la sécheresse de 1976, les taux de remplissage envisagés sur la base des statistiques s'appuyant sur des données antérieures (qui ont l'avantage d'être fiables) de fréquence de retour décennale semblent n'avoir guère de chance d'être assurés dans un contexte où l'on estime aujourd'hui un déficit global de précipitations de l'ordre de 20 % et un déficit d'écoulement de 45 % par rapport aux données utilisées pour les études de dimensionnement (communication personnelle de P. Ribstein avec Y. Reumaux).

N°5

## Les différents métabolismes de la photosynthèse

Source : Daniel Zimmer (Roche, Zimmer, 2006).

Tout se passe au niveau des stomates, de minuscules pores situés sur les feuilles que ferment deux cellules régulatrices, grâce auxquels les plantes absorbent le CO<sub>2</sub> et perdent de l'eau. Les stomates constituent un niveau essentiel de couplage des cycles globaux du carbone et de l'eau, mais aussi de régulation du fonctionnement des végétaux : dès que la plante manque d'eau, les stomates se ferment mécaniquement, ce qui réduit à la fois les pertes d'eau et les entrées de CO<sub>2</sub>.

La photosynthèse comporte deux suites de réactions : une phase photochimique où l'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique dans une molécule relais, l'ATP, et une phase non photochimique (appelée cycle de Calvin) où l'énergie convertie sert à transformer le CO<sub>2</sub> en sucres. Les plantes se limitant au cycle de Calvin sont appelées « plantes en C3 » car la première molécule qu'elles forment est un acide organique à trois carbones, l'acide phosphoglycérique. D'autres plantes dites « en C4 » effectuent une « préfixation » du CO<sub>2</sub> sur un acide organique à trois carbones et le transforment en un acide à quatre carbones, qui est transféré depuis les parties externes des feuilles vers des parties internes, où il est retransformé en l'acide organique de départ, libérant un CO<sub>2</sub> qui est utilisé par le cycle de Calvin. Les plantes en C4 se rencontrent principalement dans les régions tropicales et sub-tropicales.

Les enzymes des plantes en C4 travaillent avec des pressions partielles en dioxyde de carbone plus faibles que celles nécessaires aux plantes en C3. La plante ouvre moins ses stomates, mais fixe quand même du CO<sub>2</sub>, concentré vers les zones internes. Pour assimiler 1 g de CO<sub>2</sub>, les plantes en C3 perdent par transpiration plus de 600 g d'eau et celles en C4 environ 300 g.

Il existe un troisième type de métabolisme, celui des « plantes CAM » (*Crassulacean Acid Metabolism*) proche de celui des plantes en C4, mais différé dans le temps. La nuit, les stomates ouverts permettent l'entrée de CO<sub>2</sub>. Le jour, les stomates demeurent fermés (sans alimentation en CO<sub>2</sub> et sans perte en eau), mais les plantes utilisent l'énergie photochimique pour mettre en œuvre le cycle de Calvin.

**REVENIR AU COURS**

§ 4.2.2

N°6

## Produire plus de riz sur moins de terres avec moins d'eau

*Source : Pierre Dubreuil (Roche, Zimmer, 2006).*

Plus de 200 millions de petits exploitants asiatiques produisent 75 % de la récolte mondiale de riz sur environ 80 millions d'hectares, dont la moitié fournit déjà deux ou trois récoltes par an. Mais les rendements plafonnent au niveau du potentiel des meilleures variétés et l'environnement s'est détérioré (salinisation, excès d'engrais et de pesticides, dégradation du statut organique et déficiences minérales des sols). L'eau à usage agricole représente 75 % des ressources de l'Asie et la riziculture en consomme la moitié, avec une faible productivité : il faut ainsi 3 à 5 m<sup>3</sup> d'eau pour produire 1 kg de paddy en Chine par exemple.

Avec la croissance démographique et la réduction des superficies par la croissance urbaine, un lourd défi technologique devient inéluctable : produire plus de riz sur moins de terres avec moins d'eau. Outre le rôle que vont jouer l'amélioration variétale et les procédures agricoles raisonnées, le défi ne sera vraiment relevé que par une économie considérable de l'eau dédiée à la riziculture. Or les pertes d'eau sont dues à la percolation et à l'infiltration sous les diguettes ainsi qu'à l'évaporation du plan d'eau. Les règles et les pratiques nouvelles suivantes permettent de réduire ces pertes au niveau du casier rizicole :

- la réduction de la quantité d'eau employée par un planage guidé au rayon laser ;
- la diminution des pertes en eau dans les fentes de rétraction du sol d'un tiers environ par un travail approprié du sol entre deux cycles cultureaux ;
- le maintien de la surface du sol à environ 80 % de la saturation en eau après le tallage du riz au lieu d'une submersion permanente (déjà pratiqué en Chine) ;
- le semis direct de graines pré-germées sur boue, à la place du repiquage, permettant un gain de 25 % d'eau (déjà pratiqué en Thaïlande, au Vietnam et aux Philippines) ;
- des modifications des itinéraires techniques agricoles, tels que le travail minimum du sol ou l'insertion d'une culture aérobie intercalaire entre deux cycles de riz irrigué (le soja, la patate douce, etc.).

**REVENIR AU COURS**

§ 4.3.4.4

N° 7

## Les New Breeding Technologies (NBT) : OGM ou pas OGM ?

Des divergences d'appréciation existent concernant l'interprétation des nouvelles technologies (OGM ou non) pour l'amélioration génétique des variétés, pour une meilleure adaptation aux besoins et notamment au changement climatique. Elles sont bien explicitées dans un constat de divergence entre le CGEDD et le CGAAER (Ayphassorho *et al.*, 2020, rapport dont sont tirées les citations suivantes) sur l'utilisation des *New breeding technologies* (NBT)<sup>63</sup> dans l'adaptation de l'agriculture au changement climatique.

« [Selon le CGAAER], le progrès génétique constitue un important levier d'adaptation, afin de produire du matériel végétal plus résistant à la sécheresse, aux ravageurs, aux maladies et à des conditions évolutives de climat et de milieu. Il présente également un intérêt majeur pour réduire l'utilisation de produits phytosanitaires de synthèse et les besoins en eau de l'agriculture. Au-delà des techniques traditionnelles de sélection, d'importation (avec précautions) de matériel végétal, de mobilisation de variétés anciennes ou de sélection participative, les missionnés du CGAAER considèrent que les NBT, et en particulier la technologie CRISPR-Cas 9<sup>64</sup>, présentent l'avantage courant d'être plus précises, plus rapides et moins chères. Dès lors qu'elles n'entraînent pas de rupture génétique et n'incorporent pas de gènes issus d'autres espèces, elles constituent une perspective particulièrement intéressante dans le contexte du changement climatique. Elles doivent donc pouvoir être testées et utilisées dans un cadre réglementaire adapté. À défaut d'explorer cette voie, l'agriculture française pourrait être rapidement distancée par la concurrence internationale et se trouver en difficulté pour s'adapter à l'évolution climatique et maintenir sa compétitivité [...].

Le CGEDD prend acte de l'avis de la Cour de justice européenne, appuyé sur le conseil de ses experts, et de l'arrêt du Conseil d'État du 7 février 2020 qui considèrent l'un et l'autre que les nouvelles techniques de mutagenèse doivent relever de la réglementation relative aux organismes génétiquement modifiés (OGM). L'interdiction en droit français de l'utilisation des OGM conduit donc *de facto* à l'interdiction de l'utilisation des NBT. Certaines dérives observées dans l'utilisation des manipulations génétiques par NBT pour rendre les plantes tolérantes aux herbicides, ce qui va dans le sens d'une augmentation de l'utilisation de ces produits, en particulier du glyphosate, de manière opposée aux orientations du gouvernement français, renforce la position des missionnés du CGEDD de ne pas mobiliser ces techniques pour améliorer la tolérance des plantes au stress hydrique. Les techniques traditionnelles de sélection, la mobilisation de variétés anciennes et la sélection participative sont à même de permettre les améliorations du matériel végétal pour la résistance au stress hydrique sans avoir besoin de recourir à des techniques de manipulation génétique ».

### REVENIR AU COURS

#### § 4.3.4.5

<sup>63</sup>. Les *New Breeding Technologies* (nouvelles techniques de sélection végétale) parviennent à « cibler et modifier le génome des plantes afin d'obtenir rapidement des variétés stables, à la différence des méthodes classiques de sélection végétale qui procèdent par croisements et qui prennent plusieurs années supplémentaires. Par rapport aux OGM, les plantes obtenues par les techniques NBT sont réputées se caractériser par l'absence d'ADN étranger ». La greffe, pratiquée de longue date, est classée de ce point de vue dans les NBT (source : WIKIPEDIA. *New Breeding Techniques* [en ligne]. Mis à jour le 14.03.2020. Disponible sur [https://fr.wikipedia.org/wiki/New\\_Breeding\\_Techniques](https://fr.wikipedia.org/wiki/New_Breeding_Techniques)).

<sup>64</sup>. Les « *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* (courtes répétitions palindromiques groupées et régulièrement espacées), plus fréquemment désignées sous le nom de CRISPR [L], sont des familles de séquences répétées dans l'ADN. Une telle famille se caractérise par des séries de répétitions directes courtes (de 21 à 37 paires de bases) et régulièrement espacées par des séquences appelées « *spacer* », généralement uniques, de 20 à 40 paires de bases. Le système CRISPR-Cas9, d'abord utilisé pour typer des souches de bactéries, est récemment devenu un outil de génie génétique à fort potentiel. CRISPR-Cas9 est notamment utilisé comme ciseau moléculaire afin d'introduire des modifications locales du génome (manipulations souvent qualifiées d'édition génomique) de nombreux organismes modèles ». (Citation tirée de : WIKIPEDIA. *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* [en ligne]. Mis à jour le 8.11.2020. Disponible : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Clustered\\_Regularly\\_Interrupted\\_Short\\_Palindromic\\_Repeats](https://fr.wikipedia.org/wiki/Clustered_Regularly_Interrupted_Short_Palindromic_Repeats)).



# Chapitre 5 | Eau potable et assainissement

## Assurer le respect des droits de l'homme

### À RETENIR

**20** Le deuxième très grand enjeu d'avenir est celui de l'eau potable et de l'assainissement, y compris celui de la dépollution des eaux rejetées après usage.

**21** L'accès à une eau saine à des coûts raisonnables est une condition indispensable de l'amélioration des conditions sanitaires pour les plus déshérités de la population mondiale et en conditionne le développement social et économique. Les maladies diarrhéiques demeurent une des toutes premières causes de décès dans le monde, totalisant 1,4 million de morts chaque année (2,2 millions en 2000). Toute approche sanitaire des maladies hydriques implique une triple action : potabilisation de l'eau distribuée, assainissement et hygiène domestique. À ces fins, la disponibilité d'eau en quantité, d'un accès facile, et son évacuation ont autant d'importance que sa qualité. La crise de la COVID-19 a rappelé à tous l'enjeu du lavage des mains.

**22** Près de 40 % des habitants de la planète n'ont pas un approvisionnement sûr en eau potable et 55 % n'ont pas un assainissement sûr.

La corvée d'eau et les mauvaises conditions d'hygiène et de dignité à l'école (absence de sanitaires respectant l'intimité des élèves), mais aussi à domicile sont des freins puissants au développement. Les filles en sont les premières victimes.

**23** Le droit de l'homme que constitue l'accès à l'eau potable et à l'assainissement n'est pas correctement respecté et les États sont responsables de la mise en place de démarches de progrès continus.

**24** **Au sein des engagements internationaux, le passage des objectifs du millénaire pour le développement (OMD) aux objectifs de développement durable (ODD) a été l'occasion d'élargir le champ des objectifs et de renforcer les cibles, bien que les résultats constatés de la mise en œuvre des OMD aient été mitigés.**

Les indicateurs des ODD ont tenu compte des difficultés rencontrées pour les OMD et ont été établis après de longues concertations. Ils restent un compromis entre la volonté d'affichage politique et la capacité des services statistiques à rendre compte de cibles difficiles à quantifier.

La force de ces démarches tient dans la capacité qu'elles offrent pour évaluer les stratégies nationales, à travers des revues volontaires présentées par les pays et par des rapports simultanés des agences des Nations Unies, sous le regard des ONG qui disposent d'une capacité de contradiction factuelle des bilans officiels, qui se renforce avec les réseaux sociaux.

25

La régulation des services publics comporte plusieurs volets : tarifaire, sanitaire (conformité de l'eau distribuée aux normes de santé publique) et environnementale (volumes prélevés, collecte des eaux usées et traitement avant restitution au milieu). Quand il est fait appel à un opérateur privé, s'y ajoute, comme pour toute activité publique, le contrôle de régularité contractuelle, notamment au regard du droit de la concurrence.

**L'acteur clé est l'autorité publique organisatrice du service**, locale (municipale en général) ou nationale. Sa responsabilité concerne tous les choix stratégiques : quels niveaux de service, quels prix et quelle politique de gestion des actifs ? Elle choisit l'opérateur du service qui lui doit une performance opérationnelle qu'elle doit pouvoir contractualiser et contrôler. Que cet opérateur soit lui-même public, ou de capitaux mixtes ou entièrement privés, cela relève du choix de cette autorité. Il faut que ce choix puisse être révisé régulièrement. Le renforcement des capacités des autorités locales, en particulier dans les centres urbains secondaires, est crucial.

26

La propension des décideurs publics, presque partout dans le monde, à privilégier les investissements de nouvelles infrastructures et à **négliger l'entretien, le maintien en bon état de service des installations et la gestion de ces actifs essentiels** (*asset management*) reste une difficulté majeure : les fuites dans les réseaux par manque d'entretien et de

renouvellement coûtent cher à tous. Les installations d'assainissement (réseaux et stations de traitement) sont trop souvent mal entretenues et mal renouvelées et ne rendent pas le service de dépollution effective des eaux pour lequel elles ont été prévues.

27

La participation des personnes concernées aux décisions n'est pas un luxe pour se faire plaisir, c'est la condition sine qua non de la performance et de la soutenabilité des services.

28

La principale injustice concerne ceux qui n'accèdent pas aux services et paient beaucoup plus cher leur eau auprès de revendeurs qui ne sont pas en mesure de leur assurer la qualité de l'eau ainsi distribuée. La tarification des services doit résoudre la difficulté d'un financement soutenable des services sans que les plus démunis ne soient exclus pour des raisons financières.

*Chapitre suivant : L'eau au cœur des objectifs de développement durable*

## 5.1. L'eau : facteur de santé publique

### 5.1.1. L'eau dans notre corps

Notre corps est composé d'eau pour 65 % de son poids. La teneur en eau de nos composants et organes varie de 20 % pour les tissus adipeux et 25-30 % pour les os à 76 % pour les muscles et 80-85 % pour le cerveau.

L'eau sert :

- à la régulation thermique (transpiration : 0 à 10 L/j) ;
- au transport interne des substances : hormones, sels et nutriments. C'est le médiateur primordial de toutes les réactions biochimiques qui se déroulent dans notre organisme. L'eau du réseau sanguin (plasma : 90 %) transporte également les globules permettant la respiration ;
- au lavage interne : évacuation des déchets et des toxines (1 à 2 L/j)

De l'eau est produite, ainsi que du gaz carbonique, à l'issue de la réaction de combustion respiratoire.

Complémentaire au réseau sanguin, le système lymphatique relie tous les organes par leurs tissus conjonctifs et sert d'intermédiaire entre les capillaires sanguins et les cellules. La circulation y est plus lente, car elle s'effectue sans pompage, par perméation. Néanmoins, des canaux de circulation préférentielle existent, qui mènent aux ganglions lymphatiques et à l'organe maître : la rate.

Les reins jouent un rôle déterminant dans l'économie et le recyclage de l'eau du corps. Les artères rénales reçoivent un quart du sang pompé à chaque battement du cœur. Les reins filtrent de l'ordre de 190 litres d'eau par jour, soit plus de trois fois le poids total de l'eau dans un corps de 80 kg.

La régulation de la concentration du sang s'effectue au niveau de l'hypothalamus qui stimule la production d'hormones responsables de la sensation de soif, d'une part, et par variation de la dilution de l'urine d'autre part. Dans les cas de diarrhée mortelle, la mort découle (chez les nourrissons notamment) du syndrome de déshydratation, qui est en fait un manque de sels et non pas d'eau. L'insuffisance de sels suite aux pertes intestinales ne permet plus en effet les échanges cellulaires.

### 5.1.2. Les maladies liées à l'eau

Nous n'abordons ici que les maladies infectieuses. Il est courant de distinguer les maladies selon leurs voies de transmission, assurée directement ou indirectement par l'eau.

Lorsque l'eau a un lien direct avec la transmission, on distingue :

- les maladies transmises par l'eau de boisson : choléra, hépatite A, typhoïde, giardiase, etc.
- les parasitoses causées par le contact avec une eau contaminée : schistosomiase, dracunculose. Alors que cette dernière, (communément appelée le ver de Guinée) est quasiment éradiquée, la schistosomiase (ou bilharziose) représente encore un important problème de santé publique dans les pays chauds. D'autres maladies contractées lors de baignades (amibiases, otites, etc.) sont causées par des agents pouvant aussi se trouver dans les eaux de boisson.

En ce qui concerne les liens de transmission indirects par l'eau, on trouve :

- les maladies liées au manque d'eau pour se laver : gastroentérite, gale, lèpre, typhus, COVID-19, etc.
- les maladies à vecteurs dépendant de l'eau : paludisme, filarioses, onchocercoses, fièvre jaune, dengues, etc. Ces maladies sont propagées par les moustiques, à l'exception de l'onchocercose, propagée par la piqûre d'une mouche, la simulie. Cette dernière maladie, qui cause la cécité, fut à l'origine de l'abandon de villages entiers dans le Sahel. Le cycle de vie de ces insectes comporte une phase larvaire aquatique.

Une autre classe de maladies correspondrait à des maladies fécales ne transitant pas par l'eau, telle que la téniase (parasite transmis par la viande de porc).

En vue d'établir ses priorités d'action, l'Organisation mondiale de la santé mène régulièrement de vastes études statistiques sur la prévalence des diverses maladies dans le monde, dans laquelle les données de mortalité ont été complétées par une étude de leur pouvoir incapacitant.

L'indicateur de morbidité, en nombre de DALY (*Disease Adjusted Life-Year*) est construit en totalisant les journées de maladies, pondérées par le degré d'invalidité, ramenées à une espérance de vie normale (tableau 17). L'indicateur du nombre d'années perdues par décès prématuré (*Years of Potential Life Lost* : YLL) mesure le nombre d'années d'espérance de vie qui ont été perdues du fait d'un décès prématuré. Il représente une alternative à la mesure du taux de mortalité qui renforce le poids relatif des décès de personnes jeunes (figure 49).

**Tableau 17 : Importance pour la santé publique des maladies liées à l'eau.**

Source des données : OMS, 2000 et 2018 de la base de l'Observatoire mondial de la santé  
(accessible sur <https://www.who.int/gho/database/fr/>)

Importance en termes de santé publique		Mortalité			Morbidité		
		rang	% total	Millions de morts	rang	% total	Millions de DALY
Gastro-entérites	1990	4	5,8	2,9	2	7,2	113
	1998	6	4,1	2,2	2	4,1	99
	2016	5	2,5	1,4			
Paludisme	1998			1 à 2	8	2,8	39
	2012	10	0,7	0,435			

Passées du 4<sup>e</sup> au 6<sup>e</sup> rang entre 1990 et 1998 (le SIDA et l'asthme ayant connu une forte augmentation), les gastro-entérites aiguës (ou diarrhées)<sup>65</sup> ont sensiblement décru, mais sont remontées à la 5<sup>e</sup> place grâce à l'amélioration de la prévention du SIDA.

<sup>65</sup>. Inflammation de la muqueuse du tube digestif, elles sont pour la plupart liées à la propagation d'un rotavirus, notamment chez les enfants de moins de cinq ans, mais peuvent également être bactériennes ou parasitaires.

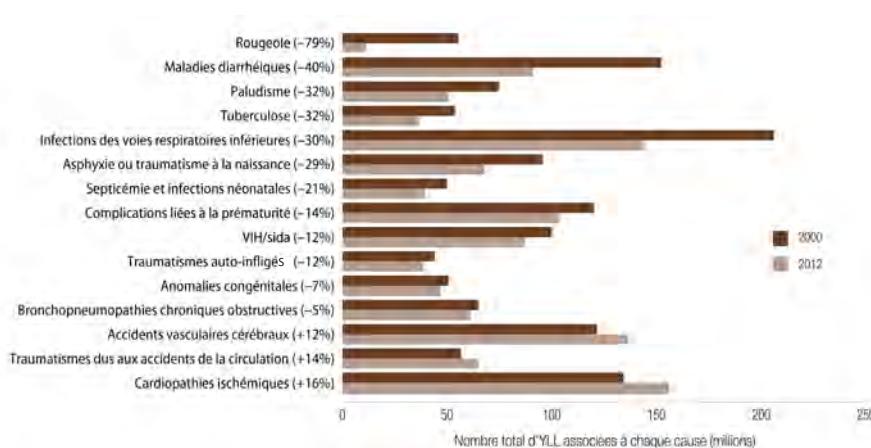


Figure 49 : Évolution de 2000 à 2012 du nombre d'années perdues par décès prématué (YLL) et par cause de décès. Tirée de OMS, 2014.

Les maladies diarrhéiques<sup>66</sup> (essentiellement les gastro-entérites) demeurent ainsi une des toutes premières causes de décès dans le monde, totalisant 1,4 million de morts chaque année (2,2 millions en 2000). Selon les façons de comptabiliser, elles touchent en moyenne entre 0,5 et 2 fois chaque personne chaque année dans un pays riche et entre 1 et 10 fois les habitants de pays pauvres.

Les enfants en sont les principales victimes : les diarrhées constituent la deuxième cause de mortalité infantile (525 000 décès par an avant l'âge de cinq ans)<sup>67</sup>. Cette mortalité a nettement diminué depuis 1990, suite au développement de l'administration de sels de réhydratation. Ce n'est pas le cas de l'incidence de la maladie, qui demeure dans les mêmes ordres de grandeur. Les politiques d'hygiène domestique, l'eau potable, les déchets et l'assainissement sont essentiels pour les voies de transmission des maladies fécales-orales et n'ont pas suffisamment progressé pour avoir réduit cette incidence.

Les maladies des voies respiratoires inférieures, notamment les bronchites et les pneumonies, sont transmises par des virus, des bactéries ou des champignons. Dans tous les cas, le lavage des mains fait partie des mesures d'hygiène contribuant à en réduire la propagation.

Nous aborderons au § 8.4.1 la façon de prendre en compte les maladies à moustiques dans les politiques d'aménagement et de gestion des ouvrages hydrauliques.

### 5.1.3. Les maladies fécales-orales

La distinction des maladies selon leurs voies de transmission est loin d'être claire et il ne faut pas prendre au pied de la lettre la phrase attribuée à Louis Pasteur (« nous buvons 90 % de

<sup>66</sup>. Émissions de selles, liquides ou pâteuses, de couleurs variées, qui sont surtout « quotidiennes, trop fréquentes et trop abondantes ».

<sup>67</sup>. La proportion de décès d'enfants de moins de cinq ans dans le monde avait reculé, passant de 20,4 millions à 10,9 millions par an de 1960 à 2000. Pendant ce temps, le nombre de décès enregistrés en Afrique subsaharienne avait presque doublé, passant de 2,3 millions à 4,5 millions chaque année.

nos maladies »). Les maladies atteignant l'homme par la voie de la boisson peuvent également l'atteindre à l'occasion d'un contact avec les *excreta*. Il ne suffit pas d'assurer la potabilité de l'eau de boisson mais il faut des conditions générales d'hygiène qui supposent un ensemble intégré de mesures (figure 54).

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°9

L'épidémie de choléra à Lima en 1991

### 5.1.4. Le rôle de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement

Dans les années 1950, les Niçois savaient bien qu'il ne fallait pas boire l'eau de Marseille. Les postes de chloration du réseau ont ensuite joué un rôle décisif dans l'éradication du choléra dans cette ville (Maksimović *et al.*, 2001). Une très forte baisse des maladies hydriques a été observée au moment de l'extension des réseaux de distribution d'eau potable. Il ne faut cependant pas déduire de tels exemples que la distribution d'une eau potable à elle seule permet l'amélioration de conditions sanitaires insuffisantes. Très souvent, les points de prélèvement d'eau sont proches des habitations humaines ou constituent des lieux d'abreuvement du bétail qui ne sont pas protégés de la contamination bactérienne par les eaux. L'élimination à domicile des *excreta*, y compris ceux des enfants, et le nettoyage des abords des maisons sont les premières mesures à prendre.

L'incidence des gastro-entérites est réduite d'au moins 30 % par la pratique régulière du lavage des mains, au moyen de savon ou, à défaut, de cendres, et souvent de 40 % par une hygiène domestique plus complète (Curtis, Cairncross, 2003).

Les exemples comparés du Bangladesh et de l'Inde montrent que, partant des situations similaires, mais ne bénéficiant pas du même développement économique, le Bangladesh a obtenu des résultats très encourageants sur la mortalité infantile en milieu rural, grâce à des campagnes de communication, d'éducation et de dialogue permettant de surmonter les difficultés psychologiques de l'usage des latrines (tableau 18).

**Tableau 18 : Comparaison des résultats obtenus par l'Inde et le Bangladesh de 1990 à 2004.**  
Tiré de PNUD, 2006a.

Indicateur	Bangladesh			Inde		
	1990	2004	Évolution	1990	2004	Évolution
Assainissement (national)	20	39	+19	14	33	+19
Assainissement (rural)	12	35	+23	3	22	+19
Mortalité infantile (%)	96	56	-40	84	62	-22

Gérard Payen, qui a joué un rôle majeur dans la prise de conscience internationale de ces enjeux, a calculé (Payen, 2013), en s'appuyant sur une étude de Guy Hutton (Hutton, Haller, Bartram, 2007), le nombre d'épisodes de diarrhées évité selon l'ambition des politiques d'eau potable et d'assainissement (tableau 19 : pour les définitions précises, voir § 5.2.6).

**Tableau 19 :** Impact de différentes politiques en matière de diarrhées évitées. Tiré de Payen, 2013.

Politique menée. <i>L'effet est mesuré sur 5 319 millions de cas par an pris en compte dans l'étude</i>	Millions de cas de diarrhée évités par an	%
OMD eau potable (accès « non amélioré » réduit de 50 %)	150	3
OMD eau potable et assainissement (accès « non amélioré » à l'eau potable et absence de toilettes privatives hygiéniques réduit de 50 %)	525	10
Accès universel (100 %) à des sources d'eau améliorées et à des toilettes privatives hygiéniques	880	17
Désinfection de toutes les eaux utilisées	2 523	47
100 % des branchements d'eau potable et d'assainissement	3 707	70

L'enjeu socio-économique a été chiffré par Guy Hutton dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices (ACB) pour le compte de l'OMS (Hutton, 2012). Les pertes économiques générées par l'insuffisance des services s'élèvent à 260 milliards de US\$ (liées à la mortalité précoce, aux dépenses de santé, à la perte de temps) soit 1,5 % de PIB. En revanche, le retour sur investissement serait en moyenne de 4\$ de bénéfices par dollar dépensé, ce qui place ces dépenses publiques au tout premier plan des outils efficaces pour le développement.

### 5.1.5. COVID-19 et lavage des mains

L'actualité de l'année 2020, avec le démarrage d'une pandémie nouvelle, la COVID-19 (maladie à coronavirus SRAS-CoV-2)<sup>68</sup>, pour laquelle étaient recensés, fin février 2021, en phase de forte propagation, 120 millions de cas et 2,5 millions de morts dans le monde, a remis sur le devant de la scène dans les pays développés l'importance cruciale de l'hygiène préventive (popularisée en France à cette occasion sous le terme de « gestes barrières »). L'UNICEF résume les conseils pratiques de prévention<sup>69</sup> dont l'essentiel vaut pour toute situation et pas seulement durant les périodes de crise épidémique. Il est nécessaire de faire un lavage soigneux des mains, qui dure 20 à 30 s en frottant bien avec du savon, à différents moments : avant et après les repas ; avant et après un contact avec un malade ; avant et après avoir changé un bébé ou aidé un enfant à utiliser les toilettes ; après être allé aux toilettes ; après avoir manipulé des poubelles ; en sortant et en entrant dans un lieu public ou à domicile.

<sup>68</sup>. Ce coronavirus partage en effet 80 % de ses gènes avec le coronavirus du SRAS (syndrome respiratoire aigu sévère) qui en 2002-2004 avait fait un peu moins de mille morts.

<sup>69</sup>. UNICEF. *Tout savoir sur le lavage des mains pour vous protéger de la maladie à coronavirus (COVID-19)* [en ligne]. Publié le 15 mars 2020. Accessible sur : <https://www.unicef.org/fr/coronavirus/tout-savoir-sur-le-lavage-des-mains-pour-vous-protéger-de-la-maladie-a-coronavirus-covid-19>

Ces prescriptions sont les mêmes pour tous types de maladies virales : SRAS, Ebola<sup>70</sup>, grippe à virus A (H1N1)<sup>71</sup>, poliomyélite, etc. C'est aussi le cas de la grippe saisonnière<sup>72</sup> et de maladies bactériennes comme la peste, le choléra, la tuberculose, certaines pneumonies, etc.

Elles ne sont qu'une part des pratiques d'hygiène élémentaires concernant l'eau, qui comportent également :

- la conservation de l'eau dans des récipients fermés pour une durée seulement limitée ;
- le lavage de la vaisselle ;
- la non-défécation en plein air, l'enlèvement des matières fécales (fèces) et la prévention du contact des enfants avec les fèces ;
- d'autres mesures qui ne sont pas liées à l'eau : l'évitement des crachats, des postillons, l'utilisation de couverts propres et non des mains pour s'alimenter, etc.

Ces pratiques élémentaires d'hygiène se heurtent très souvent à l'indisponibilité de l'eau potable dans les habitations, mais aussi dans les écoles. Les campagnes de mobilisation se multiplient pour permettre au moins l'accès à une eau saine et à des toilettes décentes dans les établissements scolaires, sous l'impulsion conjointe de l'UNESCO et de l'OMS, avec l'implication de très nombreuses ONG. Mais l'écart entre la réalité et les objectifs est gigantesque, avec des conséquences majeures en santé publique. Selon des données de 2017, 40 % de la population mondiale (62 % dans les PED) ne dispose pas de possibilités de se laver les mains à domicile et un tiers des écoles primaires n'ont pas d'eau potable ni de toilettes décentes.

### 5.1.6. Les besoins d'eau potable et d'assainissement

L'usage strictement domestique représente en France 150 L/hab./j. Si l'eau consommée pour sa potabilité (boisson, cuisson), ne représente que 4 à 5 % de l'eau domestique, la salle de bain et les WC représentent plus de la moitié de la consommation et les machines à laver près du tiers. Cet usage est peu consommateur : 90 % des prélèvements sont restitués au milieu. À ceci s'ajoute l'arrosage éventuel des jardins et des balcons, individuel ou collectif. Au niveau d'une ville, on passe à une consommation de l'ordre de 250 à 500 L/hab./j, en ajoutant les bureaux, les écoles, les industries raccordées, les besoins liés à l'agrément, l'hygiène publique ou la sécurité (bornes incendie, fontaines, jardins publics, nettoyage des rues, etc.).

### 5.1.7. La définition des niveaux de service

Qu'est-ce qu'un système de distribution d'eau potable, d'assainissement ou d'hygiène correct ? Si l'il est mal construit ou plus souvent encore mal géré, un système normalement considéré comme sûr peut être d'autant plus dangereux qu'on lui accorde sa confiance. Les statistiques sont très largement contestées car elles conduisent à considérer comme réglées des situations où le service est purement théorique. Les ONG, mais aussi la plus grande part des professionnels du

<sup>70</sup>. De l'ordre de 11000 morts en 2004-2005 en Afrique de l'Ouest.

<sup>71</sup>. De 150 000 à 570 000 morts selon les estimations en 2009-2010.

<sup>72</sup>. De 250 000 à 500 000 morts par an.

secteur, réclament l'instauration d'un système d'évaluation mondial reposant sur des observations des services effectivement rendus aux populations. Les notions et la terminologie se sont affinées (tableau 20). Des ambiguïtés ont été levées et les dispositifs statistiques sont supposés mieux représenter la réalité, ce que seule la durée permettra de vérifier.

Tableau 20 : Les niveaux de service dans le référentiel WASH pour les ODD. Tiré de JMP, 2017a.

Échelle de service du lavage des mains	
Installation élémentaire	Installation de lavage des mains avec savon et eau dans le foyer
Installation limitée	Installation de lavage des mains sans eau ou sans savon
Pas d'installation	Pas d'installation de lavage des mains
Échelle des services d'eau de boisson	
Géré en toute sécurité	L'eau de boisson provenant d'une source améliorée située sur place et disponible en cas de besoin, exempte de contamination de matières fécales (et des produits chimiques d'intérêt prioritaire)
Élémentaire	L'eau de boisson provenant d'une source améliorée avec un temps de collecte de 30 minutes ou moins l'aller-retour, incluant la file d'attente
Limité	L'eau de boisson provenant d'une source améliorée avec un temps de collecte de plus de 30 minutes l'aller-retour, incluant la file d'attente
Non amélioré	L'eau de boisson provenant de puits creusés non protégés ou de sources non protégées
Pas de service	L'eau de boisson collectée directement d'un cours d'eau, barrage, lac, étang, ruisseau, conduit, canal d'irrigation
<i>Les sources améliorées comprennent : l'eau canalisée, les forages ou les puits tubulaires, les puits creusés protégés, les sources protégées et l'eau en bouteille ou en sachet</i>	
Échelle des services d'assainissement	
Géré en toute sécurité	L'utilisation des installations d'assainissement améliorées qui ne sont pas partagées par plusieurs familles et dans lesquelles les <i>excreta</i> sont stockés et traités sur place ou acheminés et traités hors site.
Élémentaire	L'utilisation des installations d'assainissement améliorées qui ne sont pas partagées par plusieurs familles.
Limité	L'utilisation des installations d'assainissement améliorées partagées par deux ou plusieurs familles.
Non amélioré	L'utilisation des latrines à fosse sans dalle ou plateforme, latrines suspendues et latrines à seau
Pas de service	Défécation en plein air
<i>Les installations améliorées comprennent : la connexion au système d'égout, à la fosse septique ou aux latrines ; latrine et fosse améliorée ventilée, toilettes de compostage ou latrine à fosse avec dalle.</i>	

## 5.2. Engagements internationaux et droits de l'homme

### 5.2.1. Les droits de l'homme

Les droits de l'homme sont reconnus au plan international par la déclaration universelle des droits de l'homme (DUDH) adoptée en 1948 par l'assemblée générale des Nations Unies. Comme son nom l'indique, c'est une simple déclaration, c'est-à-dire qu'elle n'est pas juridiquement contraignante par elle-même. Elle a été déclinée en 1966 en deux conventions internationales : le pacte international relatif aux droits civils et politiques (PIDCP) et le pacte international relatif aux droits économiques, sociaux et culturels (PIDES), accompagnés eux-mêmes de divers protocoles facultatifs. Tout cet ensemble de textes constitue la charte internationale des droits de l'homme (CIDH).

Les droits du PIDESC relèvent d'un principe de « réalisation progressive ». Les obligations générales des États (faire respecter les droits de l'homme, les protéger et les mettre en œuvre) sont de prendre des mesures « délibérées, concrètes et ciblées » en vue d'approcher graduellement leur pleine réalisation et d'éviter toute régression, en « faisant usage de toutes ressources disponibles (y compris en faisant appel si nécessaire à l'aide internationale) »<sup>73</sup>, l'obligation d'agir de façon « non discriminatoire, participative et responsable » étant, elle, de portée immédiate.

Le PIDESC reconnaît :

- dans l'article 11 : « le droit de toute personne à un niveau de vie suffisant pour elle-même et sa famille, y compris une nourriture, un vêtement et un logement suffisants, ainsi qu'à une amélioration constante de ses conditions d'existence » ;
- dans l'article 12 : « le droit qu'a toute personne de jouir du meilleur état de santé physique et mentale qu'elle soit capable d'atteindre ».

### 5.2.2. L'eau potable et l'assainissement reconnus comme droits de l'homme

Par touches successives, les Nations Unies ont explicité que l'eau potable et l'assainissement constituent un des droits visés au PIDESC, alors que la DUDH et le PIDESC ne les citaient pas explicitement. Ainsi, en 2002, l'eau potable a fait l'objet de l'observation générale n°15 en ce sens du Comité des droits économiques, sociaux et culturels (CESCR). En 2010, l'assainissement a été traité par la résolution 64/272 de l'assemblée générale des Nations Unies qui reconnaît « le droit à l'eau potable et à l'assainissement comme un droit de l'homme essentiel au plein exercice de la vie et de tous les droits de l'homme ».

Catarina de Albuquerque, alors rapporteure spéciale des Nations Unies sur le droit à l'eau potable et à l'assainissement, regrettait à l'occasion du 6<sup>e</sup> Forum mondial de l'eau à Marseille (Albuquerque, Roaf, 2012), qu'il n'ait pas été fait mention de deux droits distincts et ayant un statut égal, considérant que « trop souvent, lorsqu'il est fait référence conjointement à l'eau [potable] et à l'assainissement, l'importance de l'assainissement est revue à la baisse en raison de la préférence

<sup>73</sup>. Observation générale n°3 du Comité des droits économiques, sociaux et culturels (CESCR) relative à la nature des obligations des États parties. Les observations générales sont des interprétations officielles du droit international et définissent précisément la nature des obligations qui s'imposent aux États signataires.

politique accordée à l'eau [potable] ». C'est bien aux articles 11 et 12 du PIDESC cités ci-dessus qu'il faut comprendre le rattachement de l'eau potable et de l'assainissement, comme partie intégrante d'un « niveau de vie suffisant » et du « meilleur état de santé ».

Pour être complet, il convient de se référer aussi à un certain nombre d'autres textes internationaux :

- la déclaration des peuples autochtones en 2007, mettant l'accent sur la dimension spirituelle de l'eau ;
- la convention sur l'élimination de toutes les formes de discrimination à l'égard des femmes ;
- la convention relative aux droits de l'enfant ;
- la convention relative aux droits des personnes handicapées.

Ces droits constituent une véritable injonction collective à agir. En cela, ils sont fondateurs de la mobilisation des acteurs de toutes sortes et de la « raison d'être » des opérateurs, qu'ils soient publics ou privés. À titre d'exemple, le secteur bancaire accorde désormais une grande importance à l'inscription de l'activité des entreprises qu'il soutient dans un clair « permis social d'action » (SLO : « *social license to operate* »). Évidemment, la loi internationale est le niveau le plus élevé de cette expression. On verra que la résolution 64/272 précise les conditions d'intervention du secteur privé.

### 5.2.3. Attention aux abus de langage concernant le droit à l'eau

Nombre d'acteurs utilisent communément le terme de « droit à l'eau », comme une expression de synthèse courante pour le « droit à l'eau potable et à l'assainissement ». Cette expression pratique est cependant très inadéquate, car elle peut aisément s'interpréter comme une sorte de droit d'usage de l'eau pour tout type d'utilisation, que l'on rapproche naturellement du « droit de l'eau », qui constitue dans chaque pays le corpus des règles juridiques et réglementaires régulant les usages de l'eau. Il faut bien distinguer deux enjeux. D'un côté, il y a la notion générale de l'eau comme « bien commun » (patrimoine commun de la nation, en droit français, de l'humanité comme de nombreuses ONG souhaiteraient le voir décider, en tout cas l'eau en tant que ressource à préserver). Nous revenons [au chapitre 7](#) sur ces questions pour tenter de les clarifier. Mais ce dont parlent les textes des Nations Unies, c'est le droit de chaque personne à des conditions de vie saines et dignes, dont l'une des composantes nécessaires est l'eau potable et l'assainissement visés par ces textes exclusivement : ce droit ne couvre donc aucun autre usage.

Nombre de pays ont inscrit ce « droit à l'eau » (au sens d'*« accès à l'eau potable et à l'assainissement »*) dans leur constitution<sup>74</sup>, comme le Kenya dès 2010. Cependant, il est fréquent que seule l'eau potable soit prise en considération, comme c'est d'ailleurs le cas en France.

<sup>74</sup>. Outre le Kenya, on peut citer : l'Afrique du Sud, le Maroc, la République démocratique du Congo, la Tunisie, la Bolivie, l'Équateur, le Mexique, les Maldives, le Nicaragua, l'Uruguay, la Slovénie, etc. Le droit français ne reconnaît que l'eau potable, malgré diverses initiatives parlementaires pour élargir la définition : le code de l'environnement (article L. 210-1) indique en effet « l'usage de l'eau appartient à tous et chaque personne physique, pour son alimentation et son hygiène, a le droit d'accéder à l'eau potable, dans des conditions économiquement acceptables par tous ». Une proposition de loi de La France insoumise, rejetée en 2018, allait largement au-delà de la formulation des Nations Unies en stipulant un principe de gratuité d'un accès minimal à l'eau potable : « toute personne a le droit fondamental et inaliénable d'accéder, gratuitement, à la quantité d'eau potable indispensable à la vie et à la dignité, prioritairement à tout autre usage ».

## 5.2.4. Quelles obligations réelles ?

Les États sont ainsi engagés de plusieurs manières. Il ne s'agit pas d'une obligation de fournir le service par eux-mêmes, ni de s'assurer de sa gratuité pour des besoins de base comme parfois on le comprend. Il n'est pas non plus question d'instaurer une gestion publique : les vendeurs d'eau (citernes, ambulants), ou les opérateurs privés peuvent intervenir selon les règles fixées par chaque État comme celui-ci le souhaite (les Nations Unies ne prescrivent pas un modèle de service<sup>75</sup>). En revanche, les États doivent s'assurer que l'accès à ces services essentiels n'est pas discriminatoire, que des acteurs n'accaparent pas les ressources en en refusant l'accès à d'autres et que les conditions financières d'accès ne sont pas un obstacle pour les plus démunis. Ils doivent aussi veiller à une amélioration continue de ces critères de façon crédible et accepter les mécanismes d'aide qui y contribuent.

## 5.2.5. Les objectifs du millénaire pour le développement (OMD) 2000-2015

C'est en conscience de la nécessité de ces efforts internationaux qu'en septembre 2000, l'assemblée générale des Nations Unies de Monterrey a fixé les Objectifs du millénaire en termes d'accès à l'eau potable. En septembre 2002, le sommet mondial du développement durable de Johannesburg a ajouté l'assainissement à ces objectifs. Le Forum mondial de l'eau à Kyoto en mars 2003 a travaillé sur les modalités pratiques de réalisation de ces engagements. Lors de cet événement, le panel mondial sur le financement de l'eau, présidé par Michel Camdessus, avait présenté le rapport *Financer l'eau pour tous*, qui comprenait de nombreuses propositions pratiques pour un accroissement significatif des financements : « Si l'objectif global est de doubler le montant total des ressources investies dans l'eau [...] les gouvernements des pays développés doivent tenir leurs engagements en ce qui concerne le renforcement des aides au secteur de l'eau [...] [L'aide au titre de l'Aide Publique au Développement devrait être doublée en première étape] » (Camdessus, Wipenny, 2003).

### VOIR ÉTUDE DE CAS N°10

Qu'a-t-on fait pour mettre en œuvre les OMD ?

D'après une évaluation faite conjointement en 2000 par l'Organisation mondiale de la santé et par l'Unicef, il aurait fallu desservir d'ici 2015 1,6 milliard d'habitants supplémentaires pour l'eau et 2,2 milliards pour l'assainissement afin de réduire de moitié la population n'accédant pas à des services de base. Selon le rapport du programme commun de surveillance (*Joint Monitoring Program : JMP*) de l'approvisionnement en eau, de l'assainissement et de l'hygiène (*Water, Sanitation and Hygiene : WASH*) du fonds des Nations Unies pour l'enfance (Unicef) et de l'Organisation

<sup>75</sup>. Le successeur de Catarina de Albuquerque, Léo Heller, a suscité de vives réactions en 2019 en mettant en consultation un document intitulé *Privatisation and human rights to water and sanitation* tendant à établir que, par nature, une gestion par un opérateur privé n'était pas propice à la mise en œuvre de ces droits. (Document accessible sur : <https://www.ohchr.org/EN/Issues/WaterAndSanitation/SRWaTer/Pages/PrivateSectorParticipation.aspx>). On peut se reporter à la réponse, parmi d'autres, de la *Water Governance Initiative*, soutenue par l'OCDE (voir chapitre 9) :

[https://www.ohchr.org/Documents/Issues/Water/Questionnaire/States/Letter\\_OECD.pdf](https://www.ohchr.org/Documents/Issues/Water/Questionnaire/States/Letter_OECD.pdf)

mondiale de la santé (OMS), l'objectif ainsi défini pour 2015 aurait été atteint dès 2010 pour l'eau potable, puisque 89 % de la population mondiale (soit 6,1 milliard de personnes), avaient alors accès à « des sources améliorées d'eau » (l'objectif était 88 %). Ce chiffre devait s'élever à 92 % en 2015 (OMS, UNICEF, 2013).

Il s'agit néanmoins d'un succès en trompe-l'œil, qui ne reflète pas la réalité de l'accès à l'eau potable. L'indicateur utilisé ne mesure en effet que l'accès à un « point d'eau amélioré » (« service de base »), mais ne tient compte ni de la qualité de l'eau, ni de la régularité du service. Dans les faits, c'est la moitié de l'humanité qui n'a pas un accès satisfaisant à l'eau potable (UN-Water, 2012) dont 19 % n'accèdent même pas à un service de base. Les disparités géographiques restent en outre importantes, avec 40 % de la population mondiale sans accès à l'eau potable vivant en Afrique. Le portage de l'eau, notamment en milieu rural, est une activité qui mobilise principalement les femmes et les jeunes filles, au détriment de leur développement (tableau 21).

**Tableau 21 : Temps quotidien consacré au portage de l'eau.** Tiré de PNUD, 2006b.

Temps (minutes par jour)	Bénin, 1998		Ghana, 1998-1999		Guinée, 2002-2003		Madagascar, 2001	
	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes
Urbain	16	6	33	31	10	3	16	10
Rural	62	16	44	34	28	6	32	8
National	45	12	41	33	23	5	27	9

Les progrès sont encore plus lents en matière d'assainissement, 2,5 milliards de personnes n'ayant pas accès à des toilettes et 1,1 milliard de personnes n'ayant pas d'autre choix que la défécation en plein air (UNSGAB, 2015). L'objectif fixé en 2002<sup>76</sup> pour 2015 ne devrait pas être atteint avant 2026. L'assainissement urbain, les systèmes d'égouts et le traitement des eaux usées continuent de faire défaut.

En définitive, le bilan tiré par les Nations Unies elles-mêmes (JMP, 2017b) de ces quinze dernières années (figure 50) aura été en retrait des objectifs, comme le résume pS-EAU<sup>77</sup> (pS-EAU, 2017), mais aucun acteur n'irait jusqu'à considérer que ce bilan est négatif et qu'il aurait fallu s'abstenir de cette initiative.

<sup>76</sup>. Les objectifs du Millénium adoptés en 2000 ne comportaient que l'objectif concernant l'eau potable. L'assainissement a été ajouté en 2002 au sommet de la Terre à Johannesburg grâce à une forte mobilisation des ONG et le soutien des pays européens, la France ayant joué un rôle majeur dans cette avancée (Roche, 2002a ; Roche, Feuillette, 2004).

<sup>77</sup>. « Le programme solidarité eau (pS-EAU) est un réseau multi-acteurs français qui s'engage pour garantir l'accès à l'eau et à l'assainissement pour tous ainsi que pour la gestion durable des ressources en eau (ODD 6) dans les pays en développement. Privilégiant le soutien aux acteurs locaux, il permet les échanges et organise la concertation entre les acteurs de la coopération décentralisée et non gouvernementale depuis plus de 30 ans. » (pS-EAU. Qui sommes-nous ? len lignel. Accessible sur : <https://www.pseau.org/fr/presentation>)

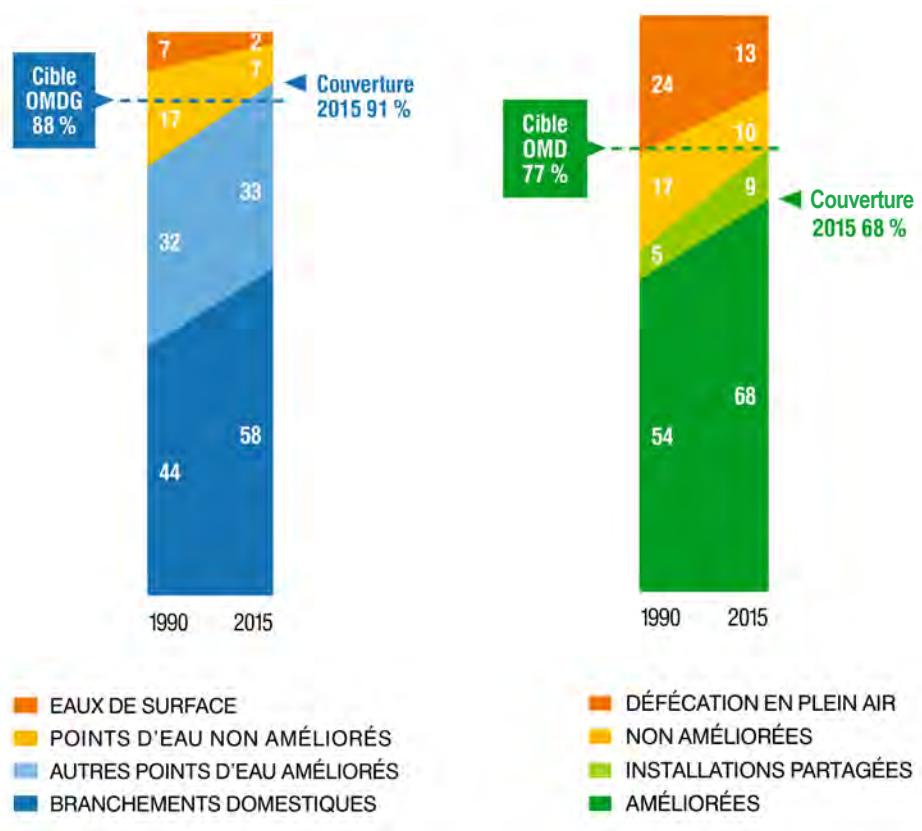


Figure 50 : Évolution de la couverture mondiale de l'approvisionnement en eau (à gauche) et de l'assainissement (à droite), en % sur la période de 1990 à gauche de chaque barre ; en 2015 à droite de chaque barre. Tirée de JMP, 2015.

Les Nations Unies ont constaté elles-mêmes :

« La cible eau potable des OMD est atteinte selon les Nations Unies, mais 663 millions de personnes n'ont toujours pas accès à une source d'eau potable améliorée ou utilisent de l'eau de surface. Par ailleurs, même lorsque le point d'eau est dit « amélioré », ceci ne garantit ni la fonctionnalité des infrastructures, ni la disponibilité de l'eau et ni sa qualité. Ainsi, on estime qu'au moins 1,8 milliard de personnes dans le monde utilisent un point d'eau contaminé par des matières fécales.

Quant à l'assainissement, la cible des OMD n'a pas été atteinte : en quinze ans, la proportion mondiale de personnes utilisant une infrastructure d'assainissement améliorée est passée de 59 % à 68 %, mais 2,4 milliards de personnes n'y avaient toujours pas accès en 2015, dont 946 millions pratiquant la défécation à l'air libre. En outre, les problèmes liés à l'absence de gestion des boues de vidange et de traitement des eaux usées posent toujours des risques majeurs pour la santé et l'environnement. »

## 5.2.6. Les ODD 2015-2030 : mieux conçus que les OMD

Le passage des OMD aux Objectifs de développement durable (ODD) a été l'occasion d'élargir le champ des objectifs et de renforcer les cibles, bien que les résultats constatés de la mise en œuvre des OMD aient été mitigés. Les indicateurs des ODD ont tenu compte des difficultés rencontrées par les OMD et ont été établis après de longues concertations ; ils restent un compromis entre la volonté d'affichage politique et la capacité des services statistiques à rendre compte de cibles difficiles à quantifier.

La force de ces démarches tient dans la capacité qu'elles offrent pour évaluer les stratégies nationales, à travers des revues volontaires présentées par les pays et par des rapports simultanés des agences des Nations Unies, sous le regard des ONG qui disposent d'une capacité qui se renforce avec les réseaux sociaux de contradiction factuelle des bilans officiels.

Les Objectifs de développement durable (ODD), qui font suite aux OMD, ont tenté de tirer les leçons des insuffisances de l'approche des OMD. Celle-ci s'est révélée efficace et novatrice dans sa simplicité de formulation, ainsi que dans l'ajout de cibles précises et d'indicateurs de mesure aux objectifs. Mais elle a été mal comprise et elle est restée ambiguë quant aux objectifs : on peut le voir dans les effets des indicateurs eau potable qui ne reflètent pas la réalité vécue de ce que chacun peut comprendre comme l'accès à l'eau potable. Par ailleurs, l'approche OMD était trop sectorielle et étroite car elle ne concernait que les pays en développement. Sur la base des définitions précisées des niveaux de service (tableau 20), des cibles ont été définies, notamment pour les deux objectifs pertinents ici (tableau 22).

**Tableau 22 :** Les interprétations normatives des ODD eau potable et assainissement. Tiré de JMP, 2017a.

Objectif 6.1 : d'ici 2030, assurer...	Interprétation normative
l'accès...	Suffisamment d'eau pour répondre aux besoins des ménages disponible de façon fiable près du domicile.
universel...	Dans l'ensemble des cas, quel que soit le contexte, notamment pour tous les ménages, les écoles, les établissements de santé, les lieux de travail et les espaces publics.
et équitable...	Réduire et éliminer progressivement les inégalités entre sous-groupes de la société.
à l'eau...	Eau utilisée pour boire, cuisiner, préparer les aliments et assurer l'hygiène personnelle.
potable...	L'eau potable est exempte en permanence d'éléments pathogènes et de taux élevés de produits chimiques.
à un coût abordable...	Le paiement des services ne représente pas un frein à l'accès à l'eau ou à la satisfaction d'autres besoins humains fondamentaux.
pour tous.	Par des hommes, des femmes, des filles et garçons de tous âges, y compris les personnes à mobilité réduite

Objectif 6.2 : d'ici 2030, assurer...	Interprétation normative
l'accès...	Implique des installations près du domicile pouvant être atteintes et utilisées facilement en cas de besoin.
de tous...	Pouvant être utilisés par des hommes, des femmes, des filles et garçons de tous âges, y compris des personnes à mobilité réduite.
dans des conditions équitables...	Implique de réduire et d'éliminer progressivement les inégalités entre les sous-groupes de la population.
à des services d'assainissement...	L'assainissement est l'offre d'installations et de services destinés à gérer et à éliminer l'urine et les matières fécales d'origine humaine.
et d'hygiène...	L'hygiène représente les conditions et les pratiques qui contribuent à la préservation de la santé et permettent d'éviter la propagation de maladies, notamment le lavage des mains, la gestion de l'hygiène menstruelle et l'hygiène alimentaire.
adéquats...	Implique un système qui permet de préserver de façon hygiénique les populations de tout contact humain avec les <i>excreta</i> et également de réutiliser/traiter en toute sécurité les <i>excreta</i> sur place, ou de les transporter et de les traiter en toute sécurité hors site.
et mettre un terme à la défécation en plein air...	Les <i>excreta</i> des adultes et des enfants sont déposés (directement ou après avoir été recouverts d'une couche de terre) dans la brousse, un champ, une plage ou tout autre espace ouvert, sont déversés dans une rigole d'évacuation, une rivière, la mer ou un autre plan d'eau, ou sont enveloppés dans un matériau temporaire avant d'être jetés
en accordant une attention particulière aux besoins des femmes et des jeunes filles...	Implique de réduire la pénibilité de la collecte d'eau et de permettre aux femmes et jeunes filles de gérer les besoins en matière d'assainissement et d'hygiène avec dignité. Une attention particulière devrait être portée aux besoins des femmes et des jeunes filles dans les endroits de « grande utilisation », tels que les écoles et les lieux de travail, ainsi que les lieux à « haut risque », tels que les établissements de santé et les centres de détention.
et des personnes en situation vulnérable.	Implique une attention aux besoins WASH spécifiques rencontrés dans des « cas particuliers », notamment les camps de réfugiés, les centres de détention, les rassemblements de masse et les pèlerinages.

### 5.2.7. Le chemin à parcourir

Les efforts de desserte supplémentaire correspondant aux cibles 6.1 et 6.2 des ODD sont considérables (tableau 23), même si les chiffres sont encore délicats à établir et varient selon les sources. Est pris en compte, pour réaliser la projection, le scénario moyen d'évolution des populations des Nations Unies (voir § 2.1).

**Tableau 23 :** Population supplémentaire à desservir pour respecter en 2030 les cibles 6.1 et 6.2 de l'ODD 6.Tiré de Hutton, Varughese, 2016<sup>78</sup>. GTS : géré en toute sécurité

	Eau potable				Assainissement				Hygiène		
	Service de base (amélioré et < 30 mn)		Service sûr (GTS)		Aucun service <sup>1</sup>	Service de base (amélioré)		Service sûr (GTS)			
	urbain	rural	urbain	rural		urbain	rural	urbain	rural	urbain	
Population desservie en 2015 (%). (Hutton <i>et al.</i> , 2016)	87	76	68	20	72	76	46	26	34	82	50
Données JMP 2019 pour l'année 2015	96,4	79,9	85,4	51	?	83,2	50,4	43,2	34,6	Pas mesuré	Pas mesuré
Population supplémentaire à desservir d'ici 2030 (M hab.) (Hutton <i>et al.</i> , 2016)	1 396	892	1 977	2 554	1 121	1 721	1 727	3 214	2 095	1 674	1 600* (corrigé)
	2 278		4 531			3 448		5 309		3 274* (corrigé)	

<sup>1</sup>. Il s'agit dans cette colonne de l'objectif de suppression de la défécation en plein air. Les populations considérées desservies sont celles qui accèdent à des latrines à fosse simple (une fosse, une dalle et une cahute pour préserver l'intimité).

Avec ces définitions, le changement de rythme nécessaire (Guterres, 2019) est frappant<sup>79</sup> (figure 51) :

- au niveau des « services de base » ressemblant aux OMD, les trajectoires seraient à peu près en ligne avec les efforts en cours ;
- au niveau des « services gérés en toute sécurité », nécessaires pour obtenir les bénéfices socio-économiques souhaités, le rythme d'amélioration antérieur est très loin de répondre à l'ambition des ODD.

<sup>78</sup>. Le chiffre de population rurale supplémentaire à desservir pour le lavage des mains figurant dans cette publication est de 3,154 milliards, soit à peu près la population rurale totale en 2030. Il est donc visiblement erroné et a été remplacé ici par un ordre de grandeur réaliste. Gérard Payen, consulté, fait remarquer que les chiffres cités dans les autres rubriques s'écartent sensiblement de ceux du *Joint Monitoring Program* rappelés en italique, données de 2019 pour l'année 2015 (UMP 2019), sans pouvoir expliquer l'origine de ces écarts. Les extrapolations sont à prendre avec précaution.

<sup>79</sup>. Rapport présenté devant le *High-level political forum on sustainable development* en juillet 2019. « Data suggests that achieving universal access to even basic sanitation service by 2030 would require doubling the current annual rate of progress. »

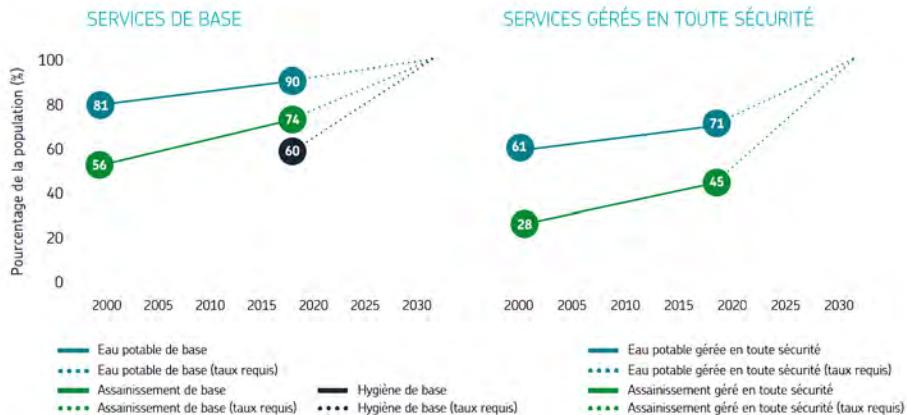


Figure 51 : Les progrès nécessaires et constatés pour les services de base et les services gérés en toute sécurité, conformément aux ODD. Tirée de Guterres, 2019.

Ces chiffres globaux peuvent paraître abstraits. Xanthea Limberg, conseillère municipale du Cap (Afrique du Sud), ville développée dont la population est passée de 2,4 millions en 1995 à plus de 4 millions en 2017, doit faire respecter des restrictions et organiser la solidarité (AFD, 2018), malgré des efforts importants et la consommation unitaire la plus faible des villes du pays. Dans le même pays, la métropole d'eThekweni, autour de la ville de Durban, au KwaZulu-Natal, suit avec ténacité un plan de développement de l'accès aux services essentiels (EMWS, 2011), fondé sur des processus participatifs qui ont été reconnus en 2014 par le *Stockholm Industry Water Prize*.

### 5.3. Les services d'eau potable et d'assainissement

Pour atteindre quelque objectif que ce soit, il faut faire fonctionner des services collectifs d'approvisionnement et de desserte en eau potable et en assainissement.

Notamment en milieu urbain ou périurbain, le puisage individuel d'eau pour les besoins domestiques n'est pas praticable sauf exception. Il faut donc capter l'eau dans des lieux ou des ouvrages collectifs et l'amener à domicile. La desserte par des réseaux (publics ou privés) d'eau potable est reconnue comme particulièrement économique et sûre en qualité par rapport aux autres modes de distribution, comme les vendeurs d'eau ambulants (porteurs d'eau) ou la distribution par camion-citerne (PNUD, 2006a) : autour de 0,5 US\$/m<sup>3</sup> pour l'eau du robinet, 1,5 US\$/m<sup>3</sup> pour les vendeurs d'eau, 2,5 US\$/m<sup>3</sup> pour les citernes et 4,5 US\$/m<sup>3</sup> pour les porteurs d'eau (chiffres établis sans compter le coût de l'assainissement).

Pour l'assainissement, la situation est plus complexe, selon l'éventail des solutions plus ou moins connectées à un réseau. Même l'assainissement non collectif, si l'on veut en maîtriser les conséquences sanitaires et environnementales, suppose que la collectivité s'y intéresse et d'une façon ou d'une autre en assure une régulation pour vérifier que ses responsabilités sont bien assurées.

### 5.3.1. Principes généraux d'organisation d'un service public local

On appelle « autorité organisatrice (AO) » l'autorité publique qui a la responsabilité d'organiser la façon dont le service est rendu à l'usager. En France, les compétences en eau potable et assainissement sont communales, mais sont souvent transférées à une structure de coopération : c'est alors celle-ci qui est qualifiée d'AO. L'AO est souvent, et en France la plupart du temps, la propriétaire des installations : elle choisit son (ou ses) opérateur(s), définit les objectifs et le(s) contrôle(s). C'est, en France, elle qui fixe les tarifs du service public. Elle doit faire la synthèse entre la satisfaction immédiate des usagers, le souci de pérennité du patrimoine et les impératifs d'équilibre des recettes et des dépenses du service public.

