



Les problèmes de l'eau en 30 questions

Ghislain de MARSILY

Sommaire

1. Allons-nous manquer d'eau au XXI^e siècle ?
2. D'où vient l'eau sur Terre ?
3. Peut-on « fabriquer » de l'eau ?
4. Comment fonctionne le cycle de l'eau ?
5. Quelle est la répartition de cette ressource en eau sur la planète ?
6. Quels sont les stocks d'eau sur terre ?
7. Les changements climatiques vont-ils modifier la disponibilité de l'eau ?
8. La fréquence des événements extrêmes va-t-elle changer ?
9. Y aura-t-il bientôt une crue centennale à Paris, quelques 100 ans après celle de 1910 ?
10. Peut-on se protéger contre les crues ?
11. Où sont les zones principales où on manque actuellement d'eau sur terre ?
12. Les écosystèmes aquatiques naturels ont-ils encore assez d'eau ?
13. Quelle est la qualité actuelle des milieux aquatiques et des écosystèmes ?
 - 13.1 Pollution diffuse d'origine agricole
 - 13.2 La pollution urbaine
 - 13.3 La pollution industrielle.
 - 13.4 Qu'appelle-t-on un parc naturel hydrologique ?
 - 13.5 Et les zones humides ?
 - 13.6 Qu'est-ce que c'est que la directive cadre européenne sur l'eau ?
 - 13.7 Et dans les pays en développement ?
14. L'eutrophisation
15. Les agences de l'eau
16. Combien d'êtres humains n'ont pas accès à l'eau potable ?
17. La qualité de l'eau potable dans les pays développés est-elle bonne ?
18. Combien consomme-t-on d'eau minérale, et pourquoi ?
19. D'où viennent les eaux de sources et les eaux minérales ?
20. Quels sont les besoins en eau potable de la planète ?
21. Quels sont les besoins en eau agricole de la planète ?
22. Quels sont les besoins en eau industrielle de la planète ?
23. Quelle est la consommation totale en eau de la planète ?
24. Comment va-t-on nourrir la planète en 2050 ?
25. Peut-il y avoir des famines dramatiques sur Terre par manque d'eau ?
26. Y aura-t-il des guerres de l'eau ?
27. Faut-il économiser l'eau ?
28. L'empreinte eau
29. L'eau en France
 - 29.1 Le cycle hydrologique en France
 - 29.2 Prélèvements et consommation d'eaux de surface et souterraines
 - 29.3 Stockage d'eau en barrages
30. Perspective

Bibliographie

1. Allons-nous manquer d'eau au XXI^e siècle ?

Globalement, la réponse est non. Il y aura toujours assez d'eau sur Terre pour les besoins en eau domestique d'une humanité en forte croissance, même si elle passe à 9,5 milliards d'habitants en 2050, ou 11 milliards en 2100, comme cela est anticipé. Le vrai problème de l'eau est sa disponibilité locale pour l'agriculture (pluviale ou irriguée), qui risque de faire défaut aux endroits cultivables et là où augmente très fortement la demande par croissance démesurée de la population (Asie, Afrique), dans des zones déjà en déficit hydrique. Or environ 90 % de nos besoins en eau sont pour nous nourrir.

Le problème est aussi la concurrence permanente entre production agricole et préservation d'écosystèmes naturels (forêts, prairies, zones humides, biodiversité) en bon état malgré la pression agricole très forte pour nourrir la population mondiale. Voir question 21 ci-après.

Cependant, localement, la réponse peut être différente. Nous verrons à la question 7 (changement climatique) que la répartition actuelle des précipitations peut être modifiée assez fortement dans certaines zones, en particulier dans les régions de latitudes méditerranéennes, les pluies peuvent y être plus faibles que par le passé, en particulier en été, tandis que l'évapotranspiration augmente. Il peut donc y avoir des manques en eau localement, et des besoins élémentaires non satisfaits, si des adductions d'eau n'ont pas été mises en place, ou des usines de dessalement de l'eau de mer, ou autre solution technique (économies d'eau, recyclage...). En France, le Sud-est ne manquera jamais d'eau, grâce au château d'eau que constituent les Alpes, et l'immense retenue de Serre-Ponçon, construite au début des années 1960. Mais le Sud-ouest, la région parisienne, et d'autres, pourraient manquer d'eau, si des aménagements ne sont pas construits à temps (retenues, adduction à grande distance, recyclages). Dans d'autres régions, ce n'est pas seulement le changement climatique qui sera la cause d'un manque d'eau, c'est la croissance démographique et surtout urbaine. Actuellement, la moitié environ de l'humanité vit en ville, il est anticipé que ce chiffre passe à 70 % en 2050. Les très grandes villes (plus de cinq millions d'habitants) vont être très nombreuses en Afrique, en Asie, en Amérique du Sud, et auront de sérieux problèmes d'alimentation en eau, qui demanderont parfois des adductions sur des distances dépassant 100 km, en sus de solutions techniques comme les économies d'eau, le recyclage, le dessalement, etc...

2. D'où vient l'eau sur Terre ?

Des planètes dites telluriques (Mercure, Vénus, la Terre et Mars), la Terre est celle qui contient de loin le plus d'eau, pour l'essentiel salée. Cette eau y est venue lors de la formation de la Terre, par accréation et collision de matériaux solides de plus petite taille, l'eau contenue s'étant en majorité rassemblée en surface. De plus, la Terre a été bombardée après sa formation par des météorites contenant un peu d'eau ; en revanche, une origine de l'eau par bombardement par des comètes est aujourd'hui abandonnée, depuis les résultats de la mission « Rosetta » de l'Agence spatiale européenne (où la France était leader), qui a envoyé en 2015 le module Philae se poser sur la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, qui se trouvait à 313 millions de km de la Terre, et qui a montré en analysant sur place la glace de la comète, que la teneur en Deutérium¹ de cette glace était en moyenne deux fois plus élevée que celle de l'eau de la Terre, ce qui interdit qu'une part significative de l'eau sur Terre provienne d'un bombardement par des comètes.

Une très faible quantité de l'eau accumulée sur Terre est cependant partie dans l'espace, par dissociation de la molécule d'eau en hydrogène et oxygène en haute altitude sous l'effet du rayonnement solaire, puis départ de l'hydrogène insuffisamment retenu par la gravité. On

¹ Le Deutérium est un isotope stable et lourd de l'hydrogène, de masse atomique de 2.

estime la perte cumulée d'eau depuis la création de la Terre, il y a 4,6 milliards d'années, à environ 0,3‰ du stock actuel d'eau sur Terre. On peut donc dire que le stock d'eau sur Terre est à peu près constant. Les planètes comme Mercure et Mars ont probablement perdu par ce processus la majeure partie de leur eau. Vénus en a gardé beaucoup. Les planètes géantes plus éloignées du soleil (Jupiter, Saturne, Neptune, ...) contiennent de très grandes quantités d'eau.

3. Peut-on « fabriquer » de l'eau ?

La synthèse de l'eau est facile, il suffit de faire brûler de l'hydrogène avec de l'oxygène ! Mais pour fabriquer ces constituants, il faut en général des quantités très importantes d'énergie, par exemple en électrolysant de l'eau ! On fabriquerait donc de l'eau avec de l'eau, en ayant dépensé beaucoup d'énergie pour rien. Mais on peut fabriquer de l'eau douce avec de l'eau salée, par dessalement, soit par évaporation/condensation, soit par osmose inverse, cette dernière technique étant plus efficace et moins chère. Le coût du dessalement est aujourd'hui un peu inférieur à 0,7 € par mètre cube, et décroît chaque année, mais il dépend fortement du prix de l'énergie. Si cette option est envisageable pour l'eau domestique, elle est, à de rares exceptions près, totalement irréaliste et trop chère pour l'eau destinée à l'agriculture : à titre d'exemple, pour produire par dessalement l'eau d'irrigation nécessaire à la satisfaction des besoins en nourriture des 3 milliards d'êtres humains supplémentaires susceptibles de venir sur la Terre d'ici à 2050 (estimée à 4 000 km³/an), il faudrait dépenser en énergie l'équivalent de trois fois la quantité de pétrole et de gaz actuellement consommée par an dans le monde. En revanche, le dessalement de l'eau de mer se combine très bien avec les énergies renouvelables intermittentes, on dessale l'eau quand l'énergie est disponible, et on la stocke dans des réservoirs pour l'utiliser quand il n'y a pas d'énergie renouvelable disponible. Le groupe français Suez a ainsi construit des usines de dessalement adossées à des éoliennes en Australie, à Perth et Brisbane.

4. Comment fonctionne le cycle de l'eau ?

Le cycle hydrologique externe perpétuel de l'eau douce fonctionne par évaporation, condensation et précipitation, son moteur thermique est le rayonnement solaire. Ce cycle alimente les continents et y maintient la vie et tous les écosystèmes que nous connaissons, pour lesquels l'eau douce est indispensable. La ressource en eau renouvelable de la planète est donc uniquement fournie par les précipitations annuelles sur les continents, qui sont estimées à 113.000 km³/an. Cela correspond en moyenne à une « lame d'eau » de pluie de l'ordre de 840 mm/an, pour une surface de continents de 134 millions de km², ou encore à un volume annuel égal à 1.270 fois celui du Lac Léman.

Le devenir moyen de cette ressource est alors le suivant :

73.000 km³/an repartent vers l'atmosphère, par évaporation directe et surtout par transpiration de la végétation. Cette quantité d'eau alimente à la fois l'agriculture pluviale (5.000 km³/an actuellement) et le fonctionnement des écosystèmes naturels. Ce n'est donc en rien une « perte ». On appelle cette fraction « **l'eau verte** »², car elle alimente principalement la végétation. Dans le détail, cette eau arrive par la pluie sur le sol, s'infiltre et y est « stockée » par capillarité entre les grains du sol, comme l'eau sur un papier buvard. Elle reste donc sur place, parfois pour plusieurs mois, à faible profondeur sous la surface, de 1 à 2 m, et n'est extraite que par les racines de la végétation, par un mécanisme osmotique (la sève dans les racines est à une concentration élevée en sels minéraux, bien plus élevée que celle de l'eau du sol, si bien que l'osmose fait pénétrer l'eau du sol dans les racines et racinelles).

² Voir aussi question 28 et Figure 1

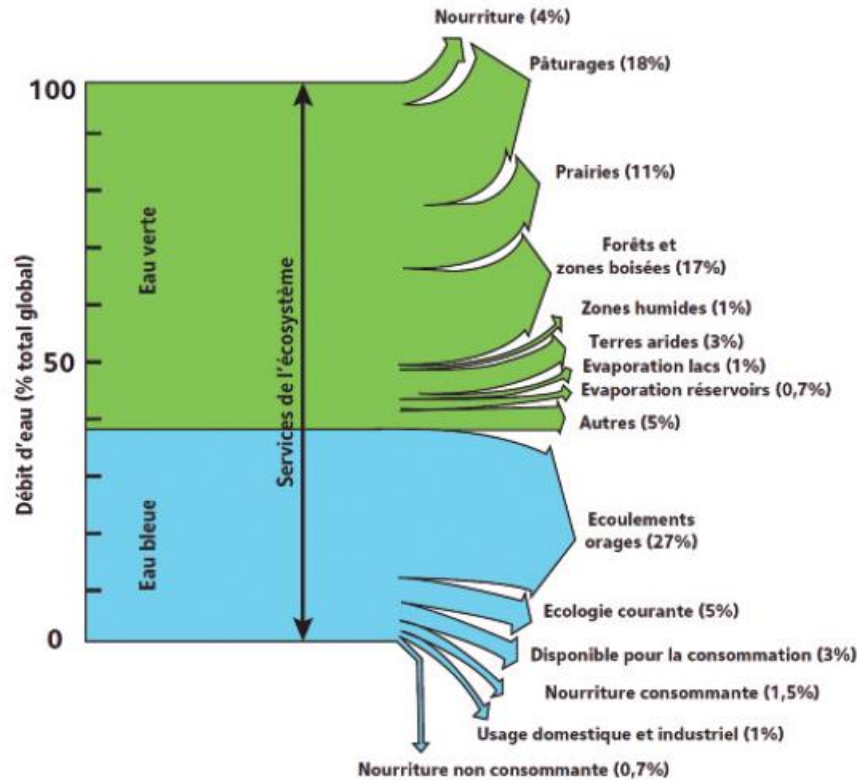


Figure 1 : Eau bleue et eau verte sur la planète, selon Rockström (1999)

3.500 km³/an sont constitués par la glace des icebergs), rejetés par les calottes glaciaires polaires (Antarctique et Groenland), qui fondent en mer et participent au fonctionnement de la circulation générale océanique ; on ne compte pas dans ces icebergs la « glace de mer », qui est de l'eau de pluie tombée sur la mer (en non sur les continents) qui a gelé en flottant sur l'eau de mer salée.

36.200 km³/an constituent l'écoulement total sur les continents, appelé « l'eau bleue »² ; on y distingue 26 000 km³/an qui rejoignent les rivières par ruissellement direct sur la surface du sol lorsqu'il pleut (une fraction de cette eau peut être récupérée et stockée dans des barrages et utilisée par l'homme ; ce flux sert aussi aux écosystèmes aquatiques lacustres, fluviaux et côtiers) et 10.000 km³/an qui s'infiltrent dans les sols en profondeur, plus bas que le sol superficiel qui stocke l'eau verte, et s'écoulent ensuite dans les nappes souterraines, alimentant les rivières lorsqu'il ne pleut pas (7.800 km³) ou rejoignant directement la mer (2.200 km³).

Le bilan est ainsi bouclé. Il faut noter que l'eau des précipitations provient en bilan global pour 65 % de l'évaporation sur ces mêmes continents, et pour 35 % seulement de l'évaporation sur les océans. Localement bien sûr, ces pourcentages peuvent être différents : près des côtes, l'eau de pluie a une origine essentiellement marine, tandis que dans les grands continents, l'eau de pluie a une origine essentiellement d'évaporation continentale. Le temps moyen de résidence de l'eau dans chacun des « réservoirs » du cycle de l'eau est de 9,5 jours dans l'atmosphère (nuages), 17 jours dans les rivières, 30 ans dans les lacs d'eau douce, 1.500 ans dans les eaux souterraines, 3.000 ans dans les océans, 10.000 ans dans les glaces de l'Antarctique, 5.000 ans dans les glaces du Groenland et 300 ans dans les glaciers de montagne. En ordre de grandeur, une eau évaporée parcourt 1.000 km dans l'atmosphère avec le vent, avant de retomber en pluie. Pour l'océan, l'évaporation est estimée à 413.000 km³/an, et les précipitations à 373.000 km³/an.

Quel est le rôle de la forêt sur le cycle de l'eau ? C'est une idée très solidement ancrée dans les esprits que la forêt attire la pluie, ce qui n'est pas exact, ou en tous cas pas de façon significative, contrairement à ce que raconte Giono dans « L'homme qui plantait des arbres ». La forêt (ou la végétation) retient l'eau, réduit le ruissellement, et augmente donc l'évapotranspiration du sol. Les rivières ont donc moins d'eau, car la forêt la consomme. Il est estimé par exemple que l'avancée de la forêt dans la région de Montpellier depuis 50 ans a diminué les ressources en eau bleue d'environ 15 %. L'eau évaporée retombe bien en pluie quelque part... mais beaucoup plus loin, en moyenne 1.000 km. Si on coupait la forêt amazonienne, l'infiltration serait plus faible, le ruissellement plus intense, l'érosion augmenterait, chargeant en sédiments l'eau qui s'écoule, et il pleuvrait un peu moins, probablement en Argentine ! Mais quel désastre écologique ! En Afrique du Sud, devant la raréfaction des ressources en eau, les autorités ont décidé de faire couper les arbres importés, comme les eucalyptus, qui assèchent les sols et les nappes. Mais à l'échelle du globe, la présence de forêts augmente la pluie et les ressources en eau, car l'évapotranspiration accrue augmente la contribution continentale à la vapeur d'eau atmosphérique, et donc *in fine* les pluies.