L'opérateur (OP), simplification du terme « opérateur de réseau », est l'entité qui a en charge de produire ce service. Qu'il soit public ou privé, il agit dans tous les cas pour le compte de l'autorité organisatrice.

Enfin, le régulateur est, au niveau national, européen et international, l'autorité chargée de l'établissement des règles (« autorités de réglementation ») qui encadrent les activités des autorités organisatrices et de leurs opérateurs et entités (« autorités de régulation »), qui assurent la vérification du respect de ces règles ou contribuent à l'obtenir.

### 5.3.2. Régie publique ou délégation à des acteurs privés

La panoplie des solutions dont disposent les autorités organisatrices des services publics d'eau et d'assainissement pour faire opérer leurs systèmes est large, notamment en France, mais aussi à l'échelle mondiale (figure 52 ; voir Roche *et al.*, 2016). Le débat récurrent sur le sujet public-privé ([voir § 5.2.4](#)) occulte la réalité de l'enjeu, qui est le besoin de mobilisation de tous les moyens pour améliorer une situation très dégradée. Gérard Payen l'impute à un « syndrome du lampadaire », qui conduit à stigmatiser les acteurs privés comme des boucs émissaires de toutes les insuffisances constatées (Payen, 2013).

#### VOIR FOCUS N°8

Les opérateurs des services d'eau et d'assainissement

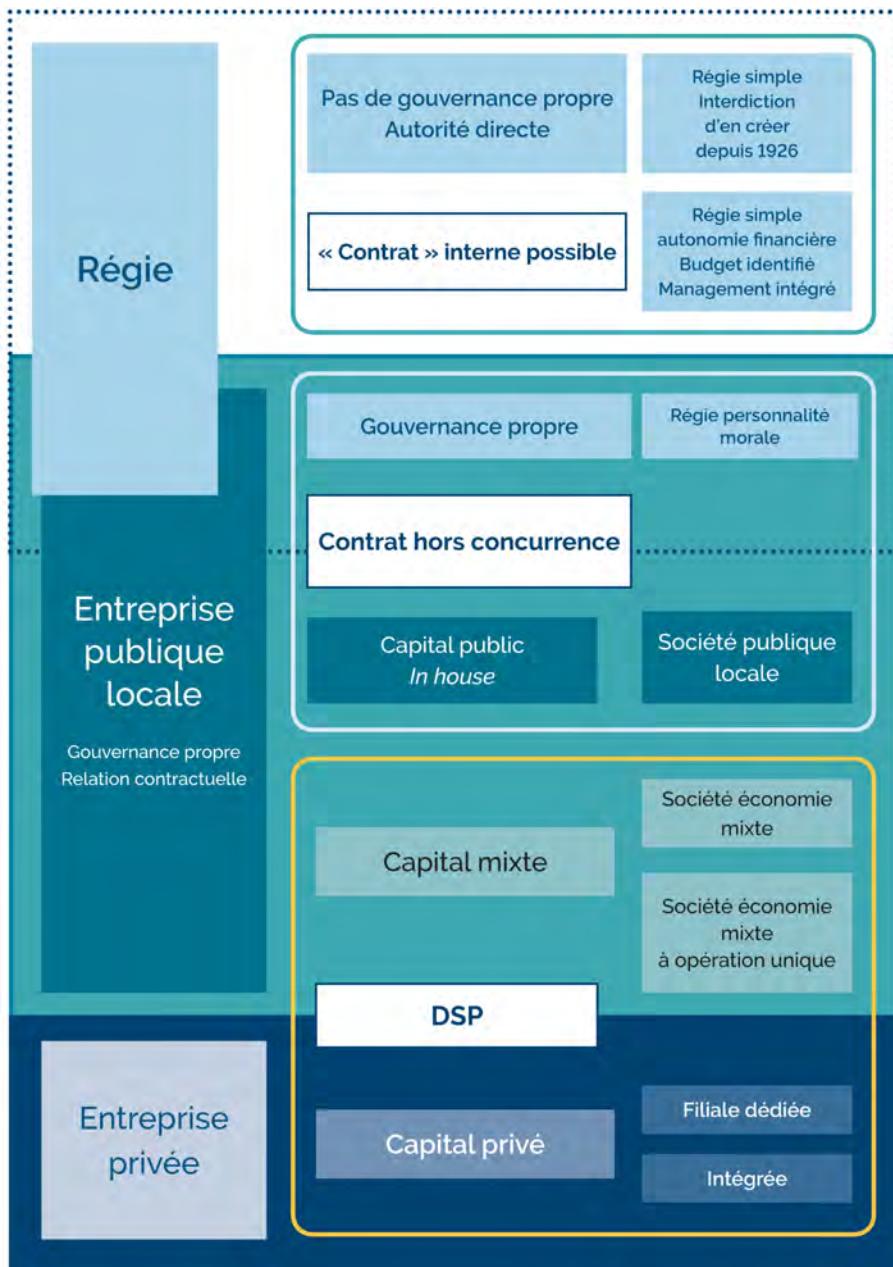


Figure 52 : Les opérateurs peuvent exercer sous des statuts très variés.  
Tirée de Roche *et al.*, 2016 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage).

À l'exception notable de la France, les services publics d'eau et d'assainissement étaient jusqu'à une date récente massivement assurés par des structures publiques. Pourquoi faire appel

au secteur privé pour le service de l'eau ? On en attend *a priori* :

- des qualités de gestion garantissant le recouvrement des coûts ;
- une aptitude à lever des fonds sur les marchés financiers ;
- une compétence technique nécessitée par les exigences normatives croissantes et la dégradation des ressources.

Toutes ces qualités peuvent être également apportées par des opérateurs publics, pourvu que les rôles et la gouvernance de l'AO et de l'opérateur soient clairement définis et que l'opérateur soit véritablement en mesure de se concentrer sur ses enjeux de performance opérationnelle.

La déclaration des Nations Unies sur le droit à l'eau et à l'assainissement lie l'exercice d'une activité au service de ce droit de l'homme au respect de plusieurs critères : disponibilité (« *availability* »), qualité, accessibilité financière (« *affordability* »), accessibilité physique, accès à l'information, non-discrimination, participation et soutenabilité. (voir § 9.2)

Deux questions difficiles se posent alors dans ce système (Roche, 2001) :

- le déséquilibre entre l'AO et l'opérateur et, dans les délégations de service, entre le délégué et le délégué ;
- la régulation globale du marché de service à une échelle nationale ou « *Sunshine Regulation* » (figure 53).

Le déséquilibre de compétences avec les opérateurs privés est patent pour les petites structures de maîtrise d'ouvrage, qui sont les plus nombreuses. Seules les très grandes agglomérations disposent d'une véritable capacité d'autorité concédante. Il convient dès lors d'apporter les éléments de soutien technique nécessaires et d'encourager une structuration des autorités à une dimension pertinente.

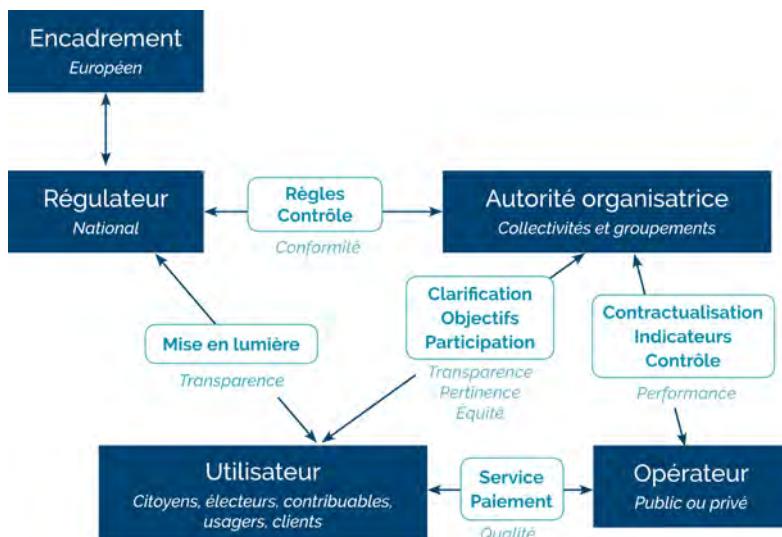


Figure 53 : Les acteurs de la régulation de services publics d'eau et d'assainissement.

Tirée de Roche *et al.*, 2016 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage)..

En effet, la performance des services publics d'eau et d'assainissement est avant tout un problème d'organisation et de renforcement des pouvoirs locaux<sup>80</sup>. Dans de nombreux pays, particulièrement en Afrique, les services publics relèvent encore aujourd'hui de l'autorité d'un État central, ou de grandes régions ou provinces. Pourtant, comme les transports publics urbains et la gestion des déchets ou de la distribution d'énergie, contrairement à la production d'électricité et de gaz ou aux télécommunications, les services d'eau sont des services de proximité : l'agglomération est l'échelle de gestion *a priori* la plus pertinente du service du « petit cycle de l'eau » (prélèvement dans la ressource, potabilisation, transport, distribution, récupération des eaux usées, transport et traitement des eaux usées avant rejets au milieu naturel) et des mécanismes de concertation doivent par ailleurs se tenir à l'échelle des bassins-versants pour la question du partage des ressources et de la solidarité.

Deux choses sont nécessaires : des autorités locales ayant une responsabilité claire devant les citoyens et les consommateurs, mais aussi le développement d'une véritable culture de la maîtrise d'ouvrage des services publics, trop longtemps confondue et mélangée avec la gestion directe proprement dite (Roche, 2000).

Dans les services en régie, comme dans les délégations de service public, des contrôles externes par des institutions anti-corruption disposant de pouvoirs étendus, une obligation de disposer de structures de concertation avec les usagers et la transparence des comptes sont les passages obligés vers un progrès effectif dans la « gouvernance locale de l'eau » (Roche, Payen, 2012). Le travail engagé en ce sens dans quelques pays africains (Afrique du Sud, Ghana, Mali, Maroc, etc.) reste encore isolé et fragile au regard des enjeux. On reviendra sur ces sujets de gouvernance au chapitre 9.

### 5.3.3. Les centres urbains secondaires : trop grands... et trop petits

Les centres urbains sont confrontés à des problèmes d'échelle humaine, pouvant trouver des solutions impliquant un tissu d'acteurs locaux, mais ils souffrent aujourd'hui dans bien des cas d'un abandon quasi général et d'une pénurie criante de moyens.

Au Mali, par exemple, de nombreuses responsabilités ont été décentralisées auprès des nouvelles municipalités, l'État s'impliquant principalement dans les plus grands centres. Avec un budget global de quelques dizaines de milliers d'euros, des municipalités sans moyens humains

---

<sup>80</sup>. Il convient de ne pas mal interpréter ce propos. Nombre de grandes régies nationales (SONEDE en Tunisie, par exemple) font un travail de très grande qualité et l'on peut comprendre une logique d'économie de moyens qui concentre au niveau national des corps de fonctionnaires dévoués et de bon niveau technique. L'histoire des institutions françaises illustre d'ailleurs tout le bénéfice qui a pu en être tiré. Malgré ses qualités, ce mode d'organisation constitue un obstacle objectif pour l'implication politique des acteurs locaux et cette responsabilisation est nécessaire à la bonne compréhension publique des enjeux, au respect des installations et au consentement à payer. Sous la réserve de la confiance effective du public dans ces autorités locales, la décentralisation de ces responsabilités, loin d'être un luxe ultime de pays aux institutions riches, stables et développées, est au contraire une condition immédiate pour l'émergence de solutions durables.

se trouvent ainsi en charge directe de l'eau, de l'assainissement, de la voirie ou encore des services de santé, pour plusieurs dizaines de milliers d'habitants<sup>81</sup>.

Ces centres secondaires se trouvent souvent trop petits pour intéresser les bailleurs de fonds et les opérateurs internationaux, sauf à travers de grands programmes généraux. À l'inverse, ces agglomérations sont trop grandes pour être traitées par des ONG, qui sauront travailler à l'échelle d'un quartier, d'un bidonville, d'un village ou d'un groupe de villages, mais qui auront plus de difficultés à apporter des solutions technologiques et à contribuer à mettre en place une organisation pérenne technique, commerciale et administrative à l'échelle de villes de dizaines ou de centaines de milliers d'habitants.

La juxtaposition d'expériences locales (qui, malheureusement, ont parfois du mal à obtenir des résultats pérennes) ne constitue pas une réponse globale à l'échelle des enjeux. Les méthodes sont éprouvées, mais la répétition village par village pose un problème considérable de moyens.

Cette émergence des autorités publiques locales, outre qu'elle se heurte dans beaucoup de cas à l'hostilité des pouvoirs nationaux, est certes souhaitée par les bailleurs de fonds internationaux, mais elle est encore insuffisamment appuyée par ceux-ci<sup>82</sup>. Ce n'est pourtant qu'avec leur implication et l'émergence d'opérateurs professionnalisés que des solutions pérennes sont trouvées à grande échelle.

### 5.3.4. Quelle tarification ?

Un approvisionnement en eau et une épuration corrects reviennent dans les grands centres urbains des pays développés à quelques euros par m<sup>3</sup>. Le principe dominant aujourd'hui est celui d'une récupération des coûts de services sur les usagers qui en sont bénéficiaires, y compris les éventuels coûts environnementaux induits. Cette logique repose sur la recherche d'une rationalisation des comportements des acteurs (politiques économies et gestion au moindre coût) en limitant la pression des prélèvements obligatoires indifférenciés en contrepartie d'un paiement des services publics.

D'une part, structurellement, ces services font partie du secteur de la consommation, sont régis par des logiques industrielles et commerciales et font l'objet d'un paiement comme un bien marchand. D'autre part, ils constituent des outils de patrimoine collectif (comme des biens de club) qui comportent de lourdes charges fixes. Cela suppose que chacun y contribue, dans l'esprit de la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen française, selon ses « facultés » (voir DDHC, article 13, 1789).

<sup>81</sup> Un exemple parmi tant d'autres : la ville de Niono au Mali, avant les événements dramatiques qui ont dévasté la région. Au cœur du périmètre irrigué de l'Office du Niger, dont on parle par ailleurs, le succès de la culture du riz y a fait augmenter la population de plus de 5 % par an, la portant à plus de 50 000 habitants en 1996 (Kuper, Tonneau, Bonneval, 2002) et 91 500 habitants au dernier recensement en 2009. Ce qui n'était encore récemment qu'un semis de petits villages de migrants devient aujourd'hui, au milieu des canaux, une grande ville, sans que les infrastructures d'eau et d'assainissement aient été préalablement développées : les premiers revenus de cette récente prospérité sont passés en médicaments. Au regard des investissements considérables de l'aide internationale et des revenus enfin générés, la faiblesse des efforts consentis dans le même temps pour la salubrité apparaît difficile à accepter.

<sup>82</sup> La Banque mondiale ne peut intervenir qu'au sein d'une autorité souveraine, c'est-à-dire d'un État, ou dans un cadre garant et encadré par celui-ci. La Banque africaine de développement (BAD) met depuis vingt ans au centre de sa stratégie le soutien aux autorités locales et l'Agence française de développement (AFD) n'a engagé d'opérations directes avec des collectivités qu'il y a une dizaine d'années (Tunisie, Afrique du Sud, Cameroun, Mali, etc.).

Les autorités politiques locales ont à créer les conditions d'accès à une eau de qualité satisfaisante et l'instauration d'un service de gestion des rejets (assainissement, latrines, etc.) pour l'ensemble de la population, sans condition de ressources. Cela ne signifie bien sûr pas la gratuité de ce service, mais une tarification comportant les péréquations et les aides suffisantes pour être assumée par les plus pauvres. Cette tarification, ou les subventions publiques d'équilibre apportées au titre de la « compensation des charges de service public » suppose de répondre à l'ensemble des composantes de formation du coût du service. Au sein du panel Camdessus en 2003, Gérard Payen avait introduit le concept de « recouvrement soutenable des coûts » (*Sustainable Cost Recovery*) pour illustrer la nécessité de modérer la notion de recouvrement des coûts auprès des usagers.

#### VOIR FOCUS N°9

##### Les tarifs de l'eau potable et de l'assainissement

Comment s'assurer, dans un contexte de vérité des coûts, que les plus pauvres ne seront pas exclus du service de l'eau ? Une étude (*Safe water enterprise*, 2017), citée par Waterpreneurs (Waterpreneurs, 2018), considère que sur les 3,8 milliards de personnes<sup>83</sup> qui n'ont pas accès à une source d'eau améliorée, 2,16 milliards peuvent payer leur eau sans subventions et sont donc accessibles directement par un dispositif assurant le plein recouvrement de ses charges auprès de ses clients. En revanche, 1,7 milliard de personnes auraient besoin d'être aidées en supposant que leurs dépenses en eau ne doivent pas dépasser 3 % de leurs revenus. Ce segment des plus pauvres aurait besoin d'une aide de 14,4 Md\$/an, soit 8,50 \$/hab./an (voir § 9.1).

### 5.3.5. Participation, conception et conduite des projets

Dès 1990, le PNUD proposait quatre principes accompagnant ce que l'on baptisait la « *Demand Responsive Approach* » :

1. l'eau doit être gérée à la fois comme bien économique et social ;
2. la gestion de l'eau doit se faire au niveau le plus proche possible des populations ;
3. une approche globale de l'utilisation de l'eau doit être employée ;
4. Les femmes doivent jouer un rôle majeur dans la gestion de l'eau.

La Charte sociale de l'eau (Roche, Valiron, 2000), initiative française portée notamment lors du sommet de Johannesburg en 2002, a repris beaucoup de ces principes, en identifiant des facteurs-clés de succès et de nombreux textes ultérieurs n'ont fait qu'accentuer cette dimension. La leçon la plus importante à retenir, depuis 50 ans de projets de développement rural ou urbain plus ou moins réussis, est l'exigence de participation. « La participation permet de cibler mieux les projets. En effet, si ceux-ci correspondent à la réelle demande de la communauté locale, l'appropriation en sera garantie, l'utilisation et la maintenance du système durable, d'où

<sup>83</sup>. Les chiffres utilisés par les uns et les autres pour caractériser les besoins proviennent le plus souvent de sources d'informations qui ont été produites à des dates différentes, et sont rarement le produit de l'analyse propre à chacun. Il ne faut donc pas être surpris des disparités qui apparaissent dans ces données, dès lors que les ordres de grandeur sont respectés.

un rendement final des investissements fortement accru. » (Charte sociale de l'eau). Dès cette initiative, il était mis en avant que la participation pouvait concerner :

- le choix du niveau de service et sa tarification (co-décision) ;
- les travaux et la gestion du service (co-production). Ce que traduit le terme anglo-saxon *d'empowerment* va au-delà de la décentralisation ou de la mobilisation : le renforcement des capacités, c'est rendre à chacun sa puissance de choix et de réalisation.

Une approche technique du problème de la difficulté de paiement des services par les plus pauvres consiste à rechercher des solutions à moindre coût. C'est le cas par exemple pour la distribution par robinet ou douches collectifs. Dans l'assainissement de type « condonial » répandu au Brésil, le passage des conduites sur les terrains privés implique les habitants dans le bon fonctionnement des égouts.

De l'écoute des populations défavorisées, il ressort en effet cette évidence première, si souvent oubliée, que le niveau de service attendu et payable par les pauvres est difficile à évaluer *a priori* sans les consulter. La participation commence par une écoute de la demande. Celle-ci est marquée par les différences culturelles. Inversement, la publicité façonne évidemment les nouveaux besoins, souvent dans le sens d'une augmentation quantitative<sup>84</sup>.

Si la demande de service est forte, le consentement à payer est souvent faible, surtout pour l'assainissement. Le succès populaire de techniques peu coûteuses, qui risquent d'apparaître conçues « au rabais », n'est pas toujours garanti. Le Dr Khan, initiateur du projet d'assainissement d'Orangi, une banlieue de Karachi, qui a permis l'assainissement d'une population de 600 000 habitants des *slums*, en témoignait oralement : « Ce que les gens voulaient, c'était un système d'assainissement classique... Comment ils voulaient l'obtenir ? Il fallait que je persuade les autorités de la ville de leur procurer gratuitement... La chose la plus importante que j'ai faite (après des mois et des mois de palabres infructueuses avec les services de la ville) ce fut de libérer le peuple des mythes démobilisants des promesses gouvernementales ».

La demande dépend de la situation initiale. À Buenos Aires, par exemple, une des sources d'approvisionnement fréquentes était le piquage illégal sur les conduites de la ville, avec l'habitude d'un approvisionnement gratuit, quoique sans aucune garantie d'hygiène. On peut racheter l'eau à des propriétés disposant de l'eau de ville (rachat payant ou non selon les normes de bon voisinage et l'existence de compteurs). Ailleurs existent des réalisations communautaires, comme les captages souterrains en nappe phréatique, avec des embryons de réseaux de distribution. La situation de départ peut être la gratuité, comme l'achat à des marchands ambulants dont l'eau sera aussi chère que peu fiable sur le plan sanitaire. Certains relativisent : en ville, on finit toujours par trouver de l'eau, sinon, on n'y resterait pas... Mais à quelle distance, à quel coût, dans quelles conditions d'hygiène ?

Comme le souligne souvent oralement le professeur Loïc Monjour, fondateur de l'association EAST<sup>85</sup> : « la gestion familiale de l'eau est très liée au statut des femmes. Le temps passé par les femmes et jeunes filles à chercher l'eau atteint trois ou quatre heures par jour

<sup>84</sup>. Les bains-douches remplacent progressivement le hammam en Turquie, les water-closets à forte consommation se sont généralisées à Amman (Jordanie).

<sup>85</sup>. Association EAST : Eau, Agriculture et Santé en milieu Tropical, voir <http://www.asso-east.org/connaître.html>

dans bien des régions d'Afrique notamment (y compris dans des villages marocains), d'où bien souvent l'impossibilité d'assister à l'école. Au Burkina Faso (Ouagadougou), ce sont les jeunes filles qui nettoient les tinettes familiales et sont les premières exposées aux risques sanitaires. Dans l'économie villageoise mexicaine, bien souvent les femmes s'occupent de maraîchage, le secteur irrigué, souvent de plus forte valeur marchande, alors que les hommes pratiquent la grande culture ou la garde de troupeaux. Pourtant les décisions appartiennent souvent à ces derniers.» (propos tenus à l'Académie de l'eau). Un autre témoignage : Buenos Aires, 1995 ; un quartier où les hommes refusent d'entrer en négociation avec Aguas Argentinas, la compagnie de distribution d'eau potable. Quelques femmes présentes énumèrent les enfants morts de diarrhée. Les hommes se décident finalement à entrer dans la négociation et une solution acceptable pour tous est rapidement trouvée<sup>86</sup>.

Les groupes internationaux, confrontés à ces questions où ils jouent leur crédibilité, ont fortement renforcé leur capacité à s'adapter au contexte local, notamment en s'associant avec des ONG implantées dans les quartiers les plus démunis. La remise sur pied du service suppose généralement une adaptation des tarifs pour les moins riches. Assurer une prévention des impayés peut se faire soit par appel à des financements externes (aide internationale, contribuables nationaux), soit par un fonds prélevé sur le service public d'eau et d'assainissement lui-même, assurant une solidarité entre consommateurs de revenus différents. Des expériences extrêmement positives se fondent sur des contreparties non monétaires, qui peuvent être de toutes sortes : les distributeurs d'eau pratiquent des accords de main d'œuvre « eau contre travail » (Mathys, Chambolle, 1999), des autorités nationales s'engagent parfois dans des accords « eau contre mesures de préservation du milieu naturel ». Au Maroc, le programme INMAE développé depuis 2004 dans le cadre de l'Initiative nationale pour le développement humain permet progressivement le raccordement de 60 000 familles des quartiers informels du Grand Casablanca aux services de l'eau potable, de l'assainissement et de l'électricité.

Ces diverses démarches seront approfondies :

- au [chapitre 7](#), en ce qui concerne les concepts de gestion et de régulation, notamment de l'applicabilité aux différents enjeux de la gestion de l'eau des préconisations pour le succès d'une gestion en commun issues des travaux d'E. Ostrom ;
- au [chapitre 9](#), tant pour les mécanismes de financements adaptés à résoudre les difficultés évoquées ci-dessus, que pour les principes de gouvernance qui résument les retours d'expérience de nombreux acteurs.

#### *Chapitre suivant : L'eau au cœur des objectifs de développement durable*

---

<sup>86</sup>. Le contrat de 1993 de cette filiale de Suez est connu pour d'autres raisons : il a été rompu en 2006, après plusieurs mois de vaines discussions. Un recours (concernant également d'autres entités que Suez), tranché en faveur de Suez en 2018 par le CIRDI, a permis un accord entre les parties, conduisant à une indemnisation de 220 millions d'euros en 2019. Le CIRDI, centre international pour le règlement des différends relatifs aux investissements, est une institution de la Banque mondiale.

# Pour approfondir

## ÉTUDES DE CAS

N°9

L'épidémie de choléra à Lima en 1991

N°10

Qu'a-t-on fait pour mettre en œuvre les OMD ?

## FOCUS

N°8

Les opérateurs des services d'eau et d'assainissement

N°9

Les tarifs de l'eau potable et de l'assainissement

N°9

## L'épidémie de choléra à Lima en 1991

On a incriminé à l'origine d'une épidémie de choléra à Lima (au Pérou) en 1991 le déballastage d'un navire en provenance d'Asie qui, en vidant ses réserves d'eau, aurait largué en mer un vibron nouveau, inconnu en Amérique latine (vibron *El Tor*). Une première contamination de la population aurait suivi l'ingestion de poisson cru contaminé.

Mais bientôt, d'autres défaillances du système d'hygiène hydrique ont pris le relais, avec un effet démultiplicateur dramatique (figure 54) :

- une contamination de la nappe nourricière par les *excreta* contaminés, faute d'assainissement correct (nappe dans laquelle une grande partie de la population s'alimente directement) ;
- une distribution par les services de la ville d'une eau sans chlore rémanent, donc sans protection contre des contaminations accidentelles en réseau, suite au débat à la mode sur la nocivité des sous-produits de la chloration.

Le résultat s'est chiffré en milliers de morts.

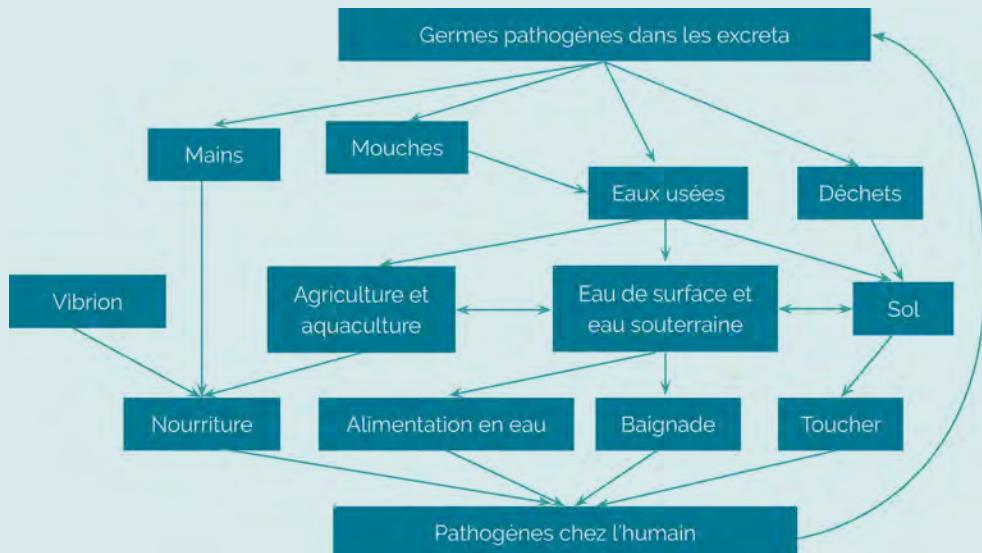


Figure 54 : Voies de transmission des maladies fécales-orales. Schéma établi par Évelyne Lyons.

**REVENIR AU COURS**

§ 5.1.3

En 2002, l'Union européenne a lancé une « initiative européenne » en faveur de l'eau. Dans ce cadre, ses membres travaillent à la définition d'un plan d'actions concrètes. La France a de plus fait adopter à l'occasion de la réunion du G8 en 2003 à Evian un « Plan d'action pour l'eau » et un « Plan d'action pour l'Afrique » et a annoncé le doublement de son aide en faveur de ce secteur. Elle s'engageait en particulier dans un plan de partenariat France - Afrique. « La France a pris pour sa part ses responsabilités en décidant de doubler, ce qui représente des sommes importantes, son action et sa participation dans le domaine de l'eau » (déclaration du président Jacques Chirac au sommet du G8).

Pour réaliser les objectifs fixés par la communauté internationale à Monterrey et Johannesburg, des changements importants sont rapidement apparus nécessaires. Dès 2005, on appelait à associer l'ensemble des parties prenantes, à mobiliser de nouveaux moyens financiers et à améliorer la gestion du secteur dans les pays en développement. Sept propositions concrètes ont été discutées dans diverses instances.

## 1. Inciter les gouvernements à définir des politiques nationales

Pour étendre la desserte au plus grand nombre, chaque pays doit définir préalablement une politique nationale de l'eau qui fixe les objectifs prioritaires, évalue les moyens pour les atteindre, et éclaire le rôle des acteurs. Ces politiques doivent prendre en compte les objectifs du millénaire. La priorité de l'eau doit être notamment prise en compte dans les plans stratégiques de réduction de la pauvreté. Ceci est loin d'être le cas aujourd'hui.

## 2. Organiser une gestion concertée de la ressource rare en eau

Les conflits pour l'utilisation de la ressource sont croissants et doivent se gérer au niveau d'un même bassin de ressource. Il faut promouvoir dans les pays africains la mise en place de plans nationaux de gestion intégrée incluant les eaux souterraines et les eaux de surface. Pour cela, il convient de renforcer les organismes de bassins existants et d'en favoriser l'émergence là où ils

n'existent pas, avec l'appui des organismes économiques sous-régionaux.

## 3. Promouvoir une charte internationale d'accès et de bonne gouvernance

De nombreux pays rencontrent une crise de gouvernance, plutôt qu'une crise de l'eau. Il faut promouvoir des principes de bonne gestion fondés sur des multi-partenariats. Une « charte d'accès aux services et de bonne gouvernance », débattue au niveau européen, pose les principes d'une gestion efficace et transparente du service public, fondée sur des partenariats associant États mais aussi collectivités locales, entreprises publiques et privées, notamment locales, associations, communautés, etc. Ce texte permettrait aux acteurs de s'engager sur des principes communs, sur la base desquels ils seraient prêts à être évalués.

## 4. Responsabiliser les collectivités locales et les impliquer financièrement

Une gestion locale permet de mieux répondre aux besoins des utilisateurs. Une meilleure gestion de l'eau doit impliquer deux niveaux distincts d'administration : celui des collectivités locales pour la gestion du service, celui des États pour veiller à l'efficacité économique du secteur et au respect des règles de service public. Pour cela, les collectivités locales doivent développer leurs compétences et apporter leurs connaissances au débat international.

Il faut faciliter l'accès des collectivités locales aux financements. Les bailleurs de fonds et les États doivent développer les marchés financiers locaux. Il s'agit notamment d'utiliser l'épargne locale, d'arriver à un allongement de la durée des prêts en monnaie locale, de faciliter l'accès des opérateurs publics et privés à des financements en monnaie locale, qui les protègent du risque de change.

## 5. Apporter des financements et garantir l'investissement

L'aide au développement ne doit pas seulement répondre à l'insuffisance de financements en faveur du secteur, mais proposer des approches nouvelles en matière de gestion. L'argent de l'aide doit accompagner les évolutions institutionnelles : préparation de politiques nationales, amélioration

de la gestion, instauration de régulations, émergence d'acteurs locaux et formation de capacités de gestion.

L'aide au développement doit également diversifier les instruments de financement susceptibles d'avoir un effet de levier sur les ressources mobilières pour favoriser le recours à l'épargne locale, pour qu'ils soient liés à l'atteinte de résultats et pour qu'ils répartissent les risques entre acteurs selon leurs responsabilités. Il faut notamment distinguer les risques politiques, les risques de change et les risques contractuels.

## 6. Un dispositif de solidarité : « le centime par m<sup>3</sup> »

La solidarité peut franchir les frontières en proposant aux usagers des pays développés de contribuer sur leur facture d'eau à des actions d'aide au développement. Il convient de favoriser le financement par les services des eaux français d'actions de coopération internationale en aménageant la réglementation, en développant les compétences professionnelles nécessaires et en informant les consommateurs des résultats obtenus. Il est souhaitable, en France même, de simplifier et d'uniformiser les systèmes existants de solidarité afin de faciliter et de systématiser la prise en charge des consommations d'eau des personnes les plus démunies.

Une loi en ce sens a été votée en France à l'unanimité au Sénat en 2004, puis début 2005 par l'Assemblée nationale (la loi dite Oudin-Santini<sup>87</sup>), du nom du sénateur et du député qui l'ont portée dans les débats). Le bilan de ce dispositif est très positif qualitativement, mais reste cependant encore modeste (depuis quelques années autour de 30 M€/an, auxquels il faut ajouter de 3 à 5 M€/an mobilisés en dehors de ce dispositif par les collectivités sur leur budget général) et loin des espérances initiales (figure 55). La tentative d'instaurer un tel dispositif au niveau européen n'a pour l'instant pas abouti. Ps-Eau met régulièrement à jour un guide pour les collectivités territoriales qui souhaitent s'impliquer : ce document comprend de nombreux exemples auxquels il est utile de se référer (pS-EAU, 2018).

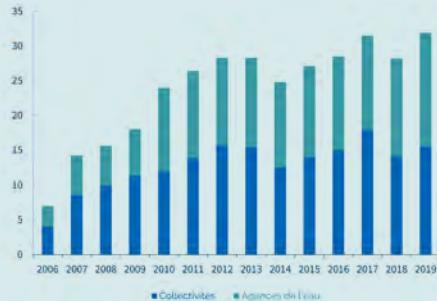


Figure 55 : Évolution de l'aide « 1 % solidarité eau » en France en M€. D'après les données collectées par pS-EAU. Source des données : pS-EAU, 2020.

## 7. Mesurer les progrès à travers un « observatoire de l'eau »

Comme on ne progresse que sur ce que l'on mesure, il a été proposé de bâtir un outil de mesure de la desserte dans le monde et de suivre les progrès des pays par rapport aux objectifs du millénaire. Cet outil était censé permettre de préciser, au travers d'une concertation internationale, la définition et les méthodes de chiffrage des niveaux de desserte. L'Union européenne s'est engagée à aider les Nations Unies à développer un réseau mondial de recueil des données sur l'accès à l'eau et à l'assainissement, en association avec l'ensemble des partenaires du secteur.

Les premiers suivis, malgré des difficultés méthodologiques sérieuses<sup>88</sup>, ont montré en tout état de cause dès 2006 que la tendance n'est pas suffisante pour atteindre en 2015 les objectifs du millénaire. Les tableaux 24 et 25 montrent l'estimation établie en 2005 par l'OMS et l'UNICEF du nombre de personnes qui devraient obtenir un accès amélioré à l'eau potable et à l'assainissement dans chaque région, ainsi que les progrès accomplis. En extrapolant ces évolutions constatées, la figure 56 montrait déjà clairement à quel point l'objectif était difficile à atteindre, notamment pour l'assainissement.

### REVENIR AU COURS

- § 5.2.5
- § 6.4

87. En fait les agences de l'eau – tout particulièrement l'agence de l'eau Seine-Normandie (AESN) sous l'impulsion initiale de son directeur Pierre-Frédéric Ténière-Buchot, largement amplifiée par la suite – et quelques collectivités pratiquaient déjà de telles interventions depuis plusieurs années avant l'adoption de cette loi. Celle-ci a en fait vu le jour quand la tutelle de l'AESN a intimé l'ordre à cette agence de mettre fin à son programme.

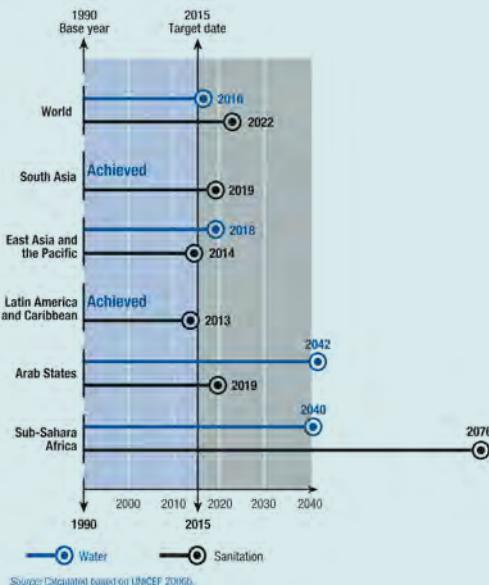
88. Un rapport (PNUD-PNUE 2006) présentait un tableau général de la façon dont les pays organisent leur suivi des objectifs du millénaire, et proposait des démarches de progrès dans ce domaine.

**Tableau 24 : Nombre moyen annuel de personnes (en millions) dont l'accès à l'eau potable doit être « amélioré » d'ici 2015 pour atteindre les objectifs du millénaire. Tiré de PNUD, 2006a.**

	1990	2004	Objectif 2015	Accès à l'eau potable en cours	Besoin d'un accès à l'eau potable pour atteindre l'objectif 2004-15
Afrique subsaharienne	226,6	383,8	627,1	10,5	23,1
Pays arabes	180,1	231,8	335,8	4,7	6,5
Asie de l'Est et Pacifique	1 154,4	1 528,2	1 741,2	22,9	24,3
Asie du Sud	840,6	1 296,4	1 538,1	32,5	22,1
Amérique latine et Caraïbes	343,3	499	527,8	9	6,1
Monde	2 767,7	4 266,4	5 029,5	79,5	82,4

**Tableau 25 : Nombre moyen annuel de personnes (en millions) dont l'accès à l'assainissement doit être « amélioré » d'ici 2015 pour atteindre les objectifs du millénaire. Tiré de PNUD, 2006a.**

	1990	2004	Objectif 2015	Accès à l'assainissement en cours	Besoin d'un accès à l'assainissement pour atteindre l'objectif 2004-15
Afrique subsaharienne	148,4	256,5	556	7,2	27,9
Moyen-Orient	120,6	196	267,2	4,9	6,9
Asie de l'Est et Pacifique	467	958,2	1 284,9	32	33,6
Asie du Sud	242,9	543,8	1 083,3	24,7	42,5
Amérique latine et Caraïbes	279,6	423,2	492,2	8,6	8,4
Monde	1 456,9	2 663,9	3 994	77,5	120,4



**Figure 56 : Possibilités d'atteindre les objectifs du millénaire au rythme actuel. Tirée de PNUD, 2006a.**

N°8

# Les opérateurs des services d'eau et d'assainissement

## 1. La part des acteurs privés en tant qu'opérateurs du service est faible

La part des acteurs privés dans le service urbain de l'eau est passée de 200 millions d'habitants en 1998 à plus de 300 millions d'habitants quatre ans après. Même en supposant quelques doubles comptes, cela représentait une augmentation très significative (tableau 26).

Ceci a cependant été de courte durée (figure 57) : le secteur se traduit depuis l'an 2000 par une grande prudence des opérateurs privés en raison de sa faible profitabilité, notamment dans les PED, où la population desservie atteignait à peine 175 millions d'habitants en 2007 (Marin, 2007). La population actuellement desservie dans le monde n'est pas documentée (notamment parce que les données disponibles donnent parfois un nombre de personnes desservies, parfois un nombre d'abonnés) mais elle ne devrait pas excéder 300 à 350 millions, dont 200 millions environ par des acteurs français (les contrats d'eau potable et d'assainissement sont très généralement séparés, mais peuvent concerner les mêmes populations).

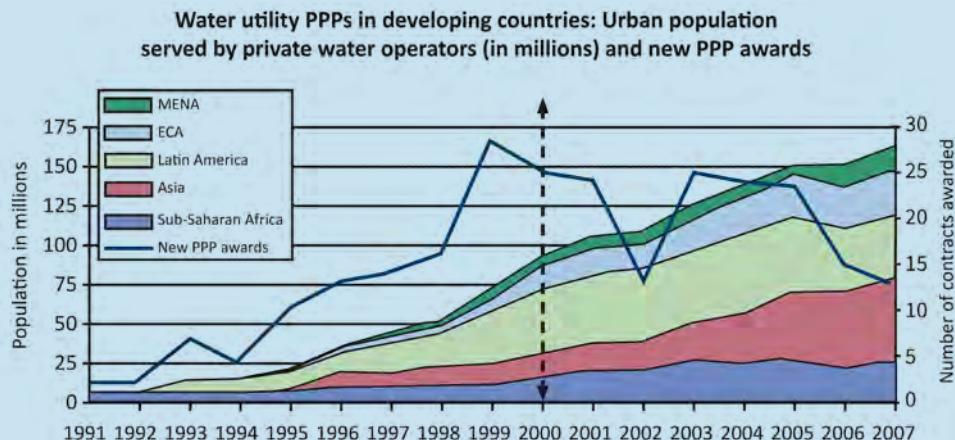


Figure 57 : Évolution des populations desservies par des acteurs privés dans les pays en développement.  
Tirée de Marin, 2007.

Les populations desservies par les deux principaux groupes français, leaders du marché mondial, n'ont pas massivement évolué depuis trente ans, leur part de marché restant stable (entre 50 % et 70 % selon les estimations). La restructuration de ces deux groupes en 2021, par laquelle Veolia reprend les activités eau internationales de Suez, n'est pas prise en compte dans les données présentées ici.

Tableau 26 : Principaux acteurs privés français du secteur de l'eau et de l'assainissement en 2018 (maximum).

Population desservie dans le monde (millions d'habitants)	Suez	Véolia
Eau potable	92	95
Population desservie assainissement	65	63

## 2. Qui sont ces groupes ?

Dans la catégorie des groupes privés propriétaires de leurs infrastructures, la prise de contrôle en 2001 du groupe *Thames Water*, troisième mondial devant Saur, par le groupe électricien allemand RWE, renforcée en janvier 2003 par le rachat d'American Water Works (avec ses filiales Wessex Water et ce qui restait d'Azurix après sa fermeture par Enron en 2001) n'a pas abouti à un très fort développement. En effet, les activités non internationales de *Thames Water* ont été revendues en 2006 à Kemble Water Holdings Ltd, un consortium impliquant l'Australien Macquarie Group<sup>89</sup>. Wessex Water est désormais sous le contrôle de YTL Power de la Malaisie.

Par ailleurs, des entreprises municipales vendent leur savoir-faire à l'international via des filiales spécialisées : c'est le cas pour Stockholm (Stockholm Vatten), Rome (ACEA) ou Madrid (Canal Isabel II).

## 3. Trois logiques organisationnelles principales

On peut distinguer trois logiques organisationnelles, qui sont assez bien illustrées (si on simplifie) par :

- la France : la gestion déléguée par contrat ;
- la Grande-Bretagne : la privatisation avec une agence indépendante de régulation ;
- l'Allemagne : une économie mixte.

La concurrence internationale porte tout à la fois sur le modèle d'organisation institutionnelle et sur les marchés, car les aptitudes des entreprises ont été jusqu'à aujourd'hui souvent liées au contexte institutionnel où elles se sont développées. En ce qui concerne les services d'eau, le modèle dominant de l'ouverture au privé est aujourd'hui la gestion déléguée par contrat, qui est adoptée dans la majorité des cas. Ce système « à la française », largement développé depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, offre en effet une large palette de solutions allant de l'affermage à la concession, permettant ainsi une grande souplesse d'adaptation au contexte particulier de chaque pays sur la question financièrement et politiquement cruciale de la propriété des infrastructures (tableau 27).

Tableau 27 : Quelques exemples d'interventions privées dans la gestion des réseaux d'eau potable et d'assainissement. Traduit de PNUD, 2006a<sup>90</sup>.

Option	Propriété	Gestion	Investissement	Risque	Durée typique (années)
Contrat de prestation	publique	partagée	public	public	1-2
Contrat de gestion	publique	privée	public	public	3-5
Affermage	publique	privée	public	partagé	8-15
Concession	publique	privée	privé	privé	20-30
Privatisation	privée	privée	privé	privé	illimitée

La vente des actifs au privé, dont le contrôle repose ensuite sur une agence de régulation indépendante (*Office of Water Services* britannique, *Public Utilities Commissions* américaines), n'a guère fait d'émules. Elle se traduit par une dépossession radicale du pouvoir de la collectivité vers le marché. Elle a été pourtant longtemps recommandée par l'ingénierie technico-financière anglo-saxonne très présente auprès des instances internationales. La principale conséquence négative de cette omniprésence réside dans la façon dont aujourd'hui encore ces institutions internationales privilégiennent le financement d'investissements et d'équipements nouveaux par rapport à l'effort le plus utile et le plus efficace, qui consiste à améliorer et à moderniser des services existants, ce que la gestion déléguée excelle à faire.

<sup>89</sup>. En 2012, des actions sont acquises par BT Pension Scheme (13 %), Abu Dhabi Investment Authority (9.9 %) et China Investment Corporation (8.7 %).

<sup>90</sup>. Attention : les termes conservés dans cette traduction par fidélité au texte d'origine, d'« affermage » et de « concession », d'emploi courant au plan international, ne le sont plus dans les textes français, mis en conformité avec la directive service européen. On ne parle désormais plus de concession et d'affermage (Roche *et al.*, 2016).

Les sociétés d'économie mixte – avec une opérateur privé minoritaire et des investisseurs institutionnels confiant ensuite un contrat d'exploitation à son actionnaire privé minoritaire – sont assez développées en Europe (en Allemagne en particulier), mais aussi dans d'autres régions, comme au Brésil (c'est la solution adoptée pour la SANAPER) ou en Indonésie (l'ouverture du capital de Intan Utilities).

La délégation de service par contrat présente ainsi un avantage considérable au plan de la démocratie et de la transparence. En évitant les intérêts financiers liés des collectivités et du privé au sein des SEM., qui sont certes gérables mais posent des problèmes de lisibilité, en évitant les difficiles questions de la valorisation des actifs lors des privatisations pures, elle permet le clair affichage de la responsabilité politique concernant un service public de premier rang. Le fait que le maire, élu, soit le responsable et l'interlocuteur du public pour la qualité du service renforce, sans doute possible, le champ du contrôle démocratique par rapport à une simple relation client-fournisseur. La tarification, par exemple, avec la difficile question des tarifs sociaux, trouve alors naturellement un lieu d'arbitrage politique de proximité.

## REVENIR AU COURS

### § 5.3.2

N°9

# Les tarifs de l'eau potable et de l'assainissement

## 1. La formation des coûts à couvrir

Les services d'eau et d'assainissement, comme nombre de services publics, supposent de fortes immobilisations en capital (patrimoine ou *assets*) qui supposent parfois des ingénieries financières sophistiquées, mais également des coûts d'exploitation récurrents (figure 58).

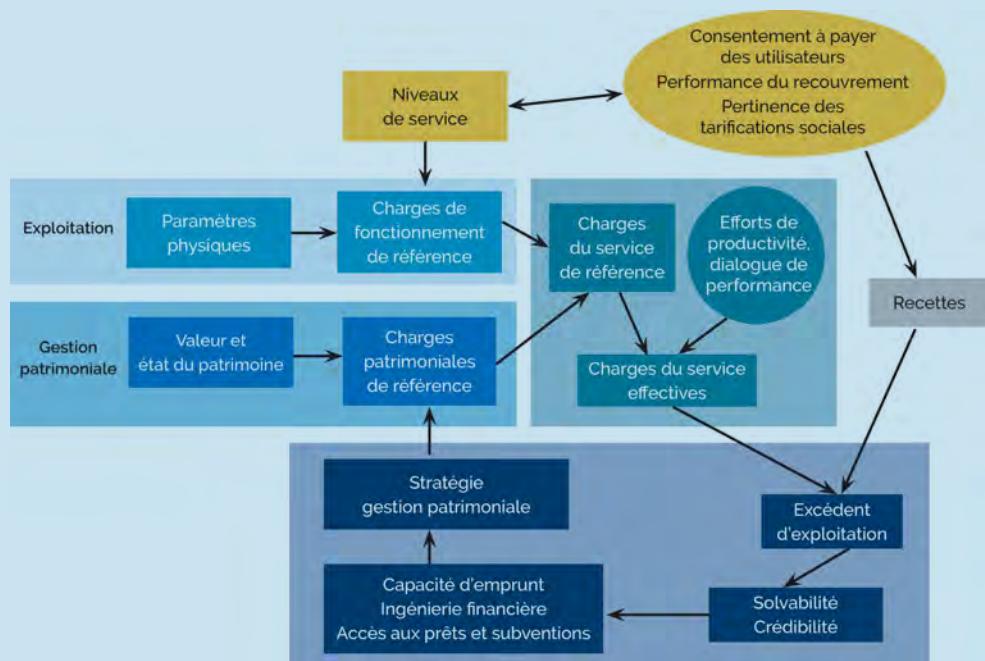


Figure 58 : La formation des prix des services à partir des coûts de production et de gestion patrimoniale.  
Tirée de Roche *et al.*, 2016 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage).

L'entretien et le maintien en état de fonctionnement, les réparations et la gestion du patrimoine technique sont souvent les parents pauvres de la conception des services, plutôt tournés vers les réalisations nouvelles. La gestion patrimoniale est cependant essentielle<sup>91</sup>.

## 2. Les formules de tarification du service

La réalité la plus commune est que les systèmes de tarification imposés par un service public, en décalage avec les ressources financières des usagers, ne sont purement et simplement pas payés

91. On se reportera dans ce domaine aux ouvrages en ligne de l'ASTEE : *Gestion patrimoniale au sein des services d'eau et d'assainissement - Approche croisée par le suivi des activités et l'analyse des coûts du service* (disponible sur <https://www.astee.org/publications/gestion-patrimoniale-au-sein-des-services-deau-et-dassainissement-approche-croisee-par-le-suivi-des-activites-et-lanalyse-des-couts-du-service/>) ; *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement / Bonnes pratiques - aspects techniques et financiers* (disponible sur <https://www.astee.org/publications/gestion-patrimoniale-des-reseaux-dassainissement-bonnes-pratiques-aspects-techniques-et-financiers/>) ; *Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable - Volume II : optimiser ses pratiques pour un service durable et performant* (disponible sur <https://www.astee.org/publications/gestion-patrimoniale-des-reseaux-deau-potable-volume-ii-optimiser-ses-pratiques-pour-un-service-durable-et-performant/>) ; *Gestion patrimoniale des réseaux d'eau potable* (disponible sur <https://www.astee.org/publications/gestion-patrimoniale-des-reseaux-deau-potable/>)

par ceux-ci. Cela fait alors parfois l'objet d'une forme de tolérance des services publics qui répercutent implicitement la charge sur les contribuables et les autres usagers, directement ou indirectement, par un service rendu de qualité dégradée : gestion, entretien, maintenance et renouvellement insuffisants des infrastructures, fuite et gâchis, absence de gestion de clientèle, fonctionnaires sous-payés et absents de leur travail, petite prévarication du quotidien, passe-droits.

La spirale de la dégradation du service peut aller très loin. La distribution de l'eau en Algérie, mais dans bien d'autres pays aussi, est entrée il y a quelques années dans ce cercle vicieux dramatique des coupures d'eau plusieurs jours par semaine, accompagnées de consommations non facturées et de fuites massives (Fatima Chikir Saïdi in Meublat, 2001). Facile d'y entrer, difficile d'en sortir.

Encore récemment, les difficultés rencontrées dans les départements d'outremer français sont sérieuses et parfois de cette nature. Ainsi, en Guadeloupe, malgré la disponibilité des ressources en eau, par défaut d'entretien et mauvaise gestion des réseaux, les fuites qui peuvent atteindre plus de 50 % du volume traité conduisent à des coupures d'eau récurrentes (Roche *et al.*, 2015). On reviendra sur le plan d'action destiné à y remédier [au chapitre 9](#).

Les tarifs qui reflèteraient le plus fidèlement la structure des coûts des opérateurs seraient des tarifs binômes, avec un prix d'abonnement fixe assez élevé pour couvrir les charges fixes et une part variable liée à la consommation. Même si, comme en France, ce prix d'abonnement est encadré et limité, il reste peu incitatif aux économies d'eau pour les consommateurs (figure 59) et constitue un « ticket d'entrée » difficile à assumer pour les populations les plus pauvres.

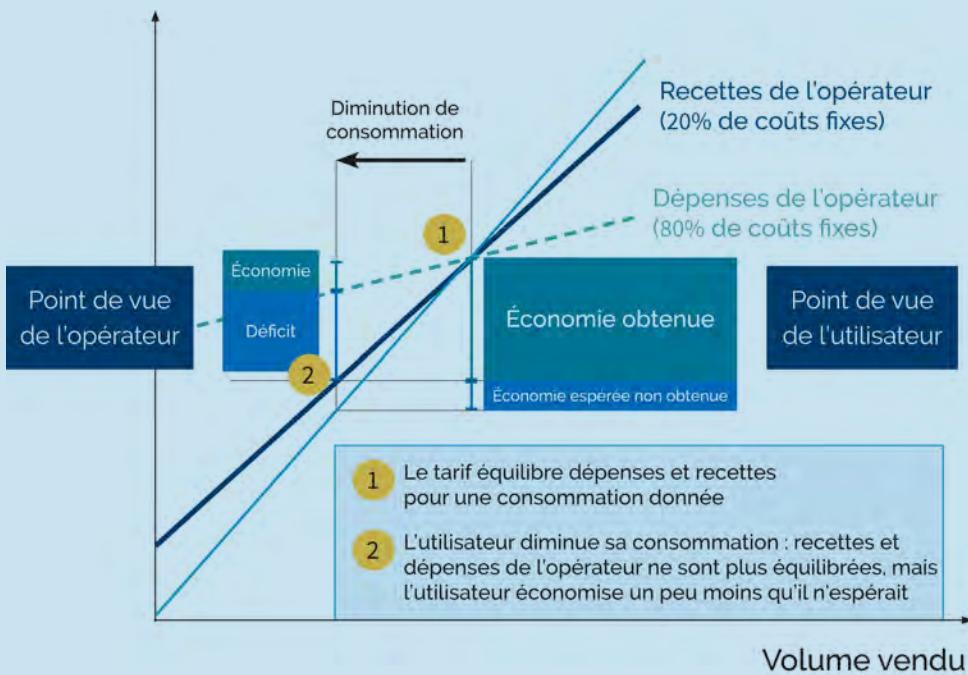


Figure 59 : Les tarifs binôme ne sont pas incitatifs aux économies d'eau par les consommateurs, qui ne bénéficient que d'une faible part de leurs efforts de parcimonie.  
Tirée de Roche *et al.*, 2016 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage).

### 3. La dynamique à créer pour répondre à des besoins souvent insolubles

Le développement de l'ensemble des services publics dans les quartiers périurbains est une question qui doit se traiter à la fois de façon intégrée (c'est un problème d'urbanisme global, où tous types de services se trouvent liés) et sectorielle pour en assurer l'efficacité et la lisibilité.

La gestion commune de plusieurs « utilités », pour reprendre cet anglicisme devenu banal, assure des péréquations entre tarifs : est-il logique que l'on paye un peu de son eau en payant son électricité, comme c'est parfois le cas ? En toute rigueur, on comprend bien tous les biais que ce type de confusion entraîne et on les proscritra. Il n'empêche que c'est aujourd'hui dans certains cas le seul moyen de solvabilisation de ces services, le consentement à payer étant à l'évidence différent selon les services, et d'autant plus faible que le service est plus « essentiel » : on peut couper l'électricité, il n'est pas tolérable de ne pas distribuer l'eau. Dès lors, on accepte de payer un peu pour l'électricité et beaucoup moins pour l'eau, car si celle-ci est « publique », elle est due.

Si aucune desserte n'est organisée, alors il faut bien payer les revendeurs. Inutile de rappeler que le coût et la qualité sont alors bien inférieurs. La relation psychologique du client avec le service public est complexe et le savoir-faire de la perception des recettes un des premiers déficits de compétence de nombreux services d'eau et d'assainissement.

Les branchements sociaux (gratuité de l'installation du branchement) sont souvent pratiqués. Sinon, l'étalement de cette dépense, telle qu'elle a été pratiquée au Kerala dès les années 1990, permet d'augmenter les taux de raccordement, ce qui est aussi de l'intérêt de l'opérateur.

Pour le paiement de l'eau elle-même, des tarifs instituant une péréquation peuvent être pratiqués. Un cas fréquent (par exemple en Belgique, aux États-Unis ou en Afrique du Sud) est la fixation d'un seuil correspondant à la consommation strictement domestique d'une famille type. Parmi les pratiques qui respectent d'avantage l'anonymat que les tarifs « sociaux », il y a le remboursement aux personnes de leurs dépenses, normales, par les bureaux d'aide sociale. Ces questions complexes sont développées dans les nombreux ouvrages publiés plus particulièrement entre 2004 et 2014 par Henri Smets (Smets, 2014) et les analyses de Bernard Barraqué, notamment sur la question du comptage de l'eau (Barraqué, 2018).

REVENIR AU COURS

§ 5.3.4

### **PARTIE 3**

---

## Gestion de l'eau comme un bien commun

Progresser par l'implication de tous,  
des mécanismes financiers adaptés  
et la compréhension des écosystèmes

# 6

## L'eau au cœur des objectifs de développement durable

### Dépasser le travail en silos et raisonner « *out of the water box* »

Les pays membres des Nations Unies ont pris ensemble des engagements forts dans le domaine de l'eau au sein des objectifs de développement durable. Mais les politiques actuellement conduites ne seront vraisemblablement pas suffisantes pour atteindre les cibles que la communauté internationale s'est données.

# 7

## Principes de régulation collective des usages de l'eau comme bien commun

### User sans abuser

Le tableau des usages de l'eau est tout d'abord complété (hydroélectricité, industrie) avant de passer en revue les instruments qui permettent d'assurer les équilibres d'allocation de ressources entre usagers : droits, quotas, marchés, gestion en communs (au sens d'Elinor Ostrom).

# 8

## La gestion intégrée des ressources en eau

### Développer les solutions fondées sur la nature

La gestion intégrée des ressources en eau s'exerce dans un cadre géographique original – les bassins-versants – et repose sur des outils originaux de gouvernance. Les ouvrages structurants, souvent à buts multiples, comme les grands barrages, présentent des enjeux de santé publique et environnementaux importants. Les démarches d'aménagement intégré, développant des solutions fondées sur la nature, contribuent à résoudre les contradictions entre usages.

# 9

## Deux clés de succès intimement liées

### Financer de façon appropriée et améliorer la gouvernance

Les montages financiers adaptés aux enjeux spécifiques de l'eau, notamment pour les services d'eau potable et d'assainissement, évoluent vers la conception d'investissements dits inclusifs ou à impact. L'aide au développement y contribue. Des méthodologies permettent de mieux objectiver les enjeux de gouvernance, qui sont la clé de la confiance et de l'efficacité. L'« ardente obligation » est de s'atteler aux situations les plus difficiles, hors de la zone de confort des bonnes pratiques. Ce pari de la confiance demande de la lucidité et s'appuie sur la construction progressive et conjointe des solutions techniques et des gouvernances appropriées.



# Chapitre 6 | L'eau au cœur des objectifs de développement durable

Dépasser le travail en silos et raisonner « *out of the water box* »

## À RETENIR

29

**Les gouvernements de presque toute la planète, dans le cadre des Nations Unies, ont fixé ensemble des cibles d'ambitions fortes et croissantes : les objectifs du millénium pour le développement (OMD) en 2000 et 2002 pour l'horizon 2015 ; puis en 2015 les objectifs de développement durable (ODD) pour 2030.**

La logique de la stratégie mondiale de développement durable pour 2030 est holistique dans sa conception, sous le slogan général « Ne laisser personne de côté » (*no one left behind*), mais aussi précise et analytique dans la définition des objectifs de développement durable (ODD), des cibles à atteindre et des indicateurs statistiques qui permettent de les évaluer.

30

**Dès 2018, la communauté internationale alertait de nouveau : les mesures prises aujourd'hui ne permettront pas d'atteindre ces cibles.**

La crédibilité des autorités publiques ne cesse d'être mise à mal auprès des opinions publiques

quand les pratiques et les résultats sont en décalage évident avec les cibles affichées.

Il est déjà clair que sans évolution significative des efforts consentis et sans une amélioration de la gouvernance, les cibles définies pour l'ODD 6 (traitant directement de la gestion de l'eau) ne pourront pas être atteintes. Par exemple, en matière d'eau potable ou d'assainissement, les cibles 6.1 et 6.2 demandent de desservir ou de mettre à niveau le service chaque année pour environ 500 millions d'habitants : c'est plus que la population de l'Europe des 27 ! Comme l'eau est également au cœur de l'atteinte de très nombreuses autres cibles, l'amélioration dans ce secteur est cruciale pour le succès de tout l'édifice des ODD.

31

**Les indicateurs pour l'eau potable et l'assainissement se sont bien améliorés en bénéficiant de l'expérience antérieure des OMD, mais pour les autres cibles de l'objectif 6, des progrès dans les définitions et la production d'informations pertinentes sont nécessaires.**

*Chapitre suivant : Principes de régulation collective des usages de l'eau comme bien commun*

## 6.1. Les objectifs de développement durable et leurs cibles

Les dix-sept objectifs de développement durable (ODD) adoptés par les Nations Unies le 27 septembre 2015 (tableau 28) forment un projet ambitieux d'agenda 2030 fondé sur une vision complète (holistique) des enjeux de soutenabilité, avec divers slogans : « *transforming our world* », « *no one left behind* » (figure 60). Ils sont déclinés en 167 cibles, mesurables selon 244 indicateurs (voir § 5.2.6).

Le Forum politique de haut niveau pour le développement durable se réunit tous les ans en juillet à New York pour examiner des revues nationales volontaires de différents pays et des revues thématiques généralement portées par les agences spécialisées des Nations Unies.

**Tableau 28 : Les objectifs du développement durable.**

Objectif 1	Éliminer la pauvreté sous toutes ses formes et partout dans le monde.
Objectif 2	Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable.
Objectif 3	Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge.
Objectif 4	Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie.
Objectif 5	Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles.
Objectif 6	Garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau.
Objectif 7	Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable.
Objectif 8	Promouvoir une croissance économique soutenue, partagée et durable, le plein emploi productif et un travail décent pour tous.
Objectif 9	Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation.
Objectif 10	Réduire les inégalités dans les pays et d'un pays à l'autre.
Objectif 11	Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables.
Objectif 12	Établir des modes de consommation et de production durables.
Objectif 13	Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions.
Objectif 14	Conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable.
Objectif 15	Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des terres et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité.
Objectif 16	Promouvoir l'avènement de sociétés pacifiques et ouvertes à tous aux fins du développement durable, assurer l'accès de tous à la justice et mettre en place, à tous les niveaux, des institutions efficaces, responsables et ouvertes à tous.
Objectif 17	Renforcer les moyens de mettre en oeuvre le Partenariat mondial pour le développement durable et le revitaliser.



Figure 60 : Les objectifs de développement durable. Tirée de Nations Unies.

Une revue générale des valeurs actuelles des indicateurs est publiée (Sachs *et al.*, 2020) et un indicateur synthétique (figure 61) a été constitué pour permettre une vision d'ensemble.

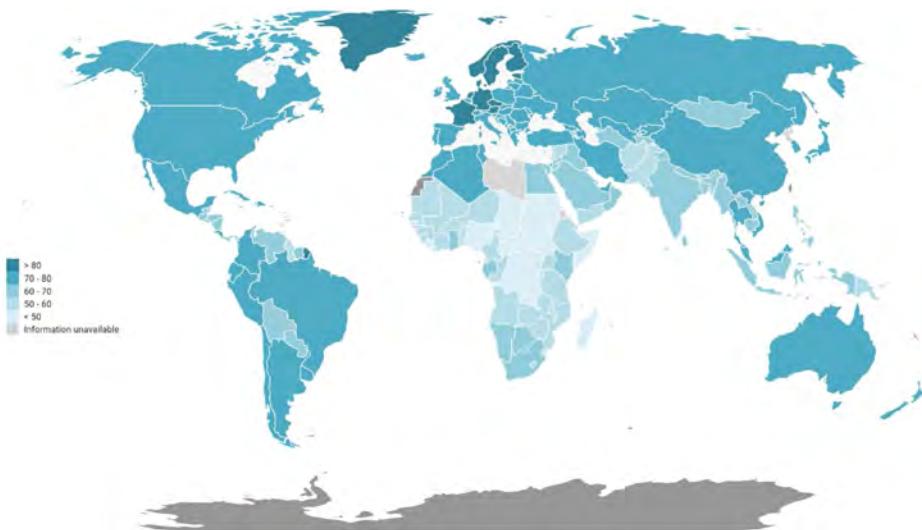


Figure 61 : État 2019 du degré de conformité aux ODD 2030. Tirée de Sachs *et al.*, 2020.

## 6.2. Un objectif particulier pour l'eau dans les ODD

Parmi les 17 ODD (figure 60), l'objectif 6 concerne directement la gestion de l'eau. Ses huit cibles montrent que la gestion de l'eau y est bien prise dans toutes ses dimensions et non plus simplement par un usage spécifique sectoriel (tableau 29).

Tableau 29 : Les cibles de l'objectif 6 des ODD. Source : Nations Unies.

<b>6.1 :</b>	D'ici à 2030, assurer l'accès universel et équitable à l'eau potable, à un coût abordable.
<b>6.2 :</b>	D'ici à 2030, assurer l'accès de tous, dans des conditions équitables, à des services d'assainissement et d'hygiène adéquats et mettre fin à la défécation en plein air, en accordant une attention particulière aux besoins des femmes et des filles et des personnes en situation vulnérable.
<b>6.3 :</b>	D'ici à 2030, améliorer la qualité de l'eau en réduisant la pollution, en éliminant l'immersion de déchets et en réduisant au minimum les émissions de produits chimiques et de matières dangereuses, en diminuant de moitié la proportion d'eaux usées non traitées et en augmentant considérablement à l'échelle mondiale le recyclage et la réutilisation sans danger de l'eau.
<b>6.4 :</b>	D'ici à 2030, augmenter considérablement l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans tous les secteurs et garantir la viabilité des retraits et de l'approvisionnement en eau douce afin de tenir compte de la pénurie d'eau et de réduire nettement le nombre de personnes qui souffrent du manque d'eau.
<b>6.5 :</b>	D'ici à 2030, mettre en œuvre une gestion intégrée des ressources en eau à tous les niveaux, y compris au moyen de la coopération transfrontière selon qu'il convient.
<b>6.6 :</b>	D'ici à 2020, protéger et restaurer les écosystèmes liés à l'eau, notamment les montagnes, les forêts, les zones humides, les rivières, les aquifères et les lacs.
<b>6.a :</b>	D'ici à 2030, développer la coopération internationale et l'appui au renforcement des capacités des pays en développement en ce qui concerne les activités et programmes relatifs à l'eau et à l'assainissement, y compris la collecte de l'eau, la désalinisation, l'utilisation rationnelle de l'eau, le traitement des eaux usées, le recyclage et les techniques de réutilisation.
<b>6.b :</b>	Appuyer et renforcer la participation de la population locale à l'amélioration de la gestion de l'eau et de l'assainissement.

D'autres objectifs comportent des cibles également liées à l'eau (tableau 30).

## 6.3. Les indicateurs : indispensables pour le suivi

Les indicateurs (tableau 31) constituent un compromis entre la faisabilité pratique de production statistique (d'une façon suffisamment claire et pratique pour assurer une homogénéité raisonnable des données de pays disposant de moyens statistiques très différents) et la pertinence de représentation des objectifs et des cibles<sup>92</sup>. On a vu pour l'eau potable et l'assainissement les défauts des indicateurs des OMD et comment ceux des ODD essaient de les corriger (voir § 5.2.6).

<sup>92</sup>. Liste des indicateurs : <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicatorslist/>. Metadata (définitions détaillées et guides) : <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/>. Base des données nationales : <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/database/>. Indicateurs pour la France : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2654964>

Tableau 30 : L'eau dans les cibles de nombreux ODD, hors objectif 6. Source : Nations Unies.

Objectif 1 - Pauvreté
<b>1.4 (partiel) :</b> D'ici à 2030, faire en sorte que tous les hommes et les femmes, en particulier les pauvres et les personnes vulnérables, aient les mêmes droits aux ressources économiques et qu'ils aient accès aux services de base ;
Objectif 3 - Santé
<b>3.3 :</b> D'ici à 2030, mettre fin à l'épidémie de sida, à la tuberculose, au paludisme et aux maladies tropicales négligées et combattre l'hépatite, les maladies transmises par l'eau et autres maladies transmissibles ;
<b>3.9 :</b> D'ici à 2030, réduire nettement le nombre de décès et de maladies dus à des substances chimiques dangereuses et à la pollution et à la contamination de l'air, de l'eau et du sol ;
Objectif 4 - Éducation
<b>4.a :</b> Construire des établissements scolaires qui soient adaptés aux enfants, aux personnes handicapées et aux deux sexes ou adapter les établissements existants à cette fin et fournir à tous un cadre d'apprentissage sûr, non violent, inclusif et efficace ;
Objectif 11 - Villes
<b>11.1 :</b> D'ici à 2030, assurer l'accès de tous à un logement et des services de base adéquats et sûrs, à un coût abordable, et assainir les quartiers de taudis ;
<b>11.5 :</b> D'ici à 2030, réduire nettement le nombre de personnes tuées et le nombre de personnes touchées par les catastrophes, y compris celles qui sont liées à l'eau, et réduire nettement la part du produit intérieur brut mondial représentée par les pertes économiques directement imputables à ces catastrophes, l'accent étant mis sur la protection des pauvres et des personnes en situation vulnérable ;
<b>11.b :</b> D'ici à 2020, accroître nettement le nombre de villes et d'établissements humains qui adoptent et mettent en œuvre des politiques et plans d'action intégrés en faveur de l'insertion de tous, de l'utilisation rationnelle des ressources, de l'adaptation aux effets des changements climatiques et de leur atténuation et de la résilience face aux catastrophes, et élaborer et mettre en œuvre, conformément au Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030), une gestion globale des risques de catastrophe à tous les niveaux ;
Objectif 13 – Changement climatique
<b>13.1 :</b> Renforcer, dans tous les pays, la résilience et les capacités d'adaptation face aux aléas climatiques et aux catastrophes naturelles liées au climat ;
Objectif 14 - Océans
<b>14.1 :</b> D'ici à 2025, prévenir et réduire nettement la pollution marine de tous types, en particulier celle résultant des activités terrestres, y compris les déchets en mer et la pollution par les nutriments ;
Objectif 15 - Écosystèmes
<b>15.1 :</b> D'ici à 2020, garantir la préservation, la restauration et l'exploitation durable des écosystèmes terrestres et des écosystèmes d'eau douce et des services connexes, en particulier des forêts, des zones humides, des montagnes et des zones arides, conformément aux obligations découlant des accords internationaux.

Ce travail approfondi permet de mesurer concrètement l'ambition qui se cache derrière les formules : pour atteindre les cibles 6.1 (eau potable) et 6.2 (assainissement) que chaque habitant de la planète dispose en 2030 d'un service sûr dans ces deux domaines (sans parler des autres composantes de ces objectifs), il faut desservir d'ici là ou améliorer les services existants pour les mettre à niveau, pour 4,8 milliards d'habitants et 5,2 milliards d'habitants pour l'assainissement, soit de l'ordre de 500 millions d'habitants par an, chaque année un peu plus que la population de l'Europe à 27.

**Tableau 31 : Les indicateurs retenus pour le suivi international de l'atteinte des cibles de l'objectif 6.**

Cible	Indicateurs
6.1	Proportion de la population utilisant des services d'alimentation en eau potable gérés en toute sécurité.
6.2	Proportion de la population utilisant des services d'assainissement gérés en toute sécurité, notamment des équipements pour se laver les mains avec de l'eau et du savon.
6.3	Proportion des eaux usées traitées sans danger. Proportion des plans d'eau dont la qualité de l'eau est bonne.
6.4	Variation de l'efficacité de l'utilisation des ressources en eau. Niveau de stress hydrique : prélèvement d'eau douce en proportion des ressources en eau douce disponibles.
6.5	Degré de mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau. Proportion de bassins hydrographiques transfrontaliers où est en place un dispositif de coopération opérationnel.
6.6	Variation de l'étendue des écosystèmes tributaires de l'eau.

## 6.4. Nous ne sommes pas en bonne voie pour satisfaire l'ODD 6 en 2030

L'avant-propos du secrétaire général des Nations Unies au rapport présenté sur l'objectif 6 au Forum politique de haut niveau de juillet 2018 indiquait :

« If we remain off track to deliver on SDG 6 then we jeopardize the entire 2030 Agenda for Sustainable Development. Yet, today, billions of people still lack access to safe water and sanitation, resulting in needless deaths, chronic disease, missed education and reduced productivity. At the same time, demand for water -- from agriculture and industry as well as domestic use -- is rapidly rising and water pollution and ecosystem degradation are being made worse by increasing amounts of untreated wastewater. And all of this is happening against a backdrop of climate change, which is playing havoc with the predictability of our most precious resource. What this report makes clear is that we must tackle weak funding, planning, capacity and governance of water and sanitation services as a top priority. New partnerships are needed, involving stakeholders within and beyond the water and sanitation sectors, to address these fundamental issues, balance competing needs, and act to get SDG 6 back on track. Data and smart technologies must be embraced so interventions can be as effective as possible and progress tracked over time. »<sup>93</sup>

<sup>93</sup>. Disponible sur <https://sustainabledevelopment.un.org/hlpf/2018>. C'est nous qui soulignons.

Une première alerte collective avait été formulée au 8<sup>e</sup> Forum mondial de l'eau de Brasilia (mars 2018) quelques mois précédemment : « *We consider that current water policies will not be sufficient to reach the targets of the Sustainable Development Goals (SDGs)* »<sup>94</sup>.

Si l'on se reporte à l'analyse qui avait été faite dès les années 2005-2006 concernant de forts risques de non atteinte des OMD en 2015 et au peu d'effet que ces alertes avaient eu sur le cours des choses pour l'objectif d'assainissement, il semble essentiel que soient entendues ces alertes précoce de l'année 2018 concernant le besoin de modification des politiques publiques pour rendre atteignables les ODD.

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°10

Qu'a-t-on fait pour mettre en œuvre les OMD ?

## 6.5. Compléter le dispositif international de suivi et d'évaluation pour l'eau

Le JMP (programme commun de surveillance de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement de l'OMS et de l'UNICEF) doit continuer de jouer le rôle de chef de file sur le volet de l'objectif post-2015 consacré à l'accès universel à une eau potable de qualité et à l'assainissement. Il devra néanmoins être renforcé pour être capable de fournir des informations fiables sur les cibles et les indicateurs nouveaux retenus.

En revanche, il n'existe pas à ce jour une structure capable de mesurer la réalisation des volets de l'objectif qui concernent la protection des ressources en eau et l'amélioration de l'efficience dans ses différents usages. ONU-EAU, structure de coordination des Nations Unies sur les questions d'eau en accord avec les États, devrait être mandatée pour proposer un mécanisme de suivi approprié. La mise en place de systèmes nationaux de données et d'informations sur l'eau devra être favorisée.

## 6.6. La biodiversité : le grand écart entre les objectifs affichés et les résultats

Il est utile d'avoir en tête l'écart entre les intentions affichées et les réalités constatées dans les dernières décennies. Si l'on prend l'exemple des atteintes à la biodiversité, la prise de conscience peut être datée des années 1970, mais la succession d'engagements de plus en plus ambitieux jusqu'aux engagements d'Aichi pour 2030 ne semble guère avoir enrayer les dégradations (figure 62).

<sup>94</sup>. Sustainability declaration, WWF8.

« Développer des stratégies, des plans ou des programmes à l'échelle nationale en faveur de la conservation et de l'utilisation durable de la diversité biologique ; Intégrer [...] la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique dans des plans, des programmes et des politiques pertinents, sectoriels et transversaux »

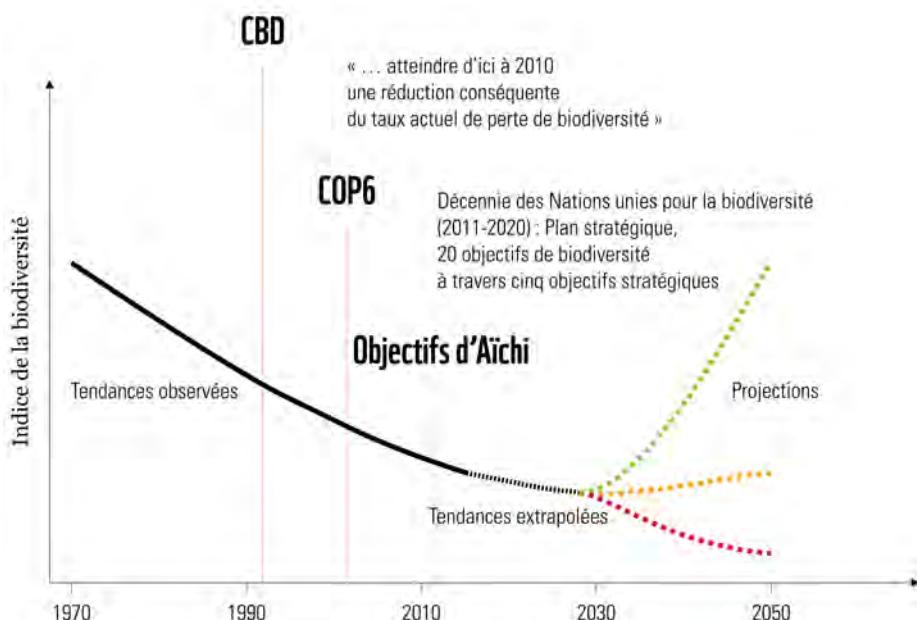


Figure 62 : Les engagements successifs de la communauté internationale en matière de biodiversité n'ont pas enrayer les dégradations massives © WWF, 2016. Tous droits réservés. Tirée de Grooten, Almond, 2018.

# Chapitre 7 | Principes de régulation collective des usages de l'eau comme bien commun

## User sans abuser

### À RETENIR

32

L'eau a de multiples usages au-delà de l'agriculture, l'eau potable et l'assainissement, qui ont été développés dans la deuxième partie.

**C'est aussi un bien énergétique :** l'hydroélectricité, très développée pour satisfaire les besoins de pointe dans les pays développés, apparaît dans de nombreux pays en développement comme l'une des ressources les plus disponibles. Elle permettrait une exploitation durable, avec un excellent bilan carbone et à moindre coût. Pourtant, l'équipement en ouvrages hydroélectriques de ces pays est encore assez peu mis en place. Il s'agit donc de mettre en valeur ce potentiel sans mettre en cause la biodiversité, ni générer des effets négatifs sur d'autres usages de l'eau ou mettre en péril la santé des populations riveraines. L'eau est par ailleurs le fluide le plus utilisé pour refroidir (ce qui est essentiel notamment pour les industries énergétiques), nettoyer et laver. Une industrie économique en eau est possible, mais de haut niveau technologique.

33

L'eau, bien renouvelable, « patrimoine commun de la Nation » comme dit la loi française, bien commun global essentiel, ou patrimoine commun de l'humanité comme disent certains, est au cœur du développement durable. L'homme la considérant comme une ressource (terme utilitariste à manipuler avec précaution), il doit donc **en user sans en abuser**.

perturber par l'usage ce cycle naturel sans le déstabiliser et sans enclencher des processus de ruine collective consécutive à des atteintes radicales aux écosystèmes qui en dépendent et dont nous dépendons.

34

Les principes de gestion de l'eau reposent sur la particularité de celle-ci d'être tour à tour une ressource considérée comme un bien commun et l'objet d'un service (eau potable et assainissement, organisation de systèmes d'irrigation) qui délivrent à des usagers ce que l'on peut qualifier de « bien de club ».

Malgré sa rareté et son utilité, il ne lui est généralement attaché aucune valeur commerciale intrinsèque. Les exemples de « marché d'eau » (on trouve aussi « marchés de droits d'eau ») où celle-ci est considérée en tant que bien échangeable, montrent leurs limites quand il s'agit de réguler la sécurité, l'équité sociale ou la préservation de la biodiversité, qui ne peuvent se résumer à la maximisation de la valeur ajoutée produite. L'emploi d'outils de régulation publique des usages (allocation réglementaire par autorisations contrôlées et taxation ou paiement de droits d'accès) est pratiquée dans des proportions variées. La combinaison de ces outils et une gestion « en biens communs » selon les principes d'E. Ostrom apparaissent indispensables.

Chapitre suivant : La gestion intégrée des ressources en eau

## 7.1. De nombreux usages en compétition

L'eau est un facteur de production essentiel pour l'agriculture et les services d'eau potable et d'assainissement comme on l'a vu en partie 2, mais aussi pour l'énergie, l'industrie, le tourisme, la pêche, etc. C'est un produit d'usage vital, dont la mobilisation, la distribution et l'évacuation après traitement requièrent des moyens importants. C'est le support d'activités de transports très peu polluantes par comparaison au transport routier. C'est en même temps une part d'écosystèmes riches et indispensables ([voir § 2.4](#)).

L'industrie s'est toujours montrée dépendante des ressources en eau, tant pour l'usage de la force motrice que pour le lavage et la capacité d'évacuation des déchets. Déjà, dans les nombreuses petites Venise européennes du Moyen Âge, les tanneurs, meuniers et autres industries de bouche s'installaient près de l'eau. Le développement de l'industrie moderne, chimique et sidérurgique à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle s'est structuré autour des fleuves. Des couloirs de la chimie se développèrent : Rhin, Rhône, Seine inférieure, etc. L'hydroélectricité a permis l'essor industriel des vallées alpines.

Le développement de l'hydroélectricité est une forte revendication des pays les moins équipes, qui entendent rattraper un retard qui est pour eux un handicap au développement, d'autant plus que c'est une énergie à la fois non émissive de gaz à effet de serre et d'une remarquable disponibilité pour faire face aux fluctuations de demande (en stockant l'eau dans des réservoirs en altitude, on procède au seul stockage d'énergie que l'homme ait jamais pu réaliser jusqu'à présent à grande échelle).

Comme cela suppose des ouvrages importants, dont les effets environnementaux et humains sont significatifs, le débat autour de leur opportunité est vif ([voir § 8.5](#)).

### VOIR FOCUS N°10

L'inégalité énergétique mondiale concerne également la mobilisation des ressources hydroélectriques

Dans les pays développés, le développement du recyclage et le traitement des effluents a permis depuis 50 ans de réduire progressivement, mais très drastiquement, l'empreinte des activités industrielles (hors agro-industrie). Pour nombre de produits industriels, la pollution urbaine n'est alors plus le fait des rejets d'usines, mais celui de la pollution diffuse émise lors de l'usage de ces produits par les ménages, notamment pour les substances toxiques, perturbateurs endocriniens ou par le lessivage des toitures et des voiries par le ruissellement (Roche, Le Nouveau *et al.*, 2017).

### VOIR FOCUS N°11

L'eau : un liquide abondant, excellent solvant et offrant une bonne capacité calorifique

En revanche, dans la plupart des pays, notamment les pays émergents et en développement, l'industrie d'une part emploie des procédés peu optimisés quant au prélèvement d'eau et d'autre part, elle manque très fortement d'outils de dépollution, rejetant des eaux non traitées pouvant présenter de très fortes toxicités. L'objectif 6.3 d'une dépollution sensiblement améliorée des rejets suppose donc des efforts considérables.

## 7.2. Réflexions sur la nature économique de la ressource en eau et des services d'eau

La multiplicité des approches reflète la difficulté et l'intérêt de ce sujet crucial. Pour l'aborder, il faut revenir à un cadre interprétatif théorique correctement posé.

Quand Adam Smith (Smith, 1776) introduit la notion de monnaie, il note à propos de l'eau :

« Il faut observer que le mot valeur a deux significations différentes : quelquefois il signifie l'utilité d'un objet particulier, et quelquefois il signifie la faculté que donne la possession de cet objet d'en acheter d'autres marchandises. On peut appeler l'une, Valeur en usage, et l'autre, Valeur en échange. Des choses qui ont la plus grande valeur en usage n'ont souvent que peu ou point de valeur en échange [...]. Il n'y a rien de plus utile que l'eau, mais elle ne peut presque rien acheter ; à peine y a-t-il moyen de rien avoir en échange ».

Cette logique est traduite en droit romain par la notion de *res nullus*. Pour raisonner sur les biens et les instruments de gestion appropriés à les répartir entre les hommes (et la nature), on s'appuie sur quatre catégories : biens collectifs purs, biens communs, biens de club et biens privés. La distinction repose sur deux critères :

- Sont-ils plus ou moins exclusifs (réservés ou non à certains) ?
- Sont-ils d'usages plus ou moins rivaux ? La consommation par l'un a un fort coût d'opportunité, c'est-à-dire qu'elle empêche la consommation par un autre ou engage un préjudice global.

Ces catégories sont établies à partir des réflexions de Paul Samuelson (Samuelson, 1954), qui ne distinguait en fait que les deux catégories de biens diamétralement opposées et les plus faciles à comprendre : les biens de consommation privée et les biens de consommation collective.

On préfère parler ici de modalités de gestion plutôt que, comme on le fait d'ordinaire, de nature des biens (tableau 32). Pour simplifier :

- en bien public : on étatise et l'État administre l'usage ;
- en bien de club : on mutualise des moyens ;
- en biens communs : on gère des solidarités ;
- en bien privé : on gère des transactions.

Tableau 32 : Catégories de modalités collectives de gestion de biens.

	Usages faiblement rivaux	Usages fortement rivaux
Accès plutôt libre	Gestion en bien collectif pur (parfois appelé « bien public »)	Gestion en biens communs
Usage plutôt exclusif	Gestion en bien de club	Gestion en bien privé

La notion de communs et ses liens avec les enjeux environnementaux multiples est complexe (tableau 33). On se reportera à Bernard Barraqué (Barraqué, Roche, 2010) pour une analyse des origines des pratiques collectives qui soutiennent les diverses notions retranscrites dans des droits contemporains complexes.

Tableau 33 : Environnement et communs . Tiré de Misonne, 2018.

<i>Les res communes</i>	<i>Le patrimoine commun</i>	<i>Les communaux</i>
L'absence d'appropriation (par nature) autorise les usages concurrents	L'absence d'appropriation (par convention) impose une solidarité dans la gestion des usages	Espaces ouverts (même si appropriés), avec partage des usages
<i>Le commun</i>		
L'agir-ensemble (faire commun) Garantie d'accès – Partage des usages – Communauté instituante – Autogestion – Solidarité à des fins de conservation/préservation		
<i>Milieux et nature</i>	<i>L'environnement</i>	<i>Le commun environnemental</i>
Air, eau, sols, biodiversité, Écosystèmes « Services écosystémiques »	Les menaces qui pèsent sur l'environnement	L'affaire de tous

La notion de propriété couvre trois attributs : user (USUS), jouir (FRUCTUS) et disposer (ABUSUS) :

- l'USUS est le droit de se servir d'un bien : par exemple habiter une maison ;
- le FRUCTUS est le droit de percevoir les fruits (c'est-à-dire les revenus) : par exemple louer une maison et en percevoir des loyers ;
- l'ABUSUS est le droit de disposer d'un bien : par exemple vendre, donner, hypothéquer ou détruire une maison.

Si ce chapitre s'intitule « user sans abuser », c'est bien entendu au sens commun. La ressource en eau, par son caractère de bien commun, est certes à disposition pour être utilisée, mais pas dans le sens où elle serait accaparable (et donc revendable, destructible). Ceci inclut le fait que sa disponibilité limitée suppose que l'usage soit raisonnable au regard des autres enjeux (ne génère pas de coûts d'opportunité excessifs). On ne dit pas non plus ici « user sans profiter ni abuser » : il n'est pas illicite (c'est le cas des concessions hydroélectriques, de l'agriculture, de la navigation ou du tourisme) de tirer profit de l'usage de l'eau.

On traitera des questions internationales [au prochain chapitre](#), mais il est utile de noter dès à présent la formulation pragmatique retenue en 1997 par les Nations Unies pour les eaux transfrontalières : « usage raisonnable et équitable ».

## 7.3. Gérer l'accès à une ressource limitée comme un bien commun

### 7.3.1. La surexploitation « à la Harding » des aquifères est une réalité

Partons d'un récit fictif et tragique, qui condense l'expérience de la surexploitation de nombreux aquifères notamment en Inde ou au Pakistan, mais aussi au Mexique et dans bien d'autres pays, y compris dans le pourtour méditerranéen ([voir § 3.2.1](#)).

Des agriculteurs en grand nombre conduisent comme ils peuvent une agriculture de subsistance, qui ne leur apporte que des revenus misérables. L'eau qu'ils utilisent provient de puits ou de forages individuels ou partagés en très petites communautés, répartis sur la surface du territoire.

Leurs prélevements excèdent de façon chronique le renouvellement de la nappe. Ils sont conduits à puiser l'eau, puis à la pomper de plus en plus profond, au fur et à mesure que le niveau de la nappe baisse.

Comme le coût d'énergie commence à peser lourdement dans l'équilibre précaire de leur exploitation, le gouvernement leur alloue des subventions pour les aider à payer leur énergie, faute de quoi ils tombent dans le dénuement le plus total. Il met aussi en place un système d'autorisation en réglementant les prélevements.

Dans un premier temps, il autorise sans formalité les prélevements en-dessous d'un niveau maximum pour protéger les petits exploitants. Les puits et les forages prolifèrent pour rester en dessous du plafond.

Puis il instaure des quotas globaux par exploitation et impose des compteurs : il n'a cependant pas les moyens de les contrôler et ils sont très vite hors d'usage. La situation continue à se dégrader.

Les moyens de contrôle sont enfin renforcés, mais les forages non déclarés se multiplient et la corruption s'installe. Pendant ce temps, le niveau de la nappe descend inexorablement.

Constatant son incapacité à faire face à une situation aussi complexe par le contrôle, l'État confie à un nombre restreint d'opérateurs le soin de gérer des exploitations collectives : ils revendent l'eau à des prix usuraires<sup>95</sup>, recrutent des milices qui font régner l'arbitraire et la famine s'installe.

Le début de cette histoire, ancrée dans la réalité de la gestion de l'eau, n'est pas sans rappeler la parabole des troupeaux en pâture libre qui a servi d'illustration à Garrett Harding dans un article célèbre et pourtant conceptuellement et expérimentalement plutôt mal établi (Harding, 1968).

Ce texte montre simplement qu'une stratégie non coopérative d'individus mus par leur seul espoir de subsistance individuelle conduit à un cercle vicieux perdant-perdant : c'est l'impossibilité de se mettre d'accord pour assurer la maximisation des gains collectifs. Juxtaposer sans concertation la recherche de gains individuels quand une ressource limitée est en accès libre sans régulation efficace conduit non seulement à des pertes collectives, mais aussi une perte individuelle.

Cette parabole de Harding a nourri deux dérives opposées : le « *free-market environmentalism* » et l'autoritarisme.

La première (également dénommée « *new environmental economy* ») extrapole la parabole de Harding pour conclure à la primauté d'une appropriation privée et commercialisable des biens communs. On y considère qu'en situation de ressources limitées, on maximise le bien-être collectif si les usages les plus productifs de valeur prédominent. La parabole de Harding illustrerait le fait que seule l'instauration d'un marché le plus fluide possible entre acteurs économiques (réduction des coûts de transaction) permettrait une répartition optimale de la ressource par la responsabilisation, car chaque usager a une forte incitation à la parcimonie par le prix (l'élasticité-prix de l'eau étant réputée forte). La régulation par les autorisations, supposant un bien public régulé,

<sup>95</sup>. Cette situation d'« usure de l'eau » se rencontre moins fréquemment que l'usure de la vente de semences. Ce scénario dramatique est transposé notamment d'un film indien (titre français : *Maudite pluie* ; titre original : *Gabhricha Paus*) de Satish Manwar, sorti en 2009, qui est sans doute la meilleure introduction sensible à la précarité de l'agriculture de subsistance à des aléas climatiques. Il ouvre sur l'image d'un agriculteur criblé de dettes qui s'est pendu comme des milliers d'autres (sur le suicide des paysans indiens, voir l'article de Wikipedia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Suicides\\_de\\_paysans\\_en\\_Inde](https://fr.wikipedia.org/wiki/Suicides_de_paysans_en_Inde)) dans un district rural (le Vidharba du Nord-Est de la province du Maharashtra, dont la capitale est Mumbai) au centre-ouest de l'Inde. La mousson ne vient pas. Les semences achetées en vendant leur seul patrimoine, les bijoux de la jeune femme du couple, ne germent pas, faute d'eau. Il faut installer un pompage. L'électricité ne fonctionne pas et coûte trop cher, alors le paysan se tue en essayant de pirater l'électricité d'une ligne à haute tension pour alimenter sa pompe.

est dans cette logique considérée peu performante, car, par définition, les acteurs économiques disposent d'informations utiles à l'optimisation qui ne sont pas accessibles à la puissance publique et les coûts de transaction du contrôle sont excessifs. Cette thèse est illustrée par les ouvrages de Terry Lee Anderson (Anderson, Snyder, 1997) dont on pourra lire utilement l'analyse critique qu'en fait Olivier Petit (Petit, 2004).

Dans la dérive de l'autoritarisme<sup>96</sup>, on conclut de Harding l'irresponsabilité intrinsèque du comportement des acteurs individuels et que seul un pouvoir central dirigiste (réglementant dans le détail et pourvu d'un pouvoir de surveillance et d'une connaissance parfaite des acteurs) est à même de vouloir et de pouvoir imposer le bien collectif à des acteurs individuels irresponsables par nature.

### 7.3.2. La gestion en communs : les conditions de succès d'Élinor Ostrom

Élinor Ostrom, prix Nobel d'économie, a rétabli une compréhension raisonnable des comportements humains à l'égard des communs (Ostrom, 1990). Elle a permis de dépasser l'alternative essentiellement idéologique « tout-marché ou tout-État », en montrant qu'il n'y a pas lieu de réduire à la seule action d'une autorité publique (l'État) l'instauration de règles collectives pour assurer la régulation de la pression des usages. Ce n'est pas parce qu'un bien est en libre accès (non réglementé) que les utilisateurs ne sont pas capables de s'organiser pour le protéger. À partir d'exemples locaux, elle montre que le succès d'une telle gestion « en biens communs » suppose cependant le respect d'un certain nombre de conditions :

- une délimitation claire de la ressource et de ses usagers légitimes ;
- des règles de gouvernance localement adaptées (à la géographie, la technologie, etc.) ;
- des usagers qui participent à la révision des règles ;
- le contrôle de l'application des règles ;
- des sanctions graduelles en cas de non-respect ;
- un mécanisme de résolution des conflits ;
- la reconnaissance de cette gouvernance particulière par les autorités.

Élinor Ostrom ne s'attache donc pas tant à la nature des biens qu'au cadre institutionnel et réglementaire qui conduit à les désigner comme des communs. La question de savoir si l'eau est un bien commun doit donc s'estomper devant la question suivante : sait-on utilement et efficacement mieux gérer l'eau dans une démarche de gestion communautaire que dans une démarche de gestion étatique, de gestion de club ou de gestion privée ?

---

<sup>96</sup>. Plus précisément on pourrait se référer au « despotisme oriental », expression courante dès le XVIII<sup>e</sup> siècle (Boulanger, Holbach, 1762) popularisée par Karl August Wittfogel (Wittfogel, 1964) et reprise dans ce contexte par Bernard Barraqué (Barraqué, Roche, 2010).

## 7.4. L'eau comme ressource et l'eau comme service

La question n'est pas simple, car l'eau est tour à tour bien commun et bien de club. L'échelle de gestion à laquelle on se place et le champ des préoccupations conduit à regarder l'eau de différentes façons.

Dès lors qu'une infrastructure collective existe, captant de l'eau et la distribuant à des clients ou usagers ou adhérents, c'est la notion de service qui domine ; il s'agit de la gestion d'un bien de club<sup>97</sup> : un périmètre irrigué, un barrage ou un réseau d'eau potable et d'assainissement créent de fait un collectif limité (les abonnés) qui partage ce bien de façon plutôt exclusive, sans que cela constitue une appropriation privée individuelle. Mais cette logique ne vaut que pour ce service dans sa délimitation et n'engage pas le statut de l'eau au-delà.

Si l'État ou une autorité instaurait une propriété publique de l'eau pour la distribuer selon des règles qu'elle établirait, il transformerait la ressource en eau en bien public. Rien ne l'exclut par principe, si ce n'est le bilan de l'efficacité de cette appropriation.

Généralement l'État ou l'autorité publique est chargé par la loi de la réglementation des usages sans instaurer pour autant une propriété publique (pour avoir le pouvoir de fixer des droits d'usage, l'État n'a pas besoin d'exercer tous les attributs de propriété sur l'eau : la gestion en biens publics n'implique pas la propriété publique).

Dès lors que des pratiques s'instaurent par le consentement mutuel des parties prenantes par le dialogue, on se rapproche plus ou moins d'une pratique de gestion en communs. Mais ces pratiques peuvent s'accommoder d'une police de l'eau exercée par l'État comme en France : cet équilibre des rôles ne respecte donc pas l'un des principes d'Élinor Ostrom que le pouvoir de contrôle et de sanction relève de la communauté et non des autorités.

La géographie des bassins-versants ou des aquifères ou encore le faible flux réel des transferts entre bassins conduisent à constituer, sur des périmètres qui ne sont souvent pas des entités nationales ou régionales, des communautés larges d'acteurs. Celles-ci partagent, d'amont en aval et entre catégories d'usagers, l'intérêt commun d'accéder à l'eau. En France, les comités de bassin<sup>98</sup> participent à la définition des flux financiers qui assurent cette mutualisation solidaire de moyens : en cela, au sein de ces comités de bassin, semble se dessiner naturellement une logique de club (Laigneau, Formiga-Johnsson, Barraqué, 2018), alors qu'ils ont en fait principalement en

**97.** Bernard Barraqué souligne notamment : « Comme ressource, l'eau ne peut pas être considérée comme un bien public pur, car si l'on ne peut pratiquement pas priver d'accès les ayants droit, en cas de pénurie il y a rivalité, et dans ce cas il faut créer une institution pour assurer une répartition équitable. [...] Une fois que tous les habitants d'une ville ou du territoire d'un service public d'eau sont raccordés, on peut considérer l'eau-service comme un bien de club : nous avons l'eau à domicile parce qu'on a installé une coûteuse infrastructure de tuyaux d'adduction et de distribution, et des usines et des pompes... le tout ensemble représente plus des trois quarts du coût du service public. Mais ensuite, chacun peut ouvrir son robinet quand il veut, et normalement il n'y a pas de situation de rivalité entre les usagers. En revanche, que l'on paye sous forme de partie fixe (abonnement) ou selon les volumes consommés, il faut couvrir les coûts du club. C'est là que des économistes trop pressés passent à côté d'un phénomène fondamental : l'eau n'est pas un bien de marché où offre et demande se confrontent librement, mais un bien de club où offre et demande forment un système dynamique contraint par la lourdeur des investissements » (Barraqué, Roche, 2010).

**98.** Les comités de bassin en France réunissent des représentants de toutes catégories d'acteurs, selon des règles qui n'ont pas manqué d'évoluer au gré des rapports de force. De la même façon, la plupart des grandes mutations de la politique de l'eau n'ont pas procédé, malgré cette gouvernance fortement responsabilisante, d'évolutions incrémentales négociées entre les parties prenantes, mais de l'irruption de formes critiques qui se sont exprimées en dehors de celles-ci quand elles ne l'emportaient pas au sein des instances (Colon, Richard, Roche, 2018).

termes de responsabilité une gestion en biens communs (Allain, 2012), dont le fonctionnement concret est *in fine* assuré par des outils de la régulation d'État (taxes et police).

Les systèmes concrets peuvent donc utilement relever de logiques différentes, hybrides, à différentes échelles, s'adressant pourtant à une même eau : on ne saurait s'en offusquer car cette complexité est inhérente aux questions à résoudre. Décidément, l'eau est non seulement physiquement fluide et informe mais aussi polymorphe dans ses acceptations sociales, économiques et environnementales : sa gestion ne se laisse donc guère emprisonner dans un cadre idéologique unique et déterminé.

On décrira au chapitre 8 la gestion par bassin-versant, pour le pari qu'elle représente de réunir des acteurs sur un territoire singulier transgressant les frontières administratives *infra* et *supra*-nationales, mais aussi en ce que qu'elle s'adresse à un système écologique dont la géographie est structurante (même si la géographie humaine ne s'y inscrit que très partiellement) et qu'elle est ainsi le lieu privilégié de la conception de solutions fondées sur la nature.

## 7.5. Allouer une ressource rare par une juste répercussion des coûts

Le coût économique total de l'usage d'une ressource comme l'eau consiste en la somme de trois composantes :

- le coût interne : coût opérationnel d'exploitation, coût de maintien en état du patrimoine de production (*asset management*), coûts financiers des immobilisations de capital, coûts de préparation de prochains investissements ;
- le coût externe ou environnemental ;
- le coût d'opportunité, ou coût d'option (ou coût d'usage rendu impossible) qui tient à la rareté de la ressource, que l'on n'utilise pas sans empêcher d'autres usages.

Sans verser dans les dérives du *free market environment* (voir § 7.3.1), la conférence internationale de Dublin de 1992 avait pour la première fois fait reconnaître le principe que l'eau pouvait « avoir un prix » sans être pour autant une marchandise. En 2000, le 2<sup>e</sup> Forum mondial de l'eau a reconnu que, pour inciter à sa bonne gestion, il fallait que l'eau soit traitée comme un bien économique. Qu'entend-on par cela ?

En Europe, la directive-cadre sur l'eau (DCE) de 2000<sup>99</sup> marque une première étape concrète de mise en œuvre de ces principes. Elle promeut en effet :

- la mise en place de tarifications incitatives pour une utilisation durable des ressources et une récupération adéquate des coûts des services de l'eau par grand secteur économique ;
- l'analyse économique comme outil d'aide à la décision pour identifier les mesures permettant d'atteindre les objectifs au moindre coût ;
- des dérogations possibles sur la base de l'argument de coûts disproportionnés.

Dans le domaine agricole, le paiement à un niveau réaliste de l'eau d'irrigation est évidemment un puissant moteur d'évolution des pratiques quand il est mis en place, mais c'est rare.

---

<sup>99</sup>. Directive n° 2000/60/CE du 23 octobre 2000 dite directive-cadre sur l'eau (DCE) : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32000L0060>

Le plein recouvrement des coûts apparaît aujourd'hui comme une utopie à de nombreux décideurs, qui s'appuient à la fois sur l'impact socio-économique d'une valorisation du coût de l'eau (impossibilité pour une agriculture fragilisée, bien souvent au niveau de subsistance, d'assumer de tels coûts, inéquité sociale), mais aussi sur des notions culturelles, voire religieuses (l'eau don du ciel, bien sacré, non appropriable), qui rendraient cette démarche inacceptable.

## 7.6. L'allocation de droits par la puissance publique

Une gestion administrée de l'eau repose sur des autorisations de prélèvements et de rejets contrôlés par une entité chargée d'une mission publique. Il s'agit souvent d'un service administratif, mais cela peut être une agence ou tout autre type d'opérateur rémunéré pour cela, sous réserve d'une décision claire et précise lui attribuant cette prérogative et les pouvoirs correspondants – souvent, cela suppose le droit de pénétrer dans des propriétés privées, de dresser le procès-verbal de constatation d'une infraction, le droit de perception d'amendes forfaitaires, etc. En France, on appelle cette activité la « police de l'eau ».

Sans entrer en détail dans le droit de l'eau<sup>100</sup>, il faut être conscient qu'en France, par exemple, les berges et le fond des rivières font l'objet d'une propriété qui peut être identifiée comme domaniale<sup>101</sup> ou non domaniale (propriété des riverains). Dans les deux cas, cette propriété du fond donne des droits, tels que réglementer ou interdire l'accès ou la circulation (dans des limites fixées par la loi). Elle donne le droit d'usage de l'eau qui coule, mais soumet ce droit à un régime d'autorisation ou de contrôle (la « police de l'eau » est une police administrative fondée sur divers régimes de déclaration, d'autorisation, de contrôle et de sanction). Généralement, ces droits d'usage sont précaires et révocables, ou tout au moins de durée limitée.

Même sans que soit affirmée une quelconque propriété publique de l'eau, une autorité publique peut ainsi se voir confier par la loi la responsabilité d'en « administrer » les prélèvements et les rejets pour le compte de la collectivité, c'est-à-dire d'édicter et d'appliquer des règles d'usage et des sanctions en cas de non-respect de ces règles.

Le cas des concessions hydroélectriques est de ce point de vue éclairant, car l'État, en France et dans de nombreux pays, y intervient à la fois comme l'autorité organisatrice d'un service public (l'énergie) et comme le régulateur de l'équilibre des usages, sans qu'à aucun de ces deux titres il ne s'agisse d'une appropriation publique de l'eau, qui garde son statut de bien commun. Ainsi, l'article L 511 du code de l'énergie, en France, stipule que « nul ne peut disposer de l'énergie des marées, des lacs et des cours d'eau, quel que soit leur classement, sans une concession ou une autorisation de l'État ». Cette concession est alors une composante des outils d'exécution d'un service public dont le principe figure à l'article L121-1 du même code : « Le service public de l'électricité a pour objet de garantir l'approvisionnement en électricité sur l'ensemble du territoire national, dans le respect de l'intérêt général [...], dans le respect des principes d'égalité, de continuité et d'adaptabilité, et dans les meilleures conditions de sécurité, de qualité et de coûts, de prix et d'efficacité économique, sociale et énergétique ». Ces concessions sont par ailleurs

<sup>100</sup>. Pour le droit français : outre l'indispensable code de l'eau (Drobrenko, Sironneau, 2017), pour une introduction simple et accessible avec le renvoi à une documentation plus spécialisée voir Chiu, 2018 et le rapport du Conseil d'État (Tiberghien, 2010).

<sup>101</sup>. Propriété publique (voir Barraqué, Roche, 2010 pour l'origine féodale de ce terme) se déclinant ensuite en domaine public et domaine privé de l'État.

soumises au code de l'environnement et à des autorisations et contrôles à ce titre, pour qu'elles respectent les autres usages et les milieux naturels. On verra que cette conception, qui domine le droit français et européen et assez répandue dans le monde, n'est pas pour autant universelle.

Ces régimes d'autorisations prévoient généralement des obligations de maintien d'un débit minimum en rivière pour des raisons environnementales et qu'en situation de crise, les mêmes autorités puissent réduire ces droits d'usage de façon unilatérale, généralement sans préavis ni indemnisation, notamment pour préserver des usages jugés prioritaires (alimentation en eau potable notamment). Les taxes ou redevances d'usage peuvent être, ou non, liées à ces autorisations.

La fraude, le contournement des règles, la corruption et la concussion<sup>102</sup> des personnels chargés du contrôle sont difficiles à juguler. Bien souvent, la pénurie de moyens suffit à vider de sens cette gestion administrée.

## 7.7. Des marchés d'eau aux marchés de droits d'eau

Un marché suppose que les producteurs disposent des moyens de mettre un bien à disposition des clients ou que ceux-ci y accèdent, ce qui pour notre propos ici est équivalent. L'eau est relativement facile à stocker, mais très coûteuse à transporter sauf par gravité au regard de ses valeurs d'usage : c'est un bien difficile à échanger, en tout cas à grande échelle.

Lorsqu'une entité est chargée de gérer une infrastructure desservant de nombreux usagers, elle peut soit tarifer l'eau de façon prédéterminée sans possibilité de rétrocession, soit allouer les volumes dont elle dispose aux plus offrants, dans des conditions éventuellement encadrées pour éviter des abus. Des niveaux de service peuvent être différenciés selon les tarifs.

Les premiers marchés d'eau sont donc des marchés de services d'eau, où ce qui est rétribué est généralement l'investissement et le coût d'exploitation d'un système production/transport/distribution. Quand un marché d'eau est possible, il peut donner naissance à un marché de droits d'eau : s'échangent alors des droits à en disposer, à certains moments, pour des durées définies ou dans des lieux non immédiats, avec ou non des clauses de sécurisation (niveau de garantie). Dans les zones arides où l'on a construit des systèmes de retenues largement interconnectés correspondant à une économie de répartition (Pouilles, Sicile, Californie, etc.), se superpose alors un premier niveau de service (stockage et transport) qui est le fournisseur d'eau brute (souvent des sociétés d'économie mixte), dont les villes sont clientes.

Un barrage-réservoir peut jouer le rôle d'une sorte de « banque de dépôt de l'eau ». Ces volumes, s'ils font l'objet d'un marché d'échange, peuvent être alloués par enchères. Les volumes sont stockés par l'opérateur du barrage pour le compte de leurs détenteurs jusqu'à lâchure contractuelle. La valeur varie selon les besoins, notamment les fluctuations climatiques et la saison.

Cette vision reste cependant très théorique : dans la réalité, on baptise sous le nom de « marché de l'eau » une grande diversité de cas (Strosser, Montginoul, 1999). Ainsi, au Pakistan, on trouve des marchés de « tours d'eau » d'un système de canaux d'irrigation et d'exploitation

---

<sup>102</sup>. Malversation d'un fonctionnaire qui ordonne de percevoir ou perçoit sciemment des fonds par abus de l'autorité que lui donne sa charge.

de l'eau souterraine entre agriculteurs (Strosser, Kuper, 1994)<sup>103</sup>. En Australie, dans l'important bassin des deux rivières (le Murray et son affluent le Darling), il y a une tension certaine entre les ressources disponibles (la région étant très aride) et les multiples usages (pour une population de 2,66 millions d'habitants et 70 % de l'agriculture irriguée d'Australie). Ce marché de droits d'eau a dû commencer à être corrigé depuis 2005 par une politique d'économie d'eau et de rachat de droits d'eau distribués en excès.

### VOIR ÉTUDE DE CAS N°11

#### Les marchés de droits d'eau dans le bassin Murray-Darling en Australie

L'un des cas les plus cités est le Chili où, depuis 1981, le principe instauré est celui du laisser-faire volontaire, au sens libéral du terme. Non seulement les allocations d'eau, mais aussi les priorités de dépollution des acteurs économiques, sont soumises à une concurrence faiblement régulée. Les conséquences ont été analysées par Carl J. Bauer dans une succession de travaux (Bauer, 1998 ; Bauer, 2010). Enquêtant sur place sur les conséquences de la loi de 1981, il avait été surpris de constater que ces marchés, dont la littérature internationale faisait grand cas, concernaient en fait un très faible volume de transactions. À l'expérience, Carl J. Bauer relève le succès d'un cadre de propriété privée juridiquement solide, qui a été un facteur décisif pour attirer des investisseurs privés, ce qui ne s'est pas produit dans le reste de l'Amérique latine. La réallocation recherchée vers des activités à forte plus-value (fruits et légumes pour l'exportation dans certaines vallées et industrie minière dans les déserts du Nord), ainsi que pour l'hydroélectricité et les besoins urbains dans les environs de Santiago s'est effectivement produite.

Les défauts sont le revers de la même réalité : ce code de l'eau s'est en contrepartie révélé inopérant pour assurer aux agriculteurs pauvres un accès à l'eau, pour gérer des conflits d'usage majeurs et pour assurer la protection des ressources naturelles. Des ajustements que Carl J. Bauer qualifie de mineurs ont été réalisés en 2005 sur la loi, pour la tempérer et tenir compte de ces difficultés.

Cet enjeu de sécurisation du cadre juridique et de prévisibilité des règles conduit naturellement à la notion de droits d'eau. Le marché de droits d'eau suppose que soient établis des titres de propriété permanente ou pour une durée significative (cette propriété pouvant être soumise le cas échéant à des contraintes d'usage, des débits réservés, etc.) qui s'échangent. Au quotidien, les détenteurs de ces droits peuvent les utiliser pour prélever de l'eau et les revendre à ceux qui en ont besoin : se constitue alors un marché de droits d'eau.

L'établissement d'un marché de droits d'eau suppose en général une allocation initiale des droits à partir d'un constat de l'existant : autorisations de prélèvement quand il y a en a, droits fondés en titre, mais plus généralement, appréciation des usages constatés (logique du droit du grand-père) qui peut d'ailleurs générer des effets d'aubaine.

Le libre jeu de l'offre et de la demande d'eau conduirait ensuite, en l'absence de coûts de transaction et en situation d'information parfaite, à un *optimum* économique de Pareto des usages,

<sup>103</sup>. Les agriculteurs de ce territoire d'environ 3000 km<sup>2</sup> sont alimentés à la fois par des canaux d'irrigation selon un système datant de la colonisation britannique (développés au sein du *Sudley Water Project* en 1932) et par des pompages en aquifère. Le marché concerne des achats ou échanges complets ou partiels informels de tours d'eau et des achats d'eau de pompage aux détenteurs des forages.

le prix s'établissant à la valeur marginale maximale (sinon une transaction de plus apporterait un gain collectif supplémentaire). Cet équilibre de Pareto est réputé vertueux en termes de bénéfices collectifs (*welfare*, il s'agit bien ici de socio-économie) : si la ressource est rare et donc sa valeur marginale élevée, les usages plus parcimonieux, apportant une plus forte valeur ajoutée, se substituent progressivement aux usages peu efficaces de l'eau. Que certains aient bénéficié initialement d'une rente de situation est alors un inconvénient qui s'estompe rapidement car les valeurs ajoutées nouvelles dominent les défauts de l'allocation initiale. Le marché de droit est donc structurellement un instrument d'internalisation des coûts dits d'opportunité (voir § 7.5) : chaque usager paie pour l'usage dont il prive d'autres usagers. En pratique, dans le cas du bassin Murray-Darling en Australie (voir [Étude de cas n°11](#)) ces droits d'eau constituent aujourd'hui pour les agriculteurs y compris retraités un capital de plus de 13 milliards d'euros, jusqu'à 40 % de leur patrimoine.

Structurellement, la logique de marchés de droits porte en germe la concentration des droits dans les mains<sup>104</sup> des plus gros acteurs industriels (compagnies d'électricité, agro-industrie et mines), voire par les acteurs financiers purs, aux dépens notamment des petits agriculteurs. Peuvent acquérir les droits ceux qui ont les ressources financières les plus solides. Ils peuvent alors redistribuer ces droits à ceux qui ne peuvent investir, selon des conditions qu'ils maîtrisent. Cet effet mécanique de concentration est certainement un des défauts majeurs de telles démarches<sup>105</sup>.

En définitive, il est remarquable que dans tous les cas où les autorités s'étaient initialement tournées vers un choix de marchés (l'Australie, la Californie, le Colorado et même, dans une moindre mesure, le Chili), elles aient finalement introduit des mécanismes correctifs d'intervention publique fondée sur des rachats, l'autorité publique se portant en quelque sorte « acheteuse d'eau pour le compte du milieu naturel ». Il faut évidemment s'interroger sur la pertinence, en ce cas, de cet outillage : pour légitime que soit cette préoccupation, elle introduit, dans un domaine qu'elle a elle-même décidé de rendre marchand, des perturbations liées aux difficultés qu'elle a à opérer sans distordre les règles qui régissent ce marché (voir dans le cas Murray-Darling les commentaires provisoires de la commission de la concurrence et de la consommation australienne reproduits dans le dossier ACCC, 2020).

---

<sup>104</sup>. Issue depuis le début du xix<sup>e</sup> siècle de la doctrine « *first in time first in right* » (premier arrivé, premier servi), la *Water law* du Colorado intègre une règle « *use it or lose it* » qui interdit de théauriser des droits inemployés. On pourrait considérer qu'elle ait pour effet de corriger les effets spéculatifs sur les droits d'eau : inemployés, ils sont perdus par leurs bénéficiaires, repris et remis en enchère. Une telle doctrine est très efficace dans le domaine aérien pour gérer l'attribution des *slots* (créneaux d'autorisations d'opérer). Néanmoins, cette règle pour effet pervers d'inciter à la consommation : utiliser tout ce à quoi l'on a droit pour ne pas perdre ce droit. Pour corriger cela et permettre une certaine restauration environnementale, cette perte des droits a été suspendue en 2013 dans le Colorado, quand un préteur renonce temporairement à user de son droit au bénéfice d'un programme de restauration des milieux.

<sup>105</sup>. C'est sur de telles perspectives que la société Enron avait tenté une stratégie dans le domaine de l'eau (société Azurix), espérant les mêmes spéculations sur les prix des droits d'eau que sur l'énergie. C'était oublier que les prix de services essentiels pour la vie demeurent régulés politiquement, bien plus que par l'économie de marché, pour les raisons à la fois symboliques et sociales développées aux [chapitres 4 et 5](#) notamment.

## 7.8. La gestion d'un aquifère : comparaison des outils de gestion

Comme nous sommes partis de la tragédie de la surexploitation mortifère des aquifères, il convient d'y revenir par l'analyse publiée par l'AFD (Lavenus, Fradet, Chazot, 2016) des instruments possibles de gestion à partir d'études de cas concrets avec une grille de lecture orientée par les principes d'É. Ostrom (tableau 34).

Tableau 34 : Analyse comparative des divers instruments pour la gestion des aquifères.

Tiré de Lavenus, Fradet, Chazot 2016.

Instrument	Conditions de mise en oeuvre et de réussite	Avantages	Inconvénients
Quotas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Connaissance sur la ressource et les prélèvements</li> <li>Pouvoir de contrôle efficace</li> <li>Neutralité du pouvoir régulateur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Outil efficace dans les situations d'urgence (sécheresse)</li> <li>Objectif environnemental fixé <i>a priori</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas d'incitation à une meilleure valorisation de la ressource, pas de contribution à l'efficacité allocative</li> <li>Pas d'incitation aux économies d'eau au-delà du quota</li> <li>Barrière à l'entrée de nouveaux exploitants</li> </ul>
Taxes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Connaissance sur la ressource, les prélèvements et les fonctions de coûts et de revenus marginaux des usagers, l'élasticité de la demande en eau pour les différents usages</li> <li>Neutralité du pouvoir régulateur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incitation à une meilleure valorisation de la ressource</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incertitude sur les effets de la taxe et de l'atteinte de l'objectif environnemental</li> </ul>
Marché de droits d'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>Connaissance sur la ressource et les prélèvements</li> <li>Pouvoir de contrôle efficace</li> <li>Coûts de transaction faibles/modérés</li> <li>Situation concurrentielle</li> <li>Faisabilité technique et échange des quotas à des coûts modérés (volumes échangeables physiquement)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Objectif environnemental fixé <i>a priori</i></li> <li>Incitation à une meilleure valorisation de la ressource</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Question d'équité liée à l'attribution des droits</li> <li>Expertise nécessaire en matière de gestion de l'eau</li> <li>Coûteux à mettre en place (réseaux d'eau, frais administratifs, etc.)</li> </ul>
Gestion collective – Contrat de nappe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les huit principes d'Ostrom</li> <li>Connaissance sur la ressource et les prélèvements</li> <li>Cadre juridique approprié à une gestion locale de l'eau</li> <li>Conscience de la surexploitation ou du risque de surexploitation</li> <li>« Homogénéité culturelle » et reconnaissance des règles communes</li> <li>Suivi et évaluation réguliers par les usagers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faibles coûts de transaction</li> <li>Outil adapté au contexte local</li> <li>Responsabilisation des usagers</li> <li>Instrument soutenable et adaptable</li> <li>Facilitateur pour la mise en oeuvre des autres outils</li> <li>Intègre facilement les autres outils</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nombreux préalables à la mise en oeuvre</li> <li>Long à se mettre en place</li> </ul>



# Pour approfondir

## ÉTUDES DE CAS

N°11

Les marchés de droits d'eau dans le bassin Murray-Darling en Australie

## FOCUS

N°10

L'inégalité énergétique mondiale concerne également la mobilisation des ressources hydroélectriques

N°11

L'eau : un liquide abondant, excellent solvant et offrant une bonne capacité calorifique

# N°11 | Les marchés de droits d'eau dans le bassin Murray-Darling en Australie

## 1. Le bassin de Murray-Darling en Australie



Figure 63 : Le bassin Murray-Darling. Tirée de *Murray-Darling Basin Authority Annual Report 2019-20*.  
CC BY 4.0.

L'Australie est un continent «wet and dry» (Pigram, 1986). Rassemblant 0,3 % de la population mondiale et 1 % des ressources en eau, elle dispose en effet globalement de grandes quantités d'eau, mais inégalement réparties. C'est un des pays les plus consommateurs en eau au monde (avec les États-Unis, le Canada, le Kirghistan et l'Ouzbékistan). Mais ces ressources connaissent une très forte variabilité interannuelle. Ainsi, de longues séquences de sécheresse ont marqué son histoire : la sécheresse de 1877-1881, la grande sécheresse de 1895-1903 ou encore la sécheresse de 1979-1983, jusqu'à la séquence en 2019-2020. En 2019, une année plus sèche que le record antérieur de 1902, des incendies ont détruit plus de 10 000 ha, provoquant une perte de PIB de l'ordre de 3 %.

Sur une surface d'un peu plus de 1 million de km<sup>2</sup> (environ deux fois la France métropolitaine, un septième de la surface de l'Australie), le bassin des rivières du Murray et de son affluent principal, le Darling, concentrent 42 % des terres arables et 40 % de la production agricole du pays, alors que ces terres étaient à l'origine arides et peu fertiles. La réalisation d'un important complexe de barrages-réservoirs a permis ce développement (pour une présentation du développement de ces barrages au cours du xx<sup>e</sup> siècle sur l'ensemble de l'Australie voir Flaminio, 2017). Le premier réservoir à destination agricole est le barrage Goulburn, construit en 1891. Sa capacité totale de stockage atteint 35 Gm<sup>3</sup>.

## 2. La loi-cadre de 1994

Comme le rappelle Sylvia Flaminio, suite à la sécheresse des années 1877-1881, l'État de Victoria (qui intègre une partie du Sud du bassin du Murray-Darling) a d'abord établi un système de fonds locaux (*local trusts*) destiné à construire et à financer des aménagements, notamment des réseaux d'irrigation. En 1886, avec l'*Irrigation Act*, cet État affirme son droit sur l'eau. Alfred Deakin, à l'origine de cette loi, écrit qu'« il est nécessaire que l'État [fédéré] exerce un contrôle suprême sur tous les cours d'eau, lacs, ruisseaux et sources d'eau,

à l'exception de sources situées sur des terrains privés, et que l'État en soit le propriétaire ». Ce sera fait beaucoup plus tard, par un processus initié en 1994 (*Water Reform Framework*), qui aboutit en 2004 à la *National Water Initiative*, imposant la réalisation et le suivi de plans de gestion des eaux pour les systèmes aquatiques sous pression.

La réalisation du plan de bassin pour le Murray-Darling a commencé en 2012 et présente dans son déroulement des analogies avec le principe des plans de gestion réalisés en Europe en application de la DCE (SDAGE en France).

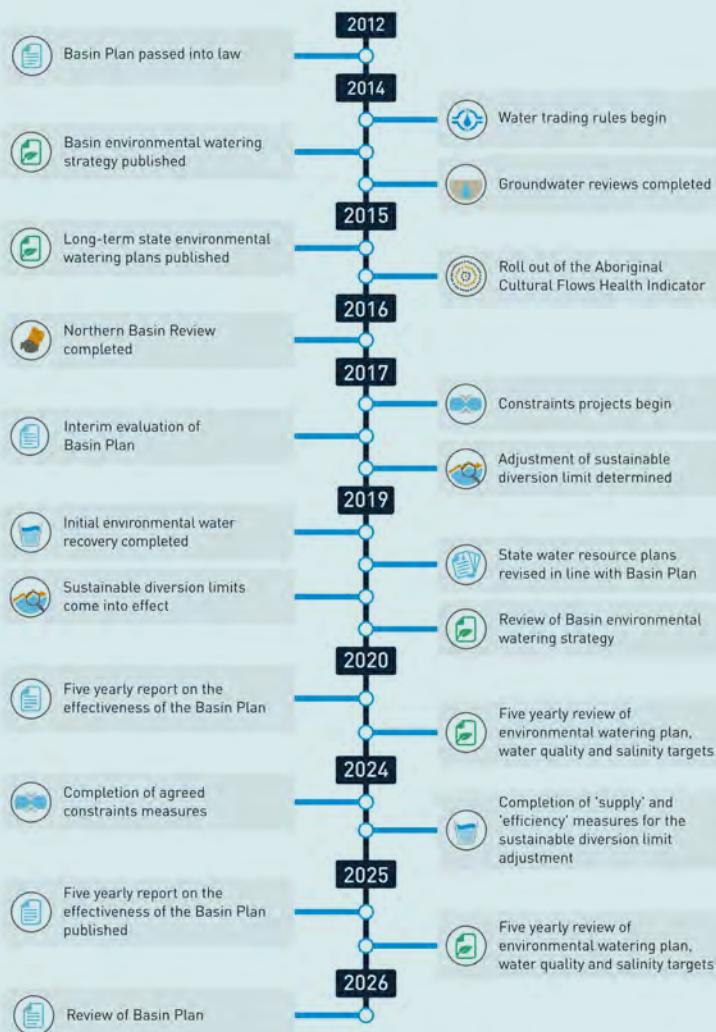


Figure 64 : Les étapes de mise en œuvre du plan de bassin Murray-Darling. Tirée de 2017 *Basin Plan Evaluation*  
© Murray-Darling Basin Authority (CC BY 4.0).

À partir de 2024 entrera en vigueur une réduction des limites de volumes alloués (*sustainable diversion limits*). Comme l'indique un rapport d'évaluation quinquennale du plan (MDBA, 2017), les méthodes de comptabilisation, après de nombreux efforts, restent « *at risk* ». Il est envisagé que cela conduise à une réduction maximale de 5 % des allocations.

### 3. Les difficultés et les contestations environnementales à partir des années 1990

Sylvia Flaminio le résume ainsi :

« L'irrigation intensive a provoqué, dans le bassin Murray-Darling, une salinisation des eaux et des terres agricoles qui modifie le couvert végétal et entraîne une diminution de la biodiversité. La dégradation des sols met aussi en péril l'agriculture. Par ailleurs, au début des années 1990, des groupes environnementalistes, tels la Snowy River Alliance, se sont mobilisés pour demander l'augmentation du débit minimal de la Snowy. [...] Depuis 2012, le *Murray-Darling Basin Authority* (MDBA), une organisation indépendante qui dépend du gouvernement australien, tente difficilement de concilier le maintien de l'agriculture irriguée et l'augmentation des débits réservés au sein du bassin-versant [...]. Si la gestion de la ressource en eau reste entre les mains des États fédérés, le Commonwealth (au sens australien du terme, l'État fédéral) a pris plusieurs mesures depuis les années 1990 pour encourager une gestion de l'eau plus durable. »

### 4. Le marché de droits et les rachats publics pour l'environnement

Le gouvernement australien fixe le volume d'extraction autorisé, et les détenteurs de droits d'eau peuvent échanger définitivement ou ponctuellement leurs droits, indépendamment de la propriété de la terre. C'est le *Bureau of Meteorology* (BOM) qui est chargé annuellement de quantifier l'eau disponible, mais aussi d'enregistrer les volumes échangés et utilisés, ainsi que les usagers.