5. Quelle est la répartition de cette ressource en eau sur la planète ?

La répartition de cette ressource sur la Terre est très inégale. Par exemple, sur le méridien de Paris, aux latitudes polaires, il pleut très peu, de l'ordre de moins de 200 mm/an. Les précipitations augmentent ensuite jusqu'aux zones tempérées (pratiquement jusqu'au centre de la France), pour atteindre environ 700 à 1.000 mm/an, puis décroissent (zone méditerranéenne) pour presque s'annuler dans la « ceinture des déserts chauds » (le Sahara). Au sud de cette zone, les précipitations augmentent à nouveau, dans la zone tropicale, pour y culminer vers 2.300 mm/an. Cette succession se reproduit dans l'ordre inverse si on passe dans l'hémisphère Sud, depuis l'équateur jusqu'au pôle.

Ce type de répartition est à peu près le même pour tous les méridiens. Il est dû à la circulation générale de l'atmosphère autour du globe. De plus, les précipitations augmentent en général avec l'altitude (elles doublent tous les 2.000 m environ) et avec l'exposition au vent.

6. Quels sont les stocks d'eau sur Terre ?

Les réserves du globe en eau douce sont données dans le tableau 1. Mis à part les glaces, difficiles à utiliser et qui sont d'ailleurs actuellement en partie consommées dans les zones où elles fondent par effet du réchauffement climatique, les nappes souterraines constituent les principales réserves d'eau douce de la planète, le reste étant négligeable. Certains pays ont déjà commencé à prélever ces réserves d'eau souterraines. C'est le cas, par exemple, de l'Inde qui, puisant dans ses nappes phréatiques superficielles, est en passe d'épuiser, d'ici dix ou vingt ans, tous ses stocks régulateurs d'eau souterraine. Ce pays ne pourra plus, ensuite, qu'utiliser les flux annuels des précipitations rechargeant les eaux souterraines, très variables d'une année à l'autre, qui se seront infiltrés pendant la saison humide précédente. Il en est de même pour la Chine du Nord. Les pays du Maghreb (Algérie, Tunisie, Libye) exploitent, quant à eux, de très grands aquifères sahariens dont les ressources sont énormes, et pourraient tenir des siècles au rythme actuel des prélèvements. Mais ces eaux sont chères (coûts de pompage, coûts de transfert vers le nord en Libye, etc.) et ce type de grands aquifères fossiles est relativement rare sur Terre. L'eau dans les nappes du Sahara s'y est infiltrée il y a plus de 6.000 ans, quand le climat du Sahara était encore humide, et notre climat encore périglaciaire ; le tracé des anciennes rivières au Sahara est encore visibles dans la topographie. La figure 2 suivante illustre ces réserves par rapport à la taille de la terre.

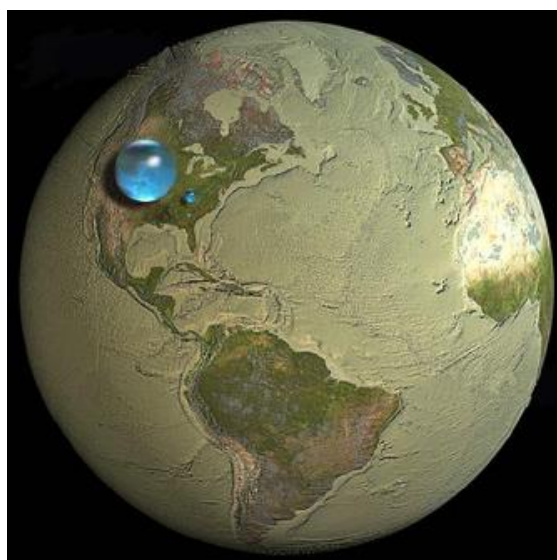


Figure 2 – Volume d’eau sur terre comparé au volume de la Terre. La grosse goutte bleue comprend l’ensemble de l’eau, douce et salée, la petite goutte à droite est l’eau douce, et celle en dessous est l’eau douce non gelée. Dessin réalisé par l’US Geological Survey et publié par « Le Monde ». Voir aussi Tableau 1.

| Milieux | Volumes, km ³ |
|--|--------------------------|
| Neige et glace de l’Antarctique, du Groenland et des montagnes | 28 millions |
| Eaux souterraines à moins de 500 m de profondeur | 7,5 millions |
| Eaux souterraines à plus de 500 m de profondeur | 7,5 millions |
| Eaux de tous les lacs d’eau douce | 176 000 |
| Eaux présentes dans les sols | 122 000 |
| Eaux des mers intérieures | 105 000 |
| Eaux présente à tout instant dans l’atmosphère | 12 700 |
| Eaux présentes à tout instant dans toutes les rivières | 1 700 |
| Eau des cellules vivantes | 1 100 |

Tableau 1 : Volume estimé des réserves d’eaux douces sur terre. Dans les océans le volume d’eau salée est de 1.335 millions de km³. Il y aurait cependant dans le manteau autant d’eau que dans les océans.

7. Les changements climatiques vont-ils modifier la disponibilité de l’eau ?

Oui. Il est prévu par les modèles de climat que globalement, les précipitations vont augmenter, mais que les zones climatiques actuelles vont se déplacer vers les pôles. Sur notre longitude, par exemple, il pleuvra ainsi un peu plus en Europe du Nord, moins en Europe du Sud et Afrique du Nord, et à nouveau plus au sud du Sahara et en zone tropicale.

8. La fréquence des événements extrêmes va-t-elle changer ?

Oui, voir la fiche 7 « Le changement climatique dû aux activités humaines ». Les événements extrêmes (crues, sécheresses) risquent de voir leur fréquence et leur intensité augmenter avec les changements du climat. Dans les zones où il pleuvra plus, les crues deviendraient plus violentes, et dans les régions où il pleuvra moins, les sécheresses deviendraient plus fréquentes. Mais les deux évolutions peuvent se faire simultanément, quel que soit le sens de variation de la pluie.

9. Y aura-t-il bientôt une crue centennale à Paris, quelques 100 ans après celle de 1910 ?

Les crues sont des phénomènes dont l'occurrence est certaine, mais la date imprévisible. On tente, à partir des chroniques du passé, de déterminer la fréquence de retour (ou la probabilité d'advenue) d'une crue d'intensité donnée en un lieu donné. On ajuste pour cela des expressions mathématiques bien choisies sur les fréquences historiques des crues observées, avec la très grande difficulté que les enregistrements les plus anciens ont débuté il y a seulement cent ou deux cents ans, parfois beaucoup moins. Il est donc très hasardeux de donner des probabilités pour les événements extrêmes de fréquence de retour égale ou supérieure au siècle. De plus, les changements climatiques vont probablement faire évoluer la fréquence des événements extrêmes et les lois calées sur la période antérieure ne seront plus représentatives. En résumé, il n'y a aucune raison statistique que la prochaine crue centennale à Paris se produise maintenant, sa probabilité d'occurrence est simplement d'environ 1/100^{ème} chaque année, et elle n'a pas une probabilité plus grande de se produire en 1911, en 1950, ou en 2020.

10. Peut-on se protéger contre les crues ?

Pour se protéger contre les crues, quatre mesures sont à mettre en œuvre :

- tout d'abord, ne pas construire en zone inondable ; la délimitation de ces zones est chose faisable, compte tenu de la morphologie des vallées et des traces laissées dans le paysage par les crues, même anciennes ;
- avoir un très bon service d'annonce de crues qui surveille en permanence l'état des bassins dangereux, prend en compte les prévisions de pluies données par la météorologie et calcule à l'avance avec des modèles le débit (et éventuellement la hauteur d'inondation). Le délai de prévision est fonction de la « nervosité » des bassins. Il peut être de plusieurs jours pour les grands bassins lents (comme la Seine) ou de quelques heures pour les petits bassins où des orages violents peuvent survenir (comme pour les Gardons issus des massifs cévenols). Ce délai peut servir à organiser l'évacuation des populations. La France a récemment mis en place un service d'annonce de crues, le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), en charge de cette responsabilité au niveau national, et qui traite en temps réel toutes les informations disponibles (débit des cours d'eau, précipitations observées ou prévues par les météorologues, etc.) ;
- réduire la vulnérabilité des zones qui seront inondées. On peut aménager l'espace de façon plus ou moins prudente pour mieux résister à une situation de crue. Par exemple, à Paris, on peut installer les transformateurs EDF sur les hauteurs plutôt que le long de la Seine ; ainsi, en cas de crue, seule la partie effectivement inondée sera privée d'électricité, et non pas la ville toute entière. De même, on peut prévoir des méthodes rapides de fermeture étanche des bouches de métro, afin d'éviter que les lignes ne soient coupées. De très nombreuses mesures de précaution peuvent ainsi être mises en œuvre en se préparant à l'avance à la crue ;
- construire des aménagements de protection contre les crues, c'est-à-dire maintenir ou aménager des zones d'expansion des crues dans les zones en amont, au lieu de canaliser les eaux vers le chenal principal. Cela va envoyer des zones rurales en amont, mais préserver des zones urbanisées en aval. Construire également des barrages de stockage de l'eau en amont. À Paris, après la crue de 1910, il a fallu soixante ans pour que quatre

barrages³, qui servent en partie à la protection contre les crues, et en partie au soutien d'étiage, soient édifiés en amont de la capitale ; mais ils ne suffiront pas à éviter que Paris soit en partie inondé, quand une crue analogue à celle de 1910 se reproduira : leur effet sera de réduire la hauteur d'eau dans Paris d'environ 30 cm. Il faut non seulement concevoir des digues de protection mais en assurer également un entretien régulier afin d'éviter des catastrophes, comme la rupture des digues du Rhône en amont d'Arles en 2003, ou de celles de La Nouvelle-Orléans en 2005. Mais ni les digues ni les barrages ne peuvent être une protection absolue ; ceux-ci sont dimensionnés pour protéger contre une crue de fréquence de retour donnée et sont inefficaces, voire dangereux, pour une crue plus intense. Il faut enfin noter que les barrages, qu'ils soient de protection contre les crues ou de stockage, ont pour conséquence la rétention des sédiments normalement charriés par les cours d'eau, engendrant en aval des déficits sédimentaires (érosion, affouillement...) le long des cours d'eau et même le long des côtes.

11. Où sont les zones principales où on manque actuellement d'eau sur Terre ?

En associant à chaque zone climatique le pourcentage de la population mondiale qui y vit, l'écoulement total, et le ruissellement direct s'écoulant dans les rivières, on peut constater que la répartition actuelle de la population ne suit pas du tout la disponibilité de la ressource en eau (Tableau 2). Aux régions déficitaires en eau pour des raisons physiques (prélèvements d'eau bleue supérieurs à 75 % des ressources) s'ajoutent celles qui présentent un déficit pour des raisons économiques, par manque de moyens pour mettre en valeur et exploiter la ressource (barrages, adductions,...), alors que la ressource en eau existe (Fig. 2).

| Classe climatique | Zones de végétation | A [%] | POP [%] | Q [%] | q [mm a ⁻¹] |
|-------------------|--|-------|---------|-------|-------------------------|
| Polaire et Froid | Toundra et polaire, parcs froids | 14.8 | 3.2 | 11.9 | 245 |
| Fraîche | Toundra forestière, forêt boréale | 11.3 | 4.0 | 11.6 | 313 |
| Tempérée | Forêt tempérée, forêt tempérée chaude | 9.9 | 23.3 | 15.2 | 465 |
| Steppe | Steppe, Chaparral | 9.7 | 13.6 | 1.9 | 59 |
| Aride | Déserts froids, déserts chauds | 18.5 | 7.9 | 0.3 | 5 |
| Subtropicale | Tropicale semi-aride, forêt tropicale sèche | 18.3 | 24.8 | 8.8 | 147 |
| Tropicale | Forêt tropicale saisonnière, forêt tropicale | 17.5 | 23.2 | 50.3 | 872 |
| Humide | pluvieuse | | | | |

Tableau 2. Classification des climats et des zones de végétation, adaptée de Viviroli et al., (2007). L'antarctique et la partie englacée du Groenland sont exclus. A : proportion de la surface totale des continents (total : 133.6 millions km²) ; POP : proportion de la population globale (total : ~7,2 milliards d'habitants) ; Q : proportion du débit d'écoulement (eau bleue) total (total : 36 200 km³ a⁻¹) ; q : ruissellement direct.

³ Grands Lacs de Seine : Lac Marne (364,5 Mm³), Lac Seine (219,6 Mm³), Lac Aube (183,5 Mm³), Lac de Pannecière sur l'Yonne (82,5 Mm³)

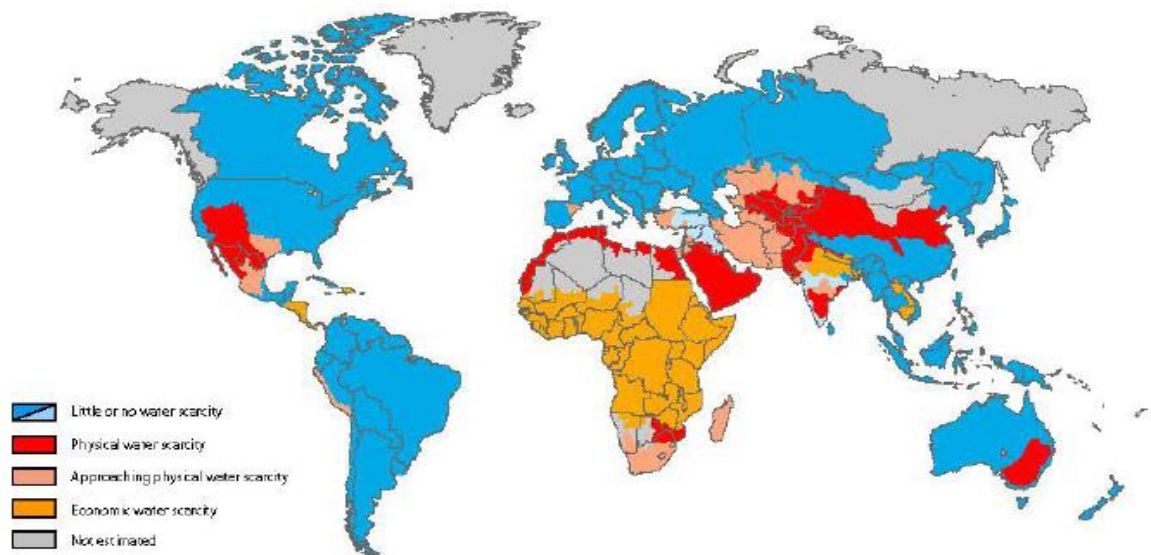


Figure 3 – Zones où sévit en 2000 un manque chronique de ressources en eau, du point de vue physique ou économique. D’après IWMI (2007).

Rouge : Déficit physique ; plus de 75% du débit des rivières (eau bleue) est prélevé pour les besoins de l’homme, en tenant compte des recyclages. Des pays arides à faible demande peuvent ainsi ne pas être en déficit.

Rose : Plus de 60% du débit des rivières est prélevé. Ces bassins vont devenir rouges dans un futur proche.

Orange : Déficit économique en eau. Les ressources sont abondantes par rapport aux usages, avec moins de 25% de prélèvements du débit des rivières, mais la sous-alimentation sévit. La capacité financière en moyens d’équipement fait défaut.

Bleu : Ressources en eau abondantes. Prélèvements d’eau bleue inférieurs à 25% du débit des rivières.

12. Les écosystèmes aquatiques naturels ont-ils encore assez d’eau ?

Depuis son apparition sur Terre, l’homme a utilisé à son profit, et dérobé peu à peu aux écosystèmes naturels, une partie sans cesse croissante des ressources issues du cycle hydrologique naturel, essentiellement pour faire fonctionner à son avantage des écosystèmes agricoles artificiels. Longtemps insignifiant, ce détournement de la ressource est devenu de plus en plus important. Qu’en sera-t-il en 2050, quand la Terre comptera peut-être 9,5 milliards d’habitants ?

Le reste des ressources en eau non utilisées par l’homme entretient en effet le fonctionnement des écosystèmes naturels (forêts, zones humides, espaces naturels...), alimente les fleuves et les nappes, qui permettent également l’existence d’autres écosystèmes aquatiques particuliers le long de leur cours ou en zone côtière. Tous ces systèmes étant en équilibre avec les ressources disponibles, tout prélèvement supplémentaire par l’homme se fait nécessairement à leurs dépens ; soumis à la diminution de leurs ressources, ils doivent soit s’adapter, soit disparaître si les changements dépassent leurs seuils de « résilience ». Les milieux les plus menacés sont les zones humides naturelles (marais, ...) dont la superficie est en perpétuelle régression par drainage et assainissement. En France, les zones humides qui nous restent sont maintenant protégées. On estime aux Etats Unis que 54% des zones humides ont été perdues depuis l’arrivée des premiers colons ; ce chiffre doit être plus fort en Europe, aménagée depuis plus longtemps ; en France il n’existe pas encore d’inventaire complet des zones humides.

Mais on assiste en France depuis la fin de la deuxième guerre mondiale à une déprise agricole dans les zones peu fertiles ou difficiles d'accès, comme les montagnes, au bénéfice d'une croissance de la forêt. On augmente donc ainsi en ce moment la superficie en France des espaces plus ou moins naturels.

13. Quelle est la qualité actuelle des milieux aquatiques et des écosystèmes ?

Les atteintes à la qualité des milieux aquatiques dans les pays développés sont aujourd'hui, par ordre d'importance, la pollution diffuse d'origine agricole, les pollutions urbaines, la pollution industrielle et enfin les retombées des pollutions atmosphériques.

13.1. Pollution diffuse d'origine agricole

Les pollutions agricoles concernent d'abord les excès de fertilisation azotée, qui contaminent les nappes souterraines et les rivières par des nitrates. Dans bien des nappes superficielles en région agricole, la teneur en nitrates dépasse la norme de potabilité fixée à 50 mg/l de NO_3 . Réduire cette pollution serait en théorie facile, il suffirait de mettre moins d'engrais dans les champs, avec pour conséquence une certaine diminution des rendements. On a pu montrer récemment cependant que la relation entre la production agricole et l'apport d'engrais est initialement une croissance linéaire, mais que, passé un certain point, cette courbe s'incurve et se rapproche d'un palier : toute augmentation de l'apport d'engrais ne se traduit plus par une augmentation significative des rendements, mais principalement par une augmentation des rejets dans l'environnement. L'optimum des apports d'engrais est cependant difficile à estimer, et varie chaque année avec le climat. On pourrait donc réduire ces rejets par réduction des apports, avec des pertes de rendements minimales. Il reste à en convaincre les agriculteurs et les pouvoirs publics. Mais le délai entre la cause (l'apport d'engrais azotés) et les conséquences (la teneur en nitrates dans les nappes souterraines et les puits ou sources) peut se chiffrer en décennies, du fait de la lenteur des écoulements souterrains. Il faudra être très patient pour espérer revenir à un état normal quand on réduira la fertilisation. La profession agricole s'ouvre peu à peu à la recherche de solutions, mais demande en échange une prise en charge par la collectivité du « manque à gagner » dû à cette réduction des rendements. On cherche actuellement à « optimiser » cet apport d'engrais au cours du temps, en fonction du climat, de la vulnérabilité des milieux, de la présence de captages à protéger, du type de culture, ou encore en mettant en place, en hiver, sur les sols usuellement à nu, de cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN), comme la moutarde, qui vont extraire du sol les nitrates au lieu de les laisser se lessiver par les pluies. Au printemps, ces CIPAN sont enfouis, servant d'engrais vert. Les épandages de lisiers sur les champs contribuent aussi fortement, dans certaines zones, comme en Bretagne, à l'apport de nitrates. Les apports en phosphates sont plus gênants pour les rivières et moins pour les nappes, car ils sont peu solubles et se fixent en général sur les matières particulaires, que l'on va retrouver dans les rivières en cas d'érosion. Les apports en nitrates et en phosphates sont ainsi responsables, dans les lacs, rivières et zones côtières, du phénomène d'eutrophisation (voir question 14).

L'agriculture utilise aussi des pesticides qui se retrouvent dans l'eau, par infiltration ou ruissellement, responsables de teneurs parfois supérieures aux normes de potabilité dans les eaux superficielles et souterraines. Ces normes sont très sévères (0,1 $\mu\text{g/l}$ pour un pesticide identifié, ou 0,5 $\mu\text{g/l}$ pour un mélange de pesticides), mais les effets de ces pesticides (ou de leurs molécules filles, produites par biodégradation) sont difficiles à apprécier et insuffisamment connus. On peut lutter contre cette pollution par l'agriculture biologique, en plein développement, ou par la mise au point de nouvelles molécules plus actives, donc utilisées en plus petites quantités, et présentes à des teneurs plus faibles, inférieures aux normes. Les tests de toxicité de ces nouveaux produits les disent peu toxiques, plus facilement biodégradables, mais cela reste controversé. On parle aussi actuellement « d'agro-écologie »,

où l'on tente de modifier la façon de lutter contre les plantes concurrentes des cultures, ou les animaux prédateurs ou les champignons. On peut utiliser par exemple des coccinelles pour se débarrasser des pucerons, ou d'autres auxiliaires naturels. On peut aussi éviter les espaces cultivés trop vastes et à monoculture, où les maladies ou parasites se répandent trop facilement, en rétablissant des haies, de la polyculture. Une méthode nouvelle est en cours de test (voir Degregori et Gatenby, 2019), basée sur la notion d'évolution. On constate en effet que l'efficacité des traitements phytosanitaires diminue avec le temps, car les ennemis des plantes évoluent naturellement génétiquement, et deviennent résistants aux traitements. L'option est d'utiliser les pesticides avec parcimonie, pour éviter que tous les organismes non résistants ne soient éliminés, et ainsi que ne reste en place que les organismes résistants occupant tout le terrain. Se développant seuls, ils prolifèrent, alors que si on élimine une partie seulement de organismes non résistants, les organismes résistants n'ont plus le champ libre et ne peuvent plus proliférer : on maintient alors une efficacité tolérable aux pesticides, permettant une poursuite de la culture, à des rendements un peu moins élevés. Mais cela reste à préciser et à tester.

13.2. La pollution urbaine

Les pollutions urbaines sont aujourd'hui, dans les pays de l'OCDE, de mieux en mieux maîtrisées grâce à la construction de stations d'épuration des eaux usées. Les rejets urbains en temps normal contiennent de la matière organique biodégradable, de l'ammoniac, des nitrates, des phosphates (dont une grande partie provient des lessives), et parfois des métaux lourds. En temps de pluie, les eaux de lessivage des toitures et des chaussées apportent des hydrocarbures, des métaux et des micropolluants organiques issus des retombées des fumées, comme les PCB (polychlorobiphényles) et les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), et des matières en suspension. Le traitement de ces eaux usées peut être plus ou moins poussé, permettant d'éliminer une grande partie de ces polluants, mais à des coûts de plus en plus élevés. Le résultat est là : la qualité des eaux des rivières en Europe s'est très notablement améliorée depuis les années 1960. Les principaux problèmes aujourd'hui, dans les grandes villes, portent sur l'amélioration des traitements (ammoniac, dénitrification, déphosphatation) et sur les eaux de ruissellement en temps de pluie, qui peuvent donner des débits élevés sur de périodes courtes, et qui jusqu'ici ne sont pas ou peu traitées. Les rejets de substances médicamenteuses dans les eaux usées urbaines (principalement par les urines) ne sont pas ou peu retenus par les installations de traitement. Ils restent à des concentrations faibles, mais on s'interroge sur d'éventuels effets à long terme sur la santé des écosystèmes et de l'homme, dans la mesure où les eaux d'un fleuve ayant reçu les eaux usées d'une ville sont bien souvent prélevées dans la ville suivante en aval pour son alimentation.

La baignade dans les cours d'eau situés en aval des grandes agglomérations reste un sujet préoccupant, car les rejets des stations d'épuration ne sont pas stérilisés. Mais imposer cette stérilisation serait un leurre, car chaque orage risque d'apporter aux cours d'eau des flux importants de bactéries pathogènes lessivées des sols, qu'il est impossible de contrôler.

13.3. La pollution industrielle

Les pollutions industrielles sont de plus en plus traitées à la source et les normes de rejet de plus en plus sévères. Cela a grandement contribué à l'amélioration de la situation. Les efforts portent aujourd'hui sur la lutte contre les rejets de micropolluants (on parle par exemple de polluants organiques persistants, ou POP, ou encore de perturbateurs endocriniens, qui incluent les résidus de médicaments). Mais les industries traditionnellement polluantes ont tendance à rechercher à s'installer dans des pays aux normes moins contraignantes, devant les coûts élevés des contraintes environnementales dans les pays développés.

Un gros problème est celui des PCB (polychlorobiphényles), un héritage du passé, que l'on retrouve en quantité notable piégés dans les sédiments du fond de nombreuses rivières, en particulier le Rhône en aval de Lyon. Les poissons fouisseurs peuvent en être contaminés, et bien souvent la pêche en est interdite. Lors des crues, ces sédiments peuvent être partiellement érodés, et ainsi polluer les eaux par des matières en suspension toxiques. Avec le temps, mais un temps long, ces produits finiront par être éliminés, mais on voit mal quelle autre solution adopter, le dragage mettrait bien trop d'éléments en suspension, et le devenir des boues de curage est problématique, sans parler du coût. Dans la Dordogne, en aval d'une usine métallurgique de la « Vieille Montagne », les sédiments du fleuve étaient pollués par des métaux lourds, fixés aux sédiments. Chaque crue en remettait une grande quantité en suspension. Une solution imaginée a été de recouvrir le fond de la rivière par des sédiments propres, qui empêchaient cette remise en suspension.

Le réchauffement des cours d'eau par les rejets des centrales thermiques peut poser quelques problèmes à l'environnement en été, particulièrement en période de canicule, et contraindre les centrales à réduire la production. Lors de la canicule de 2003, des autorisations de dépassement des normes de rejet thermique ont dû être accordées par les Préfets, pour conserver l'alimentation électrique du pays, mais elles ont été peu utilisées, EDF ayant pu équilibrer la production. Il semble cependant que les normes thermiques soient – à juste titre du point de vue de la précaution – sévères, et qu'un court dépassement puisse être toléré par les écosystèmes. Aux États-Unis, les normes de rejet thermiques sont en effet moins sévères qu'en Europe. Le stockage et le turbinage de l'eau pour la production hydroélectrique peuvent être en concurrence avec les besoins d'eau agricole en été, ou avec les besoins des écosystèmes fluviaux, l'État négociant en général avec l'exploitant un « débit minimum réservé » qui doit en permanence être respecté. Ces débits réservés sont en passe d'être prochainement réévalués, car l'Etat doit prochainement reprendre puis réaffecter la majorité des concessions hydro-électriques détenues aujourd'hui par EDF. Des règles de gestion nouvelles devront être définies. L'aménagement des cours d'eau, en particulier la chenalisation pour la navigation, peut poser des problèmes pour l'habitat des poissons.

13.4. Qu'appelle-t-on un parc naturel hydrologique ?

Pour aboutir à une qualité des eaux souterraines et superficielles beaucoup mieux garantie, en particulier pour l'alimentation en eau potable, dans les pays développés se dégage une tendance à « sanctuariser » des zones étendues, pour que les activités humaines polluantes, agricoles principalement mais aussi industrielles, soient interdites ou rigoureusement réglementées. Ces zones, où l'eau représente l'élément naturel à protéger, sont parfois appelées « Parcs naturels hydrologiques ». Un usage forestier, par exemple, pourrait être compatible avec ces parcs. De telles zones sont en cours de création (ou au moins d'études) dans de nombreuses communes de France. Cela est cohérent avec la politique de protection des « captages prioritaires » choisis dans le cadre du Grenelle de l'Environnement (Loi Grenelle 2, 12 Juillet 2010), dont les « bassins d'alimentation des captages » (les BAC) doivent être protégés, et avec la politique européenne (voir 13.6).

13.5. Et les zones humides ?

Les zones humides naturelles dans les vallées sont aujourd'hui, en Europe, mieux protégées, alors que, depuis des siècles, elles étaient peu à peu drainées et mises en exploitation agricole. Leur conservation contribue au maintien de la biodiversité, car ce sont des milieux très riches du point de vue de la flore et de la faune. Se pose cependant la question du risque de colonisation des zones humides par des parasites, comme la malaria ou d'autres maladies, du fait du changement climatique. Des études sont en cours sur ce sujet.

13.6. *Qu'est-ce que c'est que la directive cadre européenne sur l'eau ?*

La directive-cadre européenne de 2000 (voir Directive 2000/60 CE) impose aux États membres de mettre en œuvre des mesures de protection des milieux afin de revenir, initialement en 2015, puis maintenant en 2021 ou 2027, « à la bonne qualité écologique des masses d'eau », ou à la bonne qualité chimique des eaux souterraines. Ces masses d'eau sont des unités hydrologiques supposées homogènes (lac, bief d'un cours d'eau, nappe ou portion de nappe souterraine). La France a défini 10.395 masses d'eaux superficielles sur son territoire, et 553 masses d'eaux souterraines, où ces mesures de protection devront être appliquées pour rétablir la qualité d'ici 2021 ou avec report possible en 2027, en cas d'impossibilité. De très nombreuses mesures de protection et de restauration de la qualité doivent être mises en œuvre d'ici là. Les agences de l'eau (voir question 15) sont chargées de définir et d'appliquer cette politique.

13.7. *Et dans les pays en développement ?*

Dans les pays en développement, la qualité des eaux connaît en général une forte dégradation, l'équipement en stations de traitement étant insuffisant et l'équipement industriel du pays étant jugé prioritaire par rapport à la protection de l'environnement. Les pollutions d'origine agricole sont aussi présentes, en particulier dans les pays ayant connu la « révolution verte » du « bon en avant » de la production agricole, ayant pratiquement éradiqué les famines. Seule l'Afrique est pour l'instant restée en grande partie étrangère à la révolution verte et utilise peu d'engrais et de pesticides, avec hélas une part notable de sa population sous-alimentée, environ 600 millions de personnes, alors que l'Asie du Sud-Est n'en comprend qu'environ 300 millions. Mais le problème principal de qualité des eaux dans les pays en développement est la pollution bactérienne, par les excréments humains, de l'eau dite potable non (ou insuffisamment) traitée (voir 16).

14. **L'Eutrophisation⁴**

L'eutrophisation des plans d'eau (lacs, rivières, mers côtières) est la conséquence d'un apport excessif de nutriments dans les eaux, qui permet un développement trop important du phytoplancton (algues microscopiques ou macroscopiques, comme les fameuses algues vertes des plages bretonnes), ou même des macrophytes (plantes fixées au fond). La composition de la matière organique constituant les algues obéit à un rapport à peu près constant entre leurs éléments constitutifs, dit rapport de Redfield ; celui-ci est en moyenne de 106 moles de carbone, pour 16 moles d'azote, et 1 mole de phosphore. De plus, la présence ou l'absence de silice va déterminer la nature du phytoplancton présent : il faut en plus 20 moles de silice pour que les diatomées, à squelette siliceux, se développent. Quand la silice est consommée, ce sont d'autres micro-algues qui se forment, des dinoflagellés ou des cyanophycées, qui peuvent sécréter dans l'eau des substances toxiques pour l'homme, pour la faune, et rendent plus difficile le traitement de l'eau pour la potabilisation.