L'optimisation des consommations s'est accompagnée de processus de spéculation (des opérateurs *trustent* préventivement des droits d'eau pour les revendre à des prix exorbitants au moment où l'eau manque à tous) et de l'éviction des exploi-

tations familiales au profit d'entreprises de grande taille.

Pour préserver l'environnement et les débits restants en rivière, une campagne de rachat par la puissance publique des droits de l'eau a été mise en place. Cette politique n'a pas fait consensus, notamment au sein des communautés qui dépendent des revenus agricoles. En février 2016, l'Australian Broadcasting Company médiatisait des images d'autodafé autour du plan de gestion proposé par le MDBA. Ces mesures ont été accompagnées de 4 milliards de dollars australiens de subventions pour augmenter l'efficacité des infrastructures d'irrigation et 2,5 milliards pour les rachats de droits.

Depuis sa mise en place effective en 2005, 2,1 Gm<sup>3</sup>/an (77 % du programme initialement envisagé de 2,75 Gm<sup>3</sup>/an) avaient été contractés en 2017. Contrairement aux hypothèses initiales du plan, seulement 1,2 Mm<sup>3</sup>/an ont été rachetés, 700 Mm<sup>3</sup>/an ont été gagnés par des investissements en vue d'économies d'eau et 200 Mm<sup>3</sup>/an par d'autres mesures.

### 5. Les effets économiques de la politique de rachat de droits

Le centre de recherche du ministère de l'agriculture (ABARES) a produit un rapport sur les effets économiques. Les facteurs de variation des prix sont multiples : les effets de réduction d'allocation liés à la stratégie de rachat (figure 65) dans la partie sud du bassin, la croissance de cultures gourmandes en eau (coton, amandes, etc.), les années sèches et humides (figure 66) et la réduction des débits naturels, qu'ils estiment à 20 % sur un siècle. On remarquera que le marché s'établit dans le Sud, où la ressource est le plus en tension, autour de 2 €/m<sup>3</sup>, alors qu'en moyenne sur le bassin elle est plutôt de 1 €/m<sup>3</sup>.

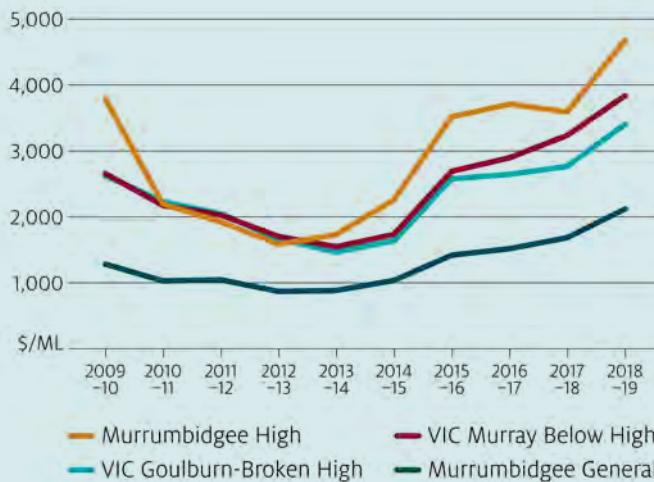


Figure 65 : Prix (AUD/1 000 m<sup>3</sup>) des droits d'eau de surface de 2009 à 2019 dans la partie sud du bassin Murray-Darling. Tirée de Whittle *et al.*, 2020, CC BY 4.0. 1 dollar australien (AUD) vaut environ 0,6 €.  
Les prix sont donc de l'ordre de 2 €/m<sup>3</sup>.

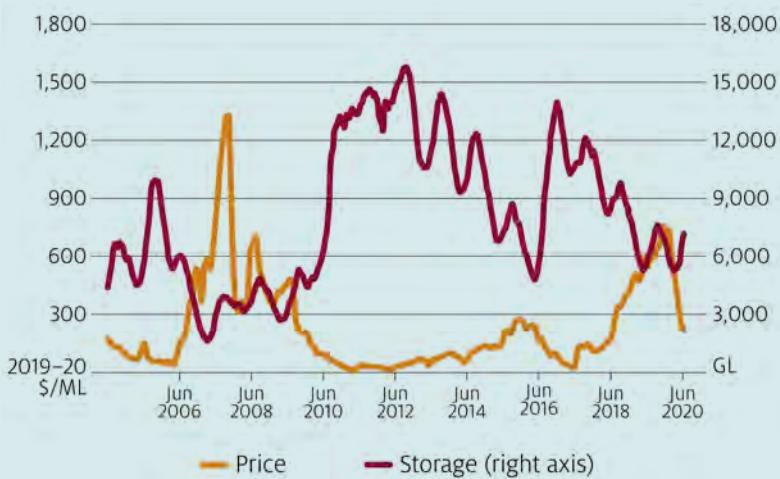


Figure 66 : Depuis 2005, les périodes de faible remplissage des retenues (unité à droite : Mm<sup>3</sup>) correspondent à des prix (unités à gauche : AUD/1000 m<sup>3</sup>) plus élevés. Tirée de Whittle *et al.*, 2020, CC BY 4.0.

Selon cette même étude, une partie des irrigants qui ont vendu leurs droits ne l'ont pas fait avec l'idée de renoncer à satisfaire leur besoin d'irrigation au niveau antérieur, mais ont préféré réaliser le capital que représentait la valorisation de ces droits et ensuite acheter l'eau sur le marché à court terme, en assumant le risque de payer cette eau au prix fort quand ils en ont besoin.

Il convient de remarquer que ces droits constituent maintenant pour leurs détenteurs (y compris des irrigants retraités) un capital considérable, qu'ABARES estime à 22,7 milliards de dollars australiens (environ 13,6 milliards d'euros), atteignant même 40 % de leur capital dans les fermes horticoles du sud du bassin.

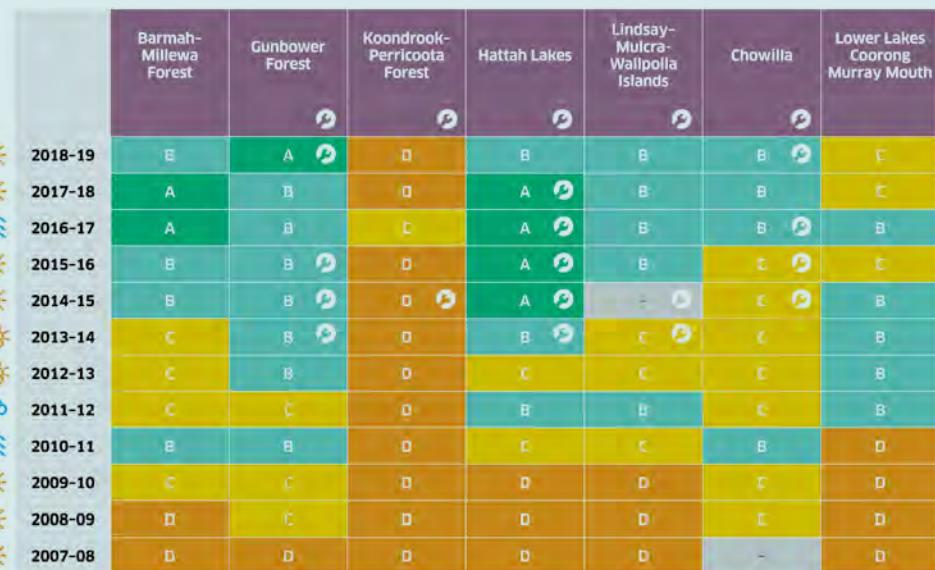
Enfin, l'amélioration des performances (comptées en m<sup>3</sup>/ha/an), financées tant pour les parties hors

exploitation (réduction des pertes des canaux d'aménée ou de l'évaporation) ou au sein de l'exploitation (évolutions de pratiques d'irrigation) a été chiffrée à 25 %.

Une autre partie a modifié ses pratiques en passant à l'agriculture pluviale (non irriguée) et en se déconnectant des réseaux d'irrigation : il en a résulté un report des charges fixes sur les autres irrigants, qui ont ainsi vu leur coût augmenter. Au final, ABARES considère que l'accroissement de prix dû à la politique de rachat a été de 0,072 AUD/m<sup>3</sup>/an.

## 6. Environnement

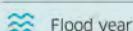
Les KPI (*key performance indicators*) suivis par la MDBA pour les questions environnementales sont répertoriés par groupes de sites et permettent un suivi qualitatif synthétique (figure 67) publié par MDBA annuellement (MDBA, 2020).



### Grades

<b>A</b>	Excellent	Most (75-100%) of ecological objectives have been met
<b>B</b>	Good	More than half (50-74%) of ecological objectives have been met
<b>C</b>	Fair	Fewer than half (25-49%) of ecological objectives have been met
<b>D</b>	Needs attention	Few (0-24%) of ecological objectives have been met
-	Data not available	-

- 8-17 ecological objectives per site
- Bird, fish and vegetation objectives
- 80-100 monitoring reports each year
- 12 years of data



Flood year



Environmental works used to deliver water to sites

Figure 67 : La restitution synthétique des principaux indicateurs de performance environnementale rapportés annuellement. Tirée de *Murray-Darling Basin Authority Annual Report 2019-20*. CC BY 4.0.

## 7. L'enquête de l'ACCC lancée en 2019

Le gouvernement australien a lancé en 2019 une enquête de la commission australienne de la concurrence et de la consommation (ACCC : *Australian Competition & Consumer Commission*) qui a produit un rapport intermédiaire public de plus de 500 pages en juin 2020 (ACCC, 2020), que l'on cite ici à titre provisoire :

« *The key problems the ACCC has identified include that:*

- *water market intermediaries such as brokers and water-exchange platforms operate in a mostly unregulated environment, allowing conflicts of interest to arise, and opportunities for transactions to be reported improperly;*
- *there are scant rules to guard against the emergence of conduct aimed at manipulating market prices, and no particular body to monitor the trading activities of market participants;*
- *there are information failures which limit the openness of markets and favour better-re-sourced and professional traders who can take advantage of opportunities such as inter-valley trade/transfer openings;*
- *differences in trade processes and water registries between the Basin States prevent participants from gaining a full, timely and accurate picture of water trade, including price, supply and demand;*
- *important information, such as allocation policies and river operations policy, which can significantly impact water pricing, are inadequately communicated to the irrigators and traders who rely on these to make business decisions;*
- *there is a disconnect between the rules of the trading system and the physical characteristics of the river system. For example, on-river delivery capacity scarcity, conveyance losses and adverse environmental impacts are not considered in the processing of trades that change the location of water use, except through some blunt and imprecise rules, such as limits on inter-valley trade/transfers;*

• *overarching governance arrangements, which result in regulatory fragmentation and overlapping of roles of different governing bodies, contribute to many of these problems, or prevent them from being addressed in an effective and timely way. A serious additional consequence of these problems is that many water users do not trust that the markets and key institutions are fair or working to the benefit of water users, in particular irrigation farmers. Impediments to informed and confident trading by many irrigators caused by these problems is likely to impede investment that is important for efficient agricultural production ».*

Ce cas du bassin Murray-Darling a alimenté une littérature internationale exceptionnellement abondante, souvent assez enthousiaste (Horne, 2018), qu'il sera intéressant de relire à l'aune des conclusions définitives de l'ACCC.

n°10

# L'inégalité énergétique mondiale concerne également la mobilisation des ressources hydroélectriques

## 1. L'hydroélectricité dans le bouquet de production énergétique

En 2019, la production hydroélectrique constituait la troisième source de production d'électricité dans le monde. Elle représentait à elle seule 70 % de la production d'énergie renouvelable et 16 % (4 306 TWh) de la production d'électricité totale, derrière le charbon (41 %) et le gaz (21 %). La puissance installée était de 1 308 GW, soit un peu plus qu'un doublement en 25 ans (625 GW en 1995). Ce rythme de croissance (1,2 % de 2018 à 2019) est plutôt faible au regard des engagements de l'accord de Paris sur le climat : certains acteurs du secteur considèrent qu'un rythme de 2 % par an serait nécessaire (ceci restant cependant très controversé).

L'hydroélectricité fait partie des sources privilégiées d'énergie, étant parfaitement renouvelable et sans autre émission que l'empreinte de la construction et de la fin des ouvrages. Cet usage de l'eau n'est que peu consomptif : il restitue au milieu, très près du lieu de prélèvement, les ressources stockées, déduction faite de l'évaporation intervenue sur le plan d'eau.

## 2. Les outils de la production hydroélectrique

La puissance délivrée est le produit du débit turbiné par la différence d'énergie potentielle (produit de la hauteur de chute par la gravité), affecté d'un coefficient de rendement.

On distingue :

- les centrales de barrages-réservoirs : l'eau stockée de façon inter-saisonnière, voire interannuelle dans une retenue située sur un cours d'eau ou en dérivation de celui-ci (l'eau étant alors divertie du cours principal par un canal d'aménée) est turbinée, généralement *via* une conduite forcée, puis rejetée en aval, habituellement dans la même rivière ; le déstockage peut être opéré très rapidement, ce qui confère à ce stock mobilisable à tout moment un rôle privilégié dans la fourniture d'énergie sur le réseau en heure de pointe ou en période de pointe ;
- les centrales au fil de l'eau : elles dépendent directement des variations naturelles de débit disponible ; les ouvrages sont souvent de relativement basses chutes (quelques mètres) ;
- les centrales d'éclusées : analogues aux précédentes, elles bénéficient d'un petit stockage (généralement en élevant le niveau de l'eau dans le bief amont de la rivière barrée par un ouvrage) qui permet un placement partiel de la production aux périodes de pointe ;
- les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) : elles sont composées d'un réservoir bas et d'un réservoir haut, l'eau pouvant alternativement être pompée vers le réservoir haut en heure creuse de consommation et turbinée en heure de pointe ;
- le turbinage en ligne sur des canaux et des canalisations destinés à d'autres usages (irrigations, eau potable, eaux usées) et dans lesquels on peut aussi récupérer une partie de la chaleur apportée lors de l'usage : c'est le cas des eaux usées domestiques, dont une partie, destinée notamment au bain, est chauffée et donc rejetée à une température supérieure à la température ambiante.

Les puissances installées sont extrêmement variées et on distingue :

- la grande hydraulique (plus de 10 MW), qui peut dépasser 1 GW. Les plus grandes centrales dans le monde sont concentrées en Chine, en Amérique du Sud, aux États-Unis et en Russie (figure 68) ;
- la petite hydraulique, qui comprend les pico-centrales (moins de 20 kW), les micro-centrales (20 kW à 500 kW), les mini-centrales (500 kW à 2 MW), et les petites centrales (2 à 10 MW).

## Puissance installée (GW)

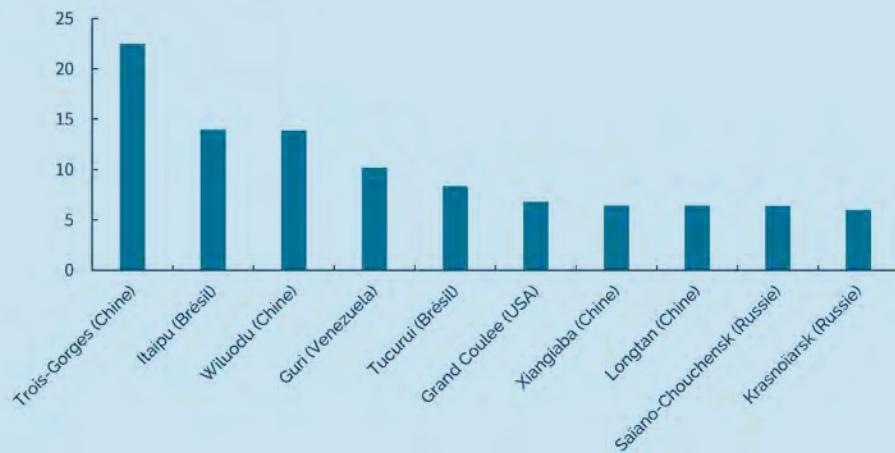


Figure 68 : Les plus grandes centrales hydroélectriques en 2017 (en GW). Source des données : Statistica.

### 3. Variations du prix de l'électricité

Dans de vastes territoires bénéficiant d'interconnexions puissantes, comme l'Europe de l'Ouest, s'est développée une ingénierie financière de plus en plus sophistiquée : les marchés d'électricité à long, moyen et court terme (figure 69) et même des marchés spot (figure 70), l'ensemble faisant l'objet de mécanismes stabilisateurs, qui se sont complétés ces dernières années (RTE, 2020).

L'hydroélectricité est placée aux moments où l'électricité a le plus de valeur et contribue donc activement à la satisfaction des besoins de pointe (figure 71), même si ceux-ci peuvent faire aussi l'objet de mesures tarifaires fortement incitatives à la réduction de ces pointes.

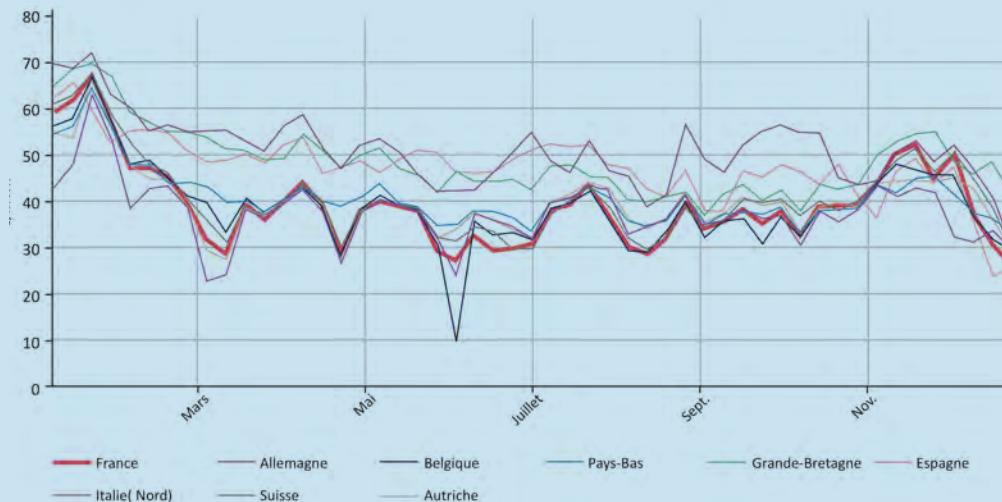


Figure 69 : Exemple de variations hebdomadaires du prix de l'électricité (Europe de l'Ouest, 2019, en €/kWh). Tirée de RTE, 2020.

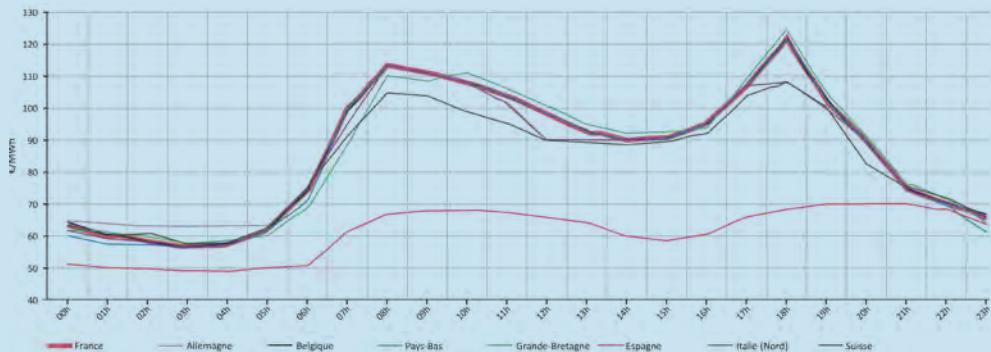


Figure 70 : Exemple de variation des prix de l'électricité dans la journée (24 janvier 2019 en Europe de l'Ouest, en €/kWh). Tirée de RTE, 2020.

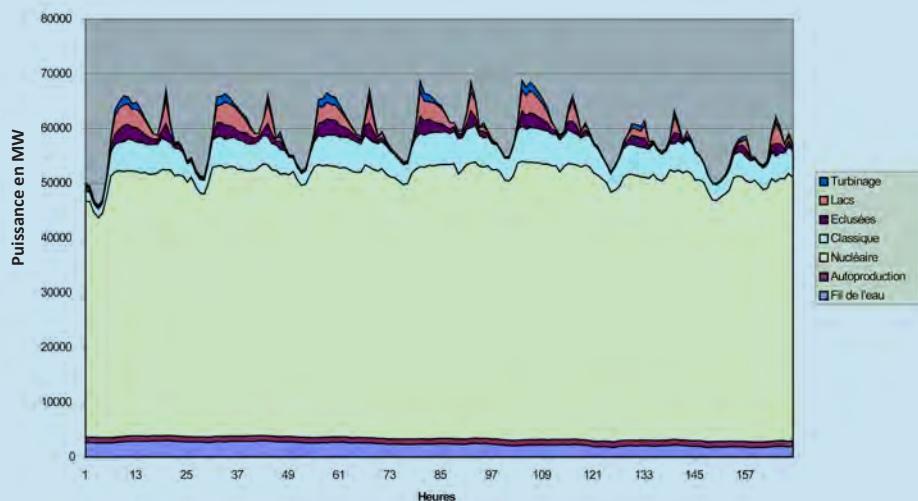


Figure 71 : Contribution des diverses sources énergétiques à la puissance produite (MW) en France durant une semaine d'automne. Tirée de Dambrine, 2006.

#### 4. Des très fortes inégalités mondiales

En 2016, 17 % de la population mondiale n'accédait pas à l'électricité. Or l'ODD n°7 (cible 7.1) demande (d'ici à 2030) de garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables et modernes, à un coût abordable.

La figure 72 montre les disparités de consommation énergétique dans le monde et le tableau 35 rappelle que les treize pays les plus consommateurs d'hydroélectricité correspondent en fait à des niveaux de consommation par habitant très contrastés. Le débat sur le développement de l'hydroélectricité est très actif et a été relancé par la recherche de mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre : quelle part de cette énergie doit être encouragée et comptabilisée par les institutions internationales comme des technologies favorables au développement durable ?



Figure 72 : Disparités de consommations d'électricité dans le monde en 2018. Source des données : AIE.

Tableau 35 : Les treize pays les plus consommateurs d'hydroélectricité dans le monde.

Source des données : Statista.

	Consommation d'hydroélectricité MTeP/an	Population (Millions d'habitants)	Consommation d'hydroélectricité par habitant teP/hab./an
Chine	272,1	1 400	0,19
Brésil	87,7	211,7	0,41
Canada	87,6	37,8	2,32
Etats-Unis	65,3	332,6	0,20
Russie	43	146	0,29
Inde	31,6	1 373	0,02
Norvège	31,3	5,4	5,80
Japon	18,3	126	0,15
Vietnam	18,3	94,7	0,19
Venezuela	16,3	28,4	0,57
France	14,5	67	0,22
Suède	14	10,3	1,36
Turquie	13,5	89,9	0,15

Il est assez difficile de parler de taux d'équipement hydroélectrique, parce que cela suppose de définir les ressources mobilisables techniquement (maximum théorique), mais aussi pratiquement (compte-tenu des contraintes environnementales et des coûts de production), d'autant que raisonner hors des variations saisonnières, climatiques, hebdomadaires et même horaires ne fait guère de sens au regard de la valeur de marché très contrastée de l'énergie selon son placement sur le réseau.

Malgré ces précautions de méthode, il ne faut pas être grand clerc pour constater que le niveau d'équipement est très inégalement réparti dans le monde. Pour la petite hydraulique (< 10 MW), qui ne représente que 7 % de la puissance totale installée, l'exercice a été fait dans un rapport de 2016 des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI) et du Centre international de la petite hydraulique en Chine (ONUDI-CIPH, 2016). Il montre que, même à cette échelle modeste, les disparités sont en faveur des pays développés (figure 73).

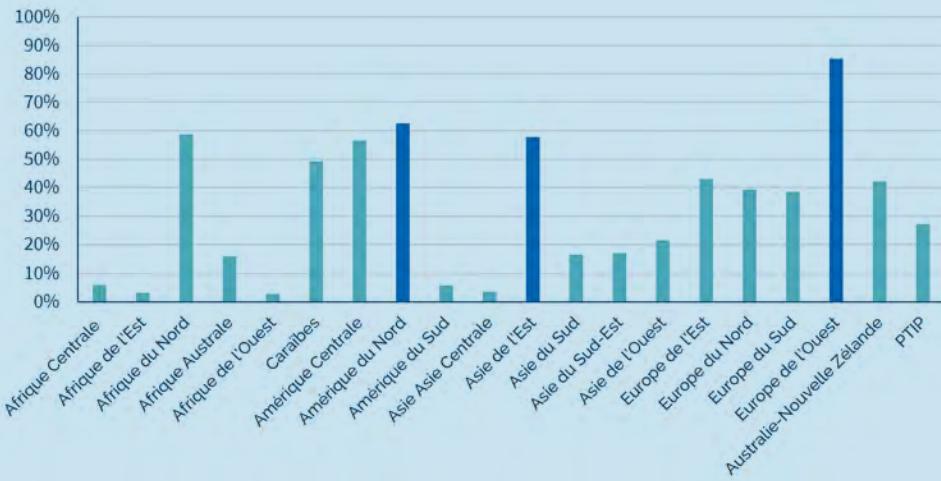


Figure 73 : Taux d'équipement en petite hydraulique (rapport entre puissance installée et puissance potentielle). Source des données : ONUDI-CIPH, 2016. En bleu foncé : supérieur à 60 %.

## 5. Les effets sur le milieu et les autres usages

Les interférences de l'hydroélectricité avec les autres usages peuvent provenir de la saisonnalité des besoins. En effet, la demande d'énergie est souvent plus forte en saison froide, alors que les demandes d'eau à usage agricole ou domestique croissent en saison chaude. Les conflits d'usage (et les arbitrages qui pourront éventuellement y mettre un terme), porteront donc prioritairement sur les consignes de gestion d'équipements régulateurs à buts multiples.

La petite hydraulique, en multipliant les obstacles tout au long des cours d'eau, contribue fortement, en l'absence de dispositifs adaptés de franchissement (passes à poissons, échelles à poissons, etc.), au cloisonnement écologique des cours d'eau et à leur appauvrissement. On pense souvent aux grands migrateurs emblématiques amphihalins comme les saumons qui sont au sommet de la pyramide trophique. Mais la nécessité de circulation s'impose, y compris à des espèces auxquelles on ne penserait pas car elles vivent l'essentiel de leur vie dans un même lieu : on imaginerait par exemple insensibles à ce cloisonnement les mulettes, des moules d'eau douce contribuant activement à la filtration des eaux. Mais leurs glochidies (stade juvénile) se développent en étant hébergées par des espèces migratrices particulières (truite, saumon ou esturgeon, selon les espèces).

L'enjeu le plus spectaculaire concerne évidemment les grands barrages de retenue. Bien entendu, le même sujet se pose pour ces retenues quel qu'en soit l'usage, mais l'hydroélectricité est l'une des valorisations socio-économiques les plus importantes de ces grands ouvrages et constitue généralement la première motivation de leur construction (voir § 8.5).

REVENIR AU COURS

§ 71

N°11

## L'eau : un liquide abondant, excellent solvant et offrant une bonne capacité calorifique

La disponibilité de cours d'eau au débit important et stable faisait partie des critères d'implantation des centrales thermiques, qu'elles fonctionnent à l'énergie fossile ou nucléaire. Une tranche de 1 GW réchauffera d'environ 7 à 10°C un débit de 100 000 m<sup>3</sup>/h. L'usage d'aéroréfrigérants (air pulsé) est courant dans les centrales thermiques autour de 100-200 MW. Pour éviter une pollution thermique excessive, le refroidissement à l'air a été généralement adopté par les centrales nucléaires. Le passage dans les tours de refroidissement laisse partir 3 à 5 % de l'eau sous forme de vapeur. Les centrales les plus récentes, situées sur le littoral, sont refroidies à l'eau de mer.

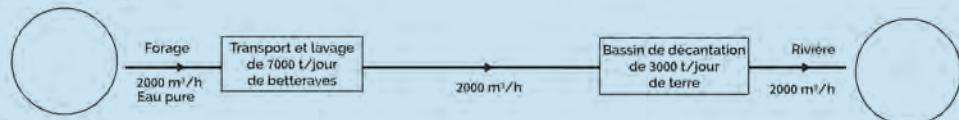
Les besoins industriels sont très variables selon les branches (tableau 38) et les techniques de recyclage. Un petit nombre de secteurs (comme la métallurgie, la chimie, la sucrerie ou la pâte à papier) est à l'origine de l'essentiel de la demande. Les exigences qualitatives sont des cas d'espèce : de l'eau ultra-pure pour l'électronique, déminéralisée pour la production de vapeur, potable pour l'industrie alimentaire, etc.

Tableau 36 : Prélèvements d'eau liés à la production dans diverses branches industrielles. Tiré de Valiron, 1990.

Produit	acier	rayonne	savon	plastique	papier	carton	essence	coton	bière	sucré
Prélèvement (m <sup>3</sup> /T)	6-300	400-1 000	1-35	1-2	80-1000	60-400	0,1-40	7-35	8-25	3-400

L'usage essentiel de l'eau dans l'industrie étant le refroidissement et le lavage, les taux de consommation sont faibles. Frederiksen estimait en 1992 à 16 % le taux de perte dans l'industrie des États-Unis et à 3 % dans le secteur énergétique. Il est courant de prendre 15 % à 20 % comme taux de perte pour l'industrie en général. Les moindres exigences qualitatives pour l'eau de refroidissement et de rinçage multiplient les occasions d'économiser l'eau grâce au recyclage (figure 74).

Sans recyclage :



Avec recyclage :

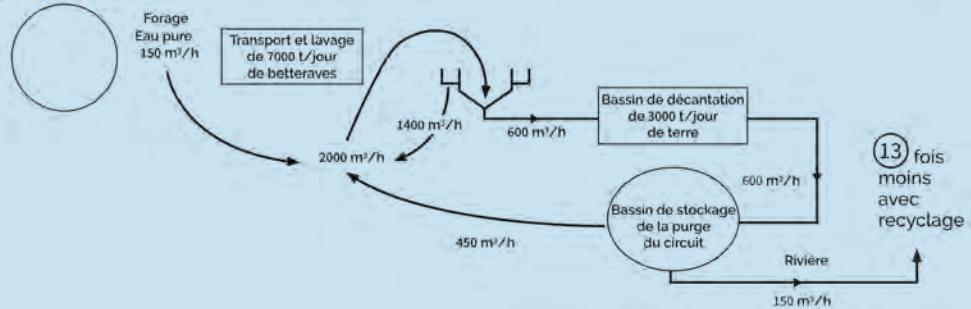


Figure 74 : Économie d'eau grâce au recyclage dans une sucrerie. Tirée de Valiron, 1990.

Dans de nombreuses filières, on observe qu'une réduction d'un facteur 10 des besoins est assez facile à obtenir, moyennant un examen d'ensemble des process et des circuits d'eau. La sucrerie de l'exemple ci-dessus fonctionne en boucle semi-fermée. Dès lors que l'eau intervient comme facteur de produc-

tion, l'industriel est susceptible de réagir rationnellement aux signaux de coût (qu'il s'agisse de coûts de pompage, de redevances, de prix d'achat de l'eau à un réseau public, etc.). Il adapte souvent de lui-même son procédé à ces facteurs technico-économiques en suivant les meilleures technologies disponibles (*best available technologies*) à l'occasion de la refonte d'une chaîne de production devenue obsolète, souvent pour un faisceau de raisons.

Depuis les années 1960, les progrès accomplis en Europe ont été considérables. Les gains de productivité des prélevements s'ajoutent à d'autres facteurs (stagnation de la production, délocalisation, etc.) pour expliquer une baisse ou une stagnation de l'usage industriel de l'eau en Europe. Le recyclage a permis à la Chine de soutenir sa croissance industrielle, en réfrénant la croissance de ses prélevements d'eau dans le milieu. Les exigences quantitatives et qualitatives se renforcent. De plus en plus de grands groupes industriels déléguent à des sociétés spécialisées la gestion de l'ensemble de leurs circuits d'eau : conditionnement, recyclage, épuration, etc.

### REVENIR AU COURS

§ 7.1

# *Chapitre 8 | La gestion intégrée des ressources en eau*

## Développer les solutions fondées sur la nature

### À RETENIR

**35**

**Le droit d'user sans abuser est local (dans le bassin hydrographique), bien souvent cependant international (avec les problèmes diplomatiques que cela génère). Convenir entre tant d'acteurs d'une répartition efficace et reconnue juste par tous n'est pas simple. La relation est asymétrique car laval est dépendant de l'amont.**

C'est à l'échelle des grands bassins-versants (ou des grands systèmes aquifères) que s'impose d'organiser cette gestion intégrée des ressources en eau, à travers des outils de concertation et de décision et en mettant en place des instruments économiques adaptés.

L'eau prend alors à la fois sa dimension d'usage (agriculture, industrie, navigation, pêche, usages domestiques, loisirs, etc.) mais aussi une dimension écologique complexe : morphologie fluviale et dynamique des sédiments sont indissociables des écosystèmes qu'ils abritent, eux-mêmes indissociables de la qualité de l'eau et de son aptitude à répondre aux usages.

Une des clés opérationnelles de la gestion intégrée est le développement d'ouvrages à buts multiples. Ceux-ci, conçus dès l'origine pour

répondre à la complexité des usages, sont ensuite gérés pour concilier au mieux l'allocation d'une ressource commune. Les conceptions de l'aménagement des eaux ont évolué vers des solutions dites « fondées sur la nature ». Les enjeux de santé publique sont là aussi très importants et ils sont fortement liés aux enjeux environnementaux : l'exemple du paludisme est plus particulièrement développé pour illustrer cette dimension essentielle.

Tous les pays s'étaient engagés à Johannesburg en 2002 à disposer dès 2005 d'un plan national de gestion intégrée des ressources en eau. Il est très souvent nécessaire qu'il soit coordonné au plan international. On est encore loin d'une généralisation de ces bonnes pratiques, mais les ODD ont fortement renforcé... l'affichage de cette ambition.

*Chapitre suivant : Deux clés de succès intimement liées : financer de façon appropriée et améliorer la gouvernance*

Ce chapitre traite plus particulièrement des outils d'une gestion soutenable de l'eau en intégrant la dimension géographique principale de la gestion de l'eau, qui est celle des bassins-versants, des enjeux de santé publique et des solutions dites fondées sur la nature.

## 8.1. La gestion intégrée des ressources en eau par bassin-versant

### 8.1.1. Un concept qui s'est progressivement imposé sur la scène internationale

Assurer pour l'eau un accès universel et une gestion durable implique de mobiliser un grand nombre d'acteurs. Autorités locales et régionales, comme les responsables des services locaux d'eau potable et d'assainissement, la coopération décentralisée, les opérateurs privés et les partenariats publics-privés ou les acteurs de la recherche et du développement, doivent partager des diagnostics, des connaissances et de l'expertise, renforcer les capacités de maîtrise d'ouvrage, qui sont souvent le maillon faible de la mise en œuvre, mais aussi rechercher et mobiliser des mécanismes innovants de financement.

À la suite de pays pionniers comme la France en 1964, la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)\* a été formulée pour la première fois lors de la conférence internationale sur l'eau et le développement durable à Dublin en 1992. On y soulignait l'importance d'impliquer tous les acteurs concernés au sein d'un même bassin et de disposer d'outils de connaissance des ressources en eau. L'importance en a été reconnue dans le plan de mise en œuvre de Johannesburg des OMD en 2002.

La directive cadre européenne sur l'eau (DCE) en 2000 a demandé aux États membres de s'organiser pour établir et suivre à l'échelle des bassins-versants des plans d'action quinquennaux pour un retour au bon état écologique des ressources en eau. Elle a fortement contribué à populariser le concept au plan international et à lier la notion de gestion intégrée des ressources en eau et de gestion par bassin-versant.

Pour les bassins partagés, la gestion intégrée des ressources en eau passe par la coopération transfrontalière, un cadre institutionnel (accords transnationaux, lois et plans nationaux) et une gouvernance adaptés, le renforcement de mécanismes de concertation et de coordination aux niveaux local, national et international. Les ODD ont reconnu la GIRE comme l'une des cibles à atteindre (cible 6a, voir § 6.2).

### 8.1.2. Gouvernance de la gestion intégrée par bassin-versant

La gestion de l'eau doit d'abord être organisée dans le cadre géographique naturel de chaque bassin-versant. Il est en particulier important d'assurer à ce niveau la coordination entre les administrations gouvernementales qui définissent les réglementations, les procédures et les mécanismes de financement public, les collectivités territoriales, les opérateurs des aménagements et des services collectifs, ainsi qu'avec les différentes catégories d'usagers de l'eau.

Dans la logique de la DCE, des programmes d'action doivent être établis et suivis à cette échelle de territoire. Ceci peut se faire, comme en Allemagne, sur la base d'institutions dont les périmètres d'intervention ne sont pas calqués sur les périmètres géographiques que constituent les bassins-versants (« districts hydrologiques » dans la terminologie de la directive). La GIRÉ suppose au minimum que soient organisés à tous les niveaux pertinents, notamment pour chaque bassin-versant, des systèmes globaux et permanents d'information permettant de mieux connaître l'état en quantité et en qualité des ressources et des milieux, les usages qui en sont faits et les pollutions rejetées, ponctuelles ou diffuses.

En France, le parti a été pris très tôt (loi sur l'eau de 1964) de constituer des institutions de bassin, des comités de bassin et des agences de l'eau, en les dotant de l'essentiel des pouvoirs et de moyens opérationnels, notamment financiers. C'est à cette même échelle que se coordonne l'action réglementaire de police des prélèvements et des rejets exercée par l'État.

Est ainsi constituée une hiérarchie de structures, de schémas stratégiques et de plans d'action cohérents entre échelles de territoires, du bassin-versant local aux bassins des grands fleuves (Roche, 2002b ; Roche, 2003b). Des maitresses d'ouvrage ont été créées en lien avec ces objectifs : des établissement publics territoriaux de bassin (EPTB), plutôt adaptés à l'échelle des grands bassins, et des établissements publics d'aménagement et de gestion de l'eau (EPAGE) pour assurer l'aménagement, la gestion, l'entretien des rivières et des bassins, ainsi que la réduction de l'exposition au risque d'inondation. C'est la compétence dite « gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations » (GEMAPI), dont la mise en place à partir de 2017 a demandé des adaptations significatives et délicates (Galibert *et al.*, 2018).

Toutes ces dispositions ont été améliorées et adaptées au fil des années et l'histoire n'a pas été sans conflit ni rivalité d'acteurs (Colon, Richard, Roche, 2018). Mais on peut raisonnablement dire que les décisions qui concernent la politique de l'eau des six grands bassins français sont prises de façon solidaire par l'ensemble des usagers représentés dans toute leur diversité (collectivités locales, agriculture, industrie, État, associations de défense et de l'environnement et des consommateurs) au sein du comité de bassin. Celui-ci exprime une solidarité de l'amont et de l'aval et entre catégories d'usagers dans l'intérêt général du bassin en votant les moyens financiers, issus des redevances assises sur les prélèvements et sur la pollution de tous les usagers (principes « pollueur-payeux »), qui permettront un aménagement harmonieux du bassin, programme après programme.

De nombreux pays ont souhaité, dès les années 1990, engager avec notre pays une coopération institutionnelle suivie pour mettre en place leurs propres organisations de bassin. C'est ce qui a conduit en 1994, lors de la réunion constitutive d'Aix-les-Bains, à la création du Réseau international des organismes de bassin<sup>106</sup>.

## 8.2. Aspects internationaux

La gestion intégrée des bassins partagés devrait être organisée dans le cadre d'accords de coopération entre les pays riverains concernés, reposant notamment sur la mise en place de commissions ou d'organismes internationaux appropriés. Cela a été un des thèmes majeurs de la décennie internationale d'action « l'eau source de vie » 2005-2015 des Nations Unies.

<sup>106</sup>. Voir le site : <https://www.riob.org/fr>

Il existe dans le monde 263 lacs et bassins fluviaux internationaux, qui couvrent la moitié de la surface des terres émergées. Les eaux souterraines ignorent au moins autant les frontières que les eaux superficielles. treize bassins dans le monde sont partagés par cinq à huit nations riveraines. Cinq bassins fluviaux, ceux du Congo, du Niger, du Nil, du Rhin et du Zambèze, sont partagés par neuf à onze pays. Le fleuve qui traverse le plus grand nombre de nations est le Danube, dont le cours traverse le territoire de dix-huit nations<sup>107</sup>. 270 systèmes aquifères transfrontaliers ont été recensés par le programme *Internationally Shared Aquifer Resources Management* (ISARM) de l'UNESCO (Aureli, Puri, 2009).

La question de la gestion du partage de ces eaux, donc des usages que l'on peut en faire, n'est pas nouvelle, mais elle prend une dimension stratégique croissante avec l'accroissement de la pression anthropique.

### 8.2.1. Une profusion de traités et de conventions

Sans remonter trop loin dans les analyses historiques et juridiques<sup>108</sup>, Jacques Sironneau a recensé 3 800 actes internationaux sur ce sujet depuis l'an 805<sup>109</sup>. Le droit international s'est d'abord occupé de réglementer la navigation : c'est le cas de l'internationalisation des fleuves et des lacs partagés à des fins de navigation, proclamée en 1815 au congrès de Vienne, avec la création de la commission du Rhin. Durant le xixe siècle, les proclamations du caractère international de nombreux fleuves se sont succédé : en 1856, le traité de Paris, à nouveau pour le Rhin, mais aussi pour le Danube ; en 1855 à Berlin pour le Congo, le Niger et le Zambèze ; en 1918 pour l'Oder et le Niemen ; en 1921 pour l'Elbe ; en 1923 pour la Weser, etc.

La convention de Barcelone de 1921, censée parachever le tout, n'a guère eu d'effet. Très vite au xx<sup>e</sup> siècle, apparaît par ailleurs la nécessité d'un arbitrage des conflits concernant d'autres usages que la navigation commerciale :

- l'hydroélectricité : la convention de Genève de 1923 ;
- des problèmes de pêche et de qualité des eaux : en 1906 entre l'Italie et la Suisse, en 1907 entre les États-Unis et la Grande Bretagne pour le Canada ; la convention de Berne en 1976 et de Strasbourg en 1996 concernant le Rhin ;
- les conventions de partage de ressources : en 1927 entre l'URSS (l'Arménie et l'Azerbaïdjan actuels) et la Turquie sur une base égalitaire, ou sous forme de quotas de livraison, comme entre l'Iran et l'Afghanistan (Kaboul en 1973), ou entre le Cameroun et le Tchad (Mondou en 1970), ou sur une base territoriale, comme pour l'Indus entre l'Inde et le Pakistan.

Les accords concernant les eaux souterraines sont peu nombreux et relativement récents, mais ils ont fait l'objet d'une attention accrue depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle par l'UNESCO, appuyée notamment en matière de méthodologie par l'Académie de l'eau française, l'OIEAU, le BRGM et opérationnellement par l'Agence française de développement (Machard de Gramont *et al.*, 2010).

<sup>107</sup>. Voir le site : <https://www.un.org/fr/waterforlifedecade/themes/transboundary.shtml>

<sup>108</sup>. Sur ce sujet, se reporter à Sironneau, 1996, Caponera, 1998, Brofferio, 2001, et Caponera, Nanni, 2007.

<sup>109</sup>. Le premier traité semble celui établi en 2500 av. J.-C, entre les deux cités-États sumériennes de Lagash et d'Umma pour mettre fin à un conflit lié à l'eau le long du Tigre.

## 8.2.2. Que nous dit le droit international ?

Quelle doctrine internationale se dégage de cette profusion de textes (Poydenot, 2008 ; Capo-nera, Nanni, 2007) ?

La première doctrine formulée (dite « doctrine Harmon ») de la souveraineté territoriale absolue) proclame qu'un État peut user des eaux dans son territoire de la façon qu'il estime la plus conforme aux intérêts nationaux, indépendamment des conséquences externes. Ayant fondé l'arbitrage léonin entre les États-Unis et le Mexique dans le conflit du Rio Grande (1895), l'avis du 41<sup>e</sup> *attorney general* (procureur général) des États-Unis, Judson Harmon, formalisa cette doctrine, à laquelle faisait pendant le principe d'intégrité territoriale absolue (interdiction de causer un dommage, vieux principe de droit coutumier). Cette doctrine a de fait été abandonnée vers les années 1950 et n'est plus invoquée que dans les situations de surenchère diplomatique. Les États-Unis compriront que si cette doctrine leur était favorable pour le Rio grande et la Colorado River, elle jouait à leur détriment pour le Rio Conchos et la Columbia River.

Dès lors que l'on abandonne une partie de ces principes simplistes, on entre dans une logique de restriction acceptée « d'accord parties » à la souveraineté des États, dans l'esprit d'une ressource partagée. La partition de l'Inde et du Bangladesh donna lieu à un conflit concernant le barrage de Farakka<sup>110</sup> porté devant les Nations Unies en 1976. Émerge alors le principe d'un « usage raisonnable et équitable » amenant les États, aux termes de compromis négociés, à des « utilisations non dommageables de leur territoire ».

Bien que complexe à formuler concrètement, ce principe a servi de base à quelques décisions célèbres, comme la fonderie du Trail, puis la Cour internationale de Justice dans l'affaire du détroit de Corfou entre le Royaume-Uni et l'Albanie dès 1949, ou la sentence arbitrale franco-espagnole sur le lac Lanoux en 1957. Ce principe a ensuite été consacré au plan universel (principes 21 et 22 de la déclaration de Stockholm sur l'environnement de 1992), avec une prééminence marquée de l'équitable sur le raisonnable, traduisant une préoccupation dominante des enjeux économiques et commerciaux.

## 8.2.3. Les conflits liés à l'eau

L'eau est au cœur des conflits actuels, à la fois par la tension extrême des usages dans les zones où le développement économique et social est devenu totalement dépendant de ressources largement surexploitées, mais aussi par l'arme stratégique qu'elle constitue entre pays amont et aval. Le débat ne sera jamais clos (Lasserre, 2003 ; Bouquet, 2011) entre ceux qui considèrent

<sup>110</sup>. Situé en Inde à 18 km de la frontière avec le Bangladesh, ce barrage hydroélectrique détourne les eaux du Gange vers un des bras de son delta, le Bhâgirathi-Hooghly, qui passe à Calcutta. L'un des buts, dès l'origine du projet en 1951, était de permettre un meilleur curage des sédiments pour y favoriser la navigation. Il a été mis en service en 1975, juste avant la sécheresse de 1976 et dans un climat de tension ravivé par l'assassinat du père fondateur du Bangladesh, Sheikh Mujibur Rahman, le 15 août 1975. L'Inde continuait à fortement réduire les apports du Gange pour le Bangladesh. Elle a cependant clairement exclu de se fonder sur la doctrine Harmon. Un accord pour cinq ans a été conclu en 1977 (Abbas, 1984). Lors d'une période propice à la coopération, un traité a été signé en 1996, qui a connu un fort retentissement international et a été considéré comme un pas décisif dans la résolution pacifique des conflits internationaux de gestion de l'eau. Les difficultés ont cependant perduré (Pandey, 2012). Il est intéressant de se reporter au rapport récent sur la question des droits de l'homme concernant un cas où l'Inde est située en aval : la Mahakali-Sharda, affluent du Gange, a fait l'objet d'un traité en 1996 pour la réalisation à la frontière du Népal et de l'Inde du projet de Panchesswar, ouvrage à buts multiples, formé d'un complexe de deux barrages, essentiellement sur le territoire indien, dont la réalisation n'a pas encore commencé (Grönwall, 2020).

que l'eau est de ce fait un générateur de conflits et ceux qui, prônant la « diplomatie de l'eau » parfois appelée « hydrodiplomatie » (Académie de l'Eau, voir Oliver, 2018 ; *Institute for Multitrack Diplomacy*<sup>111</sup>), y voient un outil diplomatique efficace pour réguler les conflits et aplanir les litiges. D'un point de vue ou de l'autre, la réalité est la même : l'eau est au cœur des conflits, aussi bien en tant qu'arme redoutable (Sironneau, 1998), enjeu de sécurité nationale ou passage obligé du développement.

Le Moyen-Orient est sans doute le prototype de ces zones où l'hydrologue devient par la force des choses diplomate ou militaire, en tous cas proche du pouvoir. Le jardin du *paradeisos* de Darius I<sup>er</sup> (mot transcrit par Strabon du persan au grec), quadrillé de canaux d'eau autour d'un palais central placé au milieu de l'eau, traduisait symboliquement cette relation du pouvoir et de l'eau. À l'évidence, une gestion globale et une répartition négociée de cette ressource rare y sont indissociables de la résolution des conflits (Comair, 2018) : pas de paix sans répartition des eaux, mais pas de solution aux problèmes d'eau sans la paix. La paix y sera durablement établie le jour où une agence régionale de l'eau au Moyen-Orient réunissant des États souverains sera chargée de veiller en toutes circonstances à la bonne application d'un ensemble nécessairement complexe de traités équitables de fourniture et d'échange d'eau entre ces pays dont l'eau lie inéluctablement les destins. Le chemin est encore long pour y parvenir.

## 8.2.4. Développement des instances de coopération internationales en Afrique

Le rôle des grands fleuves est particulièrement essentiel en Afrique : en transférant des ressources en eau des zones à climat humide aux zones plus arides, ils atténuent les effets de ces forts contrastes climatiques.

Des pays comme le Niger, la Gambie, le Botswana, la Mauritanie, le Soudan, le Tchad ou l'Egypte ont une part prépondérante (dépassant 75 % et atteignant 98 %) de leurs ressources provenant d'autres pays grâce à ces fleuves. Des fleuves comme le Congo (Zaïre), le Nil, le Zambèze, le Niger, la Volta et des lacs comme le lac Tchad concernent chacun entre six et dix pays. La Gambie, le Sénégal, le Limpopo, le fleuve Orange, l'Okavango en concernent trois ou quatre chacun. Le grand aquifère du Sahara (« continental terminal ») est partagé par de nombreux pays.

La question de la gestion et du partage des eaux internationales est ainsi une clé essentielle de la stabilité du continent. Par ce lien physique, les politiques agricoles (irrigation, pêche) et énergétiques (hydroélectricité), de transport (navigation), voire touristiques (qualité des écosystèmes, réserves, zones humides) de nombreux pays sont interdépendantes, d'autant plus fortement que la ressource est rare et majoritairement importée.

Les institutions internationales de bassin prennent donc une dimension stratégique particulière. Que peut-on en attendre ? Guy Meublat interprète ces outils de coopération selon deux approches : en tant qu'outils de travail entre États « propriétaires » des ressources, mais aussi comme institutions créatrices d'une dynamique évolutive (Meublat, 2001). La question des dynamiques institutionnelles est également par elle-même, indépendamment de tout contexte international, un point crucial des politiques de développement (Vercueil, 2013 ; Le Coq, 2017).

<sup>111</sup>. Voir le site <https://www.imtd.org/>

Dans l'esprit de la « nouvelle économie des institutions » (Tocqueville, Coase, North) on considère en effet les États riverains comme des « propriétaires » de droits qui peuvent choisir de créer une structure d'ordre commun contribuant à gérer rationnellement les conflits liés à leurs intérêts propres. Le Lesotho obtient ainsi des *royalties* de l'Afrique du Sud pour la récupération d'une partie du débit du fleuve Orange. Ceci aboutit à un équilibre des stratégies individuelles qui peuvent être au final coopératives ou non-coopératives : le dilemme du prisonnier montre bien que la coopération n'est pas un résultat acquis de ce type de jeu. La stabilité du choix coopératif est extrêmement dépendante de la confiance et de la bonne réputation réciproque des acteurs.

Guy Meublat (Meublat, 2001) insiste sur le caractère « institutionnalisant » de l'institution elle-même : un processus de coopération a pour vertu principale de faire évoluer les comportements. Finalement, la coopération se renforce quand elle devient progressivement un système de valeur, voire une tradition commune (« *reinforcement loop* »<sup>112</sup>). Il distingue dans ce processus de renforcement trois niveaux d'engagement : la concertation, la coopération (le développement d'outils communs) et, cas plus rare, l'intégration. La **concertation** relève presque d'une logique diplomatique : il s'agit de trouver les voies des arrangements. La **coopération**, souvent avec un fort appui international, consiste à dépasser la question du partage plus ou moins équitable des ressources pour constituer ensemble des équipements permettant de « partager les bénéfices du développement ». Les grands aménagements hydrauliques, notamment les barrages hydro-électriques<sup>113</sup>, sont logiquement au cœur de ces dispositifs, finalement assez nombreux, car fondés sur une réelle et concrète communauté d'intérêts. L'**intégration**, enfin, traduit le choix collectif de renoncer à des attributs de souveraineté nationale au profit d'une entité plus légitime pour en assurer la responsabilité.

On est naturellement tenté de voir un enchaînement de progrès continu entre les trois étapes évoquées par G. Meublat, comme le propose l'Académie de l'eau (Roux, 2002). Le cas du fleuve Sénégal montre que l'histoire est en réalité faite d'une succession de phases de renforcement et d'affaiblissement qui traduisent bien le temps nécessaire à la maturation d'une construction institutionnelle post-coloniale.

#### VOIR ÉTUDE DE CAS N°12

##### Le fleuve Sénégal

Si l'Union européenne et la France en particulier s'engagent dans un appui décisif à ces structures, cela ne peut être que pour accompagner celles-ci dans les étapes qui se présentent maintenant comme autant d'opportunités de progrès à saisir et non pas en fonction d'un schéma prédéterminé des actions à y mener.

<sup>112</sup>. L'économie dite évolutionniste couvre des points de vue assez divers, qui ont tous en commun de s'intéresser à la dynamique des systèmes économiques, avec des concepts plus ou moins empruntés aux théories de l'évolution ou de l'écologie. Geoffrey Martin Hodgson a produit de nombreuses revues et analyses critiques de ces démarches et s'est intéressé notamment aux liens dynamiques entre l'économie et les institutions (Hodgson, 1989 ; Hodgson, 1998), notamment dans les mécanismes de renforcement conçus comme ce qu'on appelleraït dans les autres domaines des boucles de rétroaction positive.

<sup>113</sup>. Les localisations peu nombreuses des sites équipables, les économies d'échelle des équipements et la possibilité de transporter l'énergie électrique à longue distance l'expliquent.

## 8.3. Prévention des dommages liés aux inondations à l'échelle des bassins-versants

Du diagnostic rappelé au § 2.3 ressort le constat d'une inadaptation actuelle des politiques d'aménagement pour assurer la robustesse (capacité à traverser un événement sans dommages) et la résilience (capacité à retrouver un fonctionnement presque normal après un événement) des installations humaines au regard des risques d'inondation, cette inadéquation risquant de surcroît de se voir renforcée avec le changement climatique dans les régions où les aléas sont déjà les plus importants.

### 8.3.1. Assurer la robustesse et la résilience des installations humaines face aux inondations

Les actions à mener s'en déduisent naturellement. D'un côté, les travaux doivent être conçus dans la compréhension et le respect des dynamiques naturelles, au risque sinon de voir ceux-ci rapidement dégradés, obsolètes, ou entraînant des dommages considérables sur les écosystèmes. D'un autre côté, il s'agit de mener plusieurs types d'actions non structurelles :

- maîtrise de l'occupation des sols, en particulier dans les agglomérations à forte expansion démographique ;
- amélioration de la prévision hydrométéorologique permettant de gagner de précieuses heures dans la gestion de la crise ;
- adaptation des systèmes urbains pour en réduire la vulnérabilité (réseaux électriques, transports publics, télécommunication, eau potable et assainissement) en limitant les effets de château de carte ;
- préparation de l'organisation des secours.

Dans bien des cas, la reconstruction après une catastrophe est réalisée à la hâte et au mieux à l'identique. Quand ils existent, les mécanismes assurantiels encouragent ce travers (Roche, Perrin *et al.*, 2017). Les démarches dites « *build back better* » (reconstruire mieux)<sup>114</sup> qui tendent à se développer ont pour but de tenir compte de l'expérience et de ne pas recommencer les erreurs antérieures (Mannakkara, Wilkinson, Potangaroa, 2018). Ceci prend d'autant plus de sens quant à l'exposition directe aux risques : éviter de reconstruire en zone inondable ou concevoir des constructions mieux adaptées à supporter la submersion.

---

<sup>114</sup>. Cette notion a été employée officiellement par les Nations Unies pour la première fois dans le cadre d'action de Sendai. Elle a été formulée par le président Bill Clinton pour la reconstruction en Haïti après l'ouragan de 2008, puis par le secrétaire général des Nations Unies Ban Ki-Moon après le tremblement de terre de 2010. Cette notion a été largement étendue au-delà, notamment pour la reconstruction des bâtiments pour en réduire les émissions de gaz à effet de serre, ou la reconstruction économique après la crise de la COVID-19 par l'OCDE (OCDE, 2020), ou comme slogan de campagne du candidat Joe Biden à la présidence des États-Unis en 2020. Comme le relevait le Premier ministre du Japon à Sendai dans son discours d'ouverture, ce concept qui semble nouveau est en fait profondément ancré dans la culture japonaise.

### 8.3.2. Les engagements internationaux : le cadre d'action de Sendai

Peu avant l'approbation des ODD en juillet 2015, les États-membres des Nations Unies avaient déjà approuvé un cadre d'action spécifique afin de réduire les risques liés aux catastrophes (RRC) pour 2015-2030 dans une conférence tenue à Sendai au Japon en mars 2015. Le but est de diminuer :

- la mortalité due aux catastrophes ;
- le nombre de personnes touchées ;
- les pertes économiques et les dommages aux infrastructures essentielles.

Ce cadre d'action met en avant quatre priorités :

- comprendre les risques de catastrophe ;
- renforcer la gouvernance des risques de catastrophe pour mieux les gérer ;
- investir dans la réduction des risques de catastrophe pour renforcer la résilience ;
- améliorer la préparation pour une intervention efficace et pour « faire et reconstruire mieux ».

Les signataires s'y engagent notamment à augmenter :

- le nombre de stratégies de réduction des risques de catastrophe ;
- l'accès aux dispositifs d'alerte rapide multirisque et aux données et évaluations relatives aux risques de catastrophe ;
- la coopération internationale.

## 8.4. Aménagements et santé publique

La maîtrise pluridisciplinaire des projets de grands ouvrages est la première clé d'une conception durable des aménagements : l'entrée la plus évidente est celle de la santé publique. S'il est très difficile d'évaluer la soutenabilité d'une politique d'aménagement, il est en revanche plus facile de décrire des défauts de conception des projets générant des effets négatifs plus ou moins anticipés et d'en tirer des enseignements sur la conduite des projets. Constituer des plans d'eau (par l'aménagement des barrages) offre aux moustiques de nouveaux habitats, généralement sur les berges, et peut contribuer à la diffusion de maladies. Des ouvrages conçus pour apporter du développement et de la prospérité ont ainsi pu se révéler de redoutables foyers épidémiques. Mais ceci n'est pas une fatalité : une conception adaptée permet d'éviter ces effets négatifs.

Il existe environ 4 000 espèces de moustiques, subdivisées en trois sous-familles : les anophélidés, les culicidés, et les toxorhynchitiniés, ces derniers n'étant pas vecteurs de maladies humaines (contrairement à leur nom). Les maladies qu'ils véhiculent peuvent être classées selon que leurs agents sont des parasites (le plasmodium pour le paludisme ou un ver pour les filariose) ou des arbovirus (condensé de *ARthropod BOrne Virus*). Les fièvres à arbovirus (dengue, West Nile, Rift Valley, etc.) ont tendance à se répandre facilement, y compris dans les hautes latitudes (Italie, États-Unis). Certaines, comme la fièvre jaune et l'encéphalite japonaise, sont susceptibles de vaccination.

## 8.4.1. Le paludisme, un enjeu de santé publique considérable

Le paludisme demeure une des maladies les plus répandues dans le monde. On estime que la moitié de la population mondiale y est exposée. Selon l'OMS, qui publie un rapport annuel sur le paludisme (OMS, 2019), l'incidence et la mortalité diminuent. En effet, il y a eu 228 millions de cas de paludisme en 2018, contre 251 millions en 2010. L'incidence a ainsi diminué de 71 cas à 57 pour 1 000 habitants. Le nombre de pays rapportant moins de 100 cas de paludisme indigène est passé de dix-sept à 25. De plus, on estime à 405 000 le nombre de décès dus à la maladie (585 000 en 2010). Les statistiques des années 1990-2000 s'établissaient autour de 1 à 2 millions. Le groupe le plus exposé à la mortalité palustre est celui des enfants de moins de 5 ans avec 266 000 décès en 2017 (61 % de l'ensemble des décès par paludisme).

85 % des cas de paludisme et 94 % des décès dus à cette maladie sont survenus en Afrique subsaharienne. 80 % de la charge de morbidité due au paludisme pesaient sur une quinzaine de pays, tous situés en Afrique subsaharienne, sauf l'Inde. En 2017, près de la moitié des cas dans le monde ont été enregistrés dans cinq pays : le Nigéria (25 %), la République démocratique du Congo (11 %), le Mozambique (5 %), l'Inde (4 %) et l'Ouganda (4 %).

### VOIR FOCUS N°12

Le paludisme

## 8.4.2. Le lien des maladies à moustiques avec l'aménagement hydraulique

Les micro-habitats les plus favorables aux larves de moustiques sont aussi ceux des zones humides, asséchées jadis dans le monde occidental, aujourd'hui réhabilitées : les annexes hydrauliques peu profondes, bien pourvues en végétation.

En rendant plus humides certains habitats chauds, les grands aménagements hydrauliques ont souvent été accompagnés d'épidémies chez des populations non accoutumées. On peut citer une épidémie d'arbovirus West Nile lors de la création des aménagements de Diama et le paludisme devenu endémique dans la boucle du Niger. Après quelques catastrophes sanitaires liées à la construction des premiers barrages de la Mahaweli, au Sri Lanka, les dernières réalisations de ce programme furent exemplaires et permirent de tester des programmes d'écoulement, dans les réseaux d'irrigation, spécialement adaptés à la lutte contre les vecteurs. Les mesures qui doivent être prises, tant dans la conception, la réalisation ou l'accompagnement des barrages ou grands projets d'irrigation, en vue de minimiser les risques sanitaires sont au minimum de :

- repérer et analyser préalablement les sites potentiellement favorables au développement de dépôts de larve et éviter de les créer lors du modelage de la cuvette ;
- opérer la gestion des barrages-réservoirs pour assurer des fluctuations de niveau dans la retenue à une fréquence permettant de noyer les larves d'anophèles en cours de développement.

La participation des professionnels de santé, notamment d'épidémiologistes, est indispensable auprès des écologues lors du développement de nouveaux projets et pour leurs études d'impact. Ils auront à proposer des mesures adaptées, qui ne sont pas un additif qu'on vient appliquer après coup à la conception, mais bien une des données d'entrée de cette conception.