Le carbone provient de l'atmosphère et est fabriqué par la photosynthèse à partir du CO₂. La silice provient de la dissolution de ce minéral dans les roches et les sols, et dépend de la géologie par la nature de ces roches et de l'occupation des sols. En condition naturelle, ce sont l'azote et surtout le phosphore, peu présents dans l'eau, qui sont les facteurs limitant du développement des algues, le phosphore étant généralement limitant dans les eaux continentales, et l'azote en mer. Mais les apports d'engrais azotés et phosphatés viennent rompre ce contrôle naturel : le phosphore, peu soluble, est apporté à l'eau par les particules argileuses en suspension, détachées des sols par l'érosion, sur lesquelles le phosphore s'est adsorbé. Il peut être désorbé ou passer en solution dans l'eau quand les conditions deviennent réductrices. Le phosphore provient aussi des rejets domestiques (matière organique d'origine humaine qui en contient, et lessives).

⁴ Texte de J. Garnier, UMR METIS, CNRS-Sorbonne Université Paris VI-UPMC

Désormais, le phosphore peut être bien traité en station d'épuration des eaux domestiques. L'azote sous forme de nitrates est très soluble et est mobilisé par le ruissellement et aussi entraîné vers les eaux souterraines. Les eaux usées domestiques en contiennent aussi, parfois sous forme d'ammonium, qui en absence de traitement tertiaire, est oxydé en nitrates dans la rivière en consommant de l'oxygène de l'eau.

Cet excès de nutriments conduit à un excès de matière organique autochtone qu'on appelle l'eutrophisation, dont les conséquences sont doubles. L'eutrophisation peut être à l'origine d'hypoxies (manque d'oxygène dissous dans l'eau) sévères. En effet, dans les lacs, les algues mortes sédimentent et la décomposition de cette matière organique algale par les bactéries va consommer tout l'oxygène de l'eau dans les couches profondes du lac et engendrer l'anoxie, avec raréfaction, voire disparition, de la macrofaune ; dans les rivières peu profondes, ce mécanisme se produit moins, car la circulation constante de l'eau par le courant permet la ré-oxygénation de l'eau ; dans la zone éclairée de la colonne d'eau, la photosynthèse algale peut conduire à une sursaturation importante en oxygène pendant le jour alors que la nuit la biomasse produite respire et consomme de l'oxygène ; en cas de temps couvert, la réduction de la photosynthèse, tandis que la respiration se poursuit, peut conduire à l'anoxie. L'eutrophisation peut aussi conduire à un dysfonctionnement de la chaîne trophique. Ainsi, dans tous les milieux, et en particulier en mer côtière, si la silice n'est pas disponible en quantité suffisante, elle devient le facteur limitant de la croissance des diatomées, petite algues facilement consommées par le plancton animal, et les algues qui se développent sont les ditextenoflagellés ou les cyanophycées, sans silice, souvent coloniales, difficilement consommables, certaines mucilagineuses, formant des mousses qui s'accumulent sur les plages, d'autres produisant des toxines qui conduisent à la fermeture de la pêche. Ces milieux sont alors fortement dégradés. La biomasse non consommée constitue alors une charge organique qui consomme de l'oxygène de la colonne d'eau pour être dégradée, de sorte que les deux mécanismes peuvent coexister.

Dans les zones côtières d'upwelling, là où remontent des eaux profondes froides riches en nutriments (issus de la décomposition de la matière organique dans les grands fonds), il se produit des croissances très fortes de phytoplancton de type diatomées, qui en font des eaux extrêmement poissonneuses et productrices, et sans manifestations telles que l'accumulation de matières organiques et hypoxie ou la production de toxine : on ne parle pas d'eutrophisation.

15. Les agences de l'eau

La gestion des eaux en France est organisée, depuis 1964, par grands bassins hydrographiques et non par région administrative ou département. Les usagers de l'eau d'un bassin sont en effet solidaires, tant du point de vue de la quantité que de la qualité, les pollutions de l'amont se retrouvant à l'aval. Cela demande donc une nouvelle organisation administrative en six « agences financières de bassin », ou « agences de l'eau » : Adour-Garonne, siège à Toulouse ; Artois-Picardie, siège à Douai ; Loire-Bretagne, siège à Orléans ; Rhin-Meuse, siège à Metz ; Rhône-Méditerranée-Corse et DOM-TOM, siège à Lyon ; Seine-Normandie, siège à Nanterre.

Avec la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau de 2000, les bassins hydrographiques ont été transformés en Districts Hydrographiques, au nombre de 12, représentés sur la Figure 3 ci-dessous. Mais les structures de gestion restent les six agences de l'eau déjà présentées.



Fig. 4 : Les districts hydrographiques français

Chaque agence de l'eau est dotée d'une sorte de « parlement local de l'eau », le Comité de bassin, où sont représentés les élus, l'administration, les industriels, les agriculteurs, les associations d'usagers et quelques scientifiques. Le Comité de bassin vote le montant des redevances (qui doivent être cependant approuvées par le Parlement), et la répartition des recettes entre les différents programmes. Les redevances portent sur les volumes de prélèvement (eau urbaine et industrielle surtout, et très peu agricole), et également sur les rejets polluants dans les rivières. Les pollutions agricoles jusqu'ici ne payent pas de redevance, contrairement au principe général « pollueur-payeur ».

Les agences ont aussi pour objet l'élaboration et la mise en œuvre des SDAGE (Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux) et leur déclinaison locale par petites unités hydrographiques en SAGE (Schéma d'aménagement et de gestion des eaux) en favorisant la gestion équilibrée et économe de la ressource et des milieux aquatiques. L'État assurant ses missions régaliennes de surveillance et de police de l'eau, l'intervention des agences de l'eau se fait essentiellement par l'outil financier ; elles perçoivent des redevances sur les prélèvements et les rejets polluants, et utilisent l'argent collecté pour aider à améliorer la gestion des eaux : subventions (ou prêts) pour la réalisation d'ouvrages permettant l'adduction d'eau (barrages, captages superficiels ou souterrains, conduites, etc.) ; également pour la construction de stations d'épuration des eaux usées, pour les collectivités locales et pour les industriels ; et enfin mesures de protection du milieu naturel ou de réhabilitation (re-naturation des rivières, entretien des marais et zones humides, échelles à poissons, restauration de la « continuité hydraulique » des cours d'eau (par effacement de seuils et obstacles construits dans les lits des rivières, empêchant la libre circulation des poissons) et restauration des zones de frayères pour permettre aux poissons d'accomplir leur cycle de vie, etc.). Une nouvelle « structure interbassin » a été créée en 2006, l'ONEMA (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), qui se substitue à l'ancien Conseil supérieur de la pêche ; il a compétences pour seconder les agences de l'eau dans leurs missions. Cet organisme a été ensuite fusionné le 1^{er} Janvier 2017 avec d'autres agences pour devenir l'Agence Française pour la Biodiversité, et au 1^{er} Janvier 2020 pour devenir l'Office Français de la Biodiversité. L'OFB reprendra les missions de l'Agence française pour la biodiversité (AFB) et de l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS).

C'est grâce aux agences de l'eau que se sont peu à peu mises en place l'ensemble des stations de traitements des eaux usées, tant pour les eaux domestiques que les eaux industrielles, et maintenant les eaux agricoles et d'orage. Pour fixer les idées sur le budget annuel des agences de l'eau, celles-ci ont été autorisées à lever un montant global de 2,28 milliards d'euros de redevances pour l'année 2018. Mais elles doivent reverser un montant global de 200 millions d'euros pour la réduction des déficits publics auquel s'ajoutent 240 à 260 millions d'euros pour le budget de l'AFB et 30 à 37 millions d'euros pour celui de l'ONCFS. L'eau finance donc une partie de la biodiversité !

16. Combien d'êtres humains n'ont pas accès à l'eau potable⁵ ?

En 2000, environ 1,1 milliards d'êtres humains n'avaient pas accès à un point d'eau potable proche de chez eux, 3 milliards n'avaient pas de robinet d'eau chez eux, et 2,6 milliards ne disposaient pas de l'assainissement. Le problème n'est pas technique, mais financier. Les Nations unies estiment que, chaque année, environ 1,7 million d'individus meurent de diarrhée (dont 45 % en Afrique sub-saharienne, 40 % en Asie du Sud-est et 15 % dans le reste du monde). La plupart de ces diarrhées sont dues à l'insalubrité de l'eau (pollution bactérienne). Les enfants sont les plus touchés. La diarrhée est la deuxième cause de mortalité, après les infections aiguës des voies respiratoires (2 millions de morts), et avant la malaria (0,9 million), la rougeole (0,4 million) et le sida (0,35 million).

Les Objectifs du Développement Durable (ODD) ont été adoptés en Septembre 2015 à New York par les Nations unies. Parmi ces objectifs, au nombre de 17, déclinés en 169 cibles, l'accès à l'eau potable et l'assainissement apparaissent à l'ODD 6, qui recommande que l'on doit, d'ici à 2030 : (i) assurer l'accès universel et équitable à l'eau potable, à un coût abordable ; (ii) 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 ; (iii) 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 ; (iv) 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 ; (v) 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 ; (vi) 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. Ces recommandations sont excellentes, mais il appartient aux Etats membres de trouver les moyens de les mettre en œuvre !

Le Comité des droits économiques, sociaux et culturels des Nations unies a intimé aux États signataires de la convention de l'ONU de respecter, protéger et mettre en œuvre le droit à l'eau et à l'assainissement. Ce droit consiste « en un approvisionnement suffisant, physiquement accessible et à un coût abordable, d'une eau salubre et de qualité acceptable pour les usages personnels et domestiques de chacun. » Le 28 juillet 2010, les Nations unies ont enfin déclaré que l'« accès à l'eau propre et à l'assainissement faisait partie des droits fondamentaux de la personne humaine ».

⁵ Extrait de l'article : MARSILY, G. de, BERTRAND, J. (2011) La distribution d'eau potable : la situation dans les pays en développement. *Responsabilité & Environnement (Les Annales des Mines)*, n°63 Juillet 2011, 24-33.

En simplifiant à l'extrême et en caricaturant, la situation actuelle dans les pays en développement peut se résumer ainsi : dans les plus grandes villes, il existe en général un réseau de distribution. Plus ou moins ancien, il ne couvre qu'une faible partie de la population urbaine et il est souvent en mauvais état, avec un taux de fuites très élevé (supérieur à 50%, alors que le taux admissible ne devrait pas dépasser 20%). Par manque d'eau à la production, mais surtout du fait d'une maintenance défailante et à cause des fuites, ce réseau n'est pas alimenté en continu, mais parfois seulement quelques heures par jour, voire par semaine.

Ce système pousse au gaspillage (constitution de réserves chez l'habitant, qui sont rejetées quand l'eau revient au robinet) et à une pénurie aggravée. Quand le réseau n'est pas alimenté, les points de fuite se transforment en points d'entrée dans le réseau pour les eaux usées du sous-sol (présentes à cause du défaut généralisé de système d'assainissement). Si bien que même si l'eau injectée dans le réseau en amont était traitée et potable, ce qui est rarement garanti, elle ne le serait plus à l'arrivée. Pour s'approvisionner en eau, les citoyens urbains ont recours à diverses solutions : l'acheter à un voisin si celui-ci est un privilégié disposant d'un branchement ou d'un forage particulier, s'approvisionner à des bornes-fontaines publiques ou à des kiosques privés, l'acheter à des porteurs d'eau, compter sur la distribution d'eau par camions citernes. Dans les quartiers périphériques, souvent totalement dépourvus de réseau et urbanisés de façon anarchique, les points d'eau sont plus rares encore. L'eau n'y est distribuée que par porteurs, brouettes, camions... La potabilité de l'eau prétendue potable n'est pas assurée. Les habitants qui le peuvent la font bouillir pour la débarrasser des germes pathogènes, mais l'énergie est chère et sa disponibilité pose problème. On se contente donc plus généralement d'acheter cette même eau au détail, fort cher et sans aucune garantie réelle. En Haïti, on estimait (avant le séisme de 2010) que seuls 20% de la population urbaine avait accès à l'eau au robinet à domicile, 7% *via* une fontaine publique, 15% disposait d'une ressource privée (forage, puits ...), 8% puisaient l'eau dans une rivière (or c'est d'une rivière qu'est partie l'épidémie de choléra) et 43% s'approvisionnaient, au seau (*ou « boquite »*), auprès d'un revendeur, les autres achetant à des livreurs en camion ayant accès à une source ou collectant l'eau de pluie.



Figure 5 – Différents modes d'approvisionnement en eau en zone urbaine, et puits traditionnel en zone rurale.

L'assainissement « toutes eaux » est en général totalement inexistant. Les eaux usées courent dans des rigoles le long des rues et aboutissent aux ruisseaux, rivières ou points bas sans être

traitées. Elles sont souvent réutilisées, à l'aval, par les cultivateurs et les maraîchers, qui revendront ainsi aux habitants de la ville des aliments contaminés par leurs eaux usées.

Dans les zones rurales, l'eau provient soit d'un plan d'eau superficiel (rivière, mare, marigot), soit d'un puits traditionnel, d'où on la tire au moyen d'un seau, ou encore de forages tubés réalisés grâce à certains programmes d'hydraulique villageoise. Dans ce dernier cas, l'eau est en général de meilleure qualité, sauf si une infiltration d'eaux usées (provenant des lessives, des latrines ou des lieux d'abreuvement des bestiaux) se produit à une trop faible distance du puits, auquel cas on constate une contamination des eaux.

Il faut encore citer le cas de la contamination naturelle des eaux par des éléments contenus dans les roches. Le cas le plus dramatique est celui de la plaine du Gange (au Bangladesh et en Inde), où les sédiments issus de l'Himalaya contiennent un peu d'arsenic. Pour améliorer la qualité de l'eau potable, prélevée traditionnellement dans les eaux de surface, très polluées, les Anglais avaient incité les populations rurales à forer des puits peu profonds, qui délivraient au début une eau non contaminée. Mais, peu à peu, ces eaux se sont chargées en arsenic, parce que les conditions géochimiques d'oxydoréduction, dans ce milieu perturbé par l'agriculture, ont fait passer l'arsenic en solution, avec des résultats catastrophiques : plusieurs centaines de millions de personnes reçoivent des doses excessives d'arsenic, qui provoquent de graves maladies (cancers, anémies, maladies de la peau, neuropathologies...). Traiter les eaux pour en extraire l'arsenic est possible, mais trop onéreux. Alors, on cherche à forer des puits plus profonds, pour atteindre des couches géologiques non contaminées... Dans certains pays, c'est l'excès de fluor qui pose problème, avec, là encore, son cortège de maladies associées, qui affectent en particulier les os.

Pourquoi le progrès est-il si lent, malgré les priorités affichées par toutes les parties prenantes (Institutions du développement, OMS, ONG...) ? Les raisons sont multiples : pauvreté des populations et manque de financements, non-acceptabilité culturelle ou sociale du paiement d'un service que beaucoup considèrent comme devant être gratuit, faiblesse et manque de stabilité des institutions publiques, rareté des ressources humaines d'encadrement, corruption, insuffisance des infrastructures de base (énergie, transport, communications), etc. Tous ces facteurs sont réellement en jeu, mais ils n'expliquent pas tout. Les services de téléphonie mobile, eux, se répandent aujourd'hui presque partout, même dans les quartiers les plus pauvres... On notera surtout que certains pays, qui ne sont pas mieux dotés, progressent remarquablement en matière d'accès à l'eau (c'est le cas, par exemple, de la Colombie, du Burkina Faso, de l'Ouganda, du Sénégal ou encore du Maroc...). De même, certains opérateurs publics (comme la Phnom Penh Water Authority, au Cambodge) ou privés (tels que Suez Environnement à Alger) parviennent à des résultats exemplaires dans certaines villes, tandis que d'autres villes du même pays ne progressent pas.

Le premier frein apparent au progrès de ces services est l'absence de demande effective de la part des citoyens concernés. L'inadéquation entre l'offre de services et les attentes des populations est la première explication, mais elle s'accompagne surtout de l'absence d'espoir qu'une amélioration soit possible. L'absence de demande traduit donc une résignation, sans doute en raison d'un manque de références à d'autres réalités, mais aussi en raison d'un manque de confiance dans les acteurs concernés (les opérateurs et les pouvoirs publics). Il est nécessaire de briser ce cercle vicieux, qui ne fait qu'entretenir l'immobilisme. Susciter la demande, susciter la confiance est un premier objectif ; il ne peut être atteint que si l'ensemble des acteurs (opérateurs et autorités locales, institutions financières du développement, ONG...) le partagent et s'y attellent ensemble.

17. La qualité de l'eau potable dans les pays développés est-elle bonne ?

La qualité des eaux des réseaux publics varie bien sûr en fonction des lieux. Les procédés existent et s'améliorent d'année en année pour produire de l'eau potable d'excellente qualité à partir des eaux des milieux naturels, superficielles ou souterraines, qui peuvent être contaminées. La vigilance dans le contrôle est ici la principale garantie. Elle est appliquée selon les pays avec plus ou moins de rigueur. Les normes de qualité (actuellement de l'ordre de 80 paramètres surveillés) sont définies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et le plus souvent reprises par les législations européennes ou nationales. Du point de vue des normes, l'eau est en général mieux protégée que ne le sont les aliments ou l'air que l'on respire. La tendance actuelle en Europe est de fabriquer de l'eau potable à partir d'eaux brutes le moins polluées possibles, en choisissant de prélever la ressource dans des bassins où des mesures de protection exigeantes sont imposées. Le coût des investissements consentis au fil des ans pour l'adduction en eau potable et l'assainissement est estimé, dans les pays développés, à quelques milliers d'euros par foyer, et le prix payé par l'utilisateur, en France, est de l'ordre de 1 à 4 euros par mètre cube. L'essentiel de la dépense porte en général sur l'entretien du réseau, pour éviter les pertes, qui parfois peuvent atteindre plus de 50% de l'eau produite. En France, le principal problème de qualité reste les accidents de contamination bactérienne, particulièrement dans les petites distributions rurales, où les contrôles sont plus difficiles. Il s'agit le plus souvent de contamination à l'intérieur du réseau de distribution. Les dépassements de normes sont très surveillés et doivent être portés par les Maires à la connaissance des administrés. Les Préfets peuvent prendre des arrêtés d'interdiction de consommation si nécessaire. L'effet des micropolluants organiques et des résidus de médicaments, parfois présents en trace dans les eaux, font l'objet de travaux de recherche nombreux, non encore conclusifs. Les effets les plus redoutés sont ceux de synergie entre molécules, encore très mal connus. Mais l'amélioration constante de l'état général de santé des populations semble indiquer que la qualité des eaux ne fait pas redouter de grands dangers dans ce domaine. Cependant la croissance du nombre des cancers, des maladies auto-immunes et autres, invitent à la prudence.

18. Combien consomme-t-on d'eau minérale, et pourquoi ?

La consommation mondiale d'eau embouteillée devrait atteindre 600 milliards de litres en 2020. En consommant en moyenne plus de 139 litres d'eau minérale naturelle par an en 2015, les français sont derrière les Mexicains (244 l), les Thaïlandais (204 l), les Italiens (178 l) et les Allemands (144 l) et avant les Américains (138 l). Les eaux minérales représentent en Europe 84% des eaux embouteillées, les eaux de source 13%, et les « eaux de table » (eaux rendues potable par traitement) 3%. Cette consommation peut s'expliquer par la saveur de ces eaux (absence de chlore, goût naturel, addition de gaz carbonique naturel pour 18% des eaux minérales en France) et plus par leur réputation diététique que par leur qualité intrinsèque d'eau potable par rapport aux eaux des réseaux, qui sont en général excellentes de ce point de vue. La pollution constatée et très médiatisée des eaux naturelles par l'agriculture (nitrates et pesticides) est également mise en avant pour expliquer cet engouement, malgré le prix en général mille fois plus élevé des eaux en bouteille par rapport aux eaux du robinet. Les eaux en bouteille constituent aussi un recours disponible partout et en abondance, en cas d'accident sur un réseau, comme cela s'est déjà produit dans le passé. Dans certains pays où l'eau de distribution publique est de mauvaise qualité, les eaux en bouteille ou en conteneurs sont devenues un moyen usuel d'accès à l'eau potable, comme au Mexique, ce qui réduit la demande de qualité sur le réseau. Dans certains pays également (États-Unis, Grande-Bretagne, Russie, ...), les eaux de table embouteillées ou en conteneurs sont produites à partir d'eaux brutes quelconques, par des traitements sophistiqués comme la double osmose inverse, la stérilisation et l'ajout de constituants minéraux jugés nécessaires à la santé. Aux États-Unis, par exemple, plus l'eau est

« artificielle », plus elle semble prisée par le consommateur... alors qu'un européen lui trouverait un goût détestable !

La France est le premier exportateur mondial d'eaux minérales naturelles (Groupes Nestlé, Danone, Neptune et St-Amand), ce qui permet au commerce extérieur de la France d'être excédentaire dans ce domaine. Cette industrie génère un chiffre d'affaires qui représenterait environ 2,5% du total de l'industrie agroalimentaire française. Les exportations continuent de progresser régulièrement au rythme de la production, dont elles représentent le tiers. Elles se font vers le Benelux, l'Allemagne, le Royaume-Uni, les États-Unis et le Japon. 50% de l'eau minérale naturelle est consommée sur les continents européen et nord-américain. Si l'Europe de l'ouest reste le principal marché au monde en termes de consommation par habitant, l'Amérique du Nord est le marché le plus important en volume. La progression des exportations du secteur s'explique surtout par l'ouverture des marchés des pays émergents et en particulier asiatiques. Mais l'un des problèmes majeurs de cette industrie est la gestion des bouteilles plastiques, qu'il faudrait collecter et recycler, alors qu'elles sont souvent jetées dans la nature et se retrouvent alors pour une large part dans les rivières pour aboutir aux océans. En France, la collecte et le recyclage des bouteilles plastiques (en PET, Polyéthylène Téréphtalate) était de 60% en 2014. Ce sont les fleuves asiatiques qui contribuent de façon massive au problème des plastiques dans les océans, qui est un problème très préoccupant.

19. D'où viennent les eaux de source et les eaux minérales ?

Les eaux de source sont des eaux souterraines provenant de bassins hydrogéologiques en général profonds ou bien protégés, qui ne sont pas contaminés par les activités humaines en surface. Les eaux captées doivent être potables sans traitement, ni bactériologique ni chimique, mis à part une éventuelle aération pour faire précipiter le fer et le manganèse. Les eaux minérales sont des eaux de source qui sont de plus déclarées favorables à la santé par l'Académie nationale de médecine. Leurs propriétés chimiques doivent être très constantes dans le temps, attestant ainsi de leur bonne protection contre les eaux superficielles éventuellement contaminées. Contrairement aux eaux de sources, elles ne doivent pas nécessairement être « potables » au sens des normes de potabilité, certaines d'entre elles contiennent en effet des teneurs trop fortes en certains éléments, mais que l'Académie de médecine a jugé à un moment donné comme favorable à certains traitements. Il faut alors les consommer comme un médicament. Depuis peu, l'Europe a autorisé certaines eaux minérales à être traitées pour en enlever certains éléments dits « indésirables », quand ils sont en concentration excessive par rapport aux normes, comme le fluor, l'arsenic, etc. Elles portent pourtant toujours la mention « naturelles », ce qui est critiquable.

20. Quels sont les besoins en eau potable de la Planète ?

La quantité d'eau de boisson minimale recommandée par les médecins est de 2 l/j, et elle peut être doublée ou triplée en cas de chaleur et de sécheresse. Si on y ajoute les besoins de la vie quotidienne, ce chiffre atteint, au minimum, 20 l/j par habitant pour les pays les plus pauvres en eau (par exemple la zone côtière dépourvue d'eau douce de la Mauritanie) à plus de 500 l/j dans les pays richement dotés ou peu économes (États-Unis, certaines villes d'Argentine, Afrique du Sud, Royaume-Uni...). En France, la consommation moyenne est de l'ordre de 150 à 200 l/j par habitant en ville (chiffre qui inclut l'eau des installations artisanales, commerces, etc., les fuites des réseaux de distribution⁶ et l'eau de lavage des rues et de lutte contre les incendies), un peu moins à la campagne. La moyenne mondiale est estimée à 300 l/j, soit 110

⁶ Si les réseaux sont mal entretenus, les fuites peuvent être très importantes... On parle par exemple de 50% de fuites sur le réseau de la ville de Rome ! Un réseau qui ne perdrait que 10 à 20% de l'eau transportée serait un très bon réseau... Mais cette eau n'est pas vraiment « perdue », elle s'infiltre et réalimente les eaux souterraines...

m³/an par habitant. En 2050, la population mondiale pourrait être de 9,5 milliards d'individus. En prenant comme hypothèse 9,5 milliards d'individus consommant chacun 250 l/j, la quantité totale d'eau nécessaire pour satisfaire les besoins domestiques représenterait 867 km³ d'eau par an (1 km³ est égal à 1 milliard de m³ et 1 m³ équivaut à 1.000 litres), soit 0,75% de la pluie qui tombe chaque année sur les continents, ou encore 6% de la fraction de l'eau bleue dite récupérable qui s'écoule dans les rivières et dans les nappes souterraines. Mais cette eau ainsi « utilisée » ne disparaît pas puisqu'elle est, pour l'essentiel, rejetée dans le milieu naturel, avec ou sans traitement, et peut éventuellement être réutilisée plus en aval. On voit ici la différence essentielle entre « prélèvements » et « consommation », la part consommée est celle qui est évaporée et ne participe plus aux écoulements. Elle est en moyenne de 14% pour l'eau domestique, de 13% pour l'eau industrielle et de 70% pour l'eau agricole. Clairement, la planète ne manquera jamais d'eau « domestique ».

21. Quels sont les besoins en eau agricole de la Planète ?

En 2000, avec une consommation moyenne annuelle en eau estimée à 1.300 m³/an per capita pour produire la nourriture que nous consommons, le total de l'eau utilisée pour l'alimentation dans le monde était de 8.100 km³/an, en eau verte (cultures pluviales) et eau bleue (cultures irriguées). Mais cette consommation per capita varie beaucoup selon les pays, de 600 m³/an (certains pays d'Afrique ou d'Asie) à 2.500 m³/an (Etats Unis), selon la quantité de viande consommée, car c'est la viande qui demande le plus d'eau pour être produite (voir Tableau 3 ci-après). En supposant qu'en moyenne mondiale, on consomme, par habitant et par an pour se nourrir, 1.300 m³ en 2000, 1.400 m³ en 2050 et 1.500 m³ en 2100, ce qui est une hypothèse minimaliste, on arrive aux besoins en eau suivants, jusqu'à la fin du siècle (Tableau 4), où on a fait figurer la répartition estimée des besoins en eau totaux entre l'eau verte et l'eau bleue, selon les données suivantes : en 2000, on utilisait environ 6.400 km³ d'eau de pluie entièrement évaporée (eau verte) tombant sur quelques 1,5 milliards d'hectares d'agriculture dite pluviale, et 3.700 km³ d'eau bleue prélevée dans le milieu naturel (rivières, nappes) pour arroser 280 millions d'hectares d'agriculture irriguée. Sur ces 3.700 km³/an d'eau bleue prélevée pour l'irrigation, 1.700 km³ seulement sont utilement évaporés par les plantes, le reste s'infiltré dans les nappes ou est drainé et participe aux écoulements sur les continents, ou encore est gaspillé par évaporation dans l'air. Ainsi, quelque 8.100 km³ d'eau par an ont réellement été utilisés en 2000 pour nourrir les hommes. Cela représente 7% de la pluie sur les continents. Il faut savoir cependant qu'aujourd'hui, un milliard d'individus environ sont sous-alimentés du fait de leur pauvreté⁷, voir Figure 5.

⁷ Environ 1 milliard d'habitants (en 2010) ou ~800 million (en 2017-2018) sont en état de sous-nutrition selon la FAO (avec perte irréversible de croissance physique et intellectuelle des enfants...). Certains, comme Thomas Pogge, professeur de sciences politiques à l'université de Yale, pensent que cette estimation de la FAO est inférieure à la réalité d'un facteur pouvant aller jusqu'à deux.

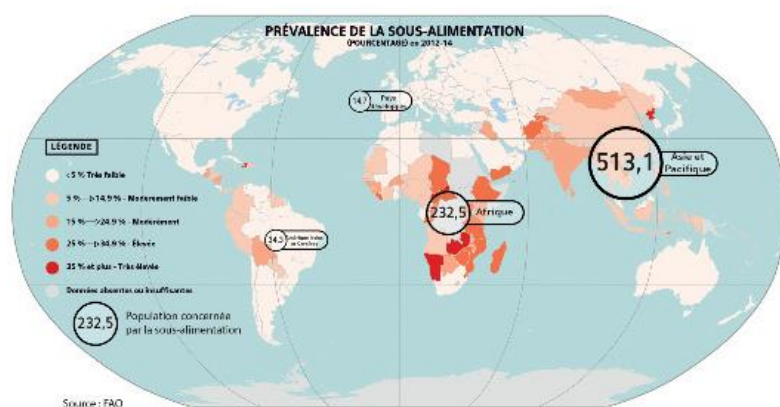


Figure 5. Sous-alimentation dans le monde, selon l'Observatoire des inégalités. Source : http://www.inegalites.fr/spip.php?page=article&id_article=111.

En 2050, avec 9,5 milliards d'habitants, si chacun mange à sa faim, et si les habitudes alimentaires ne changent pas trop, il faudra donc utiliser réellement de l'ordre de 13.300 km³ d'eau par an, soit 11% de la pluie sur les continents, ce qui n'apparaît pas globalement très préoccupant, mais pourrait en revanche devenir localement très difficile, compte tenu de l'inégale répartition spatiale et temporelle de la pluie. La part de ces 13.300 km³ qui proviendra de l'agriculture pluviale et celle de l'agriculture irriguée ne sont pas encore fixées aujourd'hui et influenceront beaucoup l'agriculture mondiale. Si on prend en compte les évolutions probables des habitudes alimentaires, on peut penser que la consommation accrue de viande dans le monde, et particulièrement en Asie, pays traditionnellement plus végétarien, pourrait porter les besoins réels en 2050 à 15.000 km³/an au lieu de 13.300 km³, et en 2100 à 20.000 km³ au lieu de 16.500 km³, car il faut par exemple 13.000 litres d'eau pour produire un kilogramme de viande de bœuf, soit 13 fois plus que pour un kilo de blé (Tableau 3). Il faut noter que l'eau agricole disparaît en majeure partie de l'eau s'écoulant sur les continents puisqu'elle est évaporée par la végétation, à l'exception des excès d'irrigation qui s'infiltrent. Pour nourrir la planète, le facteur limitant à l'échelle du globe, c'est la disponibilité en terres cultivables, pas l'eau. Mais localement, l'eau peut être le facteur limitant, comme dans les zones arides. Dès aujourd'hui, les zones arides sont obligées d'importer de la nourriture pour satisfaire leur besoins, en provenance des pays plus riches en eau où la production agricole peut être excédentaire (pays de l'OCDE, Amérique du Sud principalement).

| Produits végétaux | Eau consommée | Produits animaux | Eau consommée |
|-------------------|---------------|------------------|---------------|
| Huiles | 5 000 | Bœuf | 13 000 |
| Riz | 1 500 – 2 000 | Volailles | 4 100 |
| Blé, céréales C3 | 1 000 | Œufs | 2 700 |
| Maïs, céréales C4 | 700 | Lait | 800 |
| Agrumes | 400 | | |
| Maraîchage | 200 - 400 | | |
| Pommes de terre | 100 | | |

Tableau 3 – Quantités d'eau requises en m³/t (ou litres par kg) pour produire les bases alimentaires. Partie consommée brute (non en matière sèche) des différents produits. D'après Académie des sciences (2006).

| Année | Besoins annuels per capita, m ³ par an | Population, milliards | Volume annuel total, km ³ par an | Volume d'eau verte, km ³ /an | Volume d'eau bleue, km ³ /an |
|-------|---|-----------------------|---|---|---|
| 2000 | 1.300 m ³ | 6,2 | 8.100 | 6.400 | 1.700 |
| 2050 | 1.400 m ³ | 9,5 | 13.300 | <i>9.800</i> | <i>2.600</i> |
| 2100 | 1.500 m ³ | 11 | 16.500 | <i>11.500</i> | <i>3.000</i> |

Tableau 4 : Besoins en eau pour nourrir la planète, en 2000, 2050 et 2100
 La répartition des besoins entre eau verte et eau bleue en 2050 et 2100 reste à fixer, on a fait l'hypothèse ici que l'on garderait le même rapport qu'aujourd'hui (en italique).