## 8.5. Aménager sans détruire : les solutions basées sur la nature

### 8.5.1. Les débats autour des grands ouvrages

Les barrages, si importants pour l'irrigation à grande échelle et la production hydroélectrique (voir Focus n°10 : L'inégalité énergétique mondiale concerne également la mobilisation des ressources hydroélectriques), ont fait à la fin du xx<sup>e</sup> siècle l'objet de fortes controverses. Les associations de protection de la nature se sont, les premières, levées pour dénoncer les dommages occasionnés par certains ouvrages et se sont lancées dans des campagnes non dénuées de succès, comme l'abandon en France du barrage de Serre-de-la-Farre sur la Loire.

Lorsque la Banque mondiale a commencé à retirer les grands ouvrages de ses dispositifs d'aide, des pays, notamment au sein des BRICS (Brésil, Inde et Chine notamment) mais aussi la Turquie, ont néanmoins poursuivi leur politique d'investissement. Dans les instances internationales, ces pays soulignaient que les soutiens des ONG environnementales dans l'opinion publique se limitaient à des pays européens et d'Amérique du Nord. Ils les accusaient de mener, avec la complicité de leurs gouvernements et de leurs financeurs privés, une stratégie néocolonialiste : priver les pays moins développés des outils dont les pays développés ne s'étaient pas privés et dont ils tiraient un avantage significatif en matière de compétitivité.

La Commission mondiale des barrages<sup>115</sup> a été constituée dans ce climat conflictuel pour tenter d'installer des approches plus constructives. Elle a décrit leur « contribution importante et significative au développement humain, mais souvent à des coûts sociaux et environnementaux injustifiés » (CMB, 2000), les parties lésées étant les populations déplacées, les populations aval, les contribuables et la nature. Elle a été l'occasion de travaux approfondis pour faire la synthèse de ces impacts (Berkamp *et al.*, 2000). Son rapport proposait une nouvelle approche d'évaluation des droits et des risques, qui n'a pas fait l'unanimité auprès des gouvernements. La logique du rapport se rapproche de ce qui, dans l'Union européenne, est institué sous la logique « éviter-réduire-compenser » (ERC)<sup>116</sup> et ses recommandations s'appuient largement sur la conception d'une GIRE à l'échelle des grands bassins internationaux.

Pour être aujourd'hui moins polémique, la question reste cependant entière : le degré d'équipement des sites diffère largement d'un continent à l'autre. 70 % d'entre eux sont en Europe, 3 % en Afrique. Par exemple le bassin du Congo recèle 20 % du potentiel hydroélectrique mondial : quel sera un jour le niveau d'équipement finalement choisi, qui le choisira et à qui bénéficiera la production ?

<sup>115</sup>. La « Commission mondiale des barrages » (CMB) ne doit pas être confondue avec la « Commission internationale des grands barrages » (CIGB) qui depuis 1928 réunit les professionnels du secteur (<https://www.icold-cigb.org/>). La CMB a été un groupe de travail piloté de 1998 à 2000 par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) qui a réuni de nombreuses parties prenantes, pour établir des recommandations qui ont été publiées dans un rapport collectif (CMB, 2000). Ce rapport a inspiré de nombreuses instances de dialogue.

<sup>116</sup>. Doctrine : voir CGDD, 2012. Lignes directrices : voir CGDD-DEB, 2013. Guide : voir CGDD-CEREMA, 2018.

## 8.5.2. Concevoir et gérer de grands ouvrages à buts multiples

Intégrer tous les enjeux et tous les usages pertinents dès la conception d'un grand barrage est-il possible ? L'idée d'un tel projet est généralement motivée initialement par le désir de produire de l'électricité, de développer un périmètre irrigué, de réduire l'exposition au risque d'inondation ou encore d'alimenter un canal.

Barrer un cours d'eau ou en dériver les eaux pour les stocker ne peut se faire sans effet. Un tel ouvrage est donc par nature « à enjeux multiples ». Si l'analyse des besoins et des options alternatives montre qu'un tel bouleversement des milieux est utile, l'idée naturelle est donc d'en faire un ouvrage « à buts multiples », conçu et géré pour répondre de façon équilibrée à tous ces enjeux : c'est l'esprit par exemple du programme SHARE (Branche, 2017).

Il y a des combinaisons d'usages qui sautent vite aux yeux. Remplir un barrage durant la saison des pluies peut être opéré pour contribuer à diminuer les débits de crue et, sous réserve d'une maîtrise de l'occupation des sols, à la réduction de la vulnérabilité aux inondations. Ce faisant, disposer d'un réservoir plein au début de la période d'étiage aide à faire face aux situations de faible débit par les lâches de débit, en permettant des prélèvements (agricoles, industriels) et le maintien d'activités de loisirs ou de navigation. Les étiages correspondent en général aux saisons sèches et chaudes, propices aux cultures et aux autres activités. Il est donc généralement de bon sens et d'intérêt commun de prendre l'eau quand il y en a beaucoup et de la relâcher quand il y en a peu.

En revanche, il y a besoin d'arbitrage et tout n'est pas commensurable. Le productible d'hydroélectricité suppose de disposer d'une hauteur de chute la plus élevée possible (il vaut donc mieux garder le réservoir plein), ou en tout cas l'optimum de rentabilité est de turbiner quand l'électricité a la plus grande valeur, ce qui n'a aucune raison de correspondre aux autres besoins. Tous les usages ne produisent pas la même valeur ajoutée et ne sont pas substituables : voir la discussion sur les marchés de l'eau (*voir § 7.7*).

Il s'agit aussi de concilier des dimensions qui ne sont pas nécessairement descriptibles économiquement dans les mêmes termes : les outils de conservation de la nature, illustrés par la séquence ERC, sont des critères de décisions de type « *min-max regret* » (éviter des dommages jugés très graves) alors que les approches socio-économiques ou analyses coût-bénéfices (ACB ; *cost benefit analysis* ou CBA) sont plutôt dominées par un objectif d'optimisation d'une espérance de gains collectifs. Se prémunir du risque et optimiser une moyenne, ce sont deux objectifs bien différents. La séquence ERC vise à minimiser les atteintes potentielles à des systèmes complexes et procèdent d'une approche pragmatique de la minimisation des risques en avenir incertain : les mesures de compensation, quelles que soient la bonne volonté et la compétence des maîtres d'ouvrages, ont des effets bénéfiques plus incertains que les bénéfices, eux bien connus, des écosystèmes existants.<sup>117</sup>

Pour corser le tout, les apports en eau sont des processus aléatoires, stochastiques. De plus, ils ne peuvent pas être considérés comme stationnaires sur les longues périodes où des grands ouvrages structurants doivent être opérés.

<sup>117</sup>. La doctrine référencée rappelle : « Les atteintes aux enjeux majeurs doivent être, en premier lieu, évitées. L'évitement est la seule solution qui permet de s'assurer de la non dégradation du milieu par le projet. ».

On trouvera dans Roche, Miquel, Gaume, 2012 les développements méthodologiques nécessaires pour produire des outils d'aide à la décision (plutôt que d'optimisation, compte-tenu du caractère multi-critère des analyses) adaptés tant à la conception des grands réservoirs qu'à leur gestion en temps réel (là où se font les vrais arbitrages d'usage).

### 8.5.3. Les solutions fondées sur la nature : une nouvelle ingénierie moins ignorante

S'est construite depuis une vingtaine d'années une ingénierie fondée sur le progrès des connaissances du fonctionnement des écosystèmes (« ingénierie écologique » ou « génie écologique »), selon des principes généraux établis par l'IUCN, que l'on qualifie généralement de « solutions fondées sur la nature » (*nature-based solutions*).

Abandonner la vision purement physique de l'hydraulicien qui a longtemps prévalu pour une vision pluridisciplinaire qui s'intéresse à toutes les dimensions des milieux concernés n'en reste pas moins une démarche d'ingénieur. Embrasser toutes les dimensions des hydro-systèmes (naturels et humains) conduit rapidement à l'idée de gérer l'eau « par et pour la nature » et non « contre la nature ». Ces démarches sont établies sur la compréhension et l'observation de terrain des écosystèmes, de leur dynamique, de leurs cycles adaptatifs, de leurs emboîtements d'échelle, de leur sensibilité, de leur résilience et de leurs fonctionnalités (voir § 13.2).

Cette ingénierie du xxie siècle permet de constituer des conditions plus satisfaisantes de leurs dynamiques évolutives en interaction avec les activités humaines. Une meilleure santé de ces écosystèmes leur permet de rendre de meilleurs services. Les pratiques respectueuses de leur fonctionnement, tout comme l'intervention à la source pour les protéger, se sont également révélées moins coûteuses, tant en investissement qu'en entretien. C'est donc tout l'intérêt des maîtres d'ouvrages que de consacrer les moyens nécessaires à acquérir et entretenir les connaissances et les observations approfondies qui rendent ces interventions plus intelligentes<sup>118</sup>.

*Chapitre suivant : Deux clés de succès intimement liées : financer de façon appropriée et améliorer la gouvernance*

---

<sup>118</sup>. Voir notamment les deux ouvrages collectifs publiés pour promouvoir cette pratique par l'ASTEE, association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement : ASTEE, 2013 ; ASTEE, 2018.



# Pour approfondir

## ÉTUDES DE CAS

N° 12

Le fleuve Sénégal

## FOCUS

N° 12

Le paludisme

## N°12 | Le fleuve Sénégal

Le bassin du Sénégal ( $289\ 000\ km^2$ ) est habité par 4,5 millions d'habitants. Le fleuve est essentiellement alimenté par le massif du Fouta-Djalon (2 200 mm/an de pluie aux sources du Bafing, contre 80 mm/an sur la côte). Ses eaux sont partagées par quatre États.

Son régime est très irrégulier (écoulement de 6 à 40 milliards de  $m^3/\text{an}$  selon les années) et ses écoulements sont concentrés en un à trois mois de saison des pluies (débits moyens mensuels

de  $3\ 500\ m^3/\text{s}$  en septembre et de  $10\ m^3/\text{s}$  en mai). Le débit moyen annuel à Bakel est passé de  $1\ 374\ m^3/\text{s}$  dans la période 1903-1950 à  $597\ m^3/\text{s}$  dans la période 1951-2002 ( $840\ m^3/\text{s}$  dans la période 1950-1972 et  $419\ m^3/\text{s}$  pour la période 1973-2002) avec comme corollaire la remontée saline jusqu'à 200 km en amont de Saint-Louis entraînant un problème de disponibilité de l'eau douce.

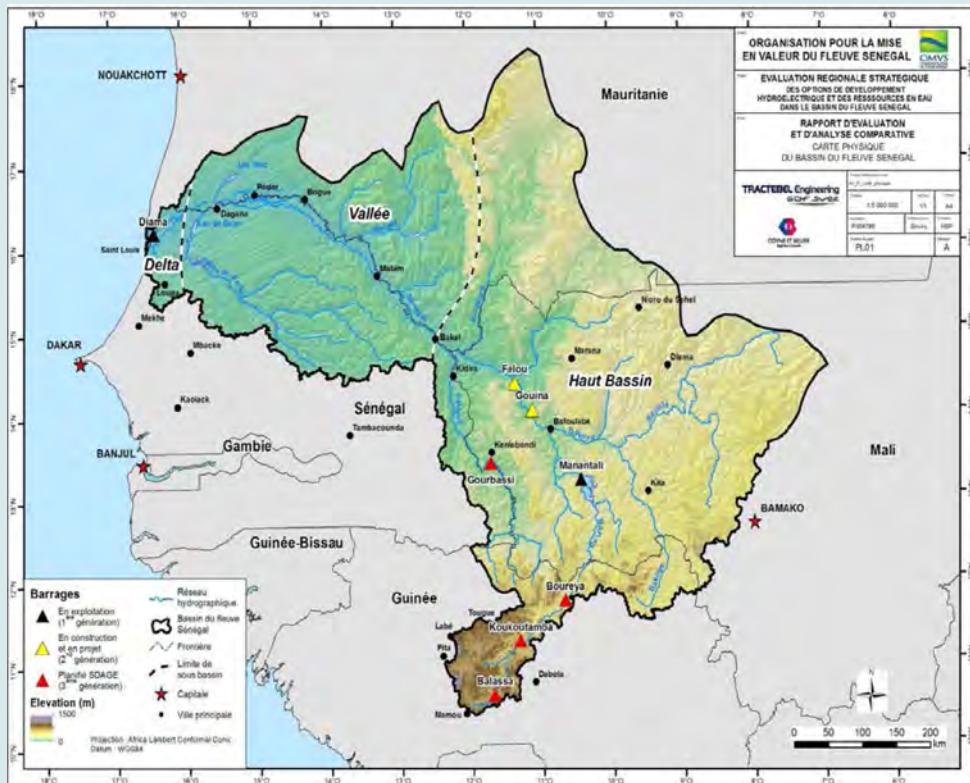


Figure 75 : Le bassin du Sénégal. Tirée de Ndiaye, 2017 ; OMVS.

Les crues annuelles permettent la mise en culture traditionnelle (culture de wallos) de 10 000 ha à 60 000 ha, assurant l'alimentation de 60 000 à 360 000 personnes environ. La population du bassin est aujourd'hui de 2,5 millions d'habitants.

Ces quatre pays sont consommateurs de 1,2 millions de t/an de riz et importent plus de la moitié de leurs besoins.

## 1. De l'OERS à l'OMVS

L'OERS (Organisation des États riverains du Sénégal) est née en 1968 d'une volonté d'intégration politique panafricaine forte, mais s'est immédiatement heurtée à un conflit d'intérêts important sur les eaux du Sénégal entre la Guinée et les autres États riverains, ainsi qu'aux rivalités entre Ahmed Sékou Touré et Léopold Sédar Senghor. La Guinée pratiquant la politique de la chaise vide, les trois autres pays ont mis en place en 1972 un haut-commissariat et l'OMVS (Office de mise en valeur du fleuve Sénégal). Depuis lors, le partage est négocié en fonction des disponibilités hydriques. Une règle de répartition des charges en fonction des bénéfices attendus a été établie en 1978 et amendée en 1986.

Les barrages de Manantali (sur le Bafing au Mali, ayant un volume de 11,5 milliards de m<sup>3</sup>) et de Diama – porte sur la mer à l'amont de Saint-Louis dans le delta, pour permettre l'irrigation et éviter la remontée du biseau salé, avec des effets majeurs et prévisibles sur la mangrove – prévus dans un schéma directeur de 1974, sont commencés en 1981-1982, achevés en 1986 et 1988 et opérationnels depuis 1990.

L'OMVS, endettée auprès des bailleurs de fonds sur 45 ans avec neuf ans de différé, devait assurer son équilibre par l'énergie hydroélectrique, le temps que les périmètres irrigués se développent, dans une gestion particulièrement fine : tant que les périmètres irrigués ne se développaient pas, l'agriculture restait dépendante de la submersion en période de crue. De 10 000 t/an de paddy sur 10 000 ha en 1974, la production passe au Sénégal (sur la rive gauche du fleuve) à 75 000 t/an en 1985 sur 16 000 ha irrigués. Mais le coût est élevé (5 700 \$/ha en 1980) car l'eau doit être pompée.

Le programme, représentant un quart du PIB des trois États impliqués, ne peut vivre qu'avec les aides des bailleurs de fonds. La Banque mondiale, particulièrement sollicitée sur l'équipement hydroélectrique, émet de nombreuses critiques. La controverse sur les impacts écologiques du projet se développe, sous trame de privatisation générale, rendant suspecte la gestion publique des deux opérateurs hydro-agricoles mis en place, la SAED et la SONADER. Dans le même temps, alors que les barrages sont construits, mais non équipés pour l'hydroélectricité, les États-Unis proposent des centrales thermiques au Sénégal et à la Mauritanie.

Fin 1995, au vu des expertises environnementales, mais aussi pour conserver et sécuriser la culture de décrue du sorgho importante pour toute la zone, l'OMVS ramène son objectif de régularisation des débits de 300 à 100 m<sup>3</sup>/s. La production agricole a entre-temps connu des fortunes diverses. Atteignant 180 000 t/an en 1991 en rive sénégalaise, elle connaît une grave crise financière liée à la libéralisation des importations de brisures de riz et à la faillite du crédit agricole sénégalais. En 1994, sur la pression des bailleurs, les opérateurs déposent le bilan et la production chute à 70 000 t/an.

## 2. La charnière des années 2000

En 1995, le gouvernement sénégalais remet au goût du jour un ancien projet de revitalisation des vallées fossiles du Sahel sénégalais. La diversion de cette eau est en contradiction totale avec les objectifs de riziculture du delta. Les bailleurs s'y opposent. Cette confrontation relance les études et l'IRD est chargé de rechercher une optimisation de la gestion des ouvrages, en maintenant le principe d'une crue permettant la culture de décrue des wallos (60 000 ha), l'alimentation de 50 000 ha de cuvettes par une crue artificielle, au détriment du turbinage (productible ramené à 690 MWh) et de l'irrigation (Lamagat, Bader, 2003).

Le PASIE, programme d'atténuation et de suivi des impacts sur l'environnement, voit le jour en même temps que les sociétés d'exploitation, créées dans une logique de délégation de service public transparente (SOGED et SOGEM). Une fois le programme énergétique lancé, la production commence, alimentant la rentabilité du projet, avec plus de dix ans de retard.

Les grands bailleurs de la vallée du Sénégal affichent au début du xxie siècle leur déception face au maigre développement constaté et à l'absence de rentabilité de la riziculture irriguée développée à grand frais. De fait, à peine la moitié des quelques 130 000 ha aménagés sont alors mis en valeur en riz au moins une fois par an, bien loin des hypothèses de rentabilisation qui étaient fondées sur la riziculture de 375 000 ha exploités en moyenne 1,6 fois par an. Pourtant, la vallée ne produisait en moyenne annuelle pas plus de 40 000 t de céréales (décrue) avant la réalisation des ouvrages de l'OMVS et pas moins de 350 000 t/an après, auxquelles s'ajoutaient le maraîchage, les fourrages pastoraux, les cultures

industrielles (comme le sucre ou les tomates) et le bois d'œuvre, qui n'intéressent pas les mêmes financeurs.

En termes de sécurité alimentaire, les trois pays de l'OMVS demeuraient ainsi en 2000 largement importateurs de céréales vivrières (600 000 t de riz importé sur une consommation annuelle de 1,2 Mt) et dépendants de l'aide alimentaire. Avec la grave sécheresse des années 2001-2002, cette situation a empiré et a rendu l'outil de production de la vallée encore plus stratégique : sur la base

des productions de l'an 2000, c'est 1,9 million d'habitants de la vallée qui auraient grossi les rangs des quelques 500 000 mal nourris de l'époque de la Mauritanie et du Sénégal, si l'investissement hydroagricole n'avait pas été réalisé.

### 3. L'OMVS en 2020

En avril 2006, la Guinée a rejoint l'OMVS, qui réunit donc désormais les quatre États concernés. L'OMVS a conduit de nombreux projets.



Figure 76 : Projets structurants de l'OMVS. Tirée de Ndiaye, 2017 ; OMVS, DEDD, 2014.

#### 3.1. Production hydroélectrique et électrification rurale

L'OMVS a aujourd'hui à son actif deux grands ouvrages hydroélectriques :

- le complexe de Manantali (le barrage et sa centrale) situé sur le Bafing. Avec une puissance installée de 200 MW, il produit en moyenne 800 GWh/an qui sont livrés aux sociétés nationales d'électricité du Mali (52 %), de la Mauritanie (15 %) et du Sénégal (33 %) ;
- l'aménagement de Félo (2013), qui produit en moyenne 60 MW injectés dans le réseau de Manantali.

La production d'énergie est acheminée vers les États par le Réseau de transport interconnecté de Manantali (RIMA), long de 1 700 km. À ce jour, la puissance totale installée du RIMA est de 260 MW.

La Société de gestion de l'énergie de Manantali (SOGEM), créée en janvier 1997 par les États membres, est chargée de l'exploitation, de l'entretien et du renouvellement de Manantali et des ouvrages communs, dont la gestion lui est confiée. Pour permettre également aux plus démunis de bénéficier des retombées des barrages, l'OMVS exécute depuis 2004 un important programme d'électrification rurale en faveur notamment des localités situées le long des lignes à haute tension.

Avec l'aménagement de Félo, l'OMVS a engagé la réalisation des ouvrages hydroélectriques dits de seconde génération. À l'achèvement de ces

projets de barrages, le système énergétique de l'OMVS devrait atteindre une puissance installée d'environ 2 000 MW. À titre indicatif, la consommation annuelle du Sénégal est de 3 000 GWh.

Elle conduit ainsi deux nouveaux projets. Le premier est le projet de Koukoutamba, en territoire guinéen sur le Bafing, principal affluent du fleuve Sénégal, à environ 570 km au nord-est de la capitale Conakry. Il se compose principalement du barrage, de lignes à haute tension de transport d'énergie et d'une route d'accès de 150 km. D'un coût estimé de 812 M\$, il a fait l'objet en 2019 d'un contrat « clé en main », dit EPCF<sup>119</sup> (*Engineering, Procurement, Construction, Financing*) avec l'entreprise chinoise Sinohydro. Le deuxième projet phare concerne le barrage de Gourbassi, un ouvrage à buts multiples d'une puissance installée de 18 MW, qui permettra notamment de contrôler les eaux de cet affluent majeur du fleuve Sénégal, en fournissant un débit optimum garanti de 500 m<sup>3</sup>/s à Bakel, station de référence. Il sera édifié sur la Falémé, à la frontière sénégalo-malienne. Il a également fait l'objet d'un contrat EPCF en 2020 de 275 M\$ avec l'entreprise chinoise *China Machinery Engineering Corporation* (CMEC). Par ailleurs, une trentaine de sites ont été identifiés en Guinée pour l'édition de micro-centrales dédiées à l'électrification rurale.

### **3.2. Le Plan directeur de Développement du Réseau de transport d'énergie**

L'OMVS s'est doté d'un Schéma directeur de développement du réseau de transport électrique pour répondre à l'évolution prévisible de la production, du transport, des échanges et de la consommation de l'électricité à moyen et long terme. Il s'agit de planifier le développement gradué du réseau actuel en prévoyant :

- l'évacuation de la production des futures centrales hydroélectriques de l'OMVS ;
- l'intégration des projets nationaux et régionaux de développement énergétique des pays membres ;
- l'interconnexion du réseau de transport OMVS aux réseaux nationaux et régionaux, comme celui de l'OMVG (Organisation pour la mise en valeur du fleuve Gambie).

### **3.3. Le PGIRE**

L'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS) a pour mandat de sécuriser les économies des États riverains du fleuve Sénégal et d'atténuer la vulnérabilité des conditions de vie des populations par la mise en valeur des ressources hydrauliques et énergétiques. À cet effet, elle a conçu un important projet intitulé « Projet de gestion intégré des ressources en eau et de développement des usages multiples du bassin du fleuve Sénégal (PGIRE) ».

Il s'agit d'un programme de développement multisectoriel formulé pour renforcer l'intégration régionale des quatre pays riverains et améliorer les conditions de vie des populations. La première phase (PGIRE I) du programme s'est déroulée de 2007 à 2013 et la seconde phase (PGIRE II) concerne la période 2014-2021, soutenue par don du royaume des Pays-Bas (Trust Fund III), partie intégrante du projet.

La mise en œuvre de la première phase du PGIRE a abouti à des réalisations prépondérantes dans les secteurs de l'agriculture, de la pêche et de la lutte contre les maladies hydrauliques dans les zones d'intervention du projet. Parmi ces réalisations, on peut citer quatre évolutions majeures.

Tout d'abord, il y a eu un développement de la petite hydraulique et des activités connexes par :

- la protection de 2015 de berges avec des ouvrages sociaux (10 abreuvoirs, 12 passerelles et 12 lavoirs) dans les préfectures de Mamou et de Labé en Guinée ;
- l'aménagement de 227 ha de bas-fonds et la réalisation de 557 forages dans les zones de Mamou et Labé en Guinée ;
- la réhabilitation de 500 ha de périmètres irrigués villageois (PIV) dans les cercles de Kayes et de Bafoulabé au Mali ;
- l'aménagement de 1 500 ha de bas-fonds et de 50 ha de petits périmètres maraîchers (PPM) dans les cercles de Kayes et de Bafoulabé au Mali ;
- la construction des ouvrages de Niakhakh, Babroun et Chechiya en Mauritanie ;
- le curage du marigot de Laouejia au Trarza en Mauritanie ;

<sup>119</sup>. Avec le mode EPCF, l'entreprise s'engage à participer dans le processus de mobilisation du financement du projet, tout en assurant les services d'ingénierie, d'approvisionnement et de direction du chantier.

- la réhabilitation du périmètre pilote du Gor-gol (700 ha), du périmètre irrigué de Bellara (250 ha) et des PIV du Trarza (220 ha) en Mauritanie ;
- la réalisation du canal de Krankaye ; l'endiguement et le curage du Gorom aval dans le département de Dagana au Sénégal ;
- la réhabilitation de 700 ha de périmètres irrigués de Hamady Ounaré et Orkadiéré dans le département de Matam au Sénégal.

La pêche traditionnelle a également été améliorée par :

- la formation de 1200 acteurs de la pêche dans la zone d'intervention du projet (Mali, Mauritanie, Sénégal) ;
- l'acquisition de matériel de pêche (pirogues, filets, caisses isothermes, flotteurs, etc.) ;
- la réalisation d'infrastructures de pêche (berges sommaires, aires de transformation de poissons et ouvrage de régulation des eaux de crue) à Matam au Sénégal ;

- l'aménagement d'un débarcadère et la construction d'un centre artisanal de développement de la pêche au Trarza en Mauritanie ;
- la construction de trois marchés à poisson et d'un débarcadère dans les cercles de Kayes et Bafoulabé au Mali.

De plus, la lutte contre les maladies hydriques a été intensifiée par la distribution de plus de 3 millions de moustiquaires imprégnées à longue durée d'application (MILDA) permettant la couverture de 85 % des ménages de la zone d'intervention en Mauritanie, 90 % au Sénégal, 96 % au Mali, 95 % en Guinée. Par ailleurs, a été organisé un traitement de masse de 80 % d'enfants d'âge scolaire et de 70 % d'adultes à risque contre la bilharziose et les géohelminthiases : plus de 7 millions de comprimés de Praziquantel (PZQ) et 2,1 millions d'Albendazole (ALB).

En matière d'irrigation, les terres réellement irriguées restent en-deçà du potentiel permis par les projets.

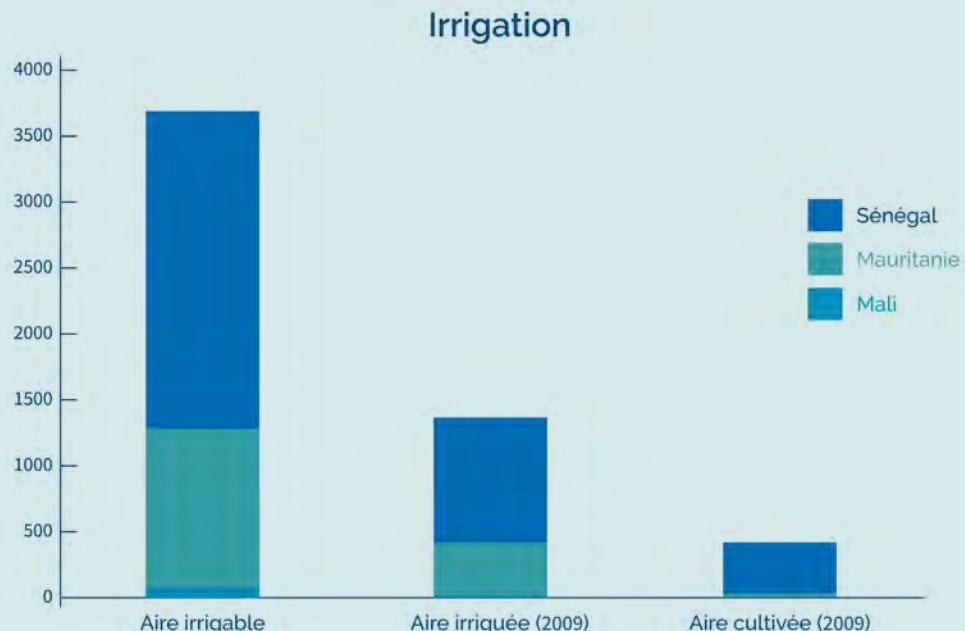


Figure 77 : Les surfaces irriguées et cultivées en 2009 dans le bassin du Sénégal.

Auteur : OMVS, CC BY-SA 3.0 (source : Wikimedia Commons).

La seconde phase du PGIRE (PGIRE II) se déroule de juillet 2014 à juin 2021, pour un coût total de 240,5 M\$. Il vise simultanément à accroître les usages productifs de l'eau et à permettre la croissance macro-économique, tout en sauvegardant la santé et les moyens de subsistance des communautés vulnérables dans le bassin du fleuve. Les objectifs sont de deux ordres :

- le développement : en appuyant le développement des usages de l'eau dans le bassin du fleuve Sénégal de manière concertée entre les pays membres de l'OMVS ;
- l'environnement : en renforçant les capacités de l'OMVS à prendre en compte le changement climatique dans le développement et la gestion concertés des ressources en eau dans le bassin du fleuve Sénégal.

Outre les mesures concernant l'ensemble de la population, sont plus particulièrement concernés 56 200 petits exploitants agricoles et agriculteurs pratiquant une agriculture de subsistance et 12 000 personnes travaillant dans la pêche artisanale, soit dans la capture de poisson, la transformation ou la vente, dont 58 % sont des femmes, ainsi que 5 000 bénéficiaires du projet et les membres d'association d'usagers de l'eau soutenus pour accroître leur résilience au climat à travers des projets pilotes.

#### 4. Le SITRAM

En 2003 est établi un Cadre d'orientation stratégique, dans lequel le développement du transport axé sur la navigabilité du fleuve était reconnu comme un objectif prioritaire. Le Système intégré de transport multimodal (SITRAM) a pour objet la réalisation d'infrastructures fluviales et routières devant être exploitées de manière coordonnée et complémentaire, pour assurer l'acheminement et l'évacuation des trafics (marchandises et passagers) du bassin du fleuve Sénégal, dans les meilleures conditions de sécurité et de coût. Sa réalisation est confiée à la Société de gestion et d'exploitation de la navigation sur le fleuve Sénégal (SOGENAV).

#### REVENIR AU COURS

##### § 8.2.4

Le volet navigation du SITRAM vise à restaurer le transport sur le fleuve Sénégal, florissant au début du xx<sup>e</sup> siècle, mais quasiment interrompu depuis les années 1970, notamment en raison de l'absence totale d'investissements pour soutenir la concurrence face aux modes de transport alternatifs (routes, chemin de fer, etc.). Le volet routier regroupe des projets destinés à assurer les meilleures conditions d'accès aux ouvrages existants et aux sites d'ouvrages projetés dans le bassin du fleuve Sénégal, tout en désenclavant les zones desservies. L'adoption des éléments du cadre réglementaire de la navigation sur le fleuve, à savoir du Code international de la navigation et des transports sur le fleuve Sénégal et ses Règlements d'application type, date de 2011.

#### Conclusion

Ayant connu et surmonté cette histoire complexe<sup>120</sup>, l'OMVS aborde désormais une phase de maturité que beaucoup d'autres institutions peuvent lui envier : une histoire commune est maintenant construite, sur laquelle l'avenir peut être bâti. L'OMVS assure désormais ses fonctions de gestion intégrée du fleuve, dans une dynamique forte avec les ONG et de nouveaux principes de gouvernance.

<sup>120</sup>. Les intentions initiales d'aboutir à une politique intégrée ont dû se replier vers une coopération forte, qui a parfois temporairement cédé le pas à une coopération plus faible. Les objectifs ont été rediscutés, remis en cause, réévalués ; de nouveaux compromis sont apparus.

N°12

# Le paludisme

Cette annexe est largement inspirée d'un article de Wikipedia<sup>121</sup>.

## 1. Le paludisme, une longue histoire

Le paludisme est une maladie parasitaire qui sévissait déjà avant l'apparition de l'homme. Ces très anciens parasites d'origine africaine auraient co-évolué depuis plusieurs milliers d'années avec les anthropoides africains, puis avec les hommes. En Égypte, en 1600 avant J.-C., sont décrites sur des papyrus l'association des frissons-fièvre à la splénomégalie (augmentation de la taille de la rate), ainsi que les mesures à prendre pour éviter d'entrer dans les maisons de « vapeurs provoquant des fièvres », mais aussi la concordance entre les crues du Nil et l'apparition des fièvres intermittentes. Au IV<sup>e</sup> siècle avant J.-C., Hippocrate a réalisé ses premières descriptions cliniques des fièvres palustres avec la triade classique « frissons-sueur-fièvre » selon des séquences quotidiennes, tierces ou quartes. Au II<sup>e</sup> siècle avant J.-C., les Grecs et les Romains ont révélé une corrélation étiologique entre les fièvres intermittentes et la proximité de marécages. Le terme italien de « *mal aria* » traduit bien la liaison faite par les Italiens entre les fièvres et les miasmes véhiculés dans l'air.

En 1717, Lancisi suggère que le paludisme est dû à un poison des marais transmis par les moustiques qui inoculent « les mauvaises humeurs dans le sang ». À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le médecin militaire Alphonse Laveran fut le premier à démontrer la nature *parasitaire* de l'affection en détectant « des éléments pigmentés dans les globules rouges des malades atteints de fièvres palustres, qui se présentent sous formes de croissant, de sphères, de flagelles » et l'appellera *Oscillaria malariae* (1881). En Italie, des travaux conduits entre 1885 et 1892 sur *Plasmodium vivax*, *Plasmodium malariae* et *Plasmodium falciparum* confirment l'origine parasitaire et l'identité spécifique des parasites. Le terme francophone de paludisme, introduit par Laveran (1893), traduit la liaison fièvres-marais (« *palud* » voulant dire « marais »).

Aux États-Unis, Mac Callum (1898) montre l'origine des formes sexuées et sanguines chez le *Plasmodium falciparum* avec la formation de microgamètes, puis examine la fécondation donnant un « ookinète ». Entre 1895 et 1898, Ross (prix Nobel de médecine de 1907) montre que le paludisme peut être transmis par les moustiques. Après de nombreuses dissections d'anophèles, il observe que, vers le 7<sup>e</sup> ou le 8<sup>e</sup> jour, des capsules éclatent et libèrent de nombreux bâtonnets qui se concentrent dans les glandes salivaires.

## 2. Le cycle du paludisme implique les eaux stagnantes

Les parasites du paludisme pénètrent dans l'organisme lors de la piqûre par une anophèle femelle infectée, sous la forme de sporozoïtes. Ils envahissent le foie par voie sanguine et s'y multiplient. Au bout d'environ neuf jours, selon l'espèce en cause, les parasites, qui se trouvent sous une forme appelée merozoïte, pénètrent dans le sang, envahissent les globules rouges (hématoïdes) et s'y multiplient à nouveau. Puis ils se libèrent en faisant éclater les hématoïdes.

L'évolution de tous les *Plasmodium* devient rapidement synchrone, si bien que tous les globules rouges parasités éclatent en même temps et libèrent à la fois les parasites et l'hémozoïne qu'ils contenaient.

Ce cycle sanguin explique la périodicité des accès de paludisme. Il se reproduit en effet régulièrement, toutes les 48 heures pour le *Plasmodium falciparum* (fièvre tierce maligne), pour le *Plasmodium vivax* et pour le *Plasmodium ovale* (fièvres tierces bénignes) et toutes les 72 heures pour le *Plasmodium malariae* (fièvre quarte). La destruction de ces cellules provoque une anémie et, dans le cas du paludisme cérébral, la mort intervient à la suite d'une obstruction des vaisseaux sanguins du cerveau par les globules rouges infectées.

Quelques jours après l'apparition de nouveaux symptômes, certains merozoïtes se transforment en gamétocytes, qui constituent le stade sexué du cycle de développement. Lorsqu'un anophèle pique

<sup>121</sup> WIKIPÉDIA. *Paludisme*. Mis à jour le 23 décembre 2020. Disponible sur <https://fr.wikipedia.org/wiki/Paludisme>.

une personne dont le sang contient des gamétozytes, il s'infecte à son tour et les parasites passent à une autre phase de leur développement dans l'organisme de l'insecte.

À la fin de ce processus, une nouvelle génération de sporozoïtes migre vers les glandes salivaires du moustique, où elle demeure jusqu'à ce que l'insecte pique de nouveau quelqu'un et inocule avec sa salive les sporozoïtes à un nouvel hôte humain. Un nouveau cycle commence alors (figure 78).

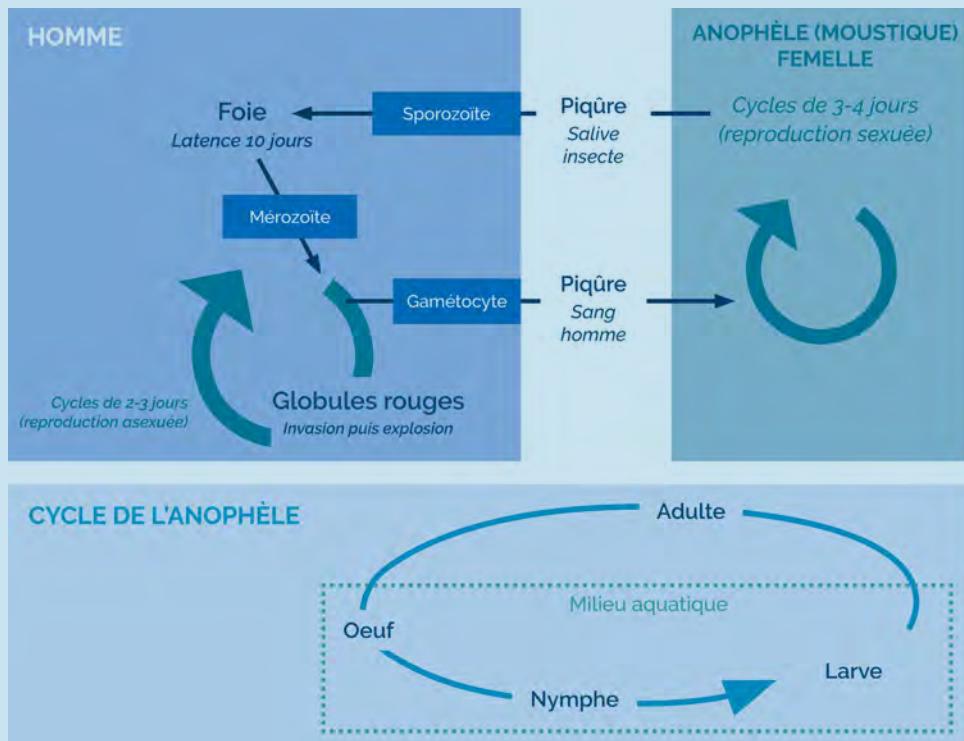


Figure 78 : Cycles de l'anophèle et du plasmodium. D'après un schéma d'Évelyne Lyons.

### 3. Moyens de lutte contre les maladies à moustiques

Pour qu'il y ait endémisme de la maladie, la combinaison de trois facteurs est nécessaire :

- la présence de vecteurs ;
- une contamination de ceux-ci par des agents infectieux compatibles (ainsi, les moustiques anophèles sont fréquents en Camargue, mais leur compatibilité avec les parasites les plus infectieux n'est pas établie) ;
- le contact entre les vecteurs et les humains.

Une température plus chaude est un facteur aggravant, en accélérant les cycles de développement des parasites.

Les diverses formes de lutte contre ces maladies sont complémentaires. La première consiste à éviter les contacts entre les humains et les vecteurs. En effet, le rayon d'action d'un moustique est de l'ordre de 2,5 km. Heureusement pour les humains, les anophèles, sensibles à la pollution, ne se plaisent guère en ville. Dès le xvi<sup>e</sup> siècle, des règlements interdisent les rizières à moins d'une lieue de Novare ou de Milan. En revanche, certains arbovirus colonisent des insectes urbains, dont les larves risquent de se développer, notamment dans les citernes de toits. À proximité des plans d'eau, il peut être bénéfique

de réglementer les zones d'habitation, de lavage ou de baignade. En zone à risque, les moustiquaires et sprays répulsifs sont de rigueur. Par ailleurs, il est également recommandé d'organiser une veille sur l'évolution des peuplements à risques, autant les moustiques que leurs hôtes, de manière à appliquer la lutte chimique de façon ciblée. Ce type d'approche a été développé avec succès en Malaisie.

La deuxième stratégie consiste à éliminer les vecteurs. La lutte chimique (en prenant en compte les limites énoncées ci-dessus) est la plus efficace lorsqu'elle s'attaque aux insectes au stade larvaire.

Enfin, la dernière solution consiste à développer la lutte environnementale en supprimant les habitats préférentiels, notamment en évitant les eaux stagnantes de faible profondeur, ou si elles sont indispensables (c'est le cas des rizières), les maintenir en deçà du temps de maturation des larves (une dizaine de jours). Il est également possible de favoriser la préation (en eaux plus profondes : lutte biologique).

#### 4. Traitement et vaccination

Le coût direct de traitement d'un cas est en moyenne du même ordre de grandeur que le budget de la santé *per capita* de nombre de pays africains. Le paludisme est ainsi reconnu comme un facteur limitant majeur du développement social et économique des zones où il est implanté.

Cette maladie est difficile à traiter du fait que les souches de *P. falciparum* (forme la plus dangereuse) résistantes aux anti-paludéens classiques, se sont répandues et que les produits de substitution sont à la fois coûteux et toxiques. En outre, la démoustication des habitations par pulvérisations est de plus en plus difficile, car de nombreuses espèces d'anophèles sont devenues résistantes aux insecticides. Enfin, nombre de programmes de lutte antipaludéens connaissent des problèmes d'ordre financier et opérationnel.

Les progrès récents de la recherche (séquençage des génomes du parasite et de son porteur d'une part et création d'anophèles ne permettant pas le développement du parasite d'autre part) laissent entrevoir de nouveaux espoirs. Le RTS,S/AS01 (RTS,S) est le premier – et jusqu'ici le seul – vaccin conférant une protection partielle au jeune enfant. Il est actif contre *P. falciparum*, le parasite du paludisme le plus meurtrier au niveau mondial, qui est aussi le plus courant en Afrique. Son utilisation lors d'essais cliniques à grande échelle chez des enfants avec l'administration de quatre doses a permis d'éviter environ quatre cas sur dix sur une période de quatre ans. En raison de l'intérêt potentiel du vaccin du point de vue de la santé publique, les principaux organes consultatifs de l'OMS chargés du paludisme et de la vaccination ont ensemble recommandé son introduction progressive dans des zones déterminées en Afrique subsaharienne. Il a été introduit en 2019 dans trois pays pilotes : le Ghana, le Kenya et le Malawi.

**REVENIR AU COURS**

§ 8.4.1

# Chapitre 9 | Deux clés de succès intimement liées

Financer de façon appropriée et améliorer la gouvernance

## À RETENIR

36

**La mise en œuvre de méthodes de financement appropriées aux enjeux spécifiques de l'eau, notamment pour les plus démunis, est la première clé indispensable de succès.** S'appuyant souvent sur des premières expériences de simple microcrédit qui ont vite trouvé leurs limites, la recherche d'outils de financement mixtes et l'engagement par de multiples voies vers la finance responsable ont mobilisé de nombreux acteurs qui constataient les carences des instruments centralisés traditionnels. Les institutions financières internationales (IFI) ont largement revu et diversifié utilement leurs cadres d'intervention. **L'aide internationale au profit de cette ingénierie de projet incluant des ingénieries financières élaborées reste néanmoins insuffisante aujourd'hui.**

37

La deuxième clé, qui conditionne la première, est la confiance que peut apporter la mise en place de meilleures gouvernances. L'amélioration de la gouvernance de l'eau est reconnue comme l'un des éléments essentiels du changement nécessaire des politiques courantes pour atteindre les ODD. La mise en synergie des acteurs suppose l'instauration de contextes institutionnels et d'instruments assurant la confiance et l'engagement des parties prenantes. Cela passe notamment par l'amélioration des mécanismes de

transparence, par le renforcement des connaissances et leur partage.

Les travaux conduits dans le cadre de la *Water Governance Initiative* tentent d'apporter un peu de clarté dans ces sujets complexes. Après avoir construit un système de principes complémentaires et d'indicateurs, ils cherchent désormais dans les expériences existantes des éléments de preuve de l'évidence partagée qu'une meilleure gouvernance produit *in fine* de meilleurs résultats. Ces progrès de gouvernance supposent un renforcement des pouvoirs locaux et de leurs capacités, tout particulièrement dans les centres urbains secondaires. La coopération décentralisée, combinée avec l'appui des IFI et la mobilisation des ONG, est importante.

38

**Il reste que, pour progresser, l'« ardente obligation » est de s'atteler aux situations les plus difficiles,** qui ne répondent pas aux critères de la zone de confort des bonnes pratiques qui convient bien aux financeurs : il n'y a pas d'autre choix que celui de la confiance et de la lucidité. Ce pari pour l'avenir conduit à la construction progressive et conjointe des solutions techniques et des gouvernances appropriées.

Ce chapitre développe les outils disponibles permettant de faire évoluer concrètement les pratiques. Le premier point concerne les moyens de financer un secteur qui, pour de multiples raisons explicitées dans les chapitres précédents, est en déficit crucial, tant pour ses investissements que pour l'entretien et l'exploitation des équipements nécessaires, dans le respect des services écosystémiques rendus par les milieux naturels. La mobilisation des financements nécessite confiance et engagement des acteurs.

Confiance et engagement sont également indispensables pour le respect des règles communes de toutes natures nécessitées par la gestion du bien rare et commun qu'est l'eau. C'est pourquoi ce dernier chapitre retrace les principes d'une bonne gouvernance de l'eau, ainsi que les moyens d'évaluer la situation et d'accompagner le renforcement des capacités des autorités organisatrices pour que, placées au plus près de besoins, celles-ci puissent mobiliser les outils les mieux adaptés et identifier les pistes de progrès.

## 9.1. Mobiliser les moyens financiers adéquats

Revenons tout d'abord aux services publics d'eau et d'assainissement. Dans ces services urbains, il n'est pas socialement possible, dans bien des cas, de suivre à la lettre l'injonction du plein recouvrement des coûts. On se borne souvent au mieux, ce qui est déjà souvent un effort important, à viser le plein recouvrement du coût du service (mobilisation, traitement, distribution, *asset management*) et parfois, tout juste le seul recouvrement des coûts de fonctionnement (« petit équilibre »).

L'OCDE a très tôt constaté que ce seul mécanisme de recouvrement des coûts auprès des clients présentait plusieurs insuffisances :

- en général, il ne « boucle pas » et il faut trouver des ressources externes ;
- inversement, il n'internalise pas spontanément ses coûts externes.

Les approches pour combiner les diverses réponses de financement ont été popularisées dans un premier temps par l'OCDE sous le slogan des 3 T : tarifs, taxes et transferts.

La question des **tarifs** a été évoquée [au chapitre 5](#). Il faut à la fois intégrer les charges fixes élevées (ce qui rend les coûts marginaux inférieurs aux coûts moyens et suppose des tarifs dégressifs) et inciter les consommateurs à la parcimonie (ce qui au contraire suppose des tarifs progressifs). Par ailleurs, au moins temporairement, il faut assurer des péréquations entre usagers en raison de leurs différences de revenus et du caractère indispensable de l'accès au service pour les plus démunis.

Les **taxes (ou impôts)** jouent un double rôle. D'une part, il s'agit des recettes perçues sur les acteurs économiques sans lien avec le service d'eau et d'assainissement : en l'occurrence, cela permet d'assurer l'équilibre et les investissements du secteur de l'eau à partir des budgets généraux (aux niveaux national, régional, local). D'autre part, il s'agit des taxes sur les usages de l'eau, en ajoutant aux prix une contrepartie destinée aux travaux de restauration des milieux (intégrer dans le prix de l'eau les externalités d'usage : [voir § 7.2](#)). Le principe « pollueur-payeur », qui contribue à internaliser les coûts environnementaux, semble passé dans les moeurs, pour l'industrie et les collectivités locales, dans les pays les plus développés au moins. Il est plus difficilement

accepté dans le monde agricole. Enfin, divers mécanismes de transferts entre acteurs, dès lors qu'ils distordent la répercussion des coûts du service entre usagers, sont réputés avoir le statut de taxes : ce sont souvent des transferts du monde urbain vers le monde rural (ce qu'organise également la solidarité de bassin des agences d'eau) ou entre catégories d'usagers (en général en direction de la profession agricole : tarifs d'énergie réduits par diverses niches fiscales ou aides directes, tarifs d'accès à la ressource ou niveaux de taxes adaptés).

Les **transferts** viennent, à l'échelle mondiale, des mécanismes de solidarité, passant soit par les mécanismes des aides publiques au développement (APD ou *official development assistance*/ ODA), d'institutions caritatives, ou de la solidarité des diasporas. Ils ne sont pas seulement financiers et concernent aussi beaucoup, notamment *via* la coopération décentralisée<sup>122</sup> et des ONG très expérimentées, des appuis opérationnels et une aide au renforcement des capacités des acteurs locaux.

### **9.1.1. Des besoins de financement non satisfaits et des moyens inemployés**

Il a été estimé par Guy Hutton and Mili Varughese (Hutton, Varughese, 2016) que l'atteinte des ODD concernant l'eau potable et l'assainissement en 2030 supposait un triplement immédiat des dépenses dans le secteur, avant que l'investissement ne décroisse et soit remplacé par des coûts de fonctionnement induits par l'accroissement des services et du patrimoine.

Le constat de l'impasse du financement de ce secteur n'est pas nouveau (Camdessus, Wipenny, 2003). De tous les secteurs de réseaux (télécommunications, gaz, électricité, eau), le niveau de rentabilité financière des investissements est le plus faible, même si l'utilité socio-économique, notamment en raison des effets sur la santé, est très élevée.

Aujourd'hui, les États et les villes du Tiers-monde sont bien seuls et démunis face à des problèmes insolubles. Dans ce genre de situation, chacun écrit l'histoire à sa façon : alors que les acteurs locaux stigmatisent le manque de moyens, il n'est guère possible de rencontrer un grand bailleur sans que celui-ci ne se lamente sur le faible nombre de dossiers qu'il a à traiter et sur les quantités de capitaux qui dorment inemployés.

La logique institutionnelle s'appuyant sur le renforcement des autorités locales, que nous avons défendue ci-dessus, a un corollaire immédiat : la crédibilisation financière de ces autorités et leur cotation est un passage obligé. Il est indispensable d'aider les collectivités locales à lever des fonds pour leur permettre de jouer pleinement leur rôle d'autorité publique.

### **9.1.2. Le besoin de financements mixtes (*blended financing*)**

L'ingénierie financière est au cœur de la résolution de ces questions. Sans faire appel à des outils de niveau de sophistication excessif, la constitution d'un montage mixte alliant, autour d'un projet concerté entre un ensemble de parties prenantes, des outils financiers appropriés à chaque phase

<sup>122</sup>. Les collectivités locales françaises intervenant dans le domaine de la coopération décentralisée, dans le cadre de leurs jumelages, apportent un véritable appui de développement des capacités à ces collectivités locales africaines dépourvues de moyens. Les coopérations Sud-Sud et Sud-Sud-Nord se sont développées, notamment sous l'impulsion du programme GWOPA (Global Water Operators' Partnership Alliance) d'UN-Habitat. Voir : <https://gwopa.org/en/>

de développement et pour chaque segment de besoin de financement, plutôt que l'utilisation de recettes standardisées, apparaît désormais le cœur de la performance d'un projet. C'est l'objet de la finance mixte (*blended finance*).

Il y a des outils adaptés pour de très forts volumes financiers, mais aussi des mécanismes comme la microfinance qui peuvent intervenir au contraire au plus près des besoins des ménages ou des très petites, petites ou moyennes entreprises. Les outils mobilisables conjointement si nécessaire dans un financement mixte sont :

- les prêts du secteur bancaire privé (finance commerciale) ; le taux d'intérêt est celui du marché de capitaux, qui est établi, selon les pays et les secteurs, à des niveaux très variables (voir ci-après) ;
- les garanties permettant de réduire le coût financier des capitaux mobilisés en assumant une part de risque ;
- les dons (subventions) et les prêts concessionnels (bonifiés) des autorités locales et nationales, de l'APD des institutions financières internationales (IFI) ; les prêts bonifiés peuvent être assortis de différés très significatifs de remboursement ;
- les apports des fonds privés de solidarité (*charity*).

### 9.1.3. Les financements du secteur bancaire privé

La mobilisation de financements bancaires privés reste extrêmement limitée. La faible rentabilité intrinsèque de ce type de marché fait que l'investissement n'a de sens que dans une sécurité de moyen et long terme suffisante. On bute sur l'instabilité des taux de change et plus fondamentalement sur les questions de confiance dans la stabilité institutionnelle et juridique.

La responsabilité des élus devant la population reste entière et c'est une bonne chose : le domaine de l'eau est de ce fait très sensible politiquement. Ceci introduit des risques de rupture unilatérale des contrats, des difficultés et incertitudes sur les évolutions tarifaires qui posent un problème de garanties. La garantie apportée par les États vis-à-vis des contrats signés par eux-mêmes et *a fortiori* par des autorités locales est très fragile. L'exemple de la crise argentine des années 2000 montre bien la limite de la confiance qu'un investisseur privé peut mettre dans un pays qui est pourtant doté de nombreux atouts économiques à moyen terme et devrait constituer un marché réputé solvable à terme malgré les difficultés conjoncturelles. Ceux-là même qui s'étaient lancés dans cette aventure ne trouveraient plus aujourd'hui le même accueil favorable du secteur bancaire pour la même opération.

La prise en compte de l'ensemble de ces risques conduit les prêteurs à apprécier la rémunération du capital qu'ils en attendent : pas d'investissement privé sans rémunération raisonnable des capitaux investis, « raisonnable » signifiant adapté au contexte et aux risques du plan d'affaires (*business plan*).

Les notations financières des institutions publiques ou de leurs opérateurs, qui sont délivrées par les trois grandes agences mondiales de notation, sont des notations de la dette (*rating*) correspondant aux perspectives de remboursement de leurs engagements envers leurs créanciers fournisseurs, financeurs, détenteurs d'obligation (les obligations représentent plus de la moitié de

l'ensemble du marché des actifs financiers). Elles alimentent l'appréciation des parties prenantes sur les taux de rémunération de capitaux attendus.

La puissance publique, qui accorde des marchés publics ou qui est actionnaire d'un opérateur public, doit donc s'assurer, pour la stabilité de son opérateur, que les recettes (tarifs, taxes, transferts) couvrent cette rémunération. Son appréciation est souvent fondée sur un modèle d'évaluation des actifs financiers (MEDAF en France), des données financières de marché disponibles et des paramètres pris en compte pour les entreprises exerçant des activités comparables. Le régulateur ou l'autorité organisatrice (*voir chapitre 5*) estime ainsi un coût moyen pondéré du capital (CMPC ou *Weighted Average Cost of Capital/WACC*). Celui-ci tient compte de la rémunération des fonds propres, du coût des emprunts et du levier financier attendu pour disposer d'un opérateur efficace. Ce dernier peut être différent du levier financier effectif, celui-ci relevant d'un choix des actionnaires. La régulation ou l'AO (qui dispose généralement d'un autre côté du pouvoir de définition des tarifs) doit veiller à ce que la rentabilité des capitaux employés ou investis (ROCE : *Return On Capital Employed* ; ROIC : *Return On Capital Invested*) soit proche du CMPC.

L'eau et l'assainissement présentent la particularité de ne pas permettre de distinguer le gestionnaire des infrastructures et l'opérateur, comme c'est le cas pour l'énergie et les transports, où un gestionnaire d'infrastructures doit mettre celles-ci à disposition d'opérateurs éventuellement multiples et généralement distincts (transporteurs, distributeurs, plateformes d'intermédiation, etc.).

Les actionnaires et les financeurs, quelle que soit leur nature, doivent être assurés par l'opérateur qu'il a bien conduit des tests de dépréciation de ses actifs (*impairment test*), la conformité de ces démarches au regard de normes précises définies au plan international étant contrôlée par des commissaires aux comptes.

### 9.1.4. Améliorer l'efficacité des dépenses publiques

La Banque mondiale (Andres *et al.*, 2019) dresse un tableau critique des subventions apportées à l'eau potable et à l'assainissement, qu'elle juge trop souvent trop généralisées, coûteuses, insuffisamment ciblées, non transparentes et distordues. Cela conduit à une autre règle des trois T qui s'adresse cette fois-ci aux subventions publiques : ciblées (*Targeted*), temporaires (*Timebound*) et transparentes (*Transparent*). Seuls 14 % des services assurent le recouvrement des coûts complets et seulement 35 % les seuls coûts d'exploitation et de maintenance, alors que selon la Banque mondiale, nombre de ces services se trouvent dans des pays dont le niveau de vie général permettrait le plein recouvrement des coûts. La Banque impute ceci à la réticence des responsables politiques à décider de systèmes de tarification adéquats<sup>123</sup>. Les bénéficiaires font pression pour que ces subventions soient pérennisées et généralement elles ne font que croître, par une extension progressive de leurs bénéficiaires.

Elles sont faiblement ciblées. Ainsi, les études d'analyse fine des coûts d'investissement (CAPEX) et d'exploitation (OPEX) sont rarement détaillées. La facilité consiste à apporter une

<sup>123</sup>. Dans le cas de la France, si le recouvrement des coûts est complet, c'est souvent au détriment du renouvellement des réseaux (Roche *et al.*, 2016), les agences de l'eau assurant des péréquations significatives de l'urbain vers le rural. Cette situation contraste avec la tarification dans les services publics de transports, qui ne couvrent que 25 % à 35 % de leurs coûts en France, une taxation sur les entreprises sans lien direct avec des indicateurs d'usage de ces transports venant assurer une forte part des recettes de ces services.

aide à l'opérateur, alors que l'enjeu est d'aider les familles. Ceci aboutit à des dispositions particulièrement inefficaces où des équipements structurants (réseaux, stations d'épuration) fortement subventionnés ne fonctionnent pas par défaut de raccordement des usagers, occasionnant le double défaut de ne pas collecter, ni *a fortiori* de traiter les effluents pour lesquels ils sont prévus, mais aussi de ne pas permettre le financement des services par défaut d'abonnés. Cette situation se rencontre dans certains départements d'Outre-mer en France (Roche *et al.*, 2015). Par ailleurs, il se trouve que les aides aux ménages bénéficient aux plus riches. Selon cette même étude, 56 % des dépenses vont au quintile le plus aisé et 6 % au quintile le plus pauvre, pour une raison très simple : les plus pauvres ne sont pas raccordés.

La GIz<sup>124</sup> a partagé récemment son expérience de financement de toilettes à domicile et aboutit à des conclusions très différentes de la Banque mondiale, en démystifiant trois idées reçues (Mbalo, Rossmann, 2019)<sup>125</sup> :

- les subventions à l'équipement des ménages en toilettes réfrèneraient l'innovation et la recherche de solutions peu onéreuses ;
- elles ne seraient pas soutenables financièrement ;
- elles ne relèveraient pas de l'action publique, s'agissant d'équipements privés.

L'expérience de la GIz est que l'effet d'entrainement est fort : les voisins s'équipent, y compris à leurs frais ; les subventions sont un stimulant de la demande. Les équipements à domicile font partie de la chaîne d'ensemble de l'assainissement et la puissance publique ne peut les ignorer<sup>126</sup>. La GIz convient cependant que les processus de sortie du système de subvention sont difficiles à mettre en œuvre.

Dans un ouvrage récent (Fonseca *et al.*, 2020), l'association « Sanitation and Water for All » (SWA) développe, sur la base d'exemples concrets tirés de divers pays, l'analyse qui pourrait déterminer les ministres des finances, dont le rôle est essentiel dans tous les pays, à créer les conditions d'une meilleure efficacité et d'un accroissement des investissements publics, dont on a vu ([au chapitre 5](#)) qu'ils avaient un excellent ratio bénéfices socio-économiques/coût. La lecture de ce document est très fortement recommandée.

SWA relève tout d'abord que les dépenses de premier investissement ne sont que la part visible de l'iceberg des dépenses à couvrir, mais aussi que les dépenses d'exploitation et de renouvellement sont largement négligées, ce qui conduit à des défaillances de fonctionnement. Les estimations de la Banque mondiale n'intègrent pas les coûts de remise en état du patrimoine existant et déjà dégradé. C'est un sujet essentiel, y compris en France (Roche *et al.*, 2016).

SWA propose notamment :

- de développer les incitations directes à l'émergence de filières techniques et professionnelles et d'entreprises en capacité d'améliorer l'offre ;

---

<sup>124</sup>. GIz, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, est l'agence allemande de coopération, six fois plus grande que l'agence française de développement. Elle résulte de la fusion en 2011 de la GTZ (ancienne agence de coopération technique), du Service allemand de développement (DED) et de InWEnt (Capacity Building International, Germany).

<sup>125</sup>. SuSanA est l'Alliance pour un assainissement soutenable, dont le site web est accessible sur : <https://www.susana.org/en/>

<sup>126</sup>. Voir par exemple l'encouragement par l'État et ses établissements financiers aux AO pour subventionner les raccordements dans le plan français Eau-Dom (Roche *et al.*, 2015).

- de cibler au plus près les subventions, notamment de les orienter vers les populations les plus pauvres, surtout celles qui ne sont pas raccordées au service (voir l'exemple de la GI2Z ci-dessus) ;
- d'accroître les mécanismes de prêts bonifiés et d'apporter des garanties ;
- d'évaluer la solvabilité des opérateurs et d'ajuster les dispositifs d'appui à la situation réelle de chacun, en privilégiant les subventions et le renforcement des capacités dans les cas les plus critiques<sup>127</sup>. Un exemple de cette pratique peut être trouvé en Indonésie (programme national d'approvisionnement en eau dans les zones urbaines NUWAS soutenu par la Banque mondiale), où les opérateurs, classés en cinq stades de maturité, accèdent au fur et à mesure qu'ils passent d'une classe à l'autre à des ressources et des appuis adaptés (figure 79) ;
- de mobiliser des ressources financières moins connues (fonds pour le climat, obligations à effet social, etc.).

### AMÉLIORATION PROGRESSIVE ET CONTINUE

OPÉRATEURS DU GROUPE 1	OPÉRATEURS DU GROUPE 2	OPÉRATEURS DU GROUPE 3	OPÉRATEURS DU GROUPE 4	OPÉRATEURS DU GROUPE 5
<b>Subvention de lancement</b> Pour étendre la couverture des services et améliorer la performance	<b>Subvention axée sur la performance</b> Pour améliorer la performance et étendre la couverture des services	<b>Subvention de contrepartie</b> Pour favoriser la mobilisation de fonds privés	<b>Subvention de contrepartie</b> Pour favoriser la mobilisation de fonds privés	<b>Subvention de contrepartie</b> Pour favoriser la mobilisation de fonds privés
<b>Appui technique et renforcement des capacités</b> Compétences de base	<b>Subvention de lancement</b> Pour étendre la couverture des services	<b>Subvention de lancement</b> Pour atteindre un niveau de service minimum	<b>Subvention axée sur la performance</b> Pour améliorer la performance et étendre la couverture des services et la zone de distribution	<b>Appui technique et renforcement des capacités</b> Améliorer les compétences et favoriser l'innovation

Figure 79 : Les outils financiers auxquels les opérateurs indonésiens accèdent dans le cadre du programme NUWAS. Tirée de Fonseca *et al.*, 2020.

127. On trouvera un exemple de programme de ce type dans les départements d'Outre-mer français dans le plan Eau-Dom (Roche *et al.*, 2015). Les collectivités, suite à un diagnostic partagé, signent avec l'État et les autres partenaires financiers (OFB, AFD, CDC) un « contrat de progrès » intégrant les actions de renforcement des capacités, destiné à répondre aux priorités identifiées. Ce dispositif a fait l'objet du 30 juillet 2018 d'une instruction aux préfets concernés, accessible sur : [http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2018/08/cir\\_43904.pdf](http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2018/08/cir_43904.pdf). Une évaluation en a été lancée en 2021.

La complexité apparente des mécanismes désormais mis en œuvre est le résultat de l'expérience accumulée durant des années où des dispositions moins complètes ont montré leurs faiblesses. En témoigne l'exemple du *Philippines Water Revolving Funds* créé en 2008 et qui a apporté son dernier prêt en 2017 avec l'appui d'USAID et de JICA, deux agences de coopération des États-Unis et du Japon (figure 80).

Cette complexité, généralement recommandée — pour ne pas dire imposée — par des bailleurs internationaux, n'est pas toujours acceptée par les autorités nationales des pays bénéficiaires, qui seraient parfois enclines à des dispositions moins sophistiquées plus directement à leurs seules mains.

Ces divergences alimentent le débat sur les conditions imposées par les IFI pour intervenir concernant la gouvernance, notamment celles qui touchent la transparence et les procédures. Ces exigences sont essentielles pour instaurer un climat de confiance favorable à l'implication des parties prenantes. Elles sont parfois stigmatisées par les administrations bénéficiaires comme de l'ingérence, ce qui peut conduire à des tensions politiques extrêmement fortes. La complexité des procédures pour obtenir les appuis financiers est assimilée à de la bureaucratie improductive.

Ces circonstances, ainsi que la propre bureaucratie des pays bénéficiaires, ont pu aussi conduire des ONG, voire des coopérations décentralisées, à la tentation de travailler dans le dos des autorités nationales en direct avec des acteurs locaux.

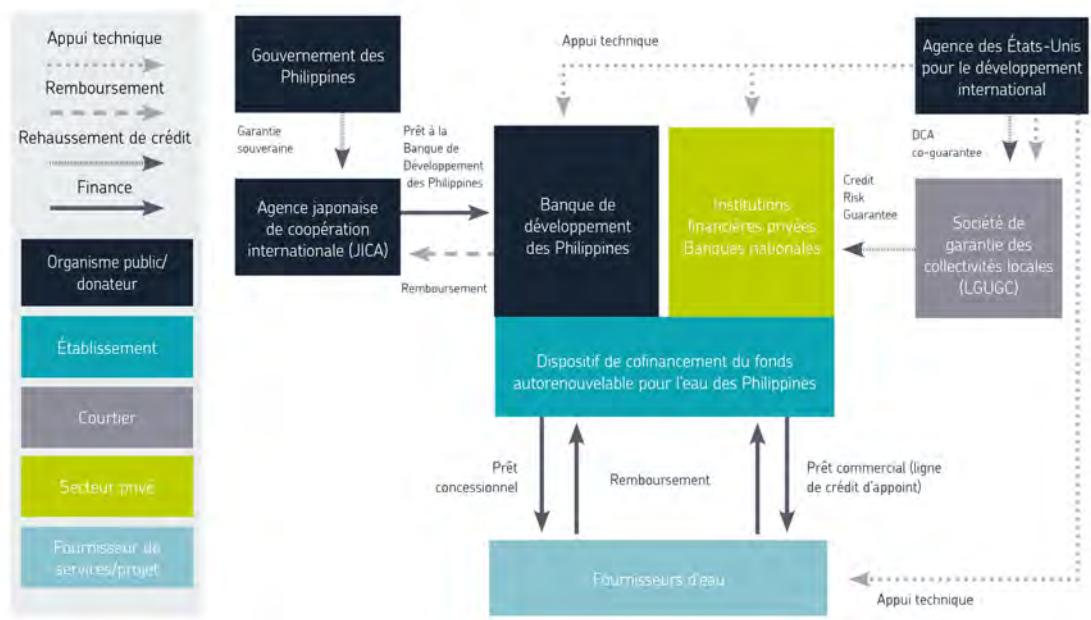


Figure 80 : Organisation du Fonds auto-renouvelable pour l'eau des Philippines. Tirée de Fonseca *et al.*, 2020.

## 9.1.5. De la microfinance à la responsabilité sociale et environnementale

Les petits crédits supportent dans les systèmes habituels des coûts de gestion prohibitifs. De plus, compte tenu des risques de non-remboursement, les pauvres qui n'accèdent pas aux banques commerciales traditionnelles empruntent sur un secteur informel où ils sont à la merci des usuriers pratiquant des taux d'intérêt très élevés (typiquement de 10 % à plus de 100 % par mois).

Muhammad Yunus, après avoir travaillé avec ses étudiants sur les variétés de riz pour tenter de contribuer à résoudre les problèmes de famine, constatant ces taux prohibitifs, a fondé au Bangladesh en 1976 la première institution de microcrédit, la *Grameen Bank* (littéralement : banque de village). Il s'est vu décerner le prix Nobel de la paix en 2006.

La microfinance va au-delà du seul microcrédit. Elle accompagne les entrepreneurs dans l'ensemble de leur parcours. Les prêts se pratiquent dans ce secteur à des taux ne dépassant généralement pas 20 % par an : un taux certes très élevé, mais tenant compte des réalités des coûts de transaction. Ils se sont fortement développés, concernant désormais des centaines de millions de personnes dans le monde : 250 millions au moins en 2020. Jacques Attali évoque la perspective de 600 millions de bénéficiaires en 2030.

Elle est cependant loin d'être une panacée de portée universelle, ni d'ouvrir à elle seule la porte « vers un monde sans pauvreté » (titre d'un ouvrage de M. Yunus). De nombreuses études l'ont montré, notamment les travaux d'Esther Duflo (Duflo, 2015) : l'endettement des plus pauvres est aussi un drame. De plus, un usage mal calibré, voire mal intentionné, du microcrédit peut contribuer à entretenir des situations de quasi-esclavage, où des personnes restent prisonnières de dettes qu'elles ne parviennent jamais à rembourser. Par ailleurs, s'il s'agit de permettre de développer toutes les opportunités fermées aux plus démunis et d'en révéler tous les talents, il serait illusoire d'en déduire que toute personne a le talent et la motivation pour entreprendre.

La micro-finance se développe désormais chez la plupart des financeurs et dans tous les segments de la gestion de l'eau. L'entrepreneuriat social est très développé dans le secteur agricole et la gestion de l'eau y joue souvent un rôle clé.

Depuis les activités traditionnelles sans but lucratif (ONG) orientées vers la seule création de valeur sociale, jusqu'aux entreprises traditionnelles orientées vers la seule création de valeur économique, le spectre est continu :

- **les structures sans but lucratif** : elles peuvent inclure des activités rétribuées contribuant à leur équilibre financier ;
- **les entreprises sociales et les entreprises avec une responsabilité sociale et environnementale (RSE)** : elles ont en commun de destiner leur production de façon ciblée à des populations en difficulté, d'impliquer des personnes en situation précaire dans le système de production, voire de les associer à l'actionnariat ;
- **des entreprises pratiquant la RSE** : tout en ayant dans leur mandat social de distribuer des dividendes à leurs actionnaires, elles incluent dans leur raison d'être et leurs pratiques des composantes fortes de création de valeur sociale.

En 2014, GIZ a ainsi dressé un bilan très complet des dispositifs existant en Inde (Bauer, 2014).

Depuis sa création, Water.org<sup>128</sup> soutient le marché de la microfinance pour l'eau et l'assainissement et encourage les institutions financières de 13 pays à mettre en place une offre de micro-prêts spécialisés, par une formation et un appui technique, ainsi que de petites subventions destinées à financer la préparation et le suivi des projets.

Les résultats obtenus à l'échelle mondiale de ce dispositif appelé *WaterCredit* sont impressionnantes : en août 2020, plus de 2,4 milliards de dollars américains avaient été dépensés sous forme de prêts. Ils ont permis à 30 millions de personnes, dont 89 % vivent avec 6 \$ par jour ou moins, d'accéder aux services d'eau et d'assainissement : les prêts sont pour 88 % faits à des femmes, d'un montant moyen de 364 \$ et sont remboursés à 99 %.

La Banque mondiale soutient une approche analogue dénommée *Global Partnership for Results-Based Approaches* (GPRBA)<sup>129</sup> dont une publication présente, au-delà les principes généraux, la mise en œuvre pour l'assainissement au Bangladesh (GRPBA, 2020).

La finance socialement et écologiquement responsable se développe dans le monde en appui à ces démarches de développement d'activités tournées vers plus de soutenabilité. Elle est connue sous divers noms et comporte de multiples modalités : « financement à impact » ou « financement à résultats sociaux » (« *impact investment* » ou « *result based finance* » ou RBF selon le GPRBA), parfois « obligations à effet social ». Cela n'est cependant pas du tout un système obligataire (rémunération garantie à taux et échéances prédéterminées) : généralement, c'est même tout l'inverse. Pour faire une analogie, c'est similaire au financement *starter* des entreprises sorties d'incubateurs : le retour d'investissement n'est pas garanti. La différence est que les résultats attendus ne sont pas seulement ceux de la profitabilité : le retour sur investissement est indirect via les effets socio-économiques ou la soutenabilité environnementale, et sensiblement différé (effets de long terme). Ces projets sont donc moins aisés à évaluer et à suivre.

Ces principes de base appliqués à l'assainissement en Asie sont notamment explicités par la commission économique et sociale des Nations Unies pour l'Asie et le Pacifique (Zakaria, Karazhanova, 2013).

Depuis 2014, le fonds *WaterEquity* se développe, avec une cible précise, particulièrement bien choisie : consolider la dette des opérateurs ayant fait leurs preuves, pour les accompagner dans leur phase de croissance en accédant à un crédit.

Des enseignements ont déjà pu être tirés des premiers retours d'expérience de ce secteur dynamique en pleine expansion, très vraisemblablement destiné à prendre une part croissante dans la panoplie des solutions (Waterpreneurs, 2018).

### 9.1.6. L'aide publique internationale est essentielle

Les aides internationales pour l'eau potable et l'assainissement connaissent de fortes fluctuations interannuelles, mais ont sensiblement augmenté depuis 2010 (figure 81).

La part de l'eau potable et de l'assainissement a sensiblement décrue à la fin du xx<sup>e</sup> siècle et se maintient stable depuis l'an 2000 (figure 82).

<sup>128</sup>. Water.org est une organisation caritative dédiée à l'eau, fondée par Gary White et Matt Damon en fusionnant en 2009 leurs deux organisations caritatives respectives. Voir plus de détails sur leur site web : <https://water.org/>

<sup>129</sup>. Voir leur site web : <https://www.grpba.org/>

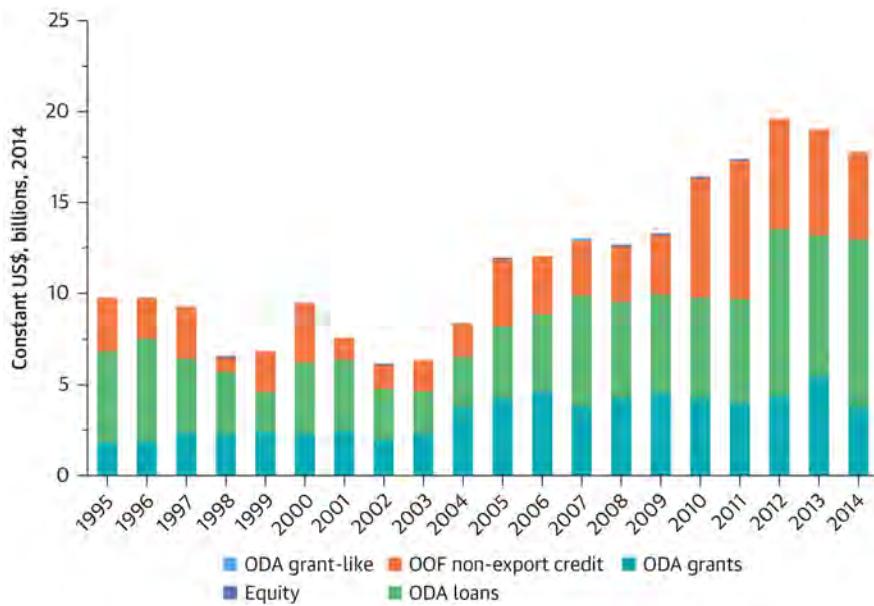


Figure 81 : Évolution des aides publiques au développement dans le secteur de l'eau. Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. Document produit en appui au panel de chefs d'Etat et de gouvernements pour l'eau.



Figure 82 : Part des aides à l'eau potable et à l'assainissement dans les aides à l'eau.

Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0.

Malgré les priorités annoncées pour ce secteur, leur poids dans l'aide totale n'a pas évolué de façon significative (figure 83).

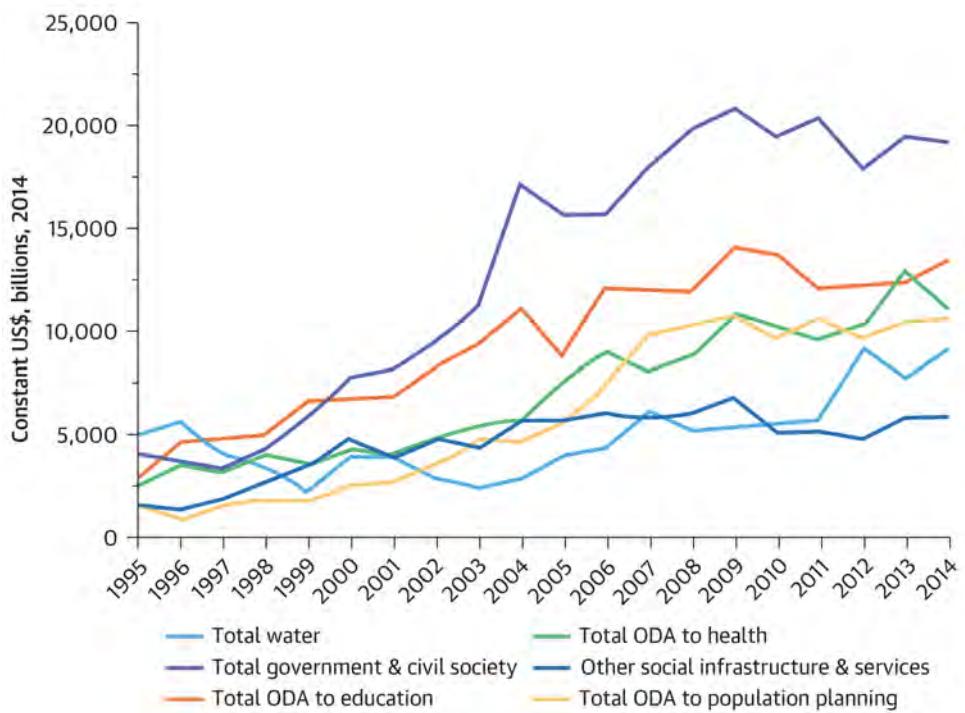


Figure 83 : Évolution du poids de l'aide au secteur eau dans les aides internationales.

Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0.

#### VOIR FOCUS N°13

Les aides et financements internationaux

### 9.1.7. Mobiliser le fonds vert pour le climat ou créer un fonds bleu spécifique ?

Le Fonds vert pour le climat (FVC) est un fonds mondial qui aide les pays à revenus faibles et intermédiaires à limiter ou à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et à s'adapter au changement climatique. Doté à sa création de 9,4 milliards de dollars américains en 2014 et parvenu fin 2019 à hauteur de 5,2 milliards de dollars, il sera réabondé dans la période 2020-2023 de 9,8 milliards de dollars. Toutefois, les fonds consacrés à l'eau et l'assainissement ne représentent fin 2019 que 328 millions de dollars, soit un peu moins de 6 % du total. Le FVC finance l'équivalent de 50 % à 75 % des dépenses d'investissement, ce qui représente un pourcentage non négligeable

dans les pays à revenu faible et intermédiaire. Dans son principe, ce fonds est équilibré en contribution à la réduction des émissions et à l'adaptation aux effets du changement climatique. Le secteur de l'eau ne contribue que faiblement aux émissions mais présente d'importants besoins dans le volet adaptation.

De nombreux acteurs internationaux, considérant le succès général du FVC, constatent cependant que l'accès à ce fonds est trop complexe et restrictif pour des acteurs de l'eau de plus petite échelle que les acteurs de l'énergie et qu'il ne répond qu'à une modeste part des enjeux de l'ODD 6. Ils souhaiteraient plutôt promouvoir le développement d'un fonds bleu<sup>130</sup>, qui serait établi sur le même principe, mais mieux adapté aux enjeux spécifiques de l'eau et plus susceptible d'en traiter toutes les dimensions. On peut craindre que l'appétit pour alimenter un tel fonds soit très modeste, les pays donneurs ayant des dispositifs déjà très développés d'intervention sectorielle. Le consensus international sur la bonne stratégie à adopter n'est pas arrêté à ce jour.

C'est donc au développement des mécanismes de coordination des interventions que chacun s'attelle, qu'il s'agisse de l'initiative des autorités nationales comme au Sénégal, de la démarche spontanée des bailleurs traditionnels ou de structures fédératives impulsées par des fédérations d'ONG, des fonds caritatifs ou des opérateurs comme SIWI, l'OIEAU (par exemple le mécanisme d'incubation de projets *Water for Climate*). Sur le modèle des conventions d'affaires du secteur commercial, des plateformes ou des séances de rencontres en *B to B* mettent en relation des porteurs de projets et des financeurs ou partenaires (par exemple l'initiative « *Innovate 4 Water* » de Waterpreneur<sup>131</sup>).

## 9.2. Faire progresser la gouvernance : les travaux de la Water Governance Initiative

Les progrès de gouvernance sont la clé de la mobilisation des acteurs de toute nature pour obtenir des résultats. Encore faut-il s'entendre sur le sens de ce mot.

À l'occasion du 6<sup>e</sup> Forum mondial de l'eau de 2012 à Marseille, nous avons pris l'initiative de constituer une alliance d'organisations, sous l'égide de l'OCDE (et bénéficiant de son soutien) pour approfondir les principes de gouvernance de l'eau et produire collectivement des retours d'expérience et des indicateurs permettant à des acteurs, à différentes échelles de territoire, de réfléchir ensemble sur leurs questions de gouvernance de l'eau. Ces travaux sont présentés sur le site de l'OCDE, sur la page dédiée à ce programme<sup>132</sup>. Cette démarche part du constat que l'amélioration des pratiques de gouvernance est cruciale pour l'obtention de résultats concrets, selon un cercle vertueux d'amélioration continue (figure 84).

<sup>130</sup>. La dénomination « fonds bleu » est déjà employée pour désigner des initiatives plus locales. Récemment, le Sénégal, a lancé une initiative nommée « Fonds bleu Sénégal » pour mobiliser des partenaires financiers multiples autour d'un ambitieux programme d'accès à l'eau et à l'assainissement. Voir : <https://www.worldwaterforum9.org/sites/default/files/BROCHURE-FONDS-BLEU-FINAL.pdf>

<sup>131</sup>. Durant une séance de trois jours à Kisumu au Kenya en février 2019, 160 acteurs de tous types se sont réunis pour mettre en réseau, développer et conforter une cinquantaine de projets concrets. Voir sur le sujet le site web dédié : <https://www.innovate4water.net/>

<sup>132</sup>. Voir : OECD. *The OECD Water Governance Programme* [en ligne]. Disponible sur <http://www.oecd.org/fr/cfe/politique-regionale/initiative-de-ocde-sur-la-gouvernance-de-eau.htm>

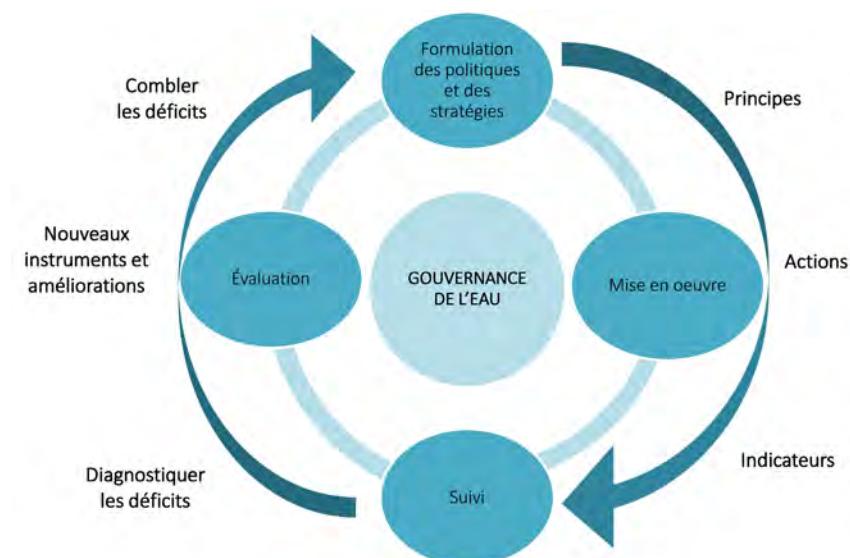


Figure 84 : Améliorer les performances de la gestion de l'eau comme enjeu de gouvernance. Tirée de WGI, 2018.

Pour organiser la réflexion, la WGI a proposé dans un premier temps aux pays de l'OCDE d'approuver un certain nombre de principes de gouvernance, ce qui a été fait en 2015 et présenté au 7<sup>e</sup> Forum mondial de l'eau à Daegu en Corée.

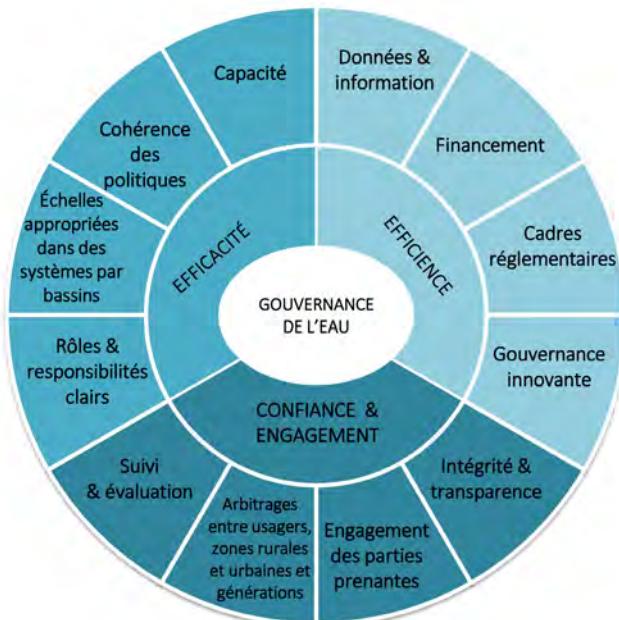


Figure 85 : Douze principes de bonne gouvernance de l'eau. Tirée de WGI, 2015.

Sur cette base, la WGI a développé un système d'indicateurs et d'outils d'évaluation pour les acteurs qui souhaitent se lancer dans une démarche de progrès. Ayant été testés sur un certain nombre de cas par les acteurs eux-mêmes, les résultats ont été présentés à Brasilia au 8<sup>e</sup> Forum mondial de l'eau en 2018 (WGI, 2018).

Trois originalités de la conception de ces indicateurs méritent d'être soulignées :

- c'est une méthode d'élaboration collective du diagnostic en dix étapes (figure 86) ;
- elle comprend l'évaluation des accords et des désaccords des parties prenantes sur le diagnostic, ce qui permet d'identifier les points sensibles sur lesquels il est important de faire des efforts de dialogue et de transparence (figure 87) ;
- elle permet l'analyse des tendances et l'estimation des cibles envisagées à échéance de trois ans (figure 88).



Figure 86 : Méthode d'élaboration du diagnostic de gouvernance. Tirée de WGI, 2018.

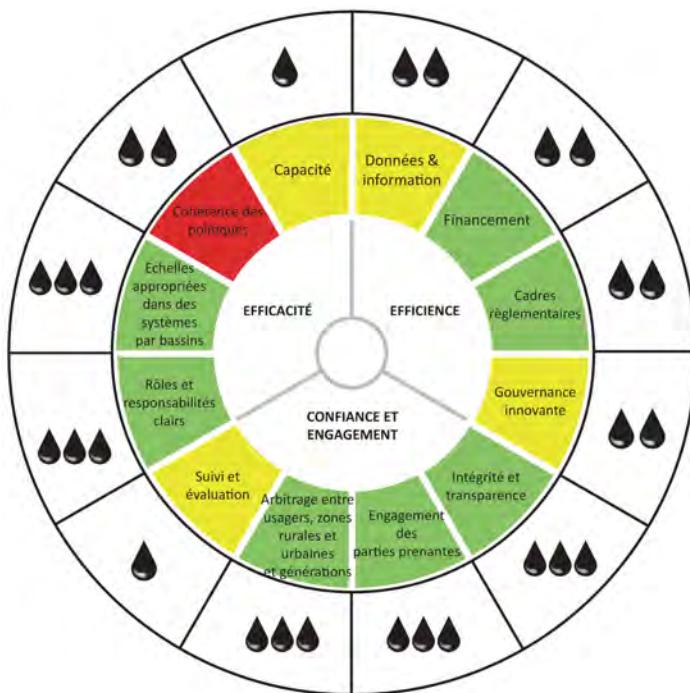


Figure 87 : Le degré d'accord des parties prenantes sur l'évaluation (feu vert, jaune ou rouge) est évalué (1 goutte : forts désaccords ; 2 gouttes : divergences d'opinions ; 3 gouttes : consensus). Tirée de WGI, 2018.

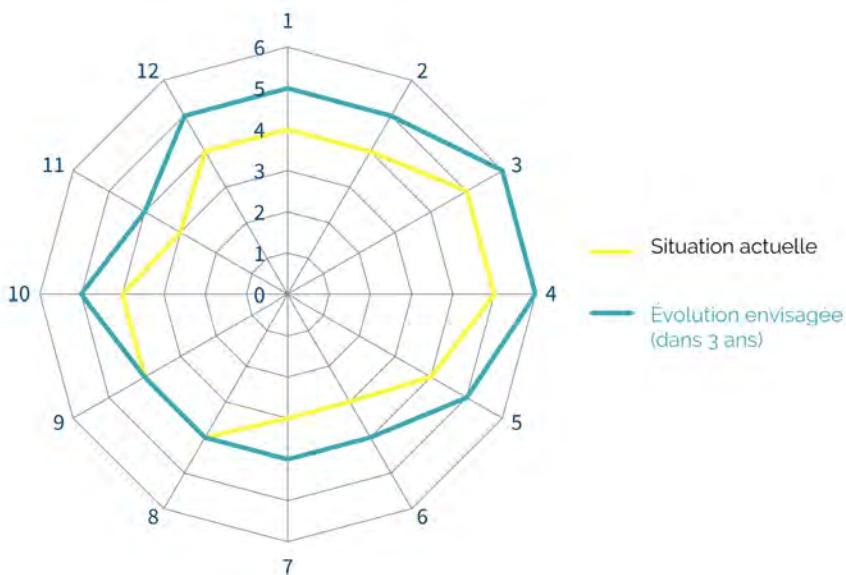


Figure 88 : L'évaluation mesure les progrès espérés dans les trois années à venir.

Source des données : WGI, 2018.

Les travaux en cours, destinés à être présentés au 9<sup>e</sup> Forum mondial de l'eau à Dakar en 2022 concernent l'étape la plus délicate de la démarche : comment peut-on objectiver le lien, perçu par tous de façon empirique, entre une bonne gouvernance, non plus évaluée comme une fin en soi, et les résultats obtenus ? Par exemple, a-t-on, par des démarches objectives d'évaluation, l'indication concrète que les eaux des territoires pourvus d'instances de bassin dédiées seraient, toutes choses égales par ailleurs, de meilleure qualité, mieux gérées quantitativement, que les territoires qui en sont dépourvus ? Les pays disposant de législations anti-corruption efficaces attirent-ils réellement plus de fonds et ceux-ci sont-ils mieux employés ? Toute la difficulté est bien entendu, au-delà du temps nécessaire pour que les effets des politiques se fassent sentir, dans la définition de « toutes choses égales par ailleurs », car les choses ne sont jamais égales.

## 9.3. La coopération décentralisée peut faciliter le renforcement des capacités locales

Comme le montrent les études du *Development Partner Working Group on Decentralisation & Local Governance* (DeLoG)<sup>133</sup> sur la décentralisation et la gouvernance locale, en particulier en Afrique, la décentralisation est un facteur de progrès. Le secteur de l'eau est directement concerné et l'on comprend que la responsabilité et les moyens, notamment pour le financement, dans les mains des élus locaux, facilitent la mise en place de services plus efficaces et plus proches des attentes des usagers.

Une attention particulière et des appuis de différentes natures en ce sens auprès des pays où cette décentralisation n'est pas ou peu effective aujourd'hui constituent des gages pour des progrès plus rapides vers l'atteinte des ODD. Les acteurs locaux devront être soutenus et accompagnés dans l'élaboration, la mise en place et la gestion des plans et des infrastructures nécessaires, notamment à travers des programmes de renforcement de leurs capacités. De tels programmes constituent une condition nécessaire, même si elle n'est pas à elle seule suffisante, pour assurer dans les meilleures conditions la pérennité du fonctionnement des infrastructures mises en place.

La coopération décentralisée connaît un développement considérable et dégage aujourd'hui des moyens significatifs. La mobilisation de la coopération décentralisée présente de grands intérêts. Aujourd'hui, en France, le lien avec l'aide publique au développement reste encore insuffisant. Ces deux mondes, qui s'ignorent bien souvent et ne sont pas exempts de petites rivalités, coexistent parfois sans synergie. Ils connaissent pourtant bien souvent les mêmes défauts :

- l'absence de prise en charge locale de la responsabilité du projet, voire parfois l'inadéquation des solutions apportées aux problèmes par défaut d'écoute ;
- la faiblesse du suivi et des mécanismes de prise de relais permettant d'assurer la pérennité des opérations.

---

<sup>133</sup>. Voir notamment leur *position paper* : [https://www.delog.org/fileadmin/user\\_upload/Publications/DeLoG-HLF-4-Position-Paper.pdf](https://www.delog.org/fileadmin/user_upload/Publications/DeLoG-HLF-4-Position-Paper.pdf)

La coopération décentralisée connaît une souplesse et une réactivité plus grande, une proximité plus forte, une aptitude réelle à contourner les bureaucraties, à expérimenter et à innover<sup>134</sup>. Ses forces de mobilisation humaine sont considérables et sa diversité d'approches et de motivations, loin d'être un handicap, est au contraire une richesse. Elle bute le plus souvent sur les limites mêmes de ses méthodes, très consommatrices de moyens, qui s'essoufflent trop souvent en raison de la fragilité même du bénévolat. Entre un embriagadement qui tuerait toute logique de coopération décentralisée et une dispersion échevelée dont tous les acteurs reconnaissent de plus en plus l'inefficacité, voire le caractère parfois irresponsable, chacun peut comprendre l'utilité de trouver de nouvelles synergies entre ces acteurs.

## 9.4. Agir et soutenir là où c'est le plus difficile : une « ardente obligation »

Les pays développés, si prompts à donner des leçons, sauraient-ils eux-mêmes faire face à l'avalanche de difficultés qui submergent aujourd'hui les pays en développement ? Les moyens manquent, il faudrait accélérer les projets, mais l'argent ne viendra pas tout seul dans le contexte actuel : les dernières décennies l'ont cruellement montré. Il ne suffira pas demain de quelques expériences positives. Il faudra avoir résolu à grande échelle des problèmes dont l'ampleur est croissante.

Comment organiser le développement d'institutions solides et assurer la nécessaire confiance, ce qui demande des générations, et dans le même temps trouver dans l'urgence une dynamique suffisante pour multiplier les moyens mobilisés, pour éviter une aggravation dramatique de la situation et si possible l'améliorer ? À l'évidence, il n'y a pas le temps de tergiverser, pourtant beaucoup de raisons incitent à la plus grande prudence pour assurer le succès et l'efficacité de ce qui est fait.

Les pays en développement affichent une volonté nouvelle de progrès vers une meilleure gouvernance, adaptée à chaque situation, et non imposée selon un modèle universel. Les acteurs internationaux reconnaissent le caractère crucial de ces enjeux, mais s'inquiètent de la faiblesse institutionnelle de leurs interlocuteurs. La société civile et les collectivités locales débordent de bonne volonté, mais ne parviennent pas à sortir de l'expérimentation, parfois aventureuse. Trois signes qui peuvent s'allier pour enrayer les cercles vicieux établis ces vingt dernières années.

La tâche est excessive et les conditions confortables d'un succès assuré sont loin d'être au rendez-vous. Les réticences compréhensibles, mais lourdes de conséquences, des uns ou des autres peuvent suffire à rater ce rendez-vous. Il n'y a pourtant pas d'autre choix que de faire ensemble confiance au processus en cours, aussi imparfait soit-il : l'abandon, la désertion, l'inaction, le doute et l'indifférence seraient à l'évidence suicidaires dans ce genre de circonstances. Accepter les risques, amplifier les moyens mobilisés, travailler ensemble au succès, même partiel, serait aujourd'hui la plus sage des décisions.

---

<sup>134</sup>. Elle n'est pas exempte de dérives (tourisme humanitaire, clientélisme, notamment) : elle est une proie souvent facile et naïve de professionnels peu scrupuleux et son enthousiasme l'expose aux risques de l'ignorance de l'apprenti sorcier, sans toujours bien en peser les conséquences humaines.

# Pour approfondir

## FOCUS

N°13

Les aides et financements internationaux

# N°13 | Les aides et financements internationaux

## 1. Les volumes financiers mobilisés

Si l'on compare les écarts entre les besoins de financement et les disponibilités, on observe que le problème n'est pas propre au secteur de l'eau et que les besoins sont fortement à l'image des populations (Chine, Inde).

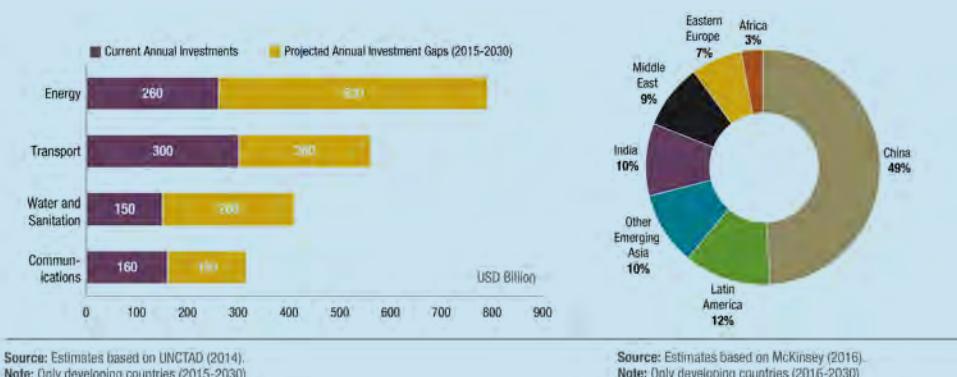


Figure 89 : Besoins de financements pour les ODD. Tirée de Miyamoto, Chiofalo, 2016.

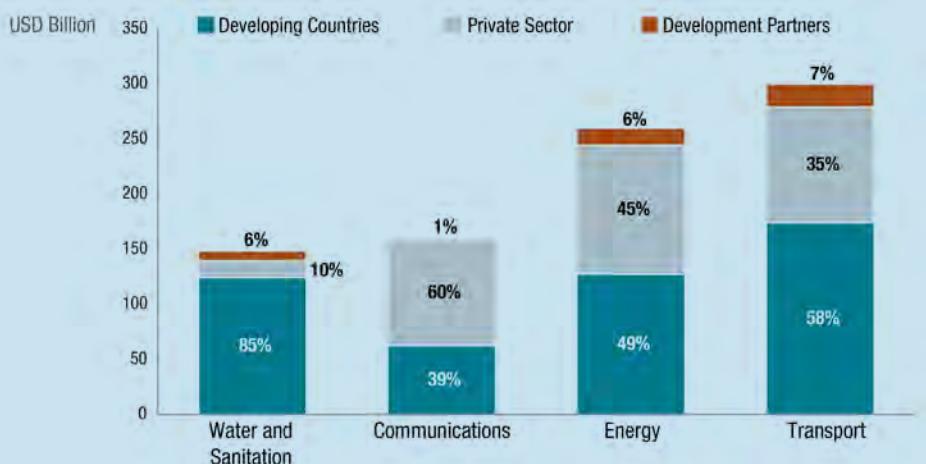


Figure 90 : Le secteur privé, très peu présent dans le financement du secteur de l'eau.

Tirée de Miyamoto, Chiofalo, 2016.

L'aide philanthropique reste à un niveau faible ; elle a sensiblement décrue après une forte croissance (figure 91).

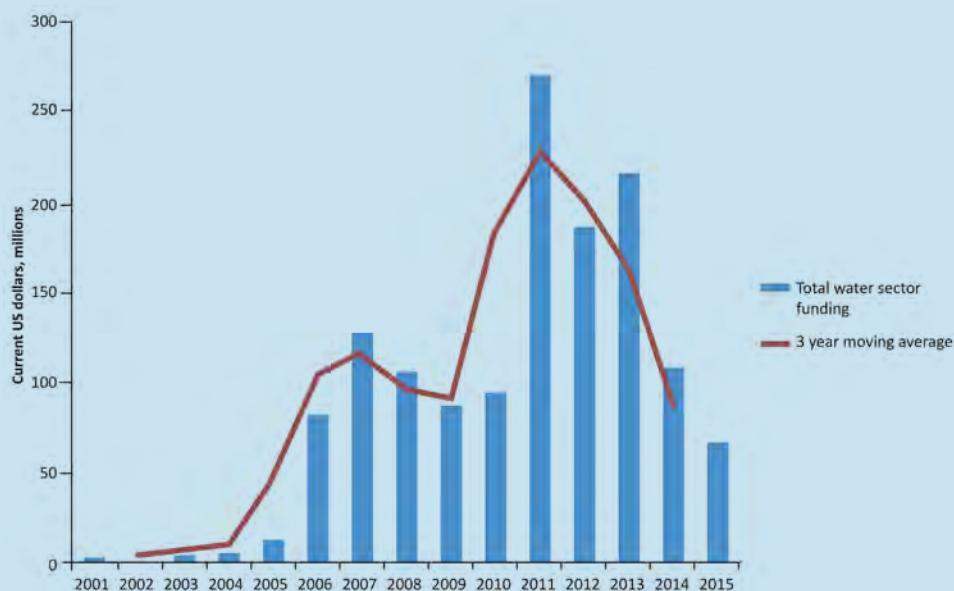


Figure 91 : Les aides des organisations caritatives. Tirée de Winpenny et al., 2016, CC BY 3.0.

## 2. Dons et prêts

Les financements de l'aide publique internationale ou des fonds de mutualisation des risques doivent avoir en tout premier lieu un rôle de garantie facilitant l'implication privée. La difficulté est alors d'en maîtriser les risques dits « moraux » : en garantissant l'opérateur contre le non-respect par l'autorité publique d'une clause d'augmentation de tarif dûment justifiée, n'encourage-t-on pas cette autorité à ne pas y procéder ? La formulation d'un dispositif incitatif mais dépourvu de ce type d'effets pervers est évidemment délicate.

Les aides publiques (dites officielles) au développement (ODA) sont pour l'essentiel des dons (subventions) ou des prêts dits concessionnels (ou bonifiés). Le degré de concessionnalité d'un prêt se mesure à partir de son « élément don » : c'est la différence entre la valeur nominale du prêt et la somme de la valeur actuelle des futurs paiements que devra effectuer l'emprunteur au titre du service de la dette, exprimée en pourcentage de la valeur nominale. Si le taux d'intérêt du crédit est inférieur au taux d'actualisation, la valeur actuelle de la dette est inférieure à sa valeur nominale et la différence correspond à l'élément don (positif) du prêt. Le taux d'actualisation qui sert à calculer la valeur actuelle du prêt est une hypothèse fondamentale dans le calcul de l'élément don. Les taux d'actualisation sont souvent les « taux d'intérêt commerciaux de référence » (TCIR) propres à chaque devise considérée publiés par l'OCDE.

Concrètement, les TCIR moyens sur dix ans sont utilisés pour les crédits dont l'échéance est d'au moins 15 ans et les TCIR moyens sur six mois pour les crédits dont l'échéance est plus courte. En règle générale, un prêt est réputé concessionnel si son élément don est d'au moins 35 %. Cependant, comme indiqué ci-dessous, ce seuil peut être supérieur dans certains cas.

Les financements officiels au développement (OOF) sont les prêts dont les parties de dons sont inférieures au seuil pour être considérés comme concessionnels.

Les ODA peuvent aussi jouer un rôle de transition pour les demandes insolubles, par un mécanisme clair, explicite et décroissant de subvention des tarifs sociaux nécessaires, hors de portée des moyens des acteurs locaux. On trouve un grand nombre d'expériences locales positives où un comité d'usagers a su, à l'échelle d'un village ou d'un quartier, créer une caisse de gestion qui assure le petit équilibre (le plus souvent), parfois le grand équilibre, et peut même dégager des ressources excédentaires financiant

d'autres équipements publics. Ces processus vertueux sont à généraliser mais ne sont pas exclusifs d'un abondement public et leur exemplarité ne doit pas être exploitée pour justifier la faiblesse des moyens publics consacrés au secteur. Certes l'eau peut payer l'eau, mais pas tout de suite et pas en totalité<sup>135</sup>.

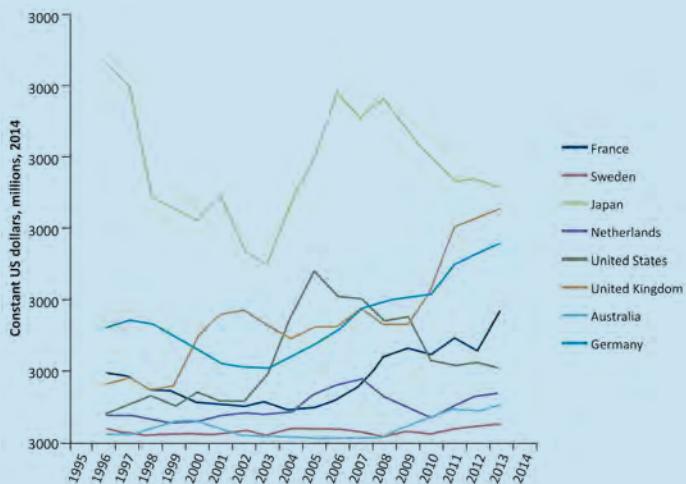
### 3. Qui paie ?

Le tableau 39 présente les aides par donneur : le Japon est largement le premier, mais sa contribution, après une très forte croissance avant l'an 2006, a très fortement diminué ensuite. Les aides des États-Unis ont connu la même évolution, alors que dans le même temps la Grande-Bretagne s'est hissée au 2<sup>e</sup> rang, devant l'Allemagne.

**Tableau 37 : Aides bilatérales distribuées par les dix principaux donneurs.**

Tableau traduit, version originale issue de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY-SA 3.0.

Pays du CAD	Classés par total de montants donnés	Engagements moyens annuels d'aide publique au développement (\$, 1995-2014)
Japon	1	1,30 milliards
Allemagne	2	711 milliards
États-Unis	3	494 milliards
France	4	413 milliards
Pays-Bas	5	233 milliards
Espagne	6	210 milliards
Royaume-Uni	7	142 milliards
Danemark	8	142 milliards
Corée du Sud	9	122 milliards
Suisse	10	96 milliards



**Figure 92 : Aides bilatérales distribuées par les dix principaux donneurs.** Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0.

135. C'est le cas en quasi-totalité en France par le biais des agences de l'eau : elles apportent d'importantes subventions, mais celles-ci, au lieu d'être alimentées par l'impôt, le sont à partir d'une mutualisation de taxes prélevées elles-mêmes sur la facture d'eau. Mais il ne faut pas oublier le haut niveau et l'état déjà très stable du patrimoine des équipements disponibles, ainsi que les conditions économiques qui le permettent. De plus, la montée en puissance de ce dispositif a malgré tout pris 30 ans avant de se stabiliser à un niveau satisfaisant.

Les institutions internationales représentent un tiers des engagements totaux et parmi elles, la Banque mondiale a récemment pris une place prépondérante. Ce sont elles qui apportent la plus grande part, en toute logique, des OOF (financement officiel du développement).

Tableau 38 : Les aides des organisations multilatérales. Tableau traduit depuis Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0.

Organisations multilatérales	Classement par total des montants donnés	Engagements moyens d'aide publique au développement (\$, 1995-2014)
Association internationale de développement	1	920 millions
Institutions de l'Union européenne	2	503 millions
Fonds spéciaux de la Banque asiatique de développement	3	234 millions
Fonds africain de développement	4	212 millions
Banque interaméricaine de développement	5	120 millions
Banque islamique de développement	6	85 millions
Fonds arabes	7	82 millions
UNICEF	8	35 millions
Fonds OREP pour le développement international	9	76 millions
Fonds pour l'environnement mondial	10	58 millions

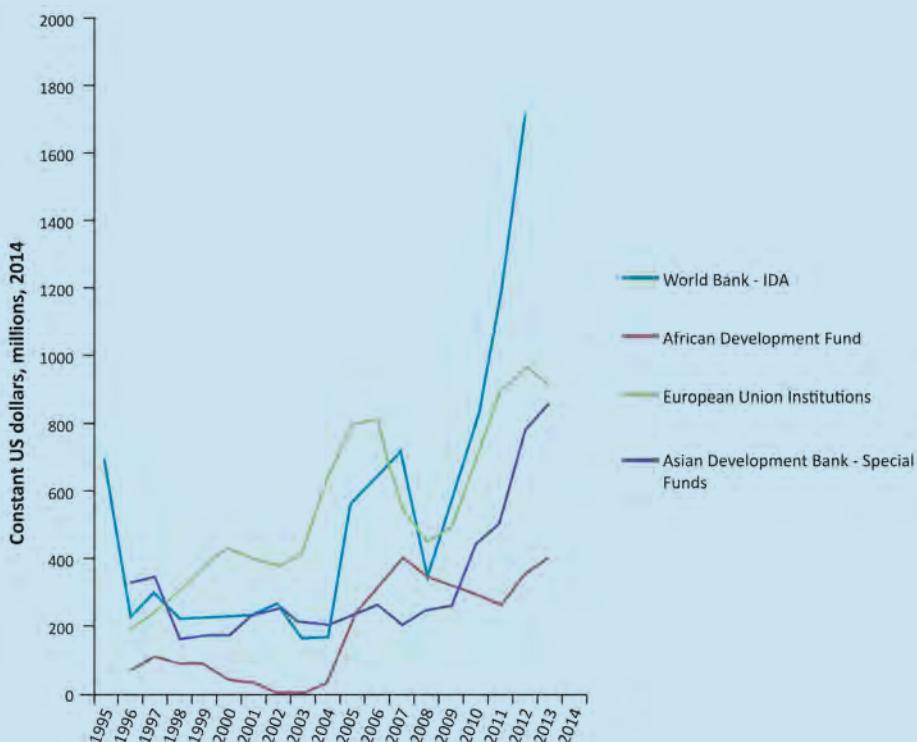
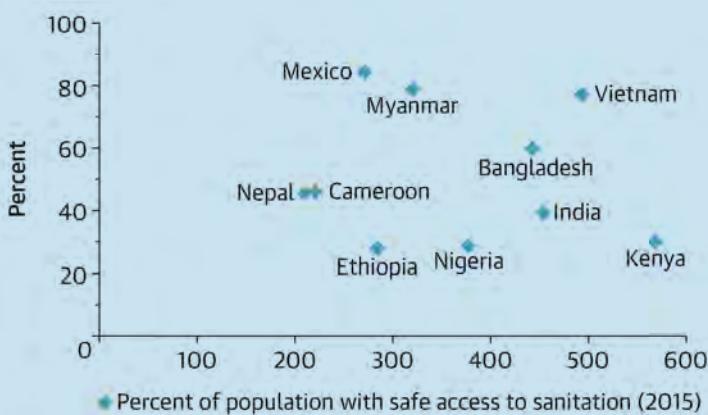
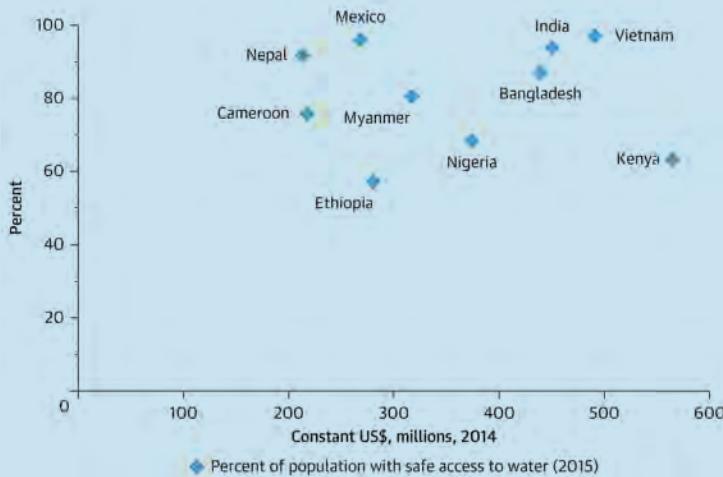


Figure 93 : Les aides des organisations multilatérales. Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0.

#### 4. Qui reçoit ?

Ces aides vont-elles là où les besoins sont les plus importants, là où elles ont le plus de chances d'être efficaces, ou bien là où l'intérêt géostratégique des pays donneurs est le plus fort ?

Les principaux pays bénéficiaires des aides se sont sensiblement approchés des objectifs du millénaire (OMD) pour l'eau potable, mais les résultats concernant l'assainissement sont, comme dans bien d'autres pays, largement moins satisfaisants (figure 94). Une étude (Strawson, 2015) identifie les 45 pays qui présentent le plus de besoins de financement (en croisant les ressources disponibles et la situation de l'eau potable et de l'assainissement). Elle constate que seulement la moitié (22) de ceux-ci se situent dans la liste des 45 pays bénéficiaires d'aides internationales et bilatérales. Elle conclut poliment : « *there is still significant scope for the international community to improve the targeting of its ODA* ».



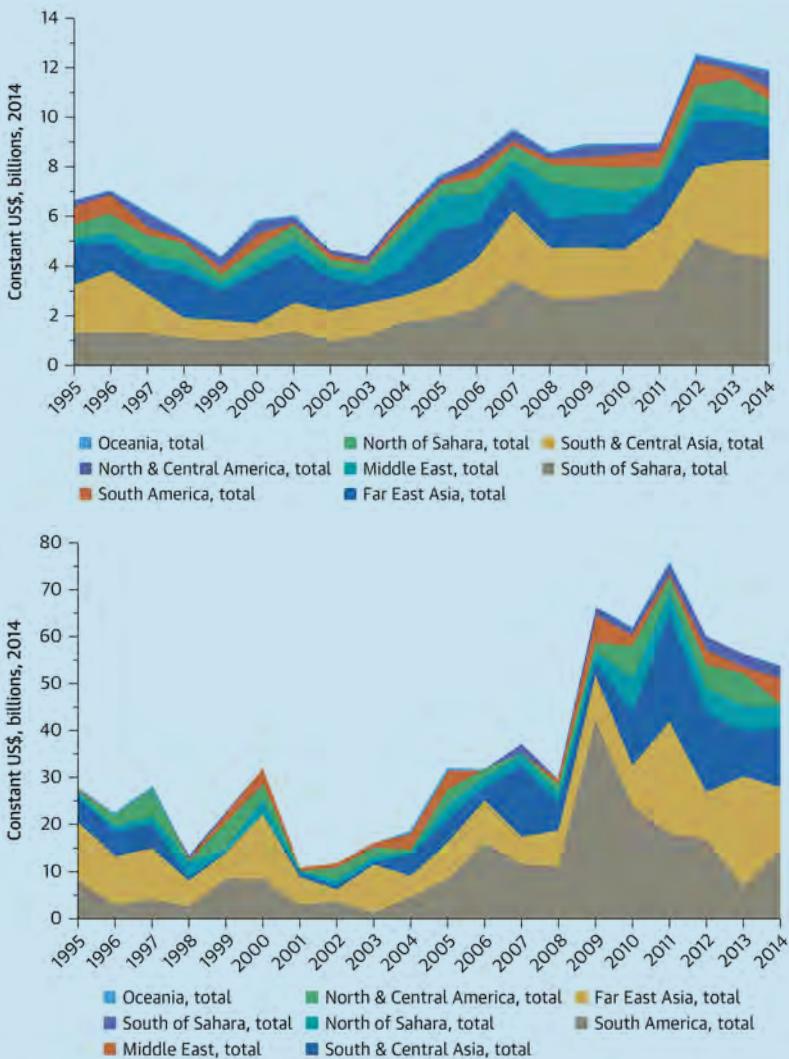
Source: OECD DAC database and JMP database ([www.wssinfo.org](http://www.wssinfo.org)).

Note: ODA = official development assistance.

Figure 94 : Situation en 2015 au regard des OMD pour l'eau potable (en haut) et pour l'assainissement (en bas) des dix pays ayant reçu le plus d'aides ces vingt dernières années.

Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0.

L'étude de la Banque mondiale sur laquelle nous nous appuyons ici (Winpenny *et al.*, 2016) relève une forte différence dans la distribution géographique des pays bénéficiaires selon la nature des instruments de financement : l'Afrique sub-saharienne (29 % du total) et l'Asie du Sud et centrale (21 %) sont les principaux bénéficiaires des aides au développement (ODA). En revanche l'Afrique sub-saharienne est beaucoup moins bénéficiaire de financements non concessionnels (OOF), alors que ces aides ont fortement augmenté en Extrême-Orient (figure 95).



Source: OECD DAC database, accessed October 25, 2016.

Note: OOF = other official flows.

**Figure 95 : Répartition régionale des aides d'assistance au développement (en haut) et des autres financements (en bas). Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0.**



# Bibliographie

ABBAS, A.T., 1984. *The Ganges Water Dispute*. Dhaka : University Press Limited.

ABU-ALNAEEMA, Madhat Farouk, YUSOFF, Ismail, FATT NG, Tham, ALIAS, Yatimah et RAKSMEY, May, 2018. Assessment of groundwater salinity and quality in Gaza coastal aquifer, Gaza Strip, Palestine: An integrated statistical, geostatistical and hydrogeochemical approaches study. *Science of the Total Environment* [en ligne], 2018, vol. 615, pp. 972-989. Disponible sur <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.320>.

ACCC, 2020. *Murray-Darling Basin water markets inquiry: interim report* [en ligne]. Rapport 06/20\_1656 : Disponible sur <https://www.accc.gov.au/system/files/Murray-Darling%20Basin%20inquiry%20-%20interim%20report.pdf>

AFD, 2018. *L'eau : un défi mondial* [en ligne]. Disponible sur [https://ideas4development.org/uploads/2018/03/ID4D\\_Livret-Eau.pdf](https://ideas4development.org/uploads/2018/03/ID4D_Livret-Eau.pdf)

ALBUQUERQUE, Catarina de et ROAF, Virginia, 2012. *Droit au but : bonnes pratiques de réalisation des droits de l'homme et de l'assainissement* [en ligne]. Lisbonne : Conseil mondial de l'eau. Disponible sur [https://www.ohchr.org/Documents/Issues/Water/BookonGoodPractices\\_fr.pdf](https://www.ohchr.org/Documents/Issues/Water/BookonGoodPractices_fr.pdf)

ALLAIN, Sophie, 2012. Négocier l'eau comme un bien commun à travers la planification concertée de bassin. *Natures Sciences Sociétés* [en ligne], 2012, vol. 20, n° 1, pp. 52-65. Disponible sur : <https://doi.org/10.1051/nss/2011132>.

ALLAN, John, 1998. Virtual water: a strategic resource, global solutions to regional deficits. *Ground Water*, 1998, vol. 36, n° 4.

ANDERSON, Terry Lee et SNYDER, Pamela S., 1997. *Water Markets. Priming the Invisible Pump*. Washington D.C. : CATO Institute.

ANDRES, Luis A., THIBERT, Michael, LOMBANA CORDOBA, Camilo, DANILENKO, Alexander V., JOSEPH, George et BORJA-VEGA, Christian, 2019. *Doing more with less: smarter subsidies for water and sanitation* [en ligne]. Washington D.C. : Banque mondiale. Disponible sur <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/smarter-subsidies-for-water-supply-and-sanitation>

ASTEE, collectif (éd.), 2013. *Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques - pourquoi ? comment ?* [en ligne]. Paris : ASTEE. Disponible sur <https://www.astee.org/publications/>

ASTEE, collectif, 2018. *Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques - pour qui ? pour quels bénéfices ?* [en ligne]. Paris : ASTEE. Disponible sur <https://www.astee.org/publications/>

AURELI, Alice et PURI, S. (éd.), 2009. *Atlas of transboundary aquifers: Global maps, regional cooperation and local inventories* [en ligne]. UNESCO. Disponible sur <https://isarm.org/sites/default/files/resources/files/2%20Atlas%20of%20TBA.pdf>

AYPHASSORHO, Hugues, BERTRAND, Nathalie, MITTEAULT, François, PUJOL, Charles, ROLIN, Dominique et SALLENAVE, Michel, 2020. *Changement climatique, eau, agriculture : quelles trajectoires d'ici 2050 ?* [en ligne]. Rapport n°012819-01. Paris : CGEDD-CGAAER. Disponible sur [http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/012819-01\\_rapport-publie\\_cle5e145b-1.pdf](http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/012819-01_rapport-publie_cle5e145b-1.pdf)

BANQUE MONDIALE, 2016. *Poverty Overview* [en ligne]. Banque mondiale. Disponible sur <https://www.banquemonde.org/fr/topic/poverty/overview>

BARLES, Sabine, 2005. Experts contre experts : les champs d'épandage de la ville de Paris dans les années 1870. *Histoire urbaine*, 2005, vol. 3, n° 14, pp. 65-80.

BARRAQUÉ, Bernard et ROCHE, Pierre-Alain (éd.), 2010. *Peurs et plaisirs de l'eau*. Paris : Hermann.

BARRAQUÉ, Bernard, 2018. Compteurs d'eau et tarifs en France : enjeux passés et actuels. In: BARRAQUÉ, Bernard (éd.). *Gestion durable de l'eau urbaine* [en ligne]. Paris : Quae. pp. 171-192. Disponible sur <https://books.openedition.org/quae/19551?lang=fr>

BAUER, Carl J., 1998. Slippery Property Rights: Multiple Water Uses and the Neoliberal Model in Chile. *Natural Resources Journal*, 1998, vol. 38, n° 1.

BAUER, Carl J., 2010. Market Approaches to Water Allocation: Lessons from Latin America. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 2010, n° 144, pp. 44-49.

BAUER, Stefanie (éd.), 2014. *Beyond Equity: financial Innovations for Social Enterprise Financing*. [en ligne]. New Dehli : GIZ. Disponible sur <https://www.giz.de/en/downloads/giz2014-en-msme-innovations-social-enterprise-financing.pdf>

BERKAMP, Ger, MC CARTNEY, Matthew, DUGAN, Pat, MC NEELY, Jeff et ACREMAN, Mike, 2000. *Dams, Ecosystem Functions and Environmental Restoration* [en ligne]. Le Cap, Afrique du Sud : CMB. Disponible sur <https://acad.carleton.edu/curricular/BIOC/classes/bio252/DamsReport.pdf>

BERZ, Gerhard, 2001. Flood disasters: Lessons from the past - Worries for the future. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, mars 2001, vol. 148, n° 1, pp. 57-58.

BESBES, Mustapha, 2003. *Système aquifère du Sahara septentrional : gestion commune d'un aquifère transfrontalier* [en ligne]. Tunis : OSS. Disponible sur [http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SASS-Etude\\_Reseaux.pdf](http://www.oss-online.org/sites/default/files/publications/OSS-SASS-Etude_Reseaux.pdf)

BOULAY, Anne-Marie, HOEKSTRA, Arjen Y. et VIONNET, Samuel, 2013. Complementarities of water-focused life-cycle assessments and water footprint. *Environmental Science & Technology*, 2013, vol. 47, n° 21.

BOUQUET, Chistian, 2011. Conflits et risques de conflits liés à l'eau en Afrique. *Les Cahiers d'Outre-Mer* [en ligne], 2011, pp. 341-362. Disponible sur <http://doi.org/10.4000/com.6283>.

BRANCHE, Emmanuel, 2017. The multipurpose water uses of hydropower reservoir: The SHARE concept. *C. R. Physique Elsevier*, 2017, n° 18, pp. 469-478. Disponible sur <http://dx.doi.org/10.1016/j.crhy.2017.06.001>.

BROFFERIO, Simona, 2001. *Les conventions relatives à la gestion des bassins versants internationaux. Principes et modalités* [en ligne]. Paris : ENGREF-OIEAU. Disponible sur [https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/34/174378/174378\\_doc.pdf](https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/34/174378/174378_doc.pdf)

BRUNDTLAND, Gro Harlem, 1987. *Notre avenir à tous* [en ligne]. Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU. Disponible sur [https://fr.wikisource.org/wiki/Notre\\_avenir\\_%C3%A0\\_tous\\_-\\_Rapport\\_Brundtland](https://fr.wikisource.org/wiki/Notre_avenir_%C3%A0_tous_-_Rapport_Brundtland)

BUDYKO, Mikhail I., 1969. Effect of solar radiation variation on climate of Earth. *Tellus*, 1969, vol. 21, n° 5, pp. 611. Disponible sur <http://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1969.tb00466.x>.

CAMDESSUS, Michel et WINPENNY, James T. (éd.), 2003. *Financer l'eau pour tous rapport du panel mondial sur le financement des infrastructures de l'eau*. Marseille : Conseil mondial de l'eau.

CANNING, David, RAJA, Sangeeta et YAZBECK, Abdo S., 2015. *La transition démographique de l'Afrique : dividende ou catastrophe ?* [en ligne]. Banque mondiale. Africa Development Forum. Disponible sur <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22036>

CAPONERA, Dante A. et NANNI, Marcella, 2007. *Principles of Water Law and Administration, National and International*. 3<sup>e</sup> édition. Brookfield, Rotterdam : Balkerna.

CAPONERA, Dante A., 1998. Les eaux partagées et le droit international. In: *Congrès international sur l'eau au Liban*, [en ligne]. Kaslik (Liban). 18 juin 1998. Disponible sur [http://www.funredes.org/agua/index\\_fr.htm](http://www.funredes.org/agua/index_fr.htm)

CGDD, 2012. *Doctrine relative à la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur le milieu naturel* [en ligne]. Paris : CGDD. Disponible sur <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Doctrine%20ERC.pdf>

CGDD, 2018. *Milieux humides et aquatiques continentaux* [en ligne]. Paris: programme EFESE (évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques). Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Les%20milieux%20humides%20et%20aquatiques%20continentaux.pdf>

CGDD-CEREMA, 2018. *Évaluation environnementale - Guide d'aide à la définition des mesures ERC* [en ligne]. CGDD. Disponible sur <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Guide%20d%E2%80%99aide%20%C3%A0%20la%20d%C3%A9finition%20des%20mesures%20ERC.pdf>

CGDD-DEB, 2013. *Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur les milieux naturels* [en ligne]. Disponible sur [http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD\\_REFDOC\\_TEMIS\\_0079094](http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD_REFDOC_TEMIS_0079094)

CHAPAGAIN, Ashok Kumar et TICKNER, David, 2012. Water footprint: Help or hindrance? *Water Alternatives*, 2012, vol. 5, n° 3, pp. 563-581.