22. Quels sont les besoins en eau industrielle de la Planète ?

On estime aujourd'hui ce chiffre à environ 200 m³/an et par habitant, ou encore 550 l/j par habitant, soit 1/5 de l'eau agricole. Mais cette fois l'eau industrielle n'est que très peu « consommée », elle est utilisée puis rejetée dans le milieu, parfois réchauffée (eau de refroidissement des centrales thermiques) ou plus ou moins dégradée (processus industriels polluants), ou seulement turbinée ou utilisée pour la navigation. Ce chiffre peut varier beaucoup en fonction des procédés techniques utilisés, des recyclages réalisés, du prix, des économies d'eau, etc. Il n'est en tout état de cause que de l'ordre de 1% de l'eau de pluie sur les continents.

23. Quelle est la consommation totale en eau de la planète ?

En 2000, année où ces chiffres sont les mieux connus, la consommation estimée d'eau domestique, agricole (eau pluviale et eau d'irrigation) et industrielle (Tableau 5) montre que la totalité des prélèvements d'eau par l'homme a été de 5.200 km³ (660 + 3.250 + 1.290), auxquels il faut ajouter 5.000 km³ d'eau de pluie utilisée directement par l'agriculture pluviale, soit 10.200 km³ au total, ce qui reste très inférieur à 10% des précipitations sur les continents. Les prévisions pour 2050 sont de 18.000 km³/an, soit 16% des précipitations. On voit donc bien que, globalement, à l'échelle de la planète, les hommes ne devraient pas manquer d'eau dans le futur proche.

| | Population millions | Eau domestique prélevée km ³ /an | Eau agricole pluviale utilisée km ³ /an | Eau agricole d'irrigation prélevée km ³ /an | Eau d'irrigation consommée km ³ /an | Eau industrielle prélevée km ³ /an |
|-------------------------------------|---------------------|---|--|--|--|---|
| Europe | 512 | 80 | 420 | 225 | 100 | 285 |
| Asie | 3.612 | 290 | 2900 | 1.800 | 830 | 330 |
| Afrique | 853 | 40 | 700 | 200 | 90 | 32 |
| Amérique du Nord | 489 | 130 | 400 | 400 | 185 | 390 |
| Amérique du Sud | 367 | 50 | 300 | 100 | 45 | 105 |
| Australie, Iles du Pacifique | 30 | 8 | 30 | 25 | 20 | 3 |
| Russie et ex URSS | 310 | 62 | 250 | 500 | 230 | 145 |
| TOTAL | 6.200 | 660 | 5.000 | 3.250 | 1.500 | 1.290 |
| Eau consommée | - | 40 | 5.000 | - | 1.500 | 130 |

Tableau 5 – Estimation des quantités d’eau prélevée et consommée dans le monde en 2000, adapté de (Académie des sciences, 2006), avec des hypothèses de proportionnalité faites sur le nombre d’habitants pour les chiffres mal connus. Ces estimations ne sont pas précises.

24. Comment va-t-on nourrir la planète en 2050 et 2100 ?

Le problème essentiel de l’eau du XXI^e siècle est de nourrir la planète (Griffon, 2006). Les besoins augmentent avec la croissance démographique encore forte, en Asie et surtout en Afrique subsaharienne. Aujourd’hui, trois céréales, le blé, le maïs et le riz, chacune à raison de 700 millions de tonnes par an, fournissent 60% de la nourriture mondiale. La première chose à faire est de réduire les pertes ou le gaspillage, qui atteignent des ordres de grandeur scandaleux de 30% de la nourriture produite. Dans les pays développés, cette nourriture est jetée dans les poubelles par les consommateurs, parfois même dans des emballages qui n’ont pas été ouverts, la date de vente étant dépassée, ce qui pourtant ne veut pas dire que la nourriture est avariée ; dans les pays en développement, les pertes se produisent surtout par mauvaise récolte dans les champs, et par mauvaises conditions de stockage. Ensuite, il faut augmenter les rendements, mieux utiliser l’eau (selon le slogan *more crop per drop*, plus de récolte pas goutte d’eau), c’est-à-dire d’éviter les pertes en eau, ou de choisir des cultures plus productives à quantité d’eau égale (Tableau 3). On espère ainsi, au mieux d’ici à 2050, des économies d’eau de l’ordre de 20%, notoirement insuffisantes par rapport aux besoins. On pourrait penser qu’une autre solution serait d’augmenter les surfaces d’agriculture irriguée, qui produisent par hectare en général 40% de plus que celles en agriculture pluviale. Au rythme actuel d’augmentation de 1,34 millions d’hectares par an de ces surfaces irriguées, on passerait de 280 millions d’hectares aujourd’hui à 330 millions d’hectares irrigués en 2050, ce qui est aussi notoirement insuffisant. Il faudrait décupler le rythme actuel d’aménagement des périmètres irrigués pour répondre aux besoins croissants, ce qui est peu envisageable. En effet, au prix actuel des céréales, la rentabilité des investissements n’est pas assurée et les financeurs institutionnels (Banque mondiale, FMI...) se détournent de ces grands aménagements de retenues d’eau et périmètres irrigués, qui, par le passé, ont également eu, pour certains d’entre eux, des conséquences environnementales désastreuses, une efficacité douteuse et une violente opposition des populations ou des écologistes. Mais une tendance récente se manifeste pour revoir cette politique, depuis la crise des céréales en 2008 et les famines récentes dans la corne de l’Afrique en 2011 et dans l’Afrique de l’Ouest sahélienne en 2012.

La solution vers laquelle on se dirige est une forte augmentation de l’agriculture pluviale, qui occupe actuellement 1,5 milliards d’hectares, et devrait croître d’ici à 2050 à 2 ou 2,5 milliards d’hectares. De telles surfaces cultivables en agriculture pluviale semblent disponibles, mais pas partout (Tableau 6) : l’Asie et le Moyen-Orient/Afrique du Nord sont très proches des limites d’utilisation de leurs sols, alors que ces deux zones sont en très forte expansion démographique. En revanche, l’Afrique subsaharienne, également en très forte expansion démographique, a largement les sols nécessaires pour produire la nourriture dont elle a besoin, mais avec cependant des disparités régionales très importantes (manque ici, excès là). L’Amérique latine, puis les pays de l’OCDE et la Russie et Etats associés (ex URSS) auraient les moyens de produire la nourriture nécessaire. On sait que le Brésil, l’Argentine s’y préparent, et que les États-Unis sont déjà les premiers exportateurs mondiaux de denrées alimentaires. Selon ce scénario, on se dirigerait vers un large effort de défrichement des zones actuellement non cultivées mais cultivables, qui sont aujourd’hui occupées par la végétation naturelle (forêt, steppe, pampa...). Cela s’accompagnera nécessairement de fortes atteintes aux écosystèmes naturels et d’une réduction massive de la biodiversité, mais que faire ? Laisser les nouveaux habitants mourir de faim ? Une autre conséquence sera que de nombreux pays perdront tout espoir d’autosuffisance alimentaire, et seront dépendants d’autres pays pour leur alimentation, avec les risques de pressions politiques que cela implique, et les tensions qui pourront en résulter sur les prix des denrées agricoles en cas de pénuries. Une marque de cette évolution est

le récent intérêt porté par certains pays (Japon, Corée, Chine, pays du Golfe Persique...) pour acheter ou louer pour cent ans des terres aujourd'hui inexploitées, en Afrique, à Madagascar ou en Amérique du Sud. Cette politique usurpatrice est dangereuse et pourra dans l'avenir provoquer des conflits.

| | Monde | Asie | Amérique Latine | Moyen-Orient et Afrique du Nord | Afrique Subsaharienne | Pays de l'OCDE (Europe, Amérique du Nord, Japon...) | Russie |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-----------------|---------------------------------|-----------------------|---|-------------|
| Surface cultivée en 2000 (a) | 1600 | 439 | 203 | 86 | 228 | 387 | 265 |
| Surface cultivable (b) | 4400 | 586 | 1066 | 99 | 1031 | 874 | 497 |
| a/b | 39 % | 75 % | 19 % | 87 % | 22 % | 44 % | 53 % |

Tableau 6 – Superficies cultivées et cultivables dans le monde, en millions d'hectares, selon M. Griffon, 2006.

Il faut ajouter à cela que l'agriculture sera aussi sollicitée pour la production de biomasse à des fins énergétiques, ce qui engendrera une tension supplémentaire sur la production alimentaire, mais fait dire aussi que la contribution des bioénergies aux besoins énergétiques mondiaux sera, en tout état de cause, modeste.

Quant aux pays « riches » en eau, comme la France, ils peuvent connaître ici ou là, en fonction des saisons, des aléas climatiques, des effets dus aux changements climatiques (cf. questions 7 et 8), des contraintes de restriction d'usage de la ressource, certes très gênantes pour les consommateurs, mais somme toute non génératrices de catastrophes. Il s'agit, et il s'agira, pour les autorités de gérer les conflits d'usages et de donner la priorité en cas de pénurie à ceux qui sont considérés comme les plus importants : eau domestique, bien sûr, mais aussi eau nécessaire aux écosystèmes fragiles, qui constituent des usages également prioritaires, pour le maintien de l'environnement et de la biodiversité, tout aussi importants que les activités productives (agriculture, industrie). La production agricole risque d'en souffrir.

Y-a-t-il une alternative à ce scénario, qui apparaît très pénalisant pour l'environnement de la planète et qui ne fait pas l'unanimité ? D'autres solutions sont évoquées : l'augmentation des rendements agricoles par fertilisation accrue et meilleure utilisation de l'eau, mais cette option ne semble pas suffisante ; l'amélioration génétique des plantes pour les faire produire plus en consommant moins d'eau est apparemment un faux espoir (Tardieu, 2005), car il est établi que, si une plante consomme moins d'eau, elle produit moins de matière sèche : l'ouverture des stomates règle non seulement la transpiration mais aussi l'entrée de CO₂ et la photosynthèse ; réduire l'une réduit aussi l'autre. Cependant, il faut évidemment poursuivre les recherches pour tenter d'améliorer les rendements à quantité d'eau consommée égale. Restent les cultures hors sol, dites hydroponiques, avec une production par unité de surface et une efficacité d'utilisation de l'eau très élevées, mais les coûts de production sont aussi très importants. Seuls les pays riches pourront s'y engager. Le défrichement, plus ou moins étendu, semble donc inéluctable si les démographies ne se trompent pas lourdement.

On ne peut pas parler de l'alimentation mondiale sans parler d'un autre fléau, celui de l'obésité. On estime qu'en 2005, il y avait 1,3 milliards de personnes en surpoids, dont 400 millions d'obèses ; 800 millions vivent dans les PED. Si les tendances actuelles se poursuivent, il y aurait en 2030 3,3 milliards de personnes en surpoids ou obèse, 80% dans les PED. Les conséquences sur la santé sont graves : maladies cardiovasculaires, cancer colorectal, etc. Les causes en sont pour l'essentiel un excès d'huiles végétales, de sucres simples, de produits carnés et de confiseries. La nourriture de la planète réclame de repenser également la nature des produits consommés.

25. Peut-il y avoir des famines dramatiques sur Terre par manque d'eau ?

Il semble que la réponse soit malheureusement oui. Déjà, en 1998, de mauvaises récoltes en Asie du Sud-Est, dues à une sécheresse déclenchée par un événement El Niño intense, avaient entraîné des achats de céréales massifs sur les marchés mondiaux, avec une réduction importante des stocks, rendant périlleuse la situation si la sécheresse s'était prolongée. Or, chaque année, la situation devient de plus en plus tendue, en raison de la croissance démographique. Il faut savoir qu'en 1876-1878, par exemple, une sécheresse catastrophique a sévi simultanément en Inde, en Chine, au Brésil et en Éthiopie, pour ne citer que quelques-uns des pays pour lesquels on dispose de données. Cette sécheresse était due à un événement El Niño très intense. Il y aurait eu à cette époque près de 30 millions de morts (Davis, 2006) pour une population mondiale de 1,5 milliard d'habitants. Un événement semblable se serait également reproduit en 1896-1900, avec un même ordre de grandeur du nombre des victimes. Ces phénomènes simultanés à l'échelle du globe seraient la conséquence d'événements El Niño d'ampleur exceptionnelle, comme il semble s'en produire en moyenne deux fois par siècle (Ortlieb, 2000). Quoi qu'il en soit, et compte tenu en particulier de l'augmentation probable de la fréquence des événements extrêmes due aux changements climatiques, et de la croissance continue de la démographie, il semble certain que ce type de catastrophe se reproduira dans un avenir plus ou moins proche. Les stocks mondiaux⁸ risquent de ne pas être suffisants pour satisfaire la demande. De plus, comme l'a montré le Prix Nobel d'économie Amartya Sen (Sen et Drèze, 1999), la cause la plus fréquente des pertes en vies humaines en cas de réduction des récoltes est la perte instantanée de pouvoir d'achat qui frappe les paysans les plus pauvres, dont les récoltes ont disparu, mais aussi d'autres catégories sociales défavorisées, qui n'ont plus les moyens d'acheter la nourriture devenue chère, quand bien même celle-ci serait disponible.

Avec la mondialisation croissante des échanges de nourriture, il est probable que les lois du marché entraîneront, en cas de pénurie, une augmentation vertigineuse des prix mondiaux agricoles, et que la famine touchera alors les plus pauvres, même si des stocks existent encore et que les moyens de les transporter sont disponibles. A. Sen montre en effet que, dans le milieu des années 1970, une famine a frappé l'Éthiopie, et que des gens sont morts de faim au voisinage de voies de communication et alors que le pays disposait, dans d'autres régions, de stocks suffisants : les ressources financières des affamés ne leur permettaient pas d'acheter, et l'aide mondiale n'a pas été sensibilisée à temps. Il est probable, bien que regrettable, qu'il faille que se déclenche une telle crise de grande ampleur pour que le monde se décide à bouger et à créer des stocks plus importants, dans les pays où les risques de manques sont les plus grands, c'est-à-dire dans les zones déjà les plus défavorisées, où les moyens financiers ne sont pas réunis pour créer ces stocks. Ces stocks peuvent être familiaux, locaux ou régionaux, pas nécessairement internationaux. La Chine a annoncé en 2018 qu'elle allait augmenter ses stocks.

⁸ Ils sont actuellement d'environ 400 millions de tonnes de céréales, soit 20 % de la consommation annuelle mondiale, soit encore moins de 3 mois, auquel il faut ajouter un stock très important de bétail sur pied. Ces stocks mondiaux se réduisent chaque année.