CHARNEY, Jule Gregory, 1975. Dynamics of deserts and droughts in Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, vol. 101, n° 428.

CHAUMET, Jean-Marc, DELPEUCH, Francis, DORIN, Bruno, GHERSI, Gérard, HUBERT, Bernard, LE COTTY, Tristan, PAILLARD, Sandrine, PETIT, Michel, RASTOIN, Jean-Louis, RONZON, Tévécia et TREYER, Sébastien, 2009. *Agrimonde. Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable*. [en ligne]. Paris : INRA et CIRAD. Disponible sur <https://www.cirad.fr/actualites/toutes-les-actualites/articles/2009/science/resultats-de-la-prospective-agrimonde>

CHIU, Victoria, 2018. Le droit de l'eau en France. *L'encyclopédie de l'environnement* [en ligne]. Disponible sur <https://www.encyclopedie-environnement.org/societe/droit-eau-en-france/>

CMB, 2000. *Barrages et Développement : Un nouveau cadre pour la prise de décision* [en ligne]. Londres : Earthscan. Disponible sur <https://pubs.iied.org/pdfs/9148IIED.pdf>

COLON, Marine, RICHARD, Sophie et ROCHE, Pierre-Alain, 2018. The evolution of water governance in France from the 1960s: disputes as major drivers for radical changes within a consensual framework. In: *The OECD Principles on Water Governance: from policy standards to practice*. Londres : Taylor et Francis. pp. 109-132. Water International.

COMAIR, Fadi Georges, 2018. *Hydro-diplomatie et nexus eau-énergie-alimentation*. Paris : Johanet.

COSGROVE, William J. et RIJSBERMAN, Frank, 2000. *World water vision making water everybody's business*. Londres : Earthscan.

CRED, 2020. *Human cost of disasters: an overview of the last 20 years 2000-2019* [en ligne]. Center for Research on the Epidemiology of Disasters - UN Office for Disaster Risk Reduction. Disponible sur <https://www.unidrr.org/sites/default/files/inline-files/Human%20Cost%20of%20Disasters%202000-2019%20FINAL.pdf>

CURTIS, V. et CAIRNCROSS, S., 2003. Effect of washing hands with soap on diarrhoea risk in the community: a systematic review. *The Lancet Infectious Diseases*, mai 2003, vol. 3, n° 5, pp. 275-281.

DAMBRINE, Fabrice, 2006. *Perspectives de développement de la production hydroélectrique en France* [en ligne]. Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. Rapport Hydro-060315. Disponible sur <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/064000471.pdf>

DAS, Binayak, 2009. *Les ressources en eau de l'Inde, disponibilité, utilisations et problèmes* [en ligne]. Disponible sur <http://base.d-p-h.info/fr/fiches/dph/fiche-dph-7826.html>

DROBRENKO, Bernard et SIRONNEAU, Jacques, 2017. *Le Code de l'eau*. 4<sup>e</sup> édition. Paris : Johanet.

DUFLO, Esther, 2015. *La politique de l'autonomie. Lutter contre la pauvreté (II)*. Paris : Le Seuil. Collection La république des idées.

EMWS, 2011. *Water Services Development Plan* [en ligne]. Durban : Ethekwini Municipality. Disponible sur [http://www.durban.gov.za/City\\_Services/water\\_sanitation/Policies\\_Plans\\_Guidelines/Documents/WSDP2012\\_Approved.pdf](http://www.durban.gov.za/City_Services/water_sanitation/Policies_Plans_Guidelines/Documents/WSDP2012_Approved.pdf)

ERHARD-CASSEGRAIN, Annie et MARGAT, Jean, 1979. *Introduction à l'économie générale de l'eau* [en ligne]. Paris : BRGM - Masson. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/79-SGN-329-HYD.pdf>

EUZEN, Agathe, JEANDEL, Catherine et MOSSERI, Rémy, 2015. *L'eau à découvert*. Paris : éditions du CNRS. Collection À découvert.

FALKENMARK, Malin et LINDH, Gunnar, 1974. How can we cope with the Water Resources Situation by the Year 2050? *Ambio* [en ligne], 1974, vol. 3, n° 3-4. Disponible sur <https://www.jstor.org/stable/4312063>

FALKENMARK, Malin et ROCKSTRÖM, Johan, 2004. *Balancing water for humans and nature the new approach in ecohydrology* [en ligne]. Londres : Earthscan. Disponible sur <http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip0410/2003023956.html>

FAO, 2003. *L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde* [en ligne]. Rome : FAO. Disponible sur <http://www.fao.org/3/j0083f/j0083f00.pdf>

FAO, 2016. *Produire plus avec moins : le maïs, le blé et le riz, guide pour une production céréalière durable* [en ligne]. Rome : FAO. Disponible sur <http://www.fao.org/ag/save-and-grow/fr/index.html>

FAO, 2018. *Guide de référence de l'agriculture intelligente face au climat* [en ligne]. 2<sup>e</sup> édition. Rome : FAO. Disponible sur <http://www.fao.org/3/I7994FR/I7994fr.pdf>

FAO, 2020. *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture : la durabilité en action* [en ligne]. Rome : FAO. Disponible sur <http://www.fao.org/3/ca9231fr/CA9231FR.pdf>

FLAMINIO, Sylvia, 2017. L'eau en Australie : de l'exploitation des ressources à la gestion des milieux ? L'exemple du bassin-versant du Gordon en Tasmanie. *Géoconfluences* [en ligne], février 2017. Disponible sur <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/articles/eau-australie-tasmanie>

FONSECA, Catana, KINGDOM, Bill, DELMON, Victoria et PORIES, Lesley, 2020. *Eau et assainissement : des pistes pour améliorer l'efficacité des investissements publics. Manuel pour les ministres des finances* [en ligne]. États-Unis : Sanitation and Water for All. Disponible sur <https://www.sanitationandwaterforall.org/sites/default/files/2020-08/Financial%20Handbook-Digital-FR.pdf>

FORRAY, Nicolas et ROCHE, Pierre-Alain, 2015. *Mission pour un projet de territoire du bassin du Tescou* [en ligne]. CGEDD. Disponible sur <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/154000052.pdf>

FOUCAULT, Alain, 2016. *Climatologie et paléoclimatologie*. 2<sup>e</sup> édition. Sciences SUP.

FRÉCAULT, René et PAGNEY, Pierre, 1983. *Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial*. Masson.

GALIBERT, Thierry, ROCHE, Pierre-Alain, ACAR, Bruno et SCARBONCHI, François, 2018. *Évaluation des conséquences de la mise en oeuvre des compétences dans le domaine de la gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations (GEMAPI)* [en ligne]. Rapport n °01245-01. Paris : CGEDD-IGA. Disponible sur <https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Affaires-0010932>

GRÖNWALL, Jenny, 2020. *Large dams and human rights obligations: the case of Pansheshwar Multipurpose Project on the border between India and Nepal* [en ligne]. Stockholm : SIWI. ICWC Report. Disponible sur [https://www.siwi.org/wp-content/uploads/2020/07/Report\\_ICWC\\_HRBA\\_2020\\_WEB.pdf](https://www.siwi.org/wp-content/uploads/2020/07/Report_ICWC_HRBA_2020_WEB.pdf)

GROOTEN, Monique et ALMOND, Rosamund E.A. (éd), 2018. *Rapport WWF Planète Vivante 2018 : soyons ambitieux - Synthèse* [en ligne]. Gland, Suisse : WWF. Disponible sur [https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2018-10/20181030\\_Rapport\\_Planete\\_Vivante\\_2018\\_synthese.pdf](https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2018-10/20181030_Rapport_Planete_Vivante_2018_synthese.pdf)

GRPBA (éd.), 2020. *Bangladesh OBA sanitation microfinance program* [en ligne]. Washington D.C. : Banque mondiale. The Global Partnership for Results-Based Approach. Disponible sur <https://www.gprba.org/sites/gpoba/files/publication/downloads/2020-09/Bangladesh-sanitation-GPRBA-case-study.pdf>

GUILLÉN, Rubén Chávez, 2016. L'approvisionnement en eau dans les mégalopoles : le cas de la région métropolitaine de Mexico. In: *Water, megacities and global change : portraits of 15 emblematic cities of the world* [en ligne]. ARCEAU-UNESCO. Disponible sur <http://eaumega.org/wp-content/uploads/2016/05/FR-Mexico-monographie.pdf>

GUTERRES, António, 2019. *Point sur les objectifs de développement durable. Rapport du secrétaire général des Nations Unies* [en ligne]. Conseil économique des Nations Unies. Disponible sur <https://undocs.org/E/2019/68>

HARDING, Garrett, 1968. The tragedy of the commons. *Science*, 1968, vol. 162, n° 3859, pp. 1243-1248.

HILLEL, Daniel, 1987. Unstable flow in layered soils: A review. *Hydrological Processes*, mars 1987, vol. 1, n° 2.

HODGSON, Geoffrey Martin, 1989. *Economics and Institutions: A Manifesto for a Modern Institutional Economics*. Cambridge : John Wiley & Sons. Polity.

HODGSON, Geoffrey Martin, 1998. The Approach of Institutional Economics. *Journal of Economic Literature*, 1998, vol. 36, n° 1, pp. 166-192.

HOEKSTRA, Arjen Y. et MEKONNEN, Mesfin M., 2012. The Water Footprint of Humanity. GLEICK, Peter H. (éd.), *PNAS* [en ligne], 2012, vol. 109, n° 9, pp. 3232-3237. Disponible sur <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>.

HORNE, James, 2018. Water security in Australia. In: TORTAJADA, Cecilia et WWC (éd.), *Global Water Security. Lessons learnt and Long-Term Implications*. Singapour : Springer. Water Resources Development and management.

HUTTON, Guy, HALLER, L. et BARTRAM, J., 2007. Global cost-benefit analysis of water supply and sanitation. *Journal of Water and Health*, 2007, vol. 5, n° 4, pp. 481-502.

HUTTON, Guy et VARUGHESE, Mili, 2016. *The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene* [en ligne]. Banque Mondiale. Water and Sanitation Program. Technical paper. Disponible sur <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23681>

- HUTTON, Guy, 2012. *Global costs and benefits of drinking-water supply and sanitation interventions to reach the MDG targets and universal Coverage* [en ligne]. OMS. Disponible sur [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/2012/globalcosts.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2012/globalcosts.pdf)
- IWMI, 1999. *World Water and Food and Rural Development in 2025*. Colombo (Sri Lanka) : IWMI.
- JMP, 2015. *1990-2015 : Progrès en matière d'assainissement et d'eau potable : mise à jour 2015 et évaluation des OMD* [en ligne]. OMS-UNICEF. Disponible sur <https://washdata.org/report/jmp-2015-report-fr>
- JMP, 2017a. *WASH dans l'agenda 2030 : les nouveaux indicateurs mondiaux pour l'eau, l'assainissement et l'hygiène* [en ligne]. OMS-UNICEF. Disponible sur <https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiIqa-g9KX-tAhXzA2MBHeHqCROQFjABegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fdata.unicef.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F07%2FJMP-2017-wash-in-the-2030-agenda-fr.pdf&usg=AOvVaw3ehCHsigUSLPgm2Y2LQFI3>
- JMP, 2017b. *Des services d'approvisionnement en eau potable gérés en toute sécurité – rapport thématique sur l'eau potable* [en ligne]. OMS-UNICEF. Disponible sur <https://washdata.org/report/jmp-tr-smdw-fr>
- JMP, 2019. *Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène des ménages 2000-2017 : gros plan sur les inégalités* [en ligne]. New-York : OMS-UNICEF. Disponible sur [http://awareness.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/jmp-report-2019/fr/](http://awareness.who.int/water_sanitation_health/publications/jmp-report-2019/fr/)
- JOZAN, Raphaël, 2010. *Les débordements de la mer d'Aral : qu'apporte la sociologie de l'acteur-réseau à la sociologie du développement ?* Marne-la-Vallée : École nationale des ponts et chaussées.
- KABBAJ, Omar, 2001. Le défi du développement de l'Afrique au début du 21<sup>e</sup> siècle. *L'Afrique en chantier*, mai 2001, n° 7.
- KUPER, Marcel, TONNEAU, Jean-Philippe et BONNEVAL, Pierre, 2002. *L'Office du Niger, grenier à riz du Mali*. Paris : CIRAD/Karthala.
- LAIGNEAU, Patrick, FORMIGA-JOHNSON, Rosa Maria et BARRAQUÉ, Bernard, 2018. Les agences de l'eau au Brésil et en France : les défis d'une gestion de l'eau en tant que bien commun à l'échelle des bassins versants. *Responsabilité et environnement* [en ligne], octobre 2018, n° 92. Disponible sur <http://www.annales.org/re/2018/re92/2018-10-11.pdf>
- LAMAGAT, Jean-Pierre et BADER, Jean-Pierre, 2003. Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal. Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs. In: *Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur la Gestion Intégrée de l'Eau au Sein d'un Bassin Versant* [en ligne]. Montpellier : CIRAD. pp. 14. Disponible sur [http://hal.cirad.fr/file/index/docid/178260/filename/Lamagat\\_Bader.pdf](http://hal.cirad.fr/file/index/docid/178260/filename/Lamagat_Bader.pdf)
- LASSERRE, Frédéric, 2003. *L'eau, enjeu mondial : géopolitique du partage de l'eau*. Paris : Le Serpent à Plumes. Collection Essais/documents.

LAVENUS, Raphaëlle, FRADET, Juliette et CHAZOT, Sébastien, 2016. *Gestion des ressources en eau souterraines comme biens communs* [en ligne]. Note technique n°18. Paris : AFD. Disponible sur <https://www.afd.fr/fr/ressources/gestion-des-ressources-en-eau-souterraines-comme-biens-communs>

LE COQ, Jean-François, 2017. *Vers une analyse des dynamiques institutionnelles pour le développement rural et les services environnementaux dans les pays du Sud* [en ligne]. Habilitation à diriger des thèses. Université de Toulouse Jean Jaurès. Disponible sur <https://agritrop.cirad.fr/587040/1/HDR%20JFLC%20-%20complet%202017%2009%2025%20FINALdocx.pdf>

LERIDON, Henri et MARSILY, Ghislain de (éd.), 2011. *Démographie, climat et alimentation mondiale* [en ligne]. Académie des Sciences et EDP Sciences. Rapport sur la science et la technologie. Disponible sur <https://www.yumpu.com/fr/document/view/5141037/demographie-climat-et-alimentation-mondiale-bibsciencesorg>

LÉRIDON, Henri, 2020. Population mondiale : vers une explosion ou une implosion ? INED Revue population et sociétés, 2020, n° 573, pp. 1-4.

MACHARD DE GRAMONT, Hubert, NOËL, Coralie, OLIVER, Jean-Louis, PENNEQUIN, Didier, RAMA, Martina et STEPHAN, Raya Marina, 2010. *Vers une gestion concertée des aquifères transfrontaliers : guide méthodologique*. Paris : AFD. Collection À savoir, n°3.

MAHÉ, Gilles et OLIVRY, Jean-Claude, 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest de 1951 à 1989. Sécheresse, 1995, vol. 6.

MAKSIMOVIC, Čedo, TEJADA-Guibert, José Alberto, GERMON, Thierry et ROCHE, Pierre-Alain (éd.), 2001. *Les nouvelles frontières de la gestion urbaine de l'eau impasse ou espoir ?* Paris : Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées.

MALLEY, J. (éd.), 2019. *Changement climatique et terres émergées : rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres* [en ligne]. GIEC. Disponible sur [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCl\\_SPM\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCl_SPM_fr.pdf)

MALTHUS, Thomas, 1798. *An Essay on the Principle of Population, as it Affects the Future Improvement of Society with Remarks on the Speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and Other Writers*. Première édition. Londres : J. Johnson.

MANNAKKARA, Sandeeka, WILKINSON, Suzanne et POTANGAROA, Regan, 2018. *Resilient Post Disaster Recovery through Building Back Better*. Londres : Routledge Taylor & Francis Group.

MARGAT, Jean, 1993. *Les ressources en eau : conception, évaluation, cartographie, comptabilité* [en ligne]. Orléans : BRGM. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-37267-FR.pdf>

MARGAT, Jean, 2008. *Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde* [en ligne]. Paris-Orléans : BRGM-UNESCO. Disponible sur [http://www.hydrologie.org/BIB/Publ\\_UNESCO/SOG\\_1598\\_70A.pdf](http://www.hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SOG_1598_70A.pdf)

MARIN, Philippe, 2007. *Partenariats public-privé pour les services d'eau urbains. Retour sur quinze années d'expériences dans les pays en développement* [en ligne]. Disponible sur <http://www.h2o.net/enjeux-financements/les-ppp-pour-les-services-d-eau-urbains.htm>

MARSILY, Ghislain de (éd.), 2005. *Eaux continentales*. Colloque tenu à l'Académie des sciences de Paris, du 15 au 17 septembre 2003. Paris, Amsterdam : Académie des sciences, Elsevier.

MARSILY, Ghislain de, 2009. *L'eau, un trésor en partage*. Paris : Dunod.

MATHYS, Alain et CHAMBOLLE, Thierry, 1999. Améliorer l'accès à l'eau et à l'assainissement des populations pauvres. *PCM-Le Pont*, 1999, n°11, 1999.

MBALO, Doreen et ROSSMANN, Regina, 2019. *Toilets on discount! - Sharing GIZ's experience with accelerating access to sanitation through household toilet subsidies* [en ligne]. GIZ. Disponible sur [https://www.susana.org/\\_resources/documents/default/3-3748-7-1581496562.pdf](https://www.susana.org/_resources/documents/default/3-3748-7-1581496562.pdf)

MDBA, 2017. *Basin plan evaluation* [en ligne]. Canberra, Australie : MDBA. Disponible sur <https://www.mdba.gov.au/sites/default/files/pubs/BPE-report-2017.pdf>

MDBA, 2020. 39/20 : *Murray-Darling Basin Authority Annual Report 2019-20* [en ligne]. Canberra, Australie : MDBA. Disponible sur <https://www.mdba.gov.au/publications/mdba-reports/mdba-annual-report>

MEADOWS, Donella H., MEADOWS, Dennis L., RANDERS, Jorgen et BEHRENS, William W., 1972. *The Limits to Growth*. New-York : Universe Books.

MEUBLAT, Guy, 2001. La rénovation des politiques de l'eau dans les pays du Sud. In: *Les nouvelles politiques de l'eau, enjeux urbains, ruraux, régionaux*. Vendôme : Presses universitaires de France.

MISONNE, Delphine, 2018. La définition juridique des biens communs environnementaux. *Responsabilité & Environnement*, octobre 2018, n° 92.

MIYAMOTO, Kaori et CHIOFALO, Emilio, 2016. *Official development finance for infrastructure, with a special focus on multilateral development banks* [en ligne]. Paris : OCDE. OECD Development Cooperation Working Papers n°30. Disponible sur [https://read.oecd-ilibrary.org/development/official-development-finance-for-infrastructure\\_9e93790e-en#page1](https://read.oecd-ilibrary.org/development/official-development-finance-for-infrastructure_9e93790e-en#page1)

NDIAYE, Aram Ngom, 2017. Le cas de l'OMVS. In: *Prendre des mesures au sein des bassins transfrontières et réduire les impacts sur la santé : Atelier International consacré à la pénurie d'eau* [en ligne]. Genève : UNECE, décembre 2017. Disponible sur [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2017/WAT/12Dec\\_11-12\\_Scarcity\\_WS/presentations/S2-3\\_AramNgomNdiaye\\_Ate-leir\\_UNECE\\_OMVS\\_11\\_et\\_12\\_D%C3%A9cembre\\_2017.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2017/WAT/12Dec_11-12_Scarcity_WS/presentations/S2-3_AramNgomNdiaye_Ate-leir_UNECE_OMVS_11_et_12_D%C3%A9cembre_2017.pdf)

OCDE (éd.), 2015. *Changement climatique, eau et agriculture* [en ligne]. OCDE. Disponible sur <https://www.oecd.org/fr/publications/changement-climatique-eau-et-agriculture-9789264235076-fr.htm>

OCDE, 2020. *Building Back Better: A Sustainable, Resilient Recovery after COVID-19* [en ligne]. Paris : OCDE. Disponible sur [https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=133\\_133639-s08q2ridhf&title=Building-back-better-\\_A-sustainable-resilient-recovery-after-Covid-19](https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=133_133639-s08q2ridhf&title=Building-back-better-_A-sustainable-resilient-recovery-after-Covid-19)

OLIVER, Jean-Louis, 2018. Les textes de référence pour la coopération hydrique dans les bassins transfrontaliers. In: *L'hydrodiplomatie et le changement climatique pour la paix en Mésopotamie : cas du bassin du Tigre et de l'Euphrate* [en ligne]. Sénat, Paris. 10 décembre 2018. pp. 6. Disponible sur <http://academie-eau.org/fr/communications-75.html>

OMS et UNICEF (éd.), 2013. *Annual report on WASH* [en ligne]. Disponible sur <https://washdata.org/report/jmp-2013-annual-report>

OMS, 2014. *Statistiques sanitaires mondiales 2012* [en ligne]. Disponible sur [https://www.who.int/gho/publications/world\\_health\\_statistics/2014/fr/](https://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2014/fr/)

OMS, 2017. *Plus sain, plus juste, plus sûr : l'itinéraire de la santé dans le monde, 2007–2017* [en ligne]. Genève : OMS. Disponible sur <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259203/9789242512366-fre.pdf;jsessionid=291E4BCBE41COBB5945ECAA8221C60D8?sequence=1>

OMS, 2019. *Rapport sur le paludisme dans le monde* [en ligne]. Genève : OMS. Disponible sur <https://www.who.int/malaria/publications/world-malaria-report-2019/report/fr/>

ONUDI-CIPH, 2016. *Rapport mondial sur le développement de la petite hydraulique dans le monde* [en ligne]. Vienne, Hangzhou. Disponible sur [www.smallhydroworld.org](http://www.smallhydroworld.org)

OSS, 2020. *L'eau dans nos régions* [en ligne]. Tunis : OSS. Disponible sur [www.oss-online.org/wikoss/moneau/fr](http://www.oss-online.org/wikoss/moneau/fr)

OSTROM, Elinor et BAECHLER, Laurent, 2010. *Gouvernance des biens communs pour une nouvelle approche des ressources naturelles*. Bruxelles : De Boeck Supérieur. Planète en jeu.

OSTROM, Elinor, 1990. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press.

OUANOUKI, Benalia et KETTAB, Ahmed, 2015. *Étude prospective de la demande en eau et de son impact sur le développement des hauts plateaux algériens*. Colloque « Les tensions sur l'eau en Europe et dans le bassin méditerranéen : des crises de l'eau d'ici 2050 ? ». Paris, 7-9 octobre 2015.

PANDEY, Punam, 2012. Revisiting the Politics of the Ganga Water Dispute between India and Bangladesh. *India Quarterly: A Journal of International Affairs*, 2012, vol. 68, pp. 267-281. Disponible sur: <http://doi.org/10.1177/0974928412454605>.

PAYEN, Gérard, 2013. *De l'eau pour tous ! abandonner les idées reçues, affronter les réalités*. Paris : Armand Colin.

PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L. et MC MAHON, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*, 2007, vol. 11, n° 5, pp. 1633-1644.

PETIT, Olivier, 2004. La nouvelle économie des ressources et les marchés de l'eau : une perspective idéologique ? *Vertigo* [en ligne], 2004, vol. 5, n° 2. Disponible sur <http://journals.openedition.org/vertigo/3608>

- PIGRAM, John Joseph James, 1986. *Issues in the management of Australia's water resources*. Melbourne, Australie : Longman Cheshire.
- PNUD, 2006a. *Human Development Report 2006. Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis*. New York : Palgrave Macmillan.
- PNUD, 2006b. *Human development report: power, poverty and the global water crisis*. PNUD.
- PNUD, 2009. *Rapport mondial sur le développement humain 2007-2008*. PNUD.
- PNUD-PNUE, 2006. *Making Progress on environmental Sustainability*. PNUD-PNUE.
- POYDENOT, Anna, 2008. 29 : *Le droit international de l'eau, état des lieux [en ligne]*. CIHEAM. Les notes d'analyse du CIHEAM. Disponible sur [https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ciheam-le\\_droit\\_international\\_de\\_l\\_eau\\_etat\\_des\\_lieux\\_2008.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ciheam-le_droit_international_de_l_eau_etat_des_lieux_2008.pdf)
- PS-EAU, 2017. *Les ODD pour les services d'eau potable et d'assainissement [en ligne]*. 2017. Disponible sur [https://www.pseau.org/outils/ouvrages/pseau\\_les\\_odd\\_pour\\_les\\_services\\_eau\\_et\\_assainissement\\_fr\\_2017.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/pseau_les_odd_pour_les_services_eau_et_assainissement_fr_2017.pdf)
- PS-EAU, 2018. *L'action extérieure des collectivités territoriales pour l'eau et l'assainissement [en ligne]*. 5<sup>e</sup> édition. Montreuil : pS-Eau. Disponible sur [https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ps\\_eau\\_L\\_action\\_exterieure\\_des\\_collectivites\\_territoriales\\_pour\\_l\\_eau\\_et\\_l\\_assainissement\\_2018.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ps_eau_L_action_exterieure_des_collectivites_territoriales_pour_l_eau_et_l_assainissement_2018.pdf)
- PS-EAU, 2020. *L'action extérieure des collectivités territoriales et des agences de l'eau : eau et assainissement. Bilan 2019 [en ligne]*. pS-Eau. Disponible sur [https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ps\\_eau\\_bilan\\_2019\\_AECT\\_2020\\_corrige.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ps_eau_bilan_2019_AECT_2020_corrige.pdf)
- RENAULT, Daniel et WALLENDER, Wesley W., 2000. Nutritional Water Productivity and Diets: From "Crop per Drop" towards: "Nutrition per Drop". *Agricultural Water Management*, 2000, vol. 45, pp. 275-296.
- ROCHE, Pierre-Alain, COLAS-BELCOUR, François, LEFEBVRE, Etienne, REBEILLÉ-BORGELLA, Emmanuel, TANDONNET, Maxime et VIAL, Jean-Claude, 2015. *Propositions pour un plan d'action pour l'eau dans les régions et départements d'outremer et à Saint-Martin [en ligne]*. CGEDD-IGA-CGAAER. Rapport n°009763-01. Disponible sur [https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Affaires-0008611/009763-01\\_rapport-publie.pdf](https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Affaires-0008611/009763-01_rapport-publie.pdf)
- ROCHE, Pierre-Alain, DECAMPS, Henri, VINDIMIAN, Eric, JEAN-PAUL BRAVARD, PENNEQUIN, Didier et BILLEN, Gilles, 2005. Les enjeux de recherche liés à l'application de la directive-cadre européenne sur l'eau. In: *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences [en ligne]*. Paris : Elsevier. pp. 243-267. Geosciences. Disponible sur [https://www.researchgate.net/publication/248548325\\_Les\\_enjeux\\_de\\_recherche\\_liés\\_a\\_la\\_directive-cadre\\_europeenne\\_sur\\_l%27eau](https://www.researchgate.net/publication/248548325_Les_enjeux_de_recherche_liés_a_la_directive-cadre_europeenne_sur_l%27eau)
- ROCHE, Pierre-Alain et FEUILLETTE, Sarah, 2004. L'eau : ressource locale, débat mondial. *Politiques et management public*, 2004, vol. 21, n° 4, pp. 137-153.

ROCHE, Pierre-Alain, GUERBER, Jean-Pierre, NICOL, Jean-Pierre et SIMONI, Marie-Louise, 2016. *Eau potable et assainissement : à quel prix [en ligne]*. CGEDD-IGA. Rapport n° 010151-01. Disponible sur [http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/cgedd/010151-01\\_rapport.pdf](http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/cgedd/010151-01_rapport.pdf)

ROCHE, Pierre-Alain, LE NOUVEAU, Nathalie, VELLUET, Rémi, HÉLARY, Jean-Louis et AUJOLET, Yvan, 2017. *Gestion des eaux pluviales : dix ans pour relever le défi. Volume 1 : synthèse et propositions. Volume 2 : diagnostic détaillé [en ligne]*. CGEDD. Rapport n°010159-01. Disponible sur <https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Affaires-0008967>

ROCHE, Pierre-Alain, MIQUEL, Jacques et GAUME, Eric, 2012. *Hydrologie quantitative processus, modèles et aide à la décision*. Paris, Berlin : Springer. Ingénierie et développement durable.

ROCHE, Pierre-Alain et PAYEN, Gérard, 2012. La performance est l'affaire de tous. In: *Améliorer la performance des services publics d'eau et d'assainissement [en ligne]*. Marseille : ASTEE. Disponible sur <https://www.astee.org/publications/ameliorer-la-performance-des-services-publics-deau-et-dassainissement/>

ROCHE, Pierre-Alain, PERRIN, Frédéric, SAUZEY, Philippe et MÉNORET, Bernard, 2017. *Inondations de mai et juin 2016 dans les bassins moyens de la Loire et de la Seine : retour d'expérience [en ligne]*. CGEDD-IGA. Rapport n°010743-01. Disponible sur <https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Affaires-0009575>

ROCHE, Pierre-Alain et VALIRON, François, 2000. La charte sociale pour l'eau. In: *L'eau au XXIème siècle : de la Vision à l'Action*. Paris : Futuribles.

ROCHE, Pierre-Alain, 2000. L'eau au XXIe siècle : enjeux, conflits, marchés. In: *Ramsès 2001: Les grandes tendances du monde*. Paris : IFRI- Dunod. pp. 79-93.

ROCHE, Pierre-Alain, 2001. Régulation des services d'eau et d'assainissement. In: COHEN, Elie (éd.), *Enchères et gestion publique*. La Documentation Française, pp. 245-262. Conseil d'analyse économique.

ROCHE, Pierre-Alain, 2002a. De Johannesburg à Kyoto, la mobilisation des acteurs français de l'eau. *TSM* [en ligne], 2002, n° 7. Disponible sur <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9608874t/f8.item.r-roche>

ROCHE, Pierre-Alain, 2002b. Les institutions françaises face à la directive-cadre européenne sur l'eau. *Responsabilité & Environnement*, janvier 2002, n° 25, pp. 75-90.

ROCHE, Pierre-Alain, 2003a. L'eau, enjeu vital pour l'Afrique. *Afrique Contemporaine*, janvier 2003, n° 205, pp. 39-75.

ROCHE, Pierre-Alain, 2003b. The Seine-Normandy case study. In: *Water for people - Water for life : The United Nations World Water Development Report* [en ligne]. Paris : Unesco Publishing. Disponible sur <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr1-2003/>

ROCHE, Pierre-Alain, 2005. *The Seine river flooding in the Ile-de-France region : what account is taken of climate change in the decision-making process ?* [en ligne]. OECD Global Forum on Sustainable Development, Development and climate change. Disponible sur <https://www.oecd.org/env/cc/34693080.pdf>.

ROCHE, Pierre-Alain, 2017. Réflexion autour du conflit du barrage de Sivens dans le Tarn. In: *Ecologie politique de l'eau*. Paris : Hermann. pp. 587. Colloque de Cerisy. ISBN 978-2-7056-9414-2.

ROCHE, Pierre-Alain et ZIMMER, Daniel, 2006. Eau, aménagement et usages. In: MARSILY, Ghislain de (éd.), *Les eaux continentales*. Académie des Sciences. Les Ulis : EDP sciences. Rapports sur la science et la technologie n°25.

ROCKSTRÖM, Johan, 1997. *On-farm agrohydrological analysis of the Sahelian yield crisis rainfall partitioning, soil nutrients and water use efficiency of pearl millet*. Stockholm : Natural resources management, department of systems ecology, Stockholm University.

ROCKSTRÖM, Johan, 2015. *Big world, small planet abundance within planetary boundaries*. New Haven, CT, London : Yale University Press.

ROSA, Lorenzo, CHIARELLI, Davide Dianilo, TU, Chengyi, RULLI, Maria Cristina et ODORICO, Paolo d', 2019. Global unsustainable virtual water flows in agricultural trade. *Environmental Research Letters* [en ligne], 2019, vol. 14. Disponible sur <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab4bfc/pdf>

ROSEGRANT, Mark W., CAI, Ximing et CLINE, Sarah A., 2002. *Global Water Outlook to 2025: Adverting an impending Crisis*. Colombo (Sri Lanka), Washington D.C. : IWMI & International Food Policy Research Institute. Food Policy Report.

ROSEGRANT, M.W. et RINGLER, C., 1999. *World water vision scenarios, consequences for food supply, demand, trade, and food security: results from the IMPACT implementation of the world water vision scenario*. Washington D.C. : International Food Policy Research Institute.

ROUX, Albert-Louis, 2002. *Proposition de guide stratégique pour aider à la constitution de commissions internationales inter-états sur les eaux partagées* [en ligne]. Paris : Académie de l'eau - RIOB. Disponible sur [https://www.rioc.org/sites/default/files/IMG/pdf/AcademieRiobGuide\\_fr.pdf](https://www.rioc.org/sites/default/files/IMG/pdf/AcademieRiobGuide_fr.pdf)

RTE, 2020. *Bilan électrique 2019* [en ligne]. Paris. Disponible sur <https://bilan-electrique-2019.rte-france.com/prix-echanges-prix-de-marche-en-europe/>

SACHS, J., SCHMIDT-TRAUB, G., KROLL, C., LAFORTUNE, G., FULLER, G. et WOELM, F., 2020. *Sustainable Development Report 2020. The Sustainable Development Goals and Covid-19* [en ligne]. Cambridge University Press. Disponible sur [https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2020/2020\\_sustainable\\_development\\_report.pdf](https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2020/2020_sustainable_development_report.pdf) Sachs

SAFE WATER ENTREPRISE, 2017. *The untapped potential of decentralized solutions to provide Safe, sustainable drinking water at large scale: The state of the safe water enterprises market* [en ligne]. Disponible sur [https://www.safewaternetwork.org/sites/default/files/Dalberg\\_WaterKioskStudy\\_SectorReport\\_Final.pdf](https://www.safewaternetwork.org/sites/default/files/Dalberg_WaterKioskStudy_SectorReport_Final.pdf)

SAMUELSON, Paul, 1954. The Pure Theory of Public Expenditure. *The Review of Economics and Statistics*, 1954, vol. 36, n° 4, pp. 387-389.

SECKLER, David, AMARASINGHE, Upali, MOLDEN, David, SILVA, Radhika de et BARBER, Randolph, 1998. *World water demand and supply, 1990 to 2025: scenarios and issues* [en ligne]. Colombo (Sri Lanka) : IWMI. Research Report n°19. Disponible sur [https://www.researchgate.net/publication/254383595\\_World\\_water\\_demand\\_and\\_supply\\_1990\\_to\\_2025\\_scenarios\\_and\\_issues](https://www.researchgate.net/publication/254383595_World_water_demand_and_supply_1990_to_2025_scenarios_and_issues)

SERRA-WITTLING, Claire et MOLLE, Bruno, 2017. *Évaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation* [en ligne]. 2017. Disponible sur <http://www.g-eau.fr/index.php/fr/umr-geau/actualites/item/758-etude-irstea-2017-sur-l-evaluation-des-economies-d-eau-potentielles-a-la-parcelle-realisables-par-la-modernisation-des-systemes-d-irrigation-c-serra-wittling-et-b-molle>

SHIKLOMANOV, Igor, Alekseevich, 1998. *World water resources a new appraisal and assessment for the 21st century a summary of the monograph World water resources*. Paris : UNESCO.

SIRONNEAU, Jacques, 1996. *L'eau, nouvel enjeu stratégique mondial* [en ligne]. Paris : Economica. Disponible sur <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3320718z/f16.item.textelimage>

SIRONNEAU, Jacques, 1998. La guerre de l'eau aura-t-elle lieu ? Menaces et enjeux de l'« hydro-politique ». In : In: MARGAT, Jean et TIERCELIN, Jean-Robert (éd.), *L'eau en question. Enjeu du XXI<sup>e</sup> siècle*. Paris : Romillat. pp. 245-295.

SMETS, Henri, 2014. *Les aides pour les dépenses d'eau des ménages*. Paris : Johannet.

SMITH, Adam, 1776. *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations* [en ligne]. Traduction française de Germain Garner, 1881. Disponible sur [http://classiques.uqac.ca/classiques/Smith\\_adam/richesse\\_des\\_nations/livre\\_1/richesse\\_des\\_nations\\_1.pdf](http://classiques.uqac.ca/classiques/Smith_adam/richesse_des_nations/livre_1/richesse_des_nations_1.pdf)

STEWARD, David R., BRUSS, Paul J., YANG, Xiaoying, STAGGENBORG, Scott, APLEY, Michael D. et WELCH, Stephen, 2013. Tapping unsustainable groundwater stores for agricultural production in the High Plains Aquifer of Kansas, projections to 2110. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, vol. 110, n° 37. Disponible sur: <http://doi.org/10.1073/pnas.1220351110>.

STRAWSON, Tim, 2015. *Improving ODA allocation for a post-2015 world: targeting aid to benefit the poorest 20 % of people in developing countries* [en ligne]. New-York : UNESCAP-ECOSOC - Development initiatives. Disponible sur [https://www.un.org/en/ecosoc/newfunct/pdf15/un\\_improving\\_oda\\_allocation\\_for\\_post-2015\\_world.pdf](https://www.un.org/en/ecosoc/newfunct/pdf15/un_improving_oda_allocation_for_post-2015_world.pdf)

STROSSER, Pierre et KUPER, Marcel, 1994. 30 : *Water markets in the Fordwah/Eastern Sadiqa Area: An answer to Perceived Deficiencies in Canal Water Supplies?* [en ligne]. Working paper. Colombo, Sri Lanka. Disponible sur <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.11.6.55.6525&rep=rep1&type=pdf>

STROSSER, pierre et MONTGINOUL, Marielle, 1999. Analyser l'impact des marchés de l'eau. Pour une meilleure prise en compte de la rigidité des systèmes de distribution de l'eau et de l'hétérogénéité spatiale. *Economie rurale* [en ligne], 1999, n° 254, pp. 20-27. Disponible sur : <https://doi.org/10.3406/ecoru.1999.5135>.

- TABUTIN, Dominique et THILTGÈS, Evelyne, 1992. Relations entre croissance démographique et environnement. *Tiers-Monde* [en ligne], 1992, vol. 33, n° 130, pp. 272-294. Disponible sur <http://doi.org/10.3406/tiers.1992.4689>.
- TAVOULARIS, Gabriel et SAUVAGE, Eléna, 2018. *Les nouvelles générations transforment la consommation de viande* [en ligne]. Paris : CREDOC. Rapport n°300. Disponible sur <https://www.credoc.fr/publications/les-nouvelles-generations-transforment-la-consommation-de-viande>
- TIBERGHIEN, Frédéric, 2010. *L'eau et son droit* [en ligne]. Conseil d'Etat. Etudes et documents. Disponible sur <https://www.conseil-etat.fr/ressources/etudes-publications/rapports-etudes/etudes-annuelles/l-eau-et-son-droit>
- TIEN-DUC, Nguyen, 1999. *L'Humanité mourra-t-elle de soif ?* Paris : Hydrocom.
- TIEN-DUC, Nguyen, 2004. *La guerre de l'eau aura-t-elle lieu ?* Paris : Johonet.
- TRIPLET, Jean-Pierre et ROCHE, Guy, 1996. *Météorologie générale*. Météo-France.
- UN-DESA, 2016. *The worlds cities in 2016: data booklet* [en ligne]. Nations Unies. Disponible sur [https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the\\_worlds\\_cities\\_in\\_2016\\_data\\_booklet.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2016_data_booklet.pdf)
- UN-DESA, 2019. *World Population Prospects 2019: Highlights* [en ligne]. UN-DESA. New-York : UN-DESA. Disponible sur [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_HIGHLIGHTS.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_HIGHLIGHTS.pdf)
- UNESCO, 1999. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau « ne laisser personne pour compte »*. UNESCO.
- UN-HABITAT, 2016. *Almanach des bidonvilles 2015-2016* [en ligne]. Nairobi. Disponible sur <https://fr.unhabitat.org/slum-almanac-2015-2016/>
- UN-HABITAT, 2020. *World cities report 2020 : the value of sustainable Urbanization*. Disponible sur <https://unhabitat.org/World%20Cities%20Report%202020>
- UNSGAB, 2015. *The UNSGAB Journey* [en ligne]. Disponible sur <https://sustainabledevelopment.un.org/topics/water/unsgab/finalreport>
- UN-WATER, 2012. *UN-Water annual report 2012* [en ligne]. Disponible sur <https://www.unwater.org/publications/un-water-annual-report-2012/>
- VALIRON, François, 1990. *Gestion des eaux*. Paris : Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.
- VAN DER ENT, Rudi J., SAVENIJE, Hubert H.G., STEEL-DUNNE, Susan C. et SCHAEFLI, Bettina, 2010. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research* [en ligne], 2010, vol. 45. Disponible sur [https://infoscience.epfl.ch/record/162492/files/vdEnt\\_2010WR009127.pdf](https://infoscience.epfl.ch/record/162492/files/vdEnt_2010WR009127.pdf)
- VAN KOPPEN, Barbara C. M., 1998. *More jobs per drop: targeting irrigation to poor women and men* [en ligne]. Wageningen Univ. Disponible sur <https://edepot.wur.nl/206299>

- VERCUEIL, Julien, 2013. Vers une économie institutionnelle du changement : clarifier les concepts et leurs articulations. *An international journal of economic analysis*, 2013, vol. 66, n° 1, pp. 31-57.
- VERDIER, Jean et VIOLET, Pierre-Louis, 2015. Compte-rendu du colloque « Les tensions sur l'eau en Europe et dans le bassin méditerranéen. Des crises de l'eau d'ici 2050 ». *La Houille Blanche* [en ligne], 2015, vol. 6. Disponible sur <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2015/06/lhb20150075/lhb20150075.html>
- VÖRÖSMARTY, C. J., MCINTYRE, P. B., GESSNER, M. O., DUDGEON, D., PRUSEVICH, A., GREEN, P., GLIDDEN, S., BUNN, S. E., SULLIVAN, C.A., REIDY LIERMANN, C. et DAVIES, P.M., 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* [en ligne], 2010, vol. 457. Disponible sur <http://image.scienzenet.cn/olddata/kexue.com.cn/upload/blog/file/2010/10/20101025132355790482.pdf>
- WATERPRENEURS, 2018. *Impact investing for water: innovative finance for scaling-up WASH market-based solutions* [en ligne]. Disponible sur [https://4528b9df-90d0-49b8-9555-9d418549b0b8.filesusr.com/ugd/2c9167\\_0eed97e0992c4996b1067582bb425ca0.pdf](https://4528b9df-90d0-49b8-9555-9d418549b0b8.filesusr.com/ugd/2c9167_0eed97e0992c4996b1067582bb425ca0.pdf)
- WGI, collectif, 2015. *Principes de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau* [en ligne]. OCDE. Disponible sur [http://www.oecd.org/fr/gov/politique-regionale/Principes-OCDE-gouvernance-eau\\_brochure.pdf](http://www.oecd.org/fr/gov/politique-regionale/Principes-OCDE-gouvernance-eau_brochure.pdf)
- WGI, collectif, 2018. *Implementing the OECD principles on water governance: indicator framework and evolving practices* [en ligne]. Paris : OCDE. OECD Studies on Water. Disponible sur <http://www.oecd.org/governance/implementing-the-oecd-principles-on-water-governance-9789264292659-en.htmhttps://doi.org/10.1787/9789264292659-en>.
- WHITTLE, Linden, GALEANO, David, HUGHES, Neal, GUPTA, Mihir, LEGG, Peter, WESTWOOD, Tim, JACKSON, Tom et HATFIELD-DODDS, Steve, 2020. *Analysis of economic effects of water recovery in the Murray-Darling Basin* [en ligne]. Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences (ABARES). Disponible sur <https://www.agriculture.gov.au/abares/publications/insights/economic-effects-of-water-recovery-in-murray-darling-basin>
- WINPENNY, James T., TREMOLET, Sophie, CARDONE, Rachel, KOLKER, Joel, KINGDOM, Bill et MOUNTSFORD, Lyndsay, 2016. *Aid flows to the water sector, overview and recommendations* [en ligne]. Washington D.C., USA : Banque mondiale. Disponible sur <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25528>
- WITTOGEL, Karl August, 1964. *Oriental Despotism: A Comparative Study of Total Power*. Traduction française : *Le despotisme oriental, étude comparative du pouvoir total*. Éditions de Minuit.
- WWAP, 2003. Bassin du Chao Phraya, Thaïlande. In: *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau*, première édition: *L'eau pour les hommes, l'eau pour la vie*. Paris, New-York : Berghahn Books. pp. 387-400.
- WWF, 2012. *L'empreinte eau de la France* [en ligne]. Disponible sur [https://waterfootprint.org/media/downloads/WWF-France-2012-Empreinte-Eau\\_1.pdf](https://waterfootprint.org/media/downloads/WWF-France-2012-Empreinte-Eau_1.pdf)

WWF, 2020. *Planète vivante 2020 : infléchir la courbe de la perte de biodiversité* [en ligne]. Disponible sur [https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2020-09/20200910\\_Synthese\\_Rapport-Planete-Vivante-2020\\_WWF-min.pdf](https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2020-09/20200910_Synthese_Rapport-Planete-Vivante-2020_WWF-min.pdf)

ZAKARIA, Salmah et KARAZHANOVA, Aida, 2013. *Development Financing for Tangible Results: A Paradigm Shift to Impact Investing and Outcome Models : the case of Sanitation in Asia* [en ligne]. Bangkok, Thaïlande : UNESCAP. Disponible sur <http://www.unescap.org/sites/default/files/Development%20Financing%20for%20Tangible%20Results-A%20Paradigm%20Shift%20to%20Impact%20Investing%20and%20Outcome%20Models.pdf>

ZIMMER, Daniel et RENAULT, Daniel, 2003. *Virtual water in food production and global trade: review of methodological issues and preliminary results* [en ligne]. WWC-FAO. Disponible sur [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/faowater/docs/VirtualWater\\_article\\_DZDR.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/faowater/docs/VirtualWater_article_DZDR.pdf)

ZIMMER, Daniel, 2013. *L'empreinte eau : les faces cachées d'une ressource vitale*. Paris : C.L. Mayer.



# Sigles et acronymes

## Dénominations bilingues

### ACB

Analyse coûts-bénéfices  
(ou coûts-avantages)

*CBA : Cost-Benefit Analysis*

### AFD

Agence française de développement

*FDA : French Development Agency*

### AOD

Aide publique officielle au développement

*ODA : Official development Aid*

### BAD

Banque asiatique de développement

*ADB : Asian Development Bank*

### BafD

Banque africaine de développement  
(quand non ambigu : BAD)

*AfDB : African development bank  
(quand non ambigu : ADB)*

### BM

Banque mondiale

*WB : World Bank*

### CAPEX

Dépenses d'investissement

*Capital expenditures*

### CME

Conseil mondial de l'eau

*WWC : World Water Council*

### CMPC

Coût moyen pondéré du capital

*WACC : Weighted average capital cost*

### DCE

Directive-cadre européenne pour l'eau

*WFD : European Water Framework Directive*

### DUDH

Déclaration universelle des droits de l'homme

*UDHR : Universal Declaration of Human Rights*

### FOD

Financement officiel du développement

*ODF : Official development financing*

### FPHN

Forum politique de haut niveau  
pour le développement durable

*HLPF : High Level Political Forum  
for Sustainable Development*

### GIEC

Groupe d'experts intergouvernemental  
sur l'évolution climatique

*IPCC : Intergovernmental Panel  
on Climate Change*

**GIRE**

Gestion intégrée des ressources en eau  
*IWRM : Integrated Water Resources Management*

**IGE**

Initiative pour la gouvernance de l'eau  
*WGI : Water Governance Initiative*

**ISSP**

Indice synthétique de sécheresse de Palmer  
*PDSI : Palmer drought syntetic indicator*

**JMP**

Programme commun OMS/UNICEF de suivi de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement

*JMP : Joint Monitoring Programme on WASH*

**FVC**

Fonds vert pour le climat  
*GCF : Green Climate Fund*

**FMN**

Fonds mondial pour la nature  
*WWF : World Wide Fund for Nature*  
*(antérieurement : World Wildlife Fund)*

**MCG**

Modèle de circulation générale  
*GCM : General Circulation Model*

**MCR**

Modèles complémentaires régionaux  
*RCM : Regional Complementary Model*

**MTD**

Meilleures technologies disponibles  
*BAT : Best Available Technologies*

**OCDE**

Organisation de coopération et de développement économiques  
*OECD : Organization for Economic Co-operation and Developement*

**ODD**

Objectifs de développement durable 2015-2030  
*SDG : Sustainable development goals 2015-2030*

**OMD**

Objectifs du millénaire pour le développement  
*MDG : Millenium Developpement Goals*

**OMM**

Organisation mondiale de la météorologie  
*WMO : World Meteorological Organization*

**OMS**

Organisation mondiale de la santé  
*WHO : World Health Organization*

**ONG**

Organisation non-gouvernementale  
*NGO : Non Governmental Organization*

**ONUAA (peu usité)/FAO**

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture  
*Food and agriculture organization*

**ONUDI**

Organisation des Nations Unies pour le développement Industriel  
*UNIDO : United Nations Industrial Development Organization*

**OPEX**

Dépenses d'exploitation  
*OPEX : Operational expenditures*

**PNUD**

Programme des Nations Unies pour le développement  
*UNDP : United Nations Development Programme*

**PNUE**

Programme des Nations Unies pour l'Environnement

*UNEP : United Nations Environment Programme*

**RIOB**

Réseau international des organismes de bassin

*INBO : International Network of Basin Organizations*

**ROCE/ROIC**

Rentabilité des actifs (des capitaux investis). Le ROIC et le ROCE sont vus du point de vue de l'actif ou du passif, mais sont égaux.  
*Return of Capital Employed (Invested).*

**UICN**

Union internationale pour la conservation de la nature

*IUCN : International Union for Conservation of Nature*

**UNESCO**

Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*

**UNICEF**

Fonds des Nations Unies pour la famille et l'enfance

*United Nations Children's Fund*

**WASH**

Eau potable, assainissement et hygiène  
*Water, sanitation and hygiene*

## Autres sigles et acronymes

**ABARES**

*Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences* (Australie)

**ABN**

Agence du bassin du Niger (Afrique)

**ACCC**

*Australian Competition & Consumer Commission* (Australie)

**ACS**

Agriculture de conservation des sols

**AEP**

Alimentation en eau potable

**AESN**

Agence de l'eau Seine-Normandie (France)

**AIE**

Agence internationale de l'énergie

**AO**

Autorité organisatrice

**Arbovirus**

*ARthropod BOrne Virus*

**BRICS**

Brésil-Russie-Inde-Chine-Afrique du Sud

**CAM**

*Crassulean Acid Metabolism*

**CGAAER**

Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et de l'espace rural (France)

<b>CGDD</b> Commissariat général au développement durable (France)	<b>GIZ (ex-GTZ)</b> <i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i> (Allemagne)
<b>CGEDD</b> Conseil général de l'environnement et du développement durable (France)	<b>IFI</b> Institution financière internationale
<b>CIGB</b> Commission internationale des grands barrages	<b>IRD</b> Institut de recherche pour le développement (France)
<b>CIRAD</b> Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (France)	<b>ISARM</b> Initiative de gestion partagée internationale des ressources des aquifères (UNESCO-AIH), portée par <i>International Groundwater Resources Assessment Center</i>
<b>CMB</b> Commission mondiale des barrages	<b>IWMI</b> <i>International Water Management Institute</i> (Colombo - Sri Lanka)
<b>CRISPR</b> <i>Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats</i> (Courtes répétitions palindromiques groupées et régulièrement espacées)	<b>JICA</b> Agence japonaise de coopération internationale
<b>DALY</b> <i>Disease Adjusted Life-Year</i>	<b>KPI</b> <i>Key performance indicator</i>
<b>DDHC</b> Déclaration des droits de l'homme et du citoyen (France)	<b>MDBA</b> <i>Murray-Darling Basin authority</i> (Australie)
<b>DeLoG</b> <i>Development partners network on decentralisation and local governance</i> (Allemagne)	<b>MENA</b> Maghreb-Machreck (Afrique)
<b>ERC</b> Éviter-réduire-compenser (Europe)	<b>NBT</b> <i>New Breeding Technologies</i> (Nouvelles méthodes de sélection végétale)
<b>GEMAPI</b> Gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (France)	<b>ODN</b> Office du Niger (Mali)
	<b>OFWAT</b> <i>Office of Water Services</i> (Grande-Bretagne)

<b>OMVS</b>	SASS
Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (Afrique)	Système aquifère du Sahara septentrional (Afrique)
<b>OSS</b>	<b>SIWI</b>
Observatoire du Sahara et du Sahel (Afrique)	<i>Stockholm International Water Institute</i> (Suède)
<b>PED</b>	<b>SDAGE</b>
Pays en développement	Schéma directeur d'aménagement et de gestion de l'eau (France)
<b>PFE</b>	<b>SOGED, SOGEM, SONADER, SAED, SITRAM, SOGENAV</b>
Partenariat français pour l'eau	Sociétés filiales de l'OMVS (Sénégal)
<b>PGF</b>	<b>SONEDE</b>
Productivité globale des facteurs	Société nationale d'exploitation et de distribution des eaux (Tunisie)
<b>PGIRE</b>	<b>STEP</b>
Programme de gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal	Station de transfert d'énergie par pompage
<b>PIB</b>	<b>USAID</b>
Produit intérieur brut	Agence des États-Unis pour le développement international
<b>PIDES</b>	<b>TCIR</b>
Pacte international relatif aux droits économiques, sociaux et culturels	Taux d'intérêt commerciaux de référence
<b>PNB</b>	<b>Trois T</b>
Produit national brut	Deux sens possibles : Tarifs, Taxes, Transferts qui s'appliquent au financement des services publics, et <i>Targeted, Timebound, Transparent</i> qui s'appliquent aux interventions publiques
<b>PPA</b>	<b>WWAP</b>
Parité de pouvoir d'achat	<i>World Water Assessment Program</i>
<b>pS-EAU</b>	<b>YLL</b>
Programme Solidarité Eau (France)	<i>Years of Potential Life Lost</i>
<b>PVD</b>	
Pays en voie de développement	
<b>REUT</b>	
Réutilisation des eaux usées traitées	
<b>RTE</b>	
Gestionnaire du réseau de transport d'électricité (France)	



# Glossaire

## Agriculture, stress hydrique

### Agriculture pluviale

L'agriculture pluviale connaît des rendements faibles du fait que l'eau nécessaire au métabolisme des plantes n'est pas disponible au bon moment de leur croissance, la variabilité des pluies créant de forts aléas sur les quantités produites.

*Voir le chapitre 4*

### Agroécologie

L'agroécologie est une façon de concevoir des systèmes de production agricole qui s'appuient sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes, en visant à diminuer les pressions sur l'environnement et à préserver les ressources naturelles en maintenant les capacités de renouvellement. Elle appartient à la famille des « solutions fondées sur la nature ».

*Voir le chapitre 4*

### Irrigation, drainage, irrigation de résilience

L'irrigation, apport d'eau supplémentaire prélevée ailleurs dans le milieu (nappe souterraines, rivières, etc.) et transportée au milieu de culture par des canaux ou des conduites, permet d'apporter les compléments nécessaires. Ajustée au mieux, elle est un pur appoint (irrigation de résilience). Elle doit souvent être associée à un drainage des terres, pour éviter une salinisation des sols pouvant aller jusqu'à les rendre stériles.

*Voir le chapitre 4*

## Bilans

### Prélèvement, consommation, eau bleue, eau verte, eau grise, eau virtuelle, empreinte eau

Les ressources en eau superficielles et souterraines forment un même ensemble que l'on peut comptabiliser à l'échelle du bassin-versant ou de l'espace couvert par un aquifère.

L'eau qui est prélevée pour les usages, hormis l'agriculture, est pour l'essentiel restituée à proximité dans le milieu, souvent dégradée. La partie évaporée ou évapotranspirée soustraite au milieu local est dite consommée et restituée à l'atmosphère. Pour calculer une empreinte eau (effet global de perturbation des ressources en eau) d'un groupe dans toutes ses consommations, on compte ses effets locaux (concepts d'eau bleue, d'eau verte et d'eau grise) rendus nécessaires par tout le cycle de vie des produits employés (les flux d'eau virtuelle sont comptabilisés notamment entre les pays).

*Voir le chapitre 3*

## Cycle de l'eau

### Énergie, chaleur latente, chaleur sensible

Les flux de transfert d'énergie entre la terre, l'océan et l'atmosphère, et à l'intérieur de chacun d'eux, hormis les rayonnements, sont liés soit à la chaleur :

- sensible : contenue dans les corps en déplacement (l'eau des océans) en raison de leur température ;
- latente : échangée à l'occasion des transitions de phases : fonte/solidification vers liquide-glace ; évaporation/condensation vers liquide-gaz ou plus rarement sublimation/gel vers solide-gaz.

Voir le chapitre 1

### Évaporation, évapotranspiration

Un corps inerte en contact avec l'atmosphère voit s'évaporer à sa surface en contact avec l'atmosphère un flux de vapeur d'eau dépendant de nombreux paramètres (températures du corps et de l'air, vent, humidité de l'air, disponibilité de l'eau en surface).

Quand c'est un être vivant (animal ou végétal), il respire également : ce flux de vapeur d'eau est nécessaire à son métabolisme. Pour les végétaux, c'est au niveau des stomates des feuilles et en lien avec la photosynthèse que s'opère l'essentiel de cette transpiration. On appelle évapotranspiration la combinaison des deux phénomènes.

Voir le chapitre 1

### Infiltration, aquifère, nappe souterraine, niveau, piézométrie, pompage, surexploitation

Quand les sols et le sous-sol sont perméables, une partie de l'eau recueillie par le sol s'infiltra vers les couches plus profondes sous l'effet de la gravité et de divers phénomènes d'interaction de l'eau et de l'air avec la matrice poreuse de ces terrains dont les vides sont plus ou moins interconnectés. L'eau se stocke alors dans les horizons géologiques qui le permettent, appelés formations aquifères, et constitue, à grande échelle, des nappes souterraines (on utilise aussi souvent le terme d'aquifère pour ces masses d'eau). Celles-ci sont dites libres (typiquement les nappes proches de la surface dites phréatiques), quand elles ne sont pas limitées par une couche supérieure qui constitue un plafond imperméable et captives (sous pression) quand une telle couche existe. Le niveau (nappe libre) ou la pression (nappe captive) de l'eau que l'on peut mesurer dans un forage est dit piézométrique. Le pompage de cette eau souterraine conduit à diminuer le stock, mais aussi la pression, et amène, s'il excède le renouvellement naturel de ce stock (sur-exploitation) à une baisse des niveaux piézométriques, imposant de pomper toujours plus profondément.

Voir les chapitres 2, 4 et 7

### Pluie, précipitation, neige, température, climat, régime hydrologique, hydrologie

Les précipitations et, dans une moindre mesure, les températures, sont très variables dans le temps et l'espace : cela dessine une grande variété de climats. Les régimes hydrologiques (saisonnalité et fluctuations entre les années des quantités écoulées) s'en déduisent pour l'essentiel, le couvert végétal, les sols (pédologie) la géologie (notamment la perméabilité des roches du sous-sol) et les pentes apportant de fortes différences supplémentaires. Ce régime naturel n'est pas stationnaire car ni les grandeurs d'entrée de ce système, ou variables de for-

çage, ni la morphologie des bassins-versants (espace géographique dont les eaux convergent) ne sont stationnaires.

*Voir le chapitre 2*

## Écosystèmes, panarchie, emboîtement d'échelles, cycle adaptatif, morphodynamique

Les écosystèmes liés à l'eau et à son écoulement, sur lequel ils agissent eux-mêmes, sont des systèmes dynamiques ouverts fonctionnant à des échelles de temps et d'espace variées, emboitées et interagissant en permanence. Chaque compartiment suit ses propres dynamiques selon les flux échangés, selon des cycles dits adaptatifs, dans lesquels il passe par des phases de croissance et de stabilisation ou de décroissance, plus ou moins rapides. Les cours d'eau connaissent des dynamiques sédimentaires complexes, liées non seulement à la variabilité des sédiments qu'ils transportent, mais aussi aux modifications qu'ils apportent à leurs lits lors de leur écoulement. Cette interaction peut conduire ces cours d'eau à de très fortes variations de tracé.

*Voir le chapitre 2*

## Gestion de l'eau

### Bien commun, marché, administration des droits d'usage, bien de club

La gestion de l'eau s'opère rarement comme celle d'un bien marchand, susceptible d'appropriation et dont les détenteurs de droits monnaieraient l'accès. C'est au contraire essentiellement un bien commun (à partager selon des règles consenties), voire parfois un bien public (approprié par la puissance publique), dont l'usage est régi par des règles de répartition et un contrôle. Cela n'exclut pas que les usagers d'un même service s'en partagent les coûts comme un bien de club via des mécanismes de tarification.

*Voir le chapitre 7*

### Droit à l'eau

Le droit à l'eau reconnu comme un droit de l'homme est un droit d'accès à l'eau potable et à l'assainissement.

*Voir le chapitre 7*

### Droit de l'eau

Le droit de l'eau est l'ensemble des règles qui assurent le partage des ressources entre les personnes et leurs activités ainsi que le milieu naturel, généralement associé à des régimes d'autorisation contrôlés par une police administrative dite « police de l'eau ».

*Voir le chapitre 7*

### Ecosystème : solutions fondées sur la nature

En matière d'aménagement des eaux, les solutions fondées sur la nature consistent à s'appuyer sur la compréhension des écosystèmes et de leurs dynamiques pour rechercher des moyens de les concilier au mieux avec les usages humains, plutôt que de chercher à les opposer dans

la confrontation souvent coûteuse, destructrice et vaine à long terme d'un combat de l'homme contre la nature.

*Voir le chapitre 8*

### Gestion intégrée des ressources en eau

Physiquement, le parcours terrestre du cycle de l'eau s'inscrit dans des géographies particulières (bassins-versants, formations géologiques, aquifères) très différentes des géographies institutionnelles. Par ailleurs, toutes les activités humaines en sont plus ou moins intensément dépendantes. Se sont peu à peu développés des outils de gestion et de planification adaptés à ce besoin d'une vision d'ensemble. Parfois, des institutions et des mécanismes d'action sont constitués spécifiquement pour s'adapter à cette géographie (comités de bassin, agences de l'eau et maîtres d'ouvrages EPTB en France).

*Voir le chapitre 8*

### Objectif du millénaire (OMD), objectif de développement durable (ODD)

Les écarts de la gestion de l'eau sont d'abord des écarts de richesse, de développement, d'institutions et de compétences, avant d'être des écarts de ressources. Divers critères permettent de clarifier la situation de chaque pays. Les ODD pour 2030 ont pris le relais des OMD fixés en 2000 et complétés à Johannesburg en 2002 pour y ajouter l'assainissement.

*Voir le chapitre 6*

### Principe de gouvernance, coopération, co-décision, confiance, engagement, participation des parties prenantes

La coopération est essentielle à toute résolution pacifique des conflits d'usages, qu'ils soient transfrontaliers (eaux dites « partagées »), ou locaux. L'implication (engagement) des parties prenantes est indispensable mais nécessite que soient établies des logiques de confiance, ou du moins d'intérêts convergents à trouver des solutions. Les principes de gouvernance développés ici offrent un cadre d'action progressif et dynamique permettant de construire un chemin collectif de progrès et de résolution des difficultés, en partant d'une situation dont le diagnostic des forces et des faiblesses est partagé et objectivé.

*Voir le chapitre 9*

## Risque

### Crue, eau pluviale, ruissellement, inondation

L'inondation, présence d'eau dans des lieux où elle n'est pas présente fréquemment, est souvent liée à l'augmentation du débit et au débordement consécutif des cours d'eau, à la montée des niveaux des nappes souterraines ou à des flux plus diffus (souvent assimilés à du ruissellement en surface, mais dont les parcours peuvent être complexes), eux-mêmes liés à des précipitations abondantes ou à la fonte des stocks de neige ou de glace.

*Voir les chapitres 2 et 8*

### Dommage, adaptation, robustesse, résilience

Les crises sont souvent soit des excès d'eau (crues et inondations), soit au contraire des sécheresses sévères. Les mesures d'adaptation sont prises pour intégrer les risques du changement

climatique dans les activités humaines. Le secteur de l'eau est un de ceux où les effets du changement climatique sont potentiellement les plus forts. Certaines mesures d'adaptation peuvent ne sembler que de la fuite en avant.

La robustesse (contraire de fragilité et de vulnérabilité) caractérise l'aptitude à subir le moins de dommages possibles dans une crise. La résilience est l'aptitude à retrouver après cette crise une nouvelle dynamique, même si celle-ci était différente de la dynamique antérieure. Ces notions s'appliquent aussi bien pour les écosystèmes que pour les sociétés humaines.

*Voir les chapitres 2 et 8*

## Santé

### Maladies hydriques, hygiène, parasite, vecteur épidémique, prévention

L'hygiène est une condition essentielle de prévention de la propagation de nombreuses maladies. Le lavage des mains, le nettoyage régulier des abords des lieux de vie et l'assainissement (évacuation des eaux usées domestiques) y contribuent fortement. Des maladies sont par ailleurs transmises par la boisson ou la cuisson des aliments : la potabilisation de l'eau et sa conservation sans contamination supposent parfois des traitements très élaborés. Enfin, l'eau (plans d'eau, lacs, zones humides) peuvent constituer des lieux de prolifération d'animaux hôtes de virus ou de bactéries, qu'ils transmettent à l'homme, souvent par piqûre (moustiques).

*Voir les chapitres 5 et 8*

### Régime alimentaire, obésité, surpoids, nutrition, alimentation carnée

L'avenir des besoins est largement dépendant de l'évolution d'une part de la démographie et d'autre part des régimes alimentaires. En effet, la situation actuelle est déjà critique avec l'émergence de surpoids et d'obésité liés à des régimes déséquilibrés. De plus, la consommation future de sucres et de viande, dont l'empreinte eau est forte, conditionnera la pression sur les ressources et la santé des populations.

*Voir les chapitres 3 et 4*

## Service

### Financement, renouvellement, *asset management*, investissement, trois T, tarification, transfert, taxe

Le financement des infrastructures, de leur fonctionnement et de leur entretien, ou la simple délivrance d'un service, se fait par des processus financiers qui ne sont pas spécifiques au secteur de l'eau : d'autres services comme l'énergie ou les communications, ont des besoins similaires. Le financement s'opère à partir de sources, dites des « trois T », le paiement du service par les usagers ou les clients du service, les transferts et les taxes affectées (ou prélevées pour internaliser des coûts non internes, comme environnementaux).

*Voir les chapitres 5 et 9*

### Gestion patrimoniale, *asset management*

Les infrastructures (réseaux et usines de traitement de l'eau potable, ou d'assainissement ; réseaux d'irrigation et de pompage, barrages à buts multiples, canalisations et usines de production hydroélectrique, etc.) nécessitent un entretien et un renouvellement pour continuer

à remplir leurs fonctions. Ils doivent être organisés dans une politique technique adaptée et bénéficier d'un financement au niveau suffisant, ce qui est rarement le cas. Cette gestion patrimoniale est un des enjeux majeurs de la soutenabilité de moyen et long terme de ces activités.

*Voir le chapitre 5*

### Régulation, autorité organisatrice, opérateur

Les services d'eau potable et d'assainissement sont un besoin de la population qui implique les autorités politiques, si possible à des échelles territoriales assez proches, mais suffisantes pour constituer des compétences adaptées à la technicité opérationnelle et financière requises. La régulation est souvent opérée par l'État : elle est indispensable, même si son rôle n'est pas de se substituer aux acteurs locaux. Les autorités doivent pouvoir constituer leurs propres opérateurs, ou recourir sous diverses formes à des opérateurs privés. Dans tous les cas, ces opérateurs doivent être soumis à des objectifs de qualité et de productivité qui permettent d'assurer aux consommateurs que leur argent (qu'ils dépensent directement pour payer le service ou *via* des taxations à diverses échelles) est employé au mieux et que les infrastructures sont maintenues pour l'avenir.

*Voir le chapitre 5*

# Index géographique

- Afrique du Sud **54, 61, 137, 144, 148, 149, 162, 209**  
Afrique subsaharienne **54, 55, 61, 64, 131, 47, 212**  
Algérie **57, 73, 76, 93, 94, 110, 122, 160**  
Allemagne **158, 159, 205, 232, 248**  
Amazone (fleuve), Amérique du Sud **21, 71**  
Amérique du Nord **53, 106, 112, 213**  
Amérique du Sud **23, 196**  
Amérique latine **51, 61, 47, 47**  
Amou-Daria (fleuve), Asie mineure **75**  
Aral (mer d'), Asie Mineure **72, 75, 89, 94**  
Asie **23, 24, 51, 54, 55, 79, 57, 61, 65, 105, 109, 112, 113, 124, 126, 47, 47, 251**  
Australie **61, 79, 185, 186, 190**  
Bafing (affluent du Sénégal) **219, 218, 220**  
Bakel, Sénégal **221, 218**  
Bangkok, Thaïlande **76**  
Bangladesh **26, 73, 132, 207, 235, 236**  
Beijing-Pékin, Chine **54, 74, 90**  
Brasilia, Brésil **172, 241**  
Brésil **51, 150, 159, 199, 213, 54**  
Calcutta, Inde **207**  
Californie, États-Unis **118, 186, 184**  
Canada **111, 190, 199, 206**  
Casablanca, Maroc **152**  
Chari (cours d'eau), Afrique **21**  
Chili **73, 185, 186**  
Chine **24, 51, 54, 57, 58, 106, 74, 90, 95, 111, 112, 113, 124, 126, 196, 199, 200, 202, 246**  
Colorado river (fleuve), Mexique-États-Unis **207**  
Conakry, Guinée **220**  
Congo (fleuve), Zaïre **21, 103, 137, 206, 208, 214**  
Corée du Sud **51, 240**  
Daegu, Corée du Sud **240**  
Dakar, Sénégal **243**  
Diama (barrage), Sénégal **212, 219**  
Égypte **76, 118, 208**  
Euphrate (fleuve), Moyen-Orient **89**  
Falémé (affluent du Sénégal) **221**  
Farakka (barrage), Inde **207**  
Félou (barrage), Sénégal **220**  
Fleuve Jaune, Chine **90**  
Fouta-Djalon, Guinée **21, 218**  
Gange (fleuve), Asie **207**  
Gaza, Moyen-Orient **75, 76**  
Ghana **139, 148, 226**  
Grande-Bretagne **159, 248**  
Guadeloupe **161**  
Guinée **119, 129, 139, 219, 220, 221, 222**  
Guyane **28**  
Hebei, Chine **90**  
Henan, Chine **90**  
Inde **24, 54, 58, 61, 106, 75, 94, 108, 109, 111, 112, 113, 178, 132, 179, 199, 206, 207, 212, 213, 47, 246**  
Indonésie **51, 73, 233, 159**  
Indus (fleuve), Inde **76, 89, 206**  
Irak **89**  
Iran **75, 206**  
Israël **76**  
Japon **54, 111, 199, 210, 211, 233, 248**  
Johannesbourg, Afrique du Sud **96, 138, 139, 150, 155, 203, 204**

- Kalahari (désert), Afrique du Sud **21**  
 Karachi, Pakistan **151**  
 Kenya **119, 137, 226, 239**  
 Lagos, Nigéria **54**  
 La Haye (Den Haag), Pays-Bas **77, 95**  
 Le Caire, Égypte **54, 73**  
 Le Cap, Afrique du Sud **144**  
 Lima, Pérou **154**  
 Limpopo (fleuve), Afrique **21, 208**  
 Logone (rivière), Afrique **21**  
 Londres, Royaume-Uni **54**  
 Los Angeles, États-Unis **73**  
 Lybie **76**  
 Madagascar **119, 139**  
 Mahaweli (fleuve), Sri Lanka **212**  
 Malawi **226**  
 Mali **148, 149, 219, 220, 221, 222**  
 Manantali (barrage), Sénégal **219, 220**  
 Manille, Philippines **54**  
 Maroc **137, 148, 152**  
 Masdar, Émirats arabes unis **73**  
 Mékong (fleuve), Asie **60, 104**  
 Mexico, Mexique **54, 73, 76, 92**  
 Mexique **76, 111, 137, 178, 207**  
 Mozambique **212**  
 Mumbai, Inde **54**  
 Murray-Darling, Australie **185, 186, 190, 195**  
 Namibie **73**  
 Népal **207**  
 Nigéria **54, 212**  
 Nil (fleuve), Afrique **74, 109, 118, 206, 208, 224**  
 Niono, Mali **148**  
 Ogallala (nappe), États-Unis **76**  
 Orange, Afrique **208, 209**  
 Osaka, Japon **54**  
 Ouagadougou, Burkina-Fasso **151**  
 Ouganda **212**  
 Pakistan **24, 89, 178, 206**  
 Palestine **98**  
 Pérou **73, 154**  
 Philippines **124**  
 Pouilles, Italie **184**  
 République démocratique du Congo (RDC) **212**  
 Rift Valley **211**  
 Rio Bravo (fleuve), Mexique - Rio Grande, États-Unis **207**  
 Rio Conchos (fleuve), Mexique **207**  
 Sahel, Afrique **41, 93, 94, 130, 219**  
 Saint-Louis, Sénégal **219**  
 Santiago, Chili **73, 185**  
 São Paulo, Brésil **119**  
 Sénégal **21, 208, 209, 218, 219, 220, 221, 222, 239**  
 Séoul, Corée du Sud **54**  
 Shanghai, Chine **54**  
 Sicile, Italie **184**  
 Sutlej (fleuve), Pakistan **185**  
 Syr-Daria (fleuve), Asie mineure **75**  
 Syrie **89, 98**  
 Tchad **21, 206, 208**  
 Texas **76**  
 Tigre (fleuve), Moyen-Orient **89, 206**  
 Tokyo, Japon **54**  
 Tunisie **57, 76, 83, 84, 93, 94, 110, 137, 147, 149**  
 Turquie **89, 151, 199, 206, 213**  
 Vietnam **124, 199**  
 Volta (fleuve), Afrique **208**  
 Yang-Tsé (fleuve), Chine **90**  
 Zambèze (fleuve), Afrique **95, 206, 208**

# Index des notions

- ABARES **192, 193**  
ABUSUS **178**  
ACCC **186, 194, 195**  
Accessibilité **26, 147**  
Accès universel **133, 141, 169, 204, 207, 244**  
Agence française de développement (AFD) **144, 187, 206, 233**  
Agriculture climato-intelligente **115**  
Agriculture de conservation des sols (ACS) **116**  
Agriculture pluviale **24, 107, 108, 109, 112, 79, 70, 109, 79, 113, 81, 103**  
Agroécologie **114**  
Aïchi (traité) **173**  
Aides publiques officielles au développement (ODA) **229, 247, 250, 251**  
Albédo **16, 17, 30, 41**  
Alimentation carnée **83, 86, 88, 89, 104, 106, 118, 103**  
Allocation de droits **183**  
Amman (Jordanie) **151**  
Analyse coût-bénéfice (ACB) **214**  
Analyse de cycle de vie **70**  
Anophèle **224**  
Appropriation publique **183**  
Arbovirus **211, 212, 225**  
Autorité organisatrice (AO) **112, 115, 145, 146, 147, 183, 231, 232**  
Banque africaine de développement (BAD) **149**  
Banque mondiale **104, 49, 51, 55, 64, 152, 151, 213, 231, 236, 249, 251**  
Barrage à buts multiples **74, 114, 135, 181, 184, 191, 196, 200, 203, 207, 213, 214, 220**  
Bassin-versant **19, 36, 74, 113, 114, 182, 204, 205**  
Bidonville **7, 54, 55, 66, 148**  
Bien commun (*commons*) **9, 137, 175, 178, 180, 181, 183**  
Bien de club **51, 149, 175, 177, 180, 181**  
Bien public **177, 180, 181**  
Bilharziose (schistosomiasis) **129, 222**  
C3 (cycle de Calvin) **17, 105, 106, 117, 123**  
C4 (préfixation du CO<sub>2</sub>) **105, 106, 117, 123**  
Cacao **119**  
Café **9, 82, 89, 119**  
CAM (*Crassulean Acid Metabolism*) **105, 123**  
CAPEX (investissement) **231**  
Cellules de Hadley **33**  
Cendres **132**  
Centime par m<sup>3</sup> (loi Oudin-Santini) **156**  
Céréales **90, 106, 108, 114, 118, 220**  
Changement climatique **14, 22, 23, 24, 25, 26, 39, 41, 43, 114, 125, 170, 114, 115, 116, 222, , 13, 47, 13, 47**  
Choléra **129, 132, 133, 154**  
Chott **94**  
Cible **66, 113, 167, 140, 141, 142, 143, 167, 127, 168, 170, 171, 241, 167, 167**  
Climat **16, 21, 22, 24, 26, 30, 36, 37, 39, 42, 57, 58, 76, 110, 125, 170, 196, 207, 208, 213, 222, 233, 234, 238**  
CMPC (Coût moyen pondéré du capital) **231**  
Comité de bassin **181**

- Complexe Terminal **93**  
Concertation **94, 139, 148, 156, 179, 203, 204, 209**  
Conditions de vie décentes **134**  
Confiance **40, 48, 134, 147, 209, 227, 228, 230, 234, 244**  
Connexité **18, 19**  
Conseil mondial de l'eau (CME-WWC) **77, 95**  
Contamination oro-fécale **131**  
Continent **36, 37, 208**  
Contre-rayonnement thermique **17**  
Coopération décentralisée **139, 204, 227, 229, 243, 244**  
Co-production **150**  
Corps noir **17**  
Coton **75, 82, 83, 88, 89, 111, 193, 201**  
Coût abordable **141, 168, 169, 170**  
Coût externe **182**  
Coût interne **182**  
COVID **127, 130, 133**  
CRISPR **125**  
Cycle adaptatif **18, 19**  
Cycle du carbone **16, 30, 39, 41**  
DALY **130**  
Débit réservé **113, 185, 192**  
Déclaration des Droits de l'Homme et du Citoyen (DDHC) - France **149**  
Déclaration universelle des droits de l'homme (DUDH) **135, 136**  
Défécation en plein air **134, 139, 140, 142, 143**  
Délégation de service **147, 159, 219**  
DeLoG **243**  
Dengue **211**  
Dessalement **73, 122**  
Diarrhée **8, 129, 133, 151**  
Directive-cadre européenne sur l'eau **18, 182, 192, 204, 205**  
Doctrine Harmon **207**  
Donneur **239, 248, 250**  
Draconculose (ver de Guinée) **129**  
Drainage **24, 72, 103, 108, 109, 110**  
Droit à l'eau **136**  
Eau bleue **70, 75, 79, 80, 82, 86, 88**  
Eau comme service **181**  
Eau-DOM (Plan) **232**  
Eau grise **70, 80, 82, 88**  
Eau verte **70, 79, 80, 82, 84, 86, 88**  
Eau virtuelle **104, 110, 79, 83, 84, 88, 70, 111, 118**  
Eaux pluviales **67**  
Éclusée **196**  
Économie évolutionniste **209**  
Écorégion **61**  
EFESE **60**  
Efficacité **59, 97, 108, 109, 112, 119, 155, 161, 171, 181, 184, 192, 231, 232, 244**  
Efficience **97, 109, 112, 113, 117, 172**  
Égout **72, 135, 139, 150**  
El Niño **31**  
Élément don **247**  
Emboîtement d'échelle **18**  
Empreinte eau **62, 104, 105, 79, 80, 82, 83, 84, 86, 87, 88, 89, 103, 70, 106**  
Endoréisme **21**  
Engagement **209, 227, 228**  
Épidémie **133, 154, 170, 212**  
Équité **141, 169, 178, 181, 207, 209**  
Étiage **90, 113, 214**  
Faim **49**  
Falkenmark (indice) **77, 106**  
Famine **103, 179, 235**  
FAO **60, 61, 68, 96, 103, 107, 112, 113, 115, 116**  
Fèces (matières fécales) **134, 135, 140, 142**  
Financement mixte (*blended*) **227, 229, 230**  
Fonds bleu **239**  
Fonds privés de solidarité (*charity*) **230, 235**  
Fonds vert pour le climat (FVC) **238, 239**  
Forum mondial de l'eau **77, 95, 136, 138, 172, 182, 239, 240, 241, 243**  
*From cradle to grave* **82**  
FRUCTUS **178**

- Gastroentérite **130, 131, 132**
- Gaz à effet de serre **17, 30, 39, 40, 41, 176, 198, 238, 47**
- GEMAPI (gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) **205**
- Génie écologique **215**
- Géré en toute sécurité **135, 143**
- Gestion déléguée **159**
- Gestion des actifs **160, 128, 128**
- Gestion en communs (*commons*) **9, 120, 137, 152, 155, 175, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 175**
- Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE-IWRM) **204, 205, 214**
- GIEC-IPCC **22, 23, 25, 26, 39, 40, 42, 43, 110**
- GlZ (ex GTZ) **232, 235**
- Gourbassi (projet), Guinée **220**
- Grameen Bank **235**
- Hamburger **82**
- Hépatite A **129**
- Hydrodiplomatie **208**
- Indemnisation **152, 184**
- Indicateur **18, 20, 60, 64, 65, 77, 97, 113, 130, 139, 140, 141, 167, 169, 171, 239, 227, 167, 127, 241**
- Indice Planète Vivante (IPV) **60**
- Industrie **74, 84, 92, 94, 96, 97, 98, 105, 176, 185, 201, 175, 228, 203**
- Infiltration **67, 109, 124**
- Influences anthropiques **40**
- Ingénierie écologique **215**
- Initiative pour la gouvernance de l'eau (WGI-OCDE) **138, 227, 239**
- Innovation **49, 168, 204, 232**
- Inondation **7, 23, 26, 56, 57, 58, 66, 47, 205, 210**
- Institut de recherche pour le développement (IRD) **219**
- Institution financière internationale (IFI) **227, 230, 234**
- Intégrité **207**
- Intrants **82, 103, 117**
- Irrigation de résilience **112, 117**
- ISSP-PDSI (Index synthétique de sécheresse de Palmer) **42**
- JMP **172, 135, 138, 139, 143, 141**
- Key performance indicator* (KPI) **193**
- Köppen-Geiger (classification) **36**
- Koukoutamba (projet), Guinée **220**
- Latrine **132, 135, 143, 149**
- Lavage des mains **127, 131, 132, 135, 142, 143**
- Maintenance **150, 160, 231**
- Maladies bactériennes **133**
- Maladies virales **131, 133**
- Malthus **49**
- Marché spot **197**
- Masse d'eau **75**
- MDBA **192, 193**
- Meilleures technologies disponibles (BAT) **202**
- Métabolisme **103, 105, 123**
- Métropole **54, 59, 76, 144**
- Microfinance **230, 234, 235**
- Migrateur **18, 200**
- MILDA (moustiquaire imprégnée) **222**
- Modèle de circulation générale (MCG) **42**
- Modèle-monde (club de Rome) **51**
- Modèles complémentaires régionaux (MCR) **42**
- More crop per drop* **119**
- More job per drop* **119**
- Morphodynamique **18**
- Moustique **130, 131, 211, 212, 224, 225**
- Nappe souterraine **71, 75**
- Navigation **90, 92, 178, 203, 47, 206, 207, 208, 222**
- Neige **28, 37, 30**
- Niveau piézométrique **76, 90, 110, 179**
- Nouvelles techniques de sélection végétales (NBT) **125**
- Nutrition **103, 114, 167**
- Océan **16**
- Office international de l'eau (OIEAU) **206, 239**
- Office of Water Services* (OFWAT), Grande-Bretagne **159**

- OMS-WHO **76, 104, 130, 133, 134, 139, 156, 172, 212, 226**
- OMVS **219, 220, 221, 222, 223**
- Onchocercose **130**
- Ondes baroclines **33**
- Opérateur privé **128, 138, 159**
- Opérateur public **230**
- OPEX (fonctionnement) **231**
- Organisme génétiquement modifié (OGM) **117, 125**
- OSS **73, 93**
- Outre-mer **232, 233**
- Paddy **24, 105, 124, 219**
- Paludisme (malaria) **130, 203, 211, 212, 224, 226**
- Panarchie **13, 18, 19**
- Panchesshwar (projet), Inde **207**
- Pandémie **133**
- Parasite **130, 211, 224, 225, 226**
- Pareto (équilibre de) **186**
- Parité de pouvoir d'achat (PPA) **64**
- Participation **169, 147, 150, 151, 155, 213, 128**
- Parties prenantes **155, 181, 213, 227, 230, 234, 241**
- Pas de service **135**
- Patrimoine commun **7, 137, 175, 178**
- Pêche **60, 68, 75, 104, 176, 203, 206, 208, 221, 222**
- PED **26, 104, 158, 103**
- PFE **22**
- PGF **64**
- PGIRE **221, 222**
- Philippines **233**
- PIDESC **136**
- Pisciculture **104**
- Plasmodium **224**
- Pluie **14, 16, 24, 28, 29, 31, 66, 67, 35, 37, 39, 40, 41, 79, 98, 108, 80, 88, 97, 108, 113, 115, 116, 117, 179, 214, 31**
- Pluviogénèse **35**
- PNB **56, 58**
- PNUD **132, 139, 144, 150, 157, 159**
- Pointe de consommation **25, 175, 196, 197**
- Poisson **60, 104, 154, 222**
- Prêt **233, 247**
- Prêts conventionnels (bonifiés) **230, 232**
- Productivité globale des facteurs (PGF) **64**
- Protéine **104**
- pS-EAU **139, 156**
- Public Utilities Commissions* (États-Unis) **159**
- PVD **134**
- RAMSAR (convention) **60**
- Rating **230**
- Recouvrement soutenable des coûts (*sustainable cost recovery*) **149**
- Régime désertique **37**
- Régime équatorial **33, 37**
- Régime glaciaire **30**
- Régime océanique **31, 37, 39**
- Régime pluvial **79, 81**
- Régime tempéré **36, 37**
- Régulateur **113, 183, 231**
- Régulation **49, 16, 17, 31, 74, 77, 113, 113, 114, 123, 125, 129, 179, 144, 145, 146, 147, 159, 13, 180, 182, 183, 184, 127, 175**
- Rendement des capitaux investis (ROCE, *return on capital employed*) **231**
- Renforcement des capacités (*capacity building*) **120, 169, 150, 170, 128, 228, 229**
- Renforcement institutionnel (*Reinforcement loop*) **209**
- Réservoir **23, 28, 74, 113, 176, 184, 190, 196, 213, 214, 215**
- Résilience **18, 19, 20, 24, 117, 118, 103, 47, 13, 210, 222**
- Res nullus* **177**
- Restitution **69, 70, 71, 80, 82, 88**
- Réutilisation des eaux usées traitées (REUT) **70, 169, 71, 72, 73, 95, 69**
- Riz **24, 82, 105, 116, 119, 124, 148, 219, 220, 235**
- Ruisseaulement **32, 66, 176**
- SAED **219**

- Savon **132, 133, 135, 171, 201**
- Sebkha* **94**
- Séquence **214, 215**
- Service non amélioré **133, 135**
- Simulie **130**
- SITRAM **222**
- Sivens (projet), France **114**
- SIWI **239**
- SOGENAV **222**
- SONADER **219**
- SONEDE **147**
- Sorgho **219**
- Source améliorée **135, 139**
- Souveraineté **207, 209**
- Station de transfert d'énergie par pompage (STEP) **196**
- Stomate **117, 123**
- Stress hydrique **78, 97, 98, 105, 109, 114, 115, 117, 125, 171**
- Subvention **113, 232, 247**
- Sucré **104, 111, 119, 123, 201, 220**
- Suez **151, 158**
- Surexploitation , **178, 73, 75, 110, 76, 111, 90, 92, 178, 112, 69, 47, 70**
- Tarif **89, 145, 152, 159, 160, 161, 162, 228, 229, 230, 247**
- Tarification **149, 150, 159, 160, 128, 231**
- Taux d'intérêt commerciaux de référence (TCIR) **247**
- Taxes , **182, 184, 228, 230, 64, 247**
- Température **17, 108, 19, 20, 23, 24, 25, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 40, 41, 43, 44, 114, 115, 116, 196, 13**
- Temps de résidence **16**
- Terre arable **74, 116, 103**
- Terre boule de neige **30**
- Thames Water* (Grande-Bretagne) **73, 158**
- Tilapia **105**
- Toilettes **88, 133, 134, 135, 139, 232**
- Traitements des eaux usées **139, 140, 148**
- Transferts **17, 31, 77, 78, 122, 95, 97, 98, 181, 182, 69, 228, 229**
- Transition démographique **47, 49, 51, 65**
- Transparence **95, 148, 159, 227, 234, 241**
- Tuberculose **133, 170**
- Turbine **196, 214, 219**
- Typhoïde **129**
- UNESCO **76, 78, 80, 134, 206**
- Use it or lose it* **186**
- Usurier **179**
- USUS **178**
- Vibrio **154**
- WACC (*weighted average cost of capital*) **231**
- WASH (Water, Sanitation and Hygiene) **135, 138, 142**
- West Nile **211, 212**
- WWAP **76, 78, 79**
- Years of Potential Life Lost (YLL)* **130**



# Table des figures

**Figure 1 :** Stock d'eau sur Terre (Gm<sup>3</sup>). Tirée de Roche, Miquel, Gaume, 2012. — **p.15**

**Figure 2 :** Échanges et flux d'eau « Terre-océans-atmosphère » (Gm<sup>3</sup>/an). Tirée de Roche, Miquel, Gaume, 2012, d'après Shiklomanov, 1998. — **p.15**

**Figure 3 :** En bleu, prépondérance dans les pluies continentales de l'eau évaporée au-dessus des océans ; en rouge prépondérance d'eau évapotranspirée sur les continents. Tirée de Van der Ent *et al.*, 2010. — **p.16**

**Figure 4 :** Pluies annuelles moyennes. Tirée de Roche, Miquel, Gaume, 2012. — **p.20**

**Figure 5 :** Évolution des précipitations annuelles en un siècle. Tirée de C. Prudhomme (Verdier, Viollet, 2015). — **p.21**

**Figure 6 :** Répartition zonale des précipitations et de l'évaporation pour les continents et les océans. D'après Frécault, Pagney, 1983. — **p.32**

**Figure 7 :** Deux cellules de Hadley coexistent entre l'équateur et les latitudes moyennes. D'après Roche, Miquel, Gaume, 2012. — **p.33**

**Figure 8 :** Schéma tricellulaire, d'après Frécault, Pagney, 1983. — **p.34**

**Figure 9 :** Circulation générale de l'atmosphère. Source : Météo-France. — **p.34**

**Figure 10 :** Les principaux types de climat. Voir la nomenclature dans le texte. Tirée de Peel, Finlyson, Mc Mahon, 2007. — **p.37**

**Figure 11 :** Les régimes hydrologiques. — **p.38**

**Figure 12 :** Contributions à l'effet de serre des différents gaz présents dans l'atmosphère en 1992. Tirée de GIEC, 1996, AR1. — **p.39**

**Figure 13 :** Contributions de divers facteurs aux changements climatiques depuis 1750. Source des données : GIEC, 2013, AR5, WGI. — **p.40**

**Figure 14 :** Carte des changements observés dans les précipitations annuelles. Tirée de GIEC, 2013, AR5, WGI. — **p.41**

**Figure 15 :** Diverses reconstitutions des précipitations sur les continents (écart à la moyenne 1981-2000). Tirée de GIEC, 2007, AR4, groupe I. — **p.42**

**Figure 16 :** Évolution de l'index synthétique de sévérité de la sécheresse de Palmer sur la période 1900-2005. Tirée de GIEC, 2007, AR4 Groupe I. — **p.43**

**Figure 17 :** Évolution des concentrations de gaz à effet de serre atmosphérique du GIEC 2013, AR5, GT III. — **p.43**

**Figure 18 :** Évolution des précipitations, évaporation, humidité relative et écoulement à échéance 2100 (GIEC, 2013, AR5, WGI) — **p.44**

**Figure 19 :** Modifications de l'intensité des pluies et du nombre de jours secs. Tirée de GIEC, 2007, AR4, groupe I. — **p.45**

**Figure 20 :** Prévisions démographiques. Tirée de UN-DESA 2019. — **p.48**

**Figure 21 :** Évolution des taux de croissance démographique par continents. Tirée de Canning, Raja, Yazbeck, 2015, CC BY 3.0 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage). — **p.49**

**Figure 22 :** Les phases de la transition démographique. Tirée de Canning, Raja, Yazbeck, 2015, CC BY 3.0 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage). — **p.50**

**Figure 23 :** L'Asie de l'Est : exemple de transition démographique. Tirée de Canning, Raja, Yazbeck, 2015, CC BY 3.0 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage). — **p.50**

**Figure 24 :** Comparaison des projections du Club de Rome (1972) et des Nations Unies (2019). Tirée de Léridon, 2020. — **p.52**

**Figure 25 :** Évolution de l'urbanisation dans le Monde de 1960 à 2018. Source des données : Nations Unies. — **p.53**

**Figure 26 :** Évolution de la population urbaine dans le Monde, en Afrique et en Asie. Scénario médian pour les projections. Source des données : Nations Unies. — p.53

**Figure 27 :** Proportion d'habitants vivant dans des bidonvilles. Tirée de UN-DESA, 2016. — p.55

**Figure 28 :** Incidence annuelle, en moyenne, du manque de services d'eau potable et d'assainissement, des catastrophes liées à l'eau, des épidémies, des tremblements de terre et des conflits. Tirée de UNESCO, 1999, CC BY-SA 3.0. — p.56

**Figure 29 :** Les catastrophes hydro-climatiques touchent une population croissante, essentiellement située dans les pays en développement. Tirée de PNUD, 2009, CC BY-SA 3.0. — p.57

**Figure 30 :** Indice planète vivante pour l'eau douce de 1970 à 2016. © WWF, 2020. Tous droits réservés. Tirée de WWF, 2020. — p.61

**Figure 31 :** Taux de croissance du PIB et du PIB/hab. de l'Afrique subsaharienne. Tirée de Canning, Raja, Yazbeck, 2015, CC BY 3.0 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage). — p.64

**Figure 32 :** Évolution du PIB par habitant en Afrique subsaharienne. Source des données : Banque mondiale. — p.65

**Figure 33 :** Comparaison des évolutions de PIB par habitant en France, dans le Monde et en Afrique subsaharienne. Source des données : Banque mondiale. — p.65

**Figure 34 :** Rapport prélèvement/disponibilité. Tirée de Cosgrove, Rijsberman, 2000. — p.77

**Figure 35 :** Évolution des pressions liées aux difficultés économiques et de gouvernance. Tirée de Cosgrove, Rijsberman, 2000. — p.78

**Figure 36 :** Prospective des prélèvements et des consommations en 2018. Tirée de UNESCO, 1999, CC BY-SA 3.0. Méthode traditionnelle de comptabilité limitée à l'eau bleue. — p.78

**Figure 37 :** Principaux flux mondiaux d'eau virtuelle ( $>15 \text{ Gm}^3/\text{an}$ ) entre pays liés aux échanges de produits industriels et agricoles, sur la période 1996-2005. Tirée de Hoekstra, Mekonnen, 2012. — p.84

**Figure 38 :** Empreinte eau moyenne par pays ( $\text{m}^3/\text{hab./an}$ ). Les pays au-dessus de la moyenne mondiale sont colorés du jaune au marron et ceux en-dessous du vert au jaune. Tirée de Hoekstra, Mekonnen, 2012. — p.84

**Figure 39 :** Empreinte eau de consommation des Français par produit. Source des données : WWF, 2012. — p.87

**Figure 40 :** Les contrastes de pluviométrie en Chine. Auteur : Alan Mak, 2006, CC BY-SA 3.0 (source : Wikipedia). — p.91

**Figure 41 :** Les trois branches du projet de transfert Sud-Nord d'eau en Chine. Auteur : Maximilian Dörrbecker (Chumwa) Pline, 2020, CC BY-SA 2.0 (source : Wikipedia). — p.91

**Figure 42 :** Les grands systèmes aquifères de l'Afrique du Nord et du Sahel. Tirée de OSS, 2020. — p.93

**Figure 43 :** Scénario d'extrapolation des politiques actuelles (BAU) : évolution des prélèvements. Source des données : Cosgrove, Rijsberman, 2000. — p.96

**Figure 44 :** Scénario d'extrapolation des politiques actuelles (BAU) : évolution des consommations. Source des données : Cosgrove, Rijsberman, 2000. — p.96

**Figure 45 :** Évolution des pressions sur les ressources en eau. Tirée de Cosgrove, Rijsberman, 2000. — p.97

**Figure 46 :** Rendements et besoins en eau de l'agriculture irriguée et de l'agriculture pluviale. Source : FAO. — p.108

**Figure 47 :** Hotspots de la consommation non soutenable de l'irrigation. La carte met en avant les sites où les ressources en eau disponible pour d'autres usages et les milieux naturels sont en forte diminution. Tirée de Rosa *et al.*, 2019, CC BY-SA 3.0. — p.112

**Figure 48 :** Baisses (en pourcentage) des rendements céréaliers prévues en 2050 en raison du changement climatique si aucune mesure d'adaptation n'est prise. Tirée de FAO, 2016. — p.116

**Figure 49 :** Évolution de 2000 à 2012 du nombre d'années perdues par décès prématûr (YLL) et par cause de décès. Tirée de OMS, 2014. — p.131

**Figure 50 :** Évolution de la couverture mondiale de l'approvisionnement en eau (à gauche) et de l'assainissement (à droite), en % sur la période de 1990 à gauche de chaque barre ; en 2015 à droite de chaque barre. Tirée de JMP, 2015. — p.140

**Figure 51 :** Les progrès nécessaires et constatés pour les services de base et les services gérés en toute sécurité, conformément aux ODD. Tirée de Guterres, 2019. — p.144

**Figure 52 :** Les opérateurs peuvent exercer sous des statuts très variés. Tirée de Roche *et al.*, 2016 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage). — p.146

**Figure 53 :** Les acteurs de la régulation de services publics d'eau et d'assainissement. Tirée de Roche *et al.*, 2016 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage). — p.147

**Figure 54 :** Voies de transmission des maladies fécales-orales. Schéma établi par Évelyne Lyons. — p.154

**Figure 55 :** Évolution de l'aide « 1 % solidarité eau » en France en M€. D'après les données collectées par pS-EAU. Source des données : pS-EAU, 2020. — p.156

**Figure 56 :** Possibilités d'atteindre les objectifs du millénaire au rythme actuel. Tirée de PNUD, 2006a. — p.157

**Figure 57 :** Évolution des populations desservies par des acteurs privés dans les pays en développement. Tirée de Marin, 2007. — p.158

**Figure 58 :** La formation des prix des services à partir des coûts de production et de gestion patrimoniale. Tirée de Roche *et al.*, 2016 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage). — p.161

**Figure 59 :** Les tarifs binôme ne sont pas incitatifs aux économies d'eau par les consommateurs, qui ne bénéficient que d'une faible part de leurs efforts de parcimonie. Tirée de Roche *et al.*, 2016 (couleurs modifiées pour le présent ouvrage). — p.162

**Figure 60 :** Les objectifs de développement durable. Source : Nations Unies. — p.169

**Figure 61 :** État 2019 du degré de conformité aux ODD 2030. Tirée de Sachs *et al.*, 2020 — p.169

**Figure 62 :** Les engagements successifs de la communauté internationale en matière de biodiversité n'ont pas enrayer les dégradations massives © WWF, 2016. Tous droits réservés. Tirée de Grooten, Almond, 2018. — p.173

**Figure 63 :** Le bassin Murray-Darling. Tirée de *Murray-Darling Basin Authority Annual Report* 2019-20. CC- BY 4.0. — p.190

**Figure 64 :** Les étapes de mise en œuvre du plan de bassin Murray-Darling. Tirée de *2017 Basin Plan Evaluation* © Murray-Darling Basin Authority (CC BY 4.0). — p.191

**Figure 65 :** Prix (AUD/1000 m<sup>3</sup>) des droits d'eau de surface de 2009 à 2019 dans la partie sud du bassin Murray-Darling. Tirée de Whittle *et al.*, 2020, CC BY 4.0. 1 dollar australien (AUD) vaut environ 0,6 €. Les prix sont donc de l'ordre de 2 €/m<sup>3</sup>. — p.193

**Figure 66 :** Depuis 2005, les périodes de faible remplissage des retenues (unité à droite : Mm<sup>3</sup>) correspondent à des prix (unités à gauche : AUD/1000 m<sup>3</sup>) plus élevés. Tirée de Whittle *et al.*, 2020, CC BY 4.0. — p.193

**Figure 67 :** La restitution synthétique des principaux indicateurs de performance environnementale rapportés annuellement. Tirée de *Murray-Darling Basin Authority Annual Report* 2019-20. CC- BY 4.0. — p.194

**Figure 68 :** Les plus grandes centrales hydroélectriques en 2017 (en GW). Source des données : Statistica. — p.197

**Figure 69 :** Exemple de variations hebdomadaires du prix de l'électricité (Europe de l'Ouest, 2019, en €/kWh). Tirée de RTE, 2020. — p.197

**Figure 70 :** Exemple de variation des prix de l'électricité dans la journée (24 janvier 2019 en Europe de l'Ouest, en €/kWh). Tirée de RTE, 2020. — p.198

**Figure 71 :** Contribution des diverses sources énergétiques à la puissance produite (MW) en France durant une semaine d'automne. Tirée de Dambrine, 2006. — p.198

**Figure 72 :** Disparités de consommations d'électricité dans le monde en 2018. Source des données : l'AIE. — p.199

**Figure 73 :** Taux d'équipement en petite hydraulique (rapport entre puissance installée et puissance potentielle). Source des données : ONUDI-CIPH, 2016. En rouge : supérieur à 60 %. — p.200

**Figure 74 :** Économie d'eau grâce au recyclage dans une sucrerie. Tirée de Valiron, 1990. — p.201

**Figure 75 :** Le bassin du Sénégal. Tirée de Ndiaye, 2017 ; OMVS. — p.218

**Figure 76 :** Projets structurants de l'OMVS. Tirée de Ndiaye, 2017 ; OMVS, DEDD, 2014. — p.220

**Figure 77 :** Les surfaces irriguées et cultivées en 2009 dans le bassin du Sénégal. Auteur : OMVS, CC BY-SA 3.0 (source : Wikimedia Commons). — p.222

**Figure 78 :** Cycles de l'anophèle et du plasmodium. D'après un schéma d'Évelyne Lyons. — p.225

**Figure 79 :** Les outils financiers auxquels les opérateurs indonésiens accèdent dans le cadre du programme NUWAS. Tirée de Fonseca *et al.*, 2020. — p.233

**Figure 80 :** Organisation du Fonds auto-renouvelable pour l'eau des Philippines. Tirée de Fonseca *et al.*, 2020. — p.234

**Figure 81 :** Évolution des aides publiques au développement dans le secteur de l'eau. Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. Document produit en appui au panel de chefs d'Etat et de gouvernements pour l'eau. — p.237

**Figure 82 :** Part des aides à l'eau potable et à l'assainissement dans les aides à l'eau. Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. — p.237

**Figure 83 :** Évolution du poids de l'aide au secteur eau dans les aides internationales. Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. — p.238

**Figure 84 :** Améliorer les performances de la gestion de l'eau comme enjeu de gouvernance. Tirée de WGI, 2018. — p.240

**Figure 85 :** Douze principes de bonne gouvernance de l'eau. Tirée de WGI, 2015. — p.240

**Figure 86 :** Méthode d'élaboration du diagnostic de gouvernance. Tirée de WGI, 2018. — p.241

**Figure 87 :** Le degré d'accord des parties prenantes sur l'évaluation (feu vert, jaune ou rouge) est évalué (1 goutte : forts désaccords ; 2 gouttes : divergences d'opinions ; 3 gouttes : consensus). Tirée de WGI, 2018. — p.242

**Figure 88 :** L'évaluation mesure les progrès espérés dans les trois années à venir. Source des données : WGI, 2018. — p.242

**Figure 89 :** Besoins de financements pour les ODD. Tirée de Miyamoto, Chiofalo, 2016. — p.246

**Figure 90 :** Le secteur privé, très peu présent dans le financement du secteur de l'eau. Tirée de Miyamoto, Chiofalo, 2016. — p.246

**Figure 91 :** Les aides des organisations caritatives. Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. — p.247

**Figure 92 :** Aides bilatérales distribuées par les dix principaux donneurs. Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. — p.248

**Figure 93 :** Les aides des organisations multilatérales. Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. — p.249

**Figure 94 :** Situation en 2015 au regard des OMD pour l'eau potable (en haut) et pour l'assainissement (en bas) des dix pays ayant reçu le plus d'aides ces vingt dernières années. Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. — p.250

**Figure 95 :** Répartition régionale des aides d'assistance au développement (en haut) et des autres financements (en bas). Tirée de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. — p.251

# Liste des tableaux

**Tableau 1 :** Évaporation et précipitation moyennes sur les océans et les continents — **p. 31**

**Tableau 2 :** Valeurs globales des flux à l'échelle de la planète (en Gm<sup>3</sup>/an et en lame d'eau en millimètres par an). — **p. 31**

**Tableau 3 :** Flux hydriques des continents aux océans (en Gm<sup>3</sup>/an). — **p. 32**

**Tableau 4 :** Les cinq grands types de climats. Classification de Köppen-Geiger. Avec des noms différents, elle reprend celle de Candolle. D'après Frécault, Pagney, 1983. — **p. 36**

**Tableau 5 :** Évolution de l'utilisation de l'eau au xx<sup>e</sup> siècle (en Gm<sup>3</sup>/an). Tiré de Shiklomanov, 1998. Bilan traditionnel (eau bleue). — **p. 75**

**Tableau 6 :** Bilans continentaux pour l'an 2000, d'après Marsily, 2009. — **p. 80**

**Tableau 7 :** Évolution des prélèvements et des consommations. Tiré de Marsily, 2009. — **p. 81**

**Tableau 8 :** Empreinte eau par secteur d'usage sur la période 1996-2005. Tiré de Hoekstra, Mekonnen, 2012. — **p. 80**

**Tableau 9 :** Ventilation de l'empreinte eau par secteur d'usage en eau verte, bleue et grise, sur la période 1996-2005. Tirée de Hoekstra, Mekonnen, 2012. — **p. 82**

**Tableau 10 :** Les composantes de l'empreinte eau pour une comptabilité nationale. Tirée de *Waterfootprint Manual*. — **p. 83**

**Tableau 11 :** Bilan de la Tunisie et prospective pour 2025. Tirée de Marsily, 2009. — **p. 84**

**Tableau 12 :** Empreinte eau de consommation de la France (métropolitaine) en Gm<sup>3</sup>/an © WWF, 2012. — **p. 87**

**Tableau 13 :** Ordres de grandeur des quantités d'eau requises en m<sup>3</sup>/T (ou L/kg) pour produire quelques-unes des denrées de base de notre alimentation. Les poids correspondent à la partie consommée (non exprimée en matière sèche) des différents produits. Diverses sources. — **p. 107**

**Tableau 14 :** Coûts et performances des techniques d'irrigation. Tirée de Hillel, 1987. — **p. 109**

**Tableau 15 :** Ordre de grandeur des prélèvements d'eau pour un hectare irrigué. — **p. 109**

**Tableau 16 :** Cinq principaux flux d'import et d'export d'eau virtuelle provenant de l'irrigation non soutenable des États-Unis en 2000 et 2015, faisant partie des quinze flux mondiaux les plus importants. Tiré de Rosa *et al.*, 2019. — **p. 112**

**Tableau 17 :** Importance pour la santé publique des maladies liées à l'eau. Source des données : OMS, 2000 et 2018 de la base de l'Observatoire mondial de la santé (accessible sur : <https://www.who.int/gho/database/fr/>) — **p. 130**

**Tableau 18 :** Comparaison des résultats obtenus par l'Inde et le Bangladesh de 1990 à 2004. Tiré de PNUD, 2006a. — **p. 132**

**Tableau 19 :** Impact de différentes politiques en matière de diarrhées évitées. Tiré de Payen, 2013. — **p. 133**

**Tableau 20 :** Les niveaux de service dans le référentiel WASH pour les ODD. Tiré de JMP, 2017a. — p. 135

**Tableau 21 :** Temps quotidien consacré au portage de l'eau. Tiré de PNUD, 2006b. — p. 139

**Tableau 22 :** Les interprétations normatives des ODD eau potable et assainissement. Tirée de JMP, 2017a. — p. 141

**Tableau 23 :** Population supplémentaire à desservir pour respecter en 2030 les cibles 6.1 et 6.2 de l'ODD 6. Tiré de Hutton, Varughese, 2016. GTS : géré en toute sécurité — p. 143

**Tableau 24 :** Nombre moyen annuel de personnes (en millions) dont l'accès à l'eau potable doit être « amélioré » d'ici 2015 pour atteindre les objectifs du millénaire. Tiré de PNUD, 2006a. — p. 157

**Tableau 25 :** Nombre moyen annuel de personnes (en millions) dont l'accès à l'assainissement doit être « amélioré » d'ici 2015 pour atteindre les objectifs du millénaire. Tiré de PNUD, 2006a. — p. 157

**Tableau 26 :** Principaux acteurs privés français du secteur de l'eau et de l'assainissement en 2018 (maximum). — p. 158

**Tableau 27 :** Quelques exemples d'interventions privées dans la gestion des réseaux d'eau potable et d'assainissement. Traduit de PNUD, 2006a. — p. 159

**Tableau 28 :** Les objectifs du développement durable. — p. 168

**Tableau 29 :** Les cibles de l'objectif 6 des ODD. — p. 170

**Tableau 30 :** L'eau dans les cibles de nombreux ODD, hors objectif 6. — p. 170

**Tableau 31 :** Les indicateurs retenus pour le suivi international de l'atteinte des cibles de l'objectif 6. — p. 171

**Tableau 32 :** Catégories de modalités collectives de gestion de biens. — p. 177

**Tableau 33 :** Environnement et communs. Tiré de Misonne, 2018. — p. 178

**Tableau 34 :** Analyse comparative des divers instruments pour la gestion des aquifères. Tirée de Lavenus, Fradet, Chazot 2016. — p. 187

**Tableau 35 :** Treize pays les plus consommateurs d'hydroélectricité dans le monde. Tiré de Statista. — p. 199

**Tableau 36 :** Prélèvements d'eau liés à la production dans diverses branches industrielles. Tirée de Valiron, 1990. — p. 201

**Tableau 37 :** Aides bilatérales distribuées par les dix principaux donneurs. Traduit, version originale issue de Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. — p. 248

**Tableau 38 :** Les aides des organisations multilatérales. Traduit depuis Winpenny *et al.*, 2016, CC BY 3.0. — p. 249

# Table des matières

<i>Remerciements</i>	5
<i>Introduction</i>	7
<i>Mode d'emploi</i>	9

## PARTIE 1

### L'eau et les hommes

Appréhender l'échelle mondiale sans perdre de vue les enjeux locaux

#### **Chapitre 1 | Le cycle de l'eau : comprendre les grands flux, les variations locales et temporelles et les évolutions**

1.1. Évolution des conceptions du cycle de l'eau	14
1.2. Le cycle de l'eau : transferts d'eau et d'énergie	14
1.3. Dans l'eau, y a pas seulement que de l'eau, y'a aut'chose...	17
1.3.1. Eau et écosystème aquatique	18
1.3.2. Comprendre ces systèmes dynamiques ouverts : la notion de panarchie	18
1.3.2.1. Le cycle adaptatif	18
1.3.2.2. L'emboîtement des échelles	19
1.3.2.3. La panarchie	19
1.3.2.4. Des configurations dynamiques plutôt que des états	19
1.4. Inégalités de répartitions des ressources en eau	20
1.5. Changement climatique : atténuation et adaptation concernant la gestion de l'eau	22
1.5.1. Leçon n°1 : impact sur la ressource en eau et augmentation des risques	22
1.5.1.1. Réduction des ressources renouvelables en eau	22
1.5.1.2. Risques d'inondations	23
1.5.1.3. Réchauffement de l'eau et qualité de l'eau	23
1.5.1.4. Événements extrêmes	23
1.5.2. Leçon n°2 : les impacts seront très variables géographiquement et sociologiquement	23
1.5.3. Leçon n° 3 : du fait de l'incertitude des impacts du changement climatique, il faut réviser nos modes de planification	23
1.5.4. Leçon n°4 : lien étroit entre les impacts du changement climatique et les impacts globaux	24
1.5.5. Leçon n°5 : il faut se pencher particulièrement sur quatre secteurs	24
1.5.5.1. Agriculture	24
1.5.5.2. Services municipaux	25
1.5.5.3. Énergie	25
1.5.5.4. Protection/conservation des eaux naturelles	25
1.5.6. Leçon n°6 : le secteur de l'eau est concerné par les volets d'« atténuation » et d'« adaptation »	25
1.5.7. Leçon n°7 : le coût exorbitant de l'adaptation au changement climatique	26
1.5.8. Leçon n°8 : les conséquences géopolitiques	26
1.5.9. Leçon n°9 : il n'est pas possible de s'adapter à tout	26

<b>Pour approfondir</b>	27
Question n°1 : Se représenter les stocks et les flux d'eau à l'échelle planétaire	28
Étude de cas n°1 : La Terre « boule de glace »	30
Focus n°1 : Le cycle de l'eau à l'échelle planétaire	31
Focus n°2 : Climats et régimes hydrologiques	36
Focus n°3 : Eau et changement climatique	39

## **Chapitre 2 | Démographie, biodiversité et risques : relever le défi de la soutenabilité**

<b>2.1. Atteindre neuf à dix milliards d'habitants en 2050 ?</b>	48
2.1.1. Deux utopies contrastées : le pessimisme malthusien et l'optimisme de la théorie de la transition démographique	49
2.1.2. Revisiter la question de la démographie mondiale à l'aune des limites des ressources planétaires	51
2.1.3. Des contrastes régionaux qui conditionnent toute réflexion	52
2.1.4. Plus de la moitié de la population mondiale est urbaine et cette part est croissante	52
<b>2.2. La pauvreté</b>	54
2.2.1. L'Afrique, notamment l'Afrique subsaharienne, est confrontée à un défi majeur	54
2.2.2. Les bidonvilles croissent	54
2.2.3. Le dénuement des zones rurales	55
<b>2.3. Exposition au risque d'inondation : une vulnérabilité qui s'accroît</b>	56
2.3.1. Des impacts économiques et sociaux majeurs	56
2.3.2. Effets du changement climatique	58
2.3.3. Effets des aménagements	58
2.3.4. Diminuer la vulnérabilité des biens et des personnes	58
<b>2.4. Biodiversité : la dégradation des écosystèmes aquatiques terrestres est d'une rapidité et d'une ampleur inégalées</b>	59
2.4.1. Des pertes avérées de biodiversité sous la pression anthropique	60
2.4.2. Pourquoi les milieux naturels ne sont-ils plus une variable d'ajustement ?	61
<b>Pour approfondir</b>	63
Étude de cas n°2 : Comment caractériser la situation en Afrique ?	64
Étude de cas n°3 : Les bidonvilles	66
Étude de cas n°4 : Qui sont les pauvres ruraux ?	67

## **Chapitre 3 | Faire le bilan des usages et des ressources : résoudre un casse-tête méthodologique**

<b>3.1. Les ressources « mobilisables »</b>	71
3.1.1. Unicité de la ressource	71
3.1.2. Utilisation et réutilisation	71
3.1.3. Utiliser l'eau de mer	73
3.1.4. Transférer de l'eau sur de grandes distances	74
<b>3.2. Faire un bilan-besoin ressources : l'approche habituelle</b>	74
3.2.1. Les déséquilibres locaux sont réels	75
3.2.2. L'indicateur de Falkenmark	77
3.2.3. Un exercice prospectif fondateur : la « Vision pour l'eau en 2025 »	77
3.2.4. Actualiser les travaux de la Vision pour 2040	78
<b>3.3. L'empreinte eau : aller au-delà avec une méthodologie mieux adaptée</b>	79
3.3.1. Intégrer l'eau verte (agriculture pluviale) dans les bilans	79
3.3.2. L'empreinte eau : eau bleue, verte et grise	80
3.3.3. L'empreinte eau de nos modes de consommation	82
3.3.4. Intégrer l'eau virtuelle pour calculer l'empreinte eau d'un territoire	83
<b>Pour approfondir</b>	85
Question n°2 : Comment un steak de 100 g peut-il avoir une empreinte eau de 1,5 m <sup>3</sup> ?	86
Question n°3 : Pratiques de consommation et empreinte eau : sur quoi faudrait-il agir ?	87
Étude de cas n°5 : En Chine, les plus grands transferts d'eau mondiaux	90
Étude de cas n°6 : La surexploitation de l'aquifère à Mexico	92
Étude de cas n°7 : Le système aquifère du Sahara septentrional	93
Focus n°4 : Un exercice prospectif fondateur : la « vision pour l'eau en 2025 »	95

## PARTIE 2

# Alimentation, eau potable et assainissement

Satisfaire les besoins essentiels d'une population croissante

## Chapitre 4 | Alimentation, agriculture et monde rural : trouver un chemin soutenable

<b>4.1. Rééquilibrer les régimes alimentaires</b>	104
4.1.1. L'alimentation est un enjeu de santé publique	104
4.1.2. Assurer un apport en protéines moins fondé sur la consommation de viande	105
<b>4.2. L'eau consommée pour l'alimentation humaine</b>	106
4.2.1. L'agriculture, principale consommation d'eau... jusqu'à surexplorier les ressources	106
4.2.2. Trois métabolismes végétaux conditionnent l'eau consommée par les plantes	106
4.2.3. L'alimentation carnée est la plus consommatrice en eau	106
<b>4.3. Quelles pratiques agronomiques ?</b>	107
4.3.1. Agriculture pluviale et agriculture irriguée : quel choix ?	107
4.3.1.1. Le rendement des cultures trop sèches est très faible	107
4.3.1.2. L'irrigation et le drainage sont indissociables	108
4.3.1.3. L'irrigation de complément, outil de l'agriculture sous contrat	110
4.3.1.4. Réduire les « pertes », un enjeu d'économie agricole plutôt qu'environnemental	110
4.3.2. Les impasses actuelles	110
4.3.2.1. Désertification et dégradation des sols	110
4.3.2.2. Non soutenabilité de certaines exportations de produits agricoles	111
4.3.3. Poursuivre la révolution verte ou passer à une irrigation de résilience ?	112
4.3.3.1. Augmenter les surfaces cultivées	112
4.3.3.2. Cultures pluviales et irriguées : l'irrigation poursuit son développement	113
4.3.3.3. Où trouver l'eau pour l'irrigation ?	114
4.3.4. Une agroécologie fondée sur la qualité des sols et adaptée au changement climatique	115
4.3.4.1. Un facteur aggravant : le changement climatique impose des adaptations significatives	115
4.3.4.2. Les démarches de progrès : un panel de solutions	116
4.3.4.3. L'agriculture de conservation des sols	117
4.3.4.4. L'agriculture de précision et les améliorations technologiques	117
4.3.4.5. L'évolution des plantes vers plus de résilience et moins de consommation	118
<b>4.4. Filières, marchés et développement rural : quelle cohérence ?</b>	118
4.4.1. Aspects économiques et stratégiques	118
4.4.2. Une production créatrice d'emplois en milieu rural	120
4.4.3. Les investissements responsables et inclusifs : condition de succès	120

<b>Pour approfondir</b>	121
Étude de cas n°8 : L'irrigation en Algérie	122
Focus n°5 : Les différents métabolismes de la photosynthèse	123
Focus n°6 : Produire plus de riz sur moins de terres avec moins d'eau	124
Focus n°7 : New Breeding Technologies (NBT) : OGM ou pas OGM ?	125

## Chapitre 5 | Eau potable et assainissement : assurer le respect des droits de l'homme

<b>5.1. L'eau : facteur de santé publique</b>	129
5.1.1. L'eau dans notre corps	129
5.1.2. Les maladies liées à l'eau	129
5.1.3. Les maladies fécales-orales	131
5.1.4. Le rôle de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement	132
5.1.5. COVID-19 et lavage des mains	133
5.1.6. Les besoins d'eau potable et d'assainissement	134
5.1.7. La définition des niveaux de service	134
<b>5.2. Engagements internationaux et droits de l'homme</b>	136
5.2.1. Les droits de l'homme	136
5.2.2. L'eau potable et l'assainissement reconnus comme droits de l'homme	136

5.2.3. Attention aux abus de langage concernant le droit à l'eau	137
5.2.4. Quelles obligations réelles ?	138
5.2.5. Les objectifs du millénaire pour le développement (OMD) 2000-2015	138
5.2.6. Les ODD 2015-2030 : mieux conçus que les OMD	141
5.2.7. Le chemin à parcourir	142
<b>5.3. Les services d'eau potable et d'assainissement</b>	144
5.3.1. Principes généraux d'organisation d'un service public local	145
5.3.2. Régie publique ou délégation à des acteurs privés	145
5.3.3. Les centres urbains secondaires : trop grands... et trop petits	148
5.3.4. Quelle tarification ?	149
5.3.5. Participation, conception et conduite des projets	150
<b>Pour approfondir</b>	
Étude de cas n°9 : L'épidémie de choléra à Lima en 1991	153
Étude de cas n°10 : Qu'a-t-on fait pour mettre en oeuvre les OMD ?	154
Focus n°8 : Les opérateurs des services d'eau et d'assainissement	155
Focus n°9 : Les tarifs de l'eau potable et de l'assainissement	158
	161

### PARTIE 3

## Gestion de l'eau comme un bien commun

Progresser par l'implication de tous, des mécanismes financiers adaptés et la compréhension des écosystèmes

### **Chapitre 6 | L'eau au cœur des objectifs de développement durable : dépasser le travail en silos et raisonner « *out of the water box* »**

6.1. Les objectifs de développement durable et leurs cibles	168
6.2. Un objectif particulier pour l'eau dans les ODD	169
6.3. Les indicateurs : indispensables pour le suivi	171
6.4. Nous ne sommes en bonne voie pour satisfaire l'ODD 6 en 2030	172
6.5. Compléter le dispositif international de suivi et d'évaluation pour l'eau	172
6.6. La biodiversité : le grand écart entre les objectifs affichés et les résultats	173

### **Chapitre 7 | Principes de régulation collective des usages de l'eau comme bien commun : user sans abuser**

7.1. De nombreux usages en compétition	176
7.2. Réflexions sur la nature économique de la ressource en eau et des services d'eau	177
<b>7.3. Gérer l'accès à une ressource limitée comme un bien commun</b>	178
7.3.1. La surexploitation « à la Harding » des aquifères est une réalité	178
7.3.2. La gestion en communs : les conditions de succès d'Élinor Ostrom	180
7.4. L'eau comme ressource et l'eau comme service	181
7.5. Allouer une ressource rare par une juste répercussion des coûts	182
7.6. L'allocation de droits par la puissance publique	183
7.7. Des marchés d'eau aux marchés de droits d'eau	184
7.8. La gestion d'un aquifère : comparaison des outils de gestion	187

<b>Pour approfondir</b>	
Étude de cas n°11 : Les marchés de droits d'eau dans le bassin Murray-Darling en Australie	189
Focus n°10 : L'inégalité énergétique mondiale concerne également la mobilisation des ressources hydroélectriques	190
Focus n°11 : L'eau : un liquide abondant, excellent solvant et offrant une bonne capacité calorifique	196
	201

## **Chapitre 8 | La gestion intégrée des ressources en eau : développer les solutions fondées sur la nature**

<b>8.1. La gestion intégrée des ressources en eau par bassin-versant</b>	204
8.1.1. Un concept qui s'est progressivement imposé sur la scène internationale	204
8.1.2. Gouvernance de la gestion intégrée par bassins-versants	204
<b>8.2. Aspects internationaux</b>	205
8.2.1. Une profusion de traités et de conventions	206
8.2.2. Que nous dit le droit international ?	207
8.2.3. Les conflits liés à l'eau	207
8.2.4. Développement des instances de coopération internationales en Afrique	208
<b>8.3. Prévention des dommages liés aux inondations à l'échelle des bassins-versants</b>	210
8.3.1. Assurer la robustesse et la résilience des installations humaines face aux inondations	210
8.3.2. Les engagements internationaux : le cadre d'action de Sendai	211
<b>8.4. Aménagements et santé publique</b>	211
8.4.1. Le paludisme reste un enjeu de santé publique considérable	212
8.4.2. Le lien des maladies à moustiques avec l'aménagement hydraulique	212
<b>8.5. Aménager sans détruire : les solutions basées sur la nature</b>	213
8.5.1. Les débats autour des grands ouvrages	213
8.5.2. Concevoir et gérer de grands ouvrages à buts multiples	214
8.5.3. Les solutions fondées sur la nature : une nouvelle ingénierie moins ignorante	215
<b>Pour approfondir</b>	217
Étude de cas n°12 : Le fleuve Sénégal	218
Focus n°12 : Le paludisme	224

## **Chapitre 9 | Deux clés de succès intimement liées : financer de façon appropriée et améliorer la gouvernance**

<b>9.1. Mobiliser les moyens financiers adéquats</b>	228
9.1.1. Des besoins de financement non satisfaits et des moyens inemployés	229
9.1.2. Le besoin de financements mixtes ( <i>blended financing</i> )	229
9.1.3. Les financements du secteur bancaire privé	230
9.1.4. Améliorer l'efficacité des dépenses publiques	231
9.1.5. De la microfinance à la responsabilité sociale et environnementale	235
9.1.6. L'aide publique internationale est essentielle	236
9.1.7. Mobiliser le fonds vert pour le climat ou créer un fonds bleu spécifique ?	238
<b>9.2. Faire progresser la gouvernance : les travaux de la Water Governance Initiative</b>	239
<b>9.3. La coopération décentralisée peut faciliter le renforcement des capacités locales</b>	243
<b>9.4. Agir et soutenir là où c'est le plus difficile : une « ardente obligation »</b>	244
<b>Pour approfondir</b>	245
Focus n°13 : Les aides et financements internationaux	246

<b>Bibliographie</b>	253
<b>Sigles et acronymes</b>	271
<b>Glossaire</b>	277
<b>Index géographique</b>	283
<b>Index des notions</b>	285
<b>Table des figures</b>	291
<b>Liste des tableaux</b>	295