26. Y aura-t-il des guerres de l'eau ?

Difficile d'être affirmatif. Une perspective historique peut être utile ici⁹. Les deux conflits emblématiques auxquels on peut penser sont le génocide rwandais de 1994 et ceux de l'île de Pâques au XVII^e siècle. Il est classique de dire que le génocide rwandais a pour origine un conflit ethnique entre Hutus et Tutsis. Le premier à avoir mis en cause cette interprétation est Jared Diamond, géographe américain auteur de « Effondrement », ouvrage paru en France en 2006, qui analyse les cas de catastrophes des civilisations du passé faute d'avoir su gérer leur environnement. Il traite d'abord du cas bien connu de l'île de Pâques, découverte en 1722 par les Hollandais ; la civilisation de l'île, totalement isolée, sans contact depuis plusieurs siècles avec le monde extérieur et se croyant seule au monde, a détruit entre le XV^e et le XVII^e siècle son environnement en abattant tous ses arbres pour en faire des rondins afin de déplacer ces immenses statues de pierre bien connues, les Moaï, qui servaient de symboles de domination aux prêtres ou aux puissants ; l'érosion des sols et la perte des moyens de production alimentaire qui en a résulté n'ont plus permis de maintenir une société estimée initialement entre 6.000 et 30.000 âmes ; en 1680 environ, des révoltes contre les élites, une guerre civile et des massacres incluant du cannibalisme auraient réduit cette population à quelque 30% de sa population maximale.

Au Rwanda, en 1994, environ 800.000 personnes (11% de la population) ont été massacrées en un mois, c'est selon Diamond, la croissance démographique démesurée de ce pays, d'environ 3% par an, et la réduction continue des moyens disponibles per capita pour produire la nourriture qui a conduit au massacre. Toutes les terres cultivables étaient exploitées ; la population avait atteint en 1993 une densité très élevée, proche de celle de la Grande-Bretagne (250 habitants par km²), et n'était plus en mesure de se nourrir compte tenu des méthodes agricoles utilisées. En 1985, la production alimentaire par habitant, après avoir crû de 1966 à 1981, était redescendue au niveau de 1960. C'est la pénurie qui aurait été la cause première des massacres, ce qui serait en partie confirmé par le massacre des Hutus par des Hutus, dans des zones où les Tutsis étaient minoritaires ou absents. Un conflit ethnique est bel et bien présent, il existe historiquement des conflits ancestraux entre les deux communautés (éleveurs contre agriculteurs), mais l'hypothèse de Diamond est que la cause première du conflit est la raréfaction de la ressource et qu'ensuite seulement le conflit s'habille en conflit ethnique, religieux ou culturel, ou est délibérément orienté vers un tel conflit par la propagande.

Au Rwanda, la raréfaction de la ressource n'était pas l'eau, c'est un pays très humide, mais la disponibilité de terres agricoles sur lesquelles cultiver pour se nourrir. Ce risque de pénurie avait été anticipé par des agronomes belges (Wils et al., 1986), sans qu'aucune action ne soit prise pour éviter la crise. Mais la même chose peut se produire pour les conflits liés à l'eau, laquelle peut bien souvent être la cause première de la raréfaction des ressources alimentaires. Elle peut servir alors d'étincelle pour ranimer des conflits ancestraux liés à l'ethnie, au nomadisme, à la religion... Gleick (2014) attribue l'origine du conflit syrien à une forte sécheresse ayant entraîné une perte des productions agricoles et une migration des ruraux vers les centres urbains, d'où serait partie la révolte, mais ce point de vue est contesté par Selby et al. (2017) et réaffirmé en réponse par Gleick (2017) ou d'autres commentateurs dans le même numéro de *Political Geography*.

La figure 6 selon Story (2015) donne les zones de conflits potentiels sur l'eau au XXI^e siècle. On peut trouver aussi des cartes similaires dans (De Stephano et al., 2012), ainsi qu'une chronologie des conflits liés à l'eau (<http://www2.worldwater.org/conflict.html>) produite par l'équipe de A.T. Wolf à Oregon State University.

⁹ Texte adapté de Marsily et al., 2018

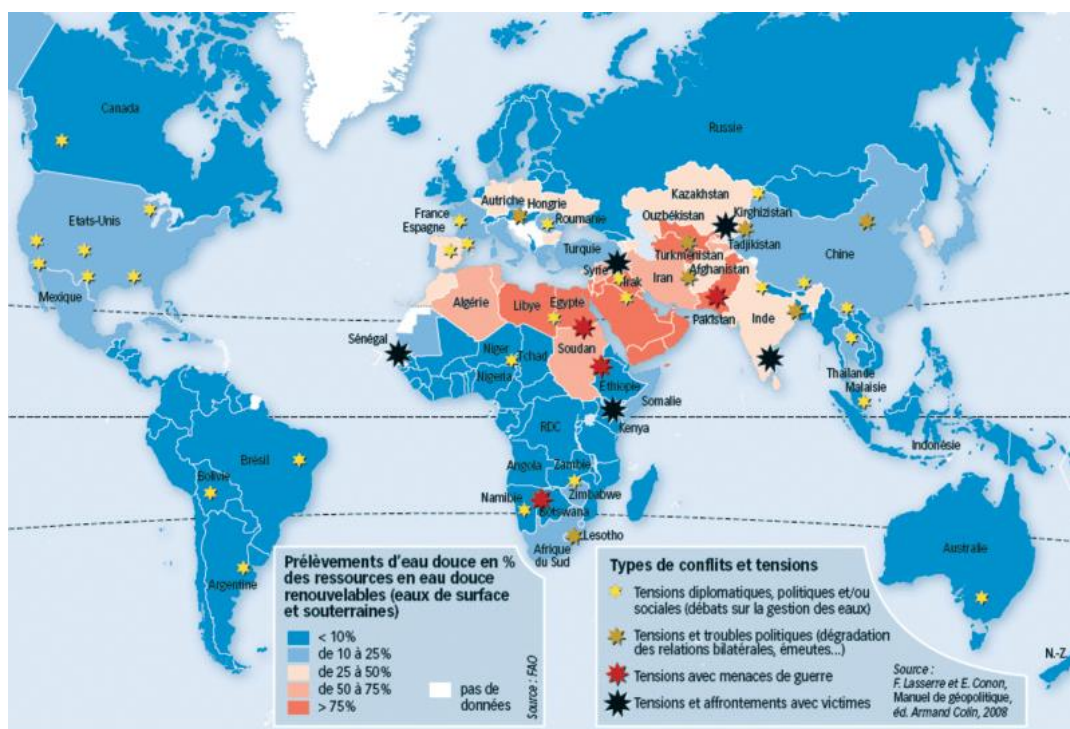


Figure 6. Zones de conflits potentiels sur l'eau, selon Story (2015). Cartographie : Jean-Pierre Magnier

Il y a déjà des conflits latents ayant le partage de l'eau pour cause, le principal était jusqu'à 2018 entre l'Éthiopie, le Soudan et l'Égypte, ce dernier pays ayant officiellement fait savoir que la construction de barrages en Éthiopie pour retenir et utiliser l'eau du Nil Bleu serait un *casus belli*. Pourtant les besoins en eau de ces deux pays augmentent très rapidement, du fait de l'augmentation démographique. La négociation sera-t-elle en mesure de prévenir la guerre? L'Éthiopie a commencé à construire un de ces fameux barrages, celui dit de « Renaissance », à 40 km de la frontière avec le Soudan, pendant que l'Égypte connaissait un profond changement politique. L'Éthiopie étant chrétienne et l'Égypte dominée par l'Islam, les négociations sont difficiles et cette question religieuse a déjà compromis un projet d'accord élaboré par la Banque mondiale du temps de Moubarak, qui prévoyait de construire en Éthiopie des barrages en altitude, où l'évaporation serait bien moindre que dans la plaine du Nil à Assouan, où les égyptiens et les Soudanais stockent actuellement leur eau. L'eau de ces barrages serait destinée à l'Égypte et au Soudan, et pourrait aussi produire de l'électricité. L'économie d'eau sur l'évaporation à Assouan aurait pu bénéficier à l'Éthiopie, sans toucher aux ressources en eau des autres pays. Le Président Al Sissi d'Égypte a réussi à trouver en 2017-2018 un compromis avec l'Éthiopie sur la construction et l'utilisation du barrage de Renaissance, dont les termes sont restés secrets. Ils portent probablement en particulier sur la vitesse de remplissage du nouveau barrage, qui pourrait varier entre moins de deux ans, si ces années-là, aucune eau n'était relâchée vers Assouan, à une ou deux décennies. Le partage de l'électricité produite a aussi probablement été discuté. Le barrage devrait être prêt en 2020 ou 2021.

L'exemple de l'Inde et du Pakistan, en état de conflit permanent, donne de l'espoir. Ces deux pays ont en effet réussi à continuer à gérer de façon stable et pacifique leurs ressources en eau communes, les eaux de l'Indus, par la négociation, qui ne s'est jamais arrêtée, même dans les moments les plus tendus. D'autres zones de conflits potentiels sont le Moyen-Orient, l'Asie du Sud-Est, l'Afrique Australe, etc. Mais le risque de véritable conflit armé entre deux états voisins me semble peu probable...

27. Faut-il économiser l'eau ?

Sachant, comme il a été vu ci-dessus, que la planète va avoir de plus en plus besoin d'eau pour satisfaire une population en forte croissance, la question qui vient naturellement à l'esprit est : « Faut-il économiser l'eau ? » La réponse est bien sûr oui, toute économie ou réduction d'un gaspillage est une action qui va dans le bon sens et qui doit être menée en priorité. Encore faut-il savoir ce que l'on doit économiser en priorité et quand, car ne pas utiliser d'eau quand on vit à côté d'un grand fleuve en crue n'aura évidemment pas d'effet sur la disponibilité en eau dans un pays assoiffé à 10.000 km de là ! Nous avons vu que la demande quotidienne d'eau dans un pays Européen est de l'ordre 200 l/j en eau domestique, de 550 l/j en eau industrielle, et de 2.860 l/j en eau agricole, seule cette dernière étant en majorité réellement consommée, les deux autres étant prélevées puis restituées (à 85%) au milieu naturel. Pour les individus, économiser de la nourriture est donc le poste le plus efficace pour économiser l'eau, et de plus cette nourriture économisée est transportable (ou économisée en ne l'important pas) et peut être mise à la disposition des populations qui en manquent. Pour donner un exemple, jeter 100 g de viande de bœuf représente un gaspillage, selon le Tableau 3, de 1.300 l d'eau, soit plus de 6 jours de toute sa consommation domestique. Jeter 100 g de pain représente un gaspillage de 100 l d'eau... Il est donc scandaleux, dans un monde où certains ne mangent pas à leur faim, de « gaspiller » l'eau en jetant de la nourriture. Économiser l'eau industrielle n'est pas directement à la portée des citoyens, si ce n'est en économisant les produits industriels eux-mêmes, car jeter ou ne pas réparer un objet industriel qui pourrait encore être utilisé en le remplaçant par un objet neuf consomme de l'eau, de l'énergie, des matières premières, utilisés pour le produire (voir question 28). L'eau réellement consommée par l'industrie est cependant une faible fraction de l'eau prélevée (estimée à 13%), ce qui conduit à dire que si on raisonne en eau réellement consommée, les prélèvements industriels pèsent peu sur le bilan, économiser les objets produits par l'industrie est plus important en termes d'énergie et de matières premières. Enfin pour l'eau domestique, le problème est un peu le même. Si l'on est dans un pays où l'eau est rare (ou à une saison où l'eau est rare), il est clair qu'il faut réduire au minimum sa consommation d'eau domestique, et encourager les recyclages, pour permettre à chacun, y compris les écosystèmes, d'avoir accès à l'eau. Gaspiller l'eau revient à supprimer cet accès à certains des utilisateurs. Mais quand l'eau est relativement abondante, en un lieu ou à une saison donnée, économiser l'eau du robinet agit en fait très peu sur la ressource en eau : l'eau prélevée est en majorité (85%) restituée presque instantanément au milieu naturel, après passage dans les installations de traitement des eaux usées, en particulier si l'eau est prélevée dans une rivière et rejetée dans la même rivière. Ce qui est économisé en réduisant sa consommation quotidienne, par exemple de 100 l/j, ce qui est beaucoup, c'est au mieux 15 l d'eau¹⁰, mais surtout de l'énergie électrique de pompage de l'eau, en moyenne en France de l'ordre de 0,75 kWh par m³, soit 0,075 kWh pour 100 l, c'est à dire l'équivalent de 1 h de fonctionnement d'une ampoule de 75 W. Éteindre la lumière dans les locaux inoccupés est donc souvent plus efficace pour les économies globales que de ne pas se laver ! Économiser de l'eau chaude est encore plus important pour réduire la consommation d'énergie, par exemple gaspiller 100 l d'eau chaude représente environ 40 h de consommation d'une ampoule de 75 W. Et réduire de 1 km par jour sa distance parcourue en automobile représente en moyenne une économie globale de 1,34 kWh, soit 18 h de fonctionnement d'une ampoule de 75 W... Mais une économie importante d'eau peut être réalisée par le monde agricole, en ne « gaspillant » pas l'eau, on a vu en effet (question 21) que sur 3.700 km³/an d'eau d'irrigation agricole prélevée, 1.700 km³/an seulement sont réellement utilisés, le reste étant évaporé en pure perte, ou retournant dans les écoulements souterrains par infiltration dans les canaux et parcelles

¹⁰ La réduction du flux d'eau usée ne procure en fait pas d'économies à la station de traitement, car la charge polluante rejetée par un être humain est à peu près constante, et son traitement ne dépend que très peu du volume d'eau dans laquelle elle est diluée.

irriguées, ce qui n'est pas vraiment une perte. Il est donc possible de faire des économies en irriguant mieux (ne pas faire d'aspersion le jour, utiliser le goutte-à-goutte...) ou en utilisant des plantes couvrant mieux le sol (pour éviter l'évaporation sur sol nu) ou plus efficaces (par exemple riz cultivé sous eau pendant la première partie de son cycle, puis irrigué mais sans plan d'eau pour le reste).

28. L'empreinte eau¹¹

Il est nécessaire, pour comprendre les enjeux liés à cette ressource vitale qu'est l'eau douce, d'en considérer l'offre et la demande dans leur ensemble : c'est la raison d'être de l'empreinte eau, un nouvel indicateur de l'usage direct ou indirect de l'eau par le consommateur ou le producteur. Mis au point en 2002 par le Pr. Arjen Y. Hoekstra, de l'Unesco-IHE, et développé ensuite par l'Université de Twente (Pays-Bas), l'empreinte eau permet, entre autres, d'alerter sur les pressions exercées localement sur les ressources en eau, et de mettre en évidence le fait que de nombreux pays doivent importer une part importante de biens, notamment agricoles, qui demandent beaucoup d'eau pour leur production.

L'empreinte eau d'un individu, d'une communauté ou d'une entreprise est définie comme le volume total d'eau douce utilisé pour produire les biens et services consommés par l'individu ou la communauté, ou produits par l'entreprise (ou le producteur agricole). La figure 5 donne deux exemples d'empreinte eau de produits de consommation courants.



Exemple d'empreinte eau de quelques produits de consommation courants.

Fig. 7 : L'empreinte eau a trois composantes :

- **l'empreinte eau verte** : c'est la consommation des eaux de pluie qui se stockent dans les sols superficiels et sont reprises par les racines de la végétation et transpirées par les feuilles, notamment par les végétations naturelles (forêts, prairies...) et les cultures agricoles dites pluviales ;
- **l'empreinte eau bleue** : c'est la consommation des eaux de surface et des eaux souterraines qui s'écoulent dans les rivières et les nappes souterraines, et peuvent être prélevées par pompage ;
- **l'empreinte eau grise** : c'est le volume d'eau douce (fictif) qu'il faudrait ajouter aux rejets d'eaux usées de toute origine, qui arrivent dans les milieux naturels, pour diluer les polluants rejetés dans ces eaux usées pour que la qualité de l'eau issue de ce mélange

¹¹ Adapté du Rapport du WWF « L'empreinte eau de la France », 2012, www.wwf.fr, et de la Newsletter du WWF de Juillet 2010 « connaître l'empreinte de l'eau ».

soit conforme aux normes de rejets en vigueur. Ce n'est pas une solution technique aux problèmes de pollution, mais une « mesure » indirecte de l'importance de la pollution, assez critiquable à de nombreux égards.

« L'empreinte eau au sein d'un pays », ou « Empreinte eau de production nationale », correspond au volume total d'eau douce consommé ou pollué à l'intérieur du territoire du pays. Elle se compose de :

- l'empreinte eau *interne* de consommation nationale, c'est-à-dire l'eau utilisée pour fabriquer les produits consommés par la population nationale.
- l'eau virtuelle exportée par les produits fabriqués dans le pays et vendus à l'étranger, c'est à dire l'eau utilisée pour fabriquer sur le territoire des produits destinés à l'export.
- l'empreinte eau de consommation nationale correspond à la quantité totale d'eau utilisée pour produire les biens et services consommés par les habitants d'un pays. Elle est constituée d'une composante interne et externe.
- « l'empreinte eau interne de consommation nationale ».
- « l'empreinte eau externe de consommation nationale », c'est-à-dire l'eau utilisée par d'autres pays pour fabriquer les produits au sein des pays considérés, et consommés ensuite en France.
- « l'eau virtuelle de réexportation » correspond à l'eau utilisée pour fabriquer les produits importés qui sont ensuite réexportés. Ces composantes de l'empreinte eau nationale définissent pour finir les notions d'eau virtuelle : eau virtuelle importée, eau virtuelle exportée, budget eau virtuelle.

L'estimation de l'empreinte eau de la France a été menée pour la première fois en 2012 par l'Université de Twente (Pays-Bas) pour le WWF-France. Elle a été quantifiée selon les bases de calcul de la comptabilité nationale. Les valeurs présentées correspondent à une moyenne établie sur la période 1996 – 2005. À noter que les DOM-TOM ne sont pas inclus dans l'étude, les données n'étant pas disponibles pour ces territoires.

L'empreinte eau de production de la France (l'eau utilisée sur le territoire pour la production de biens et services) est de 90 milliards de m³ par an¹². Les cultures agricoles représentent 86% de cette empreinte eau, essentiellement sous forme d'eau verte. Le maïs représente à lui seul 50% de l'empreinte eau bleue de production agricole, avec un impact massif sur les bassins de la Loire, de la Garonne et de la Seine. L'empreinte eau d'un consommateur français est de 1.786 m³ par an. La consommation de viande totalise 36% de cette empreinte eau (via le maïs et le soja pour le bétail), et le lait 10% de l'empreinte eau verte de consommation (via les fourrages). Le coton représente 57% des importations d'empreinte eau bleue de la France. 47% de l'empreinte eau française est externe (c'est l'eau utilisée à l'étranger pour fabriquer les produits importés puis consommés en France) : la France dépend donc presque pour moitié de l'étranger pour son approvisionnement en eau, avec un déficit de 12,8 milliards de m³ par an !

L'empreinte eau est le premier indicateur à évaluer la soutenabilité de l'usage de l'eau, en identifiant les bassins (« points chauds ») qui souffrent d'une rareté en eau bleue due à l'empreinte eau française, affectant aussi bien les activités humaines que la biodiversité. En France, les bassins de la Loire, la Garonne, la Seine et l'Escaut sont particulièrement touchés.

¹² On rappelle (voir question 29) que le bilan hydrologique de la France donne 479 milliards de m³/an pour les précipitations totale, et 175 milliards de m³/an pour le total des écoulements (eau bleue), fleuves et nappes souterraines, et de 297 milliards de m³/an en eau verte évaporée.

À l'étranger, la consommation en France de coton affecte des bassins comme celui de la mer d'Aral, de l'Indus ou du Guadalquivir. Le sucre de canne, le riz et le soja sont les autres produits agricoles à l'origine de « points chauds » à l'étranger dus à la France.

En France, la consommation de produits industriels représente 10% de l'empreinte eau de consommation totale. 57% de l'empreinte eau grise de consommation de la France vient de ces produits industriels, et provient en majorité de produits importés, avec des « points chauds » qui se situent notamment en Chine, en Russie, en Allemagne et aux États-Unis. L'empreinte eau est un outil opérationnel qui permet d'agir pour préserver la ressource en eau, que ce soit au niveau des particuliers, des collectivités territoriales et des entreprises.

29. L'eau en France

La France est un de plus grands États membres de l'Union européenne (550.000 km²) qui possède de hautes montagnes (les Alpes, les Pyrénées, le Massif central), de vastes plaines et quatre types de climat (océanique, continental, méditerranéen et alpin) mais où prédomine le climat océanique. Les précipitations sont abondantes et régulières et le Rhône est, pour l'Europe, un grand fleuve, alimenté par un puissant château d'eau, les Alpes (les précipitations doublent environ tous les 2000 m). La ressource en eau annuelle potentielle par habitant est de 3.200 m³ contre 2.000 en Allemagne et 1.400 pour l'Angleterre et le Pays de Galle (et 2.200 pour le Royaume-Uni tout entier). En général, la qualité des eaux continentales et côtières est relativement bonne et, comme le développement de l'irrigation est resté globalement assez modéré, la France n'a pas de problèmes graves de pénurie d'eau, au moins en années normales sous le climat actuel, et est presque totalement autonome pour ses besoins directs en eau (voir question 28 Empreinte eau).

29.1. Le cycle hydrologique en France

Les principaux termes du bilan hydrologique moyen annuel actuel de la France, en y incluant la Corse mais pas les territoires d'outre-mer, sont donnés ci-dessous.

| Principaux flux du bilan hydrologique moyen annuel | Volumes en km³/an |
|--|-------------------------------------|
| Précipitations totales sur la France | 479 |
| Evapotranspiration réelle totale | 297 |
| Ecoulement intérieur total | 182 |
| Total des exportations d'eau vers les voisins de la France, principalement l'Allemagne, le Luxembourg et la Belgique | 18 |
| Total des importations des voisins de la France (excluant le Rhin) principalement le Rhône à partir de la Suisse et la Garonne de l'Espagne. | 11 |
| Total des ressources en eaux de la France | 175 |
| Recharge totale des nappes souterraines ; 98% de cette eau s'écoule ensuite en rivière, et 2% s'écoule directement en mer. | 100 |
| Eaux de ruissellement | 75 |
| Total des prélèvements par les hommes pour des besoins énergétiques | 19 |
| Total des prélèvements d'eau de surface (sauf énergie) | 8,7 |
| Total des prélèvements d'eau souterraine. | 6,3 |

Tableau 7 – Bilan hydrologique de la France.

29.2. Prélèvements et consommation d'eaux de surface et souterraines

Le total des prélèvements d'eaux de surface et souterraines en France et une estimation de la quantité d'eau réellement consommée et non rendue au réseau hydrographique en aval sont donnés ci-dessous.

| Prélèvements en km ³ /an | Eau domestique | Industrie | Irrigation | Production d'énergie | Total |
|--|-------------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Eaux de surface | 2,6 | 2,3 | 3,8 | 19 | 8,7 + 19 |
| Eaux souterraines | 3,7 | 1,5 | 1,1 | 0,019 | 6,3 |
| Total | 6,3 | 3,8 | 4,9 | 19 | 34 |
| Estimation des quantités d'eau réellement consommées | 14% 0,880 | 14% 0,420 | 75% 3,675 | 2% 0,380 | 16% 5,355 |

Tableau 8 – Prélèvements et consommation d'eau en France pour l'année 2001-2002, en km³. Les prélèvements pour la production d'énergie ne comprennent pas ceux faits en eaux salées (Gironde et bord de mer).

Environ 2% seulement de l'eau utilisée pour produire de l'énergie est réellement consommée, le reste retourne en rivière, aussi bien pour le refroidissement des centrales thermiques que la production hydroélectrique. Pour les usages domestiques, il existe 35.000 points de captage (4% d'eau de surface, 96% d'eau souterraine) ; la consommation est de 14% du volume prélevé ; pour l'industrie, de 11% ; mais pour l'agriculture, la consommation est d'environ 75% du prélèvement, car 25 % de l'eau est perdue pendant le transport par les canaux et par infiltration dans les aquifères. Sur ces 75% consommés, environ 20% est aussi perdue dans l'atmosphère lors de l'aspersion ou si l'eau s'évapore sur un sol nu. L'irrigation est le consommateur principal aussi bien d'eau de surface que d'eau souterraine en France (81% de toute l'eau consommée). On peut y ajouter une estimation de la quantité d'eau de pluie consommée par l'agriculture, 157 km³ par an. L'agriculture consomme alors un volume total de 160 km³ par an, soit 98% de la consommation totale d'eau en France.

La superficie irriguée en France est passé de 450 000 ha en 1955 à 1,5 millions d'hectares en 1990 et est à peu près constante depuis, alors qu'environ 2,7 millions d'hectares se prêtent à des cultures irriguées. Les cultures irriguées pour l'année 2000 sont pour 50% le maïs, 11% le maraîchage et culture sous serre, 7% les vergers, 7% le fourrage, le reste distribué sur pomme de terre, blé, autres céréales, tournesol, soja, protéagineux, prairies.

On peut estimer la consommation de la végétation naturelle et des forêts, (terres non agricoles) à 130 km³ par an. L'eau qui s'écoule dans les lacs et les rivières satisfait aux besoins des écosystèmes aquatiques, mais n'est pas consommée : elle est seulement utilisée par la vitesse qu'elle donne au courant, la température qu'elle maintient, les nutriments qu'elle apporte, etc.

29.3. Stockage d'eau en barrages

Les barrages ont été construits principalement pour la production hydroélectrique, puis également, pour soutenir les débits d'étiage en été pour l'agriculture, les besoins industriels et domestiques, et enfin pour répondre aux besoins de refroidissement des centrales thermiques. La protection contre les crues est aussi un de leurs objectifs, par exemple en région parisienne.

La capacité totale des barrages-réservoirs français est de 12 km³ mais ils laissent s'écouler un volume annuel 15 fois plus grand, car l'eau qu'ils contiennent est sans cesse renouvelée. 75% des réserves de la France sont gérées actuellement par EDF. Le volume total des lacs d'eau douce en France est estimé à 43 km³, y compris la partie française du lac Léman à Genève ; le volume de glace dans les montagnes françaises est estimé à 17 km³.

30. Perspective

Trouver l'eau nécessaire pour nourrir une population en forte augmentation est le véritable défi concernant cette ressource vitale. La croissance du nombre d'habitants, principalement en Asie, va très vite rendre les besoins en eau et en terres cultivables de ces continents supérieurs aux ressources locales. Incapable bientôt d'assurer son autosuffisance alimentaire, l'Asie ne pourra s'alimenter qu'en important massivement de la nourriture, ce qu'on appelle de « l'eau virtuelle », ou en laissant sa population émigrer. L'Amérique du Sud paraît alors être le principal continent capable de fournir la production agricole nécessaire, mais au prix de vastes défrichements, réduisant encore un peu plus la part de la planète réservée aux écosystèmes naturels et la biodiversité. L'Europe du Nord, la Russie et l'Amérique du Nord pourront aussi fournir une partie des besoins, le réchauffement climatique étant susceptible de permettre la mise en culture de 160 millions d'hectares de terres dans les pays nordiques, tandis qu'il fera perdre environ 110 millions d'hectares dans les zones Méditerranéennes. L'Afrique pourrait rester globalement autosuffisante, malgré une très forte croissance démographique, en mettant en culture une vaste partie de ses espaces naturels, mais avec des disparités régionales très fortes ; il est vraisemblable que les équipements et investissements nécessaires à cette croissance de la production agricole ne soit pas au rendez-vous, et que l'Afrique continue à dépendre, comme elle le fait aujourd'hui, de nourriture importée. Il est à craindre cependant que des crises climatiques majeures (sécheresses, par exemple liées à des événements El Niño) puissent engendrer des famines dramatiques simultanées sur plusieurs continents. Devant un tel défi, les autres problèmes liés à l'eau paraissent presque secondaires. Ils portent sur les effets des changements climatiques, sur la distribution d'eau potable, sur les risques de pénurie dans la zone méditerranéenne, sur la qualité de l'eau et des écosystèmes, sur les crues. Une bonne ingénierie de l'aménagement conçue pour respecter et conserver les écosystèmes naturels et une gestion cohérente et patrimoniale de la ressource devraient permettre de les résoudre, si les moyens matériels nécessaires y sont consacrés à temps.

Bibliographie

- ACADEMIE DES SCIENCES (2006). Les eaux continentales, G. de MARSILY, coordinateur. EDP Sciences, Paris.
- ACADEMIE DES SCIENCES (2011). Démographie, climat et alimentation mondiale, H. Leridon et G. de Marsily, coordinateurs. EDP Sciences, Paris.
- M. DAVIS (2006). Génocides tropicaux. Catastrophes naturelles et famines coloniales. Aux origines du sous-développement. La Découverte, Paris.
- J. DEGREGORI, R. GATENBY (2019) La théorie de l'évolution, une nouvelle arme contre le cancer. Pour la Science, N°255, Novembre 2019, p. 26-32.
- L. DE STEPHANO, DUNCAN J., DINAR S., STAHL K., STRZEPEK K.M., WOLF A.T., 2012. Climate change and the institutional resilience of international river basins. *J. Peace Res.*, 49, 193-209.
- J. DIAMOND, 2006. Effondrement. Comment les sociétés *décident de leur disparition ou de leur survie*. Paris, Gallimard, 648 p.
- DIRECTIVE 2000/60/CE du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, 32000L0060, adoptée le 23 octobre 2000, *JQ* du 22 décembre 2000, p. 1-73
- E. FUSTEC, J.C. LEFEUVRE *et al.* (2000). *Fonctions et valeurs des zones humides*. Dunod, Paris.
- P. GERLAND, RAFTERY A., SEVCIKOVA H., LI N., GU D., SPOORENBERG T., ALKEMA L., FOSDICK B., CHUNN J., LALIC N., BAY G., BUETTNER T., HEILIG G., WILMOTH J., 2014. World population stabilization unlikely this century. *Science*, 346, 234-237. doi: 10.1126/science.1257469
- GIEC, 2014. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Pachauri R.K., Meyer L.A. eds), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p. Disponible à l'adresse : http://ar5.syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf
- P.H. GLEICK, 2014. Water, drought, climate change, and conflict in Syria. *Weather Clim. Soc.*, 6, 331-340. doi: 10.1175/wcas-d-13-00059.1
- P.H. GLEICK, 2017. Climate, water, and conflict: Commentary on Selby *et al.* 2017. *Political Geography*, 60, 248-250. doi: 10.1016/j.polgeo.2017.06.009
- GREVE P., SENEVIRATNE S.I., 2014. Assessment of future changes in water availability and aridity. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 5493-5499. doi: 10.1002/2015gl064127
- M. GRIFFON, 2006. *Nourrir la planète*. Odile Jacob, Paris.
- J. HANSEN J., SATO M., KHARECHA I P., VON SCHUCKMANN K., BEERLING D.J., CAO J., MARCOTT S., MASSON-DELMOTTE V., PRATHER M.J., ROHLING E.J., SHAKUN J., SMITH P., LACIS A., RUSSELL G., RUEDY R., 2017. Young people's burden: requirement of negative CO2 emissions. *Earth Syst. Dynam.*, 8, 577-616. doi: 10.5194/esd-8-577-2017
- A.J. HOEKSTRA *et al.*, 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Publisher: Earthscan, ISBN: 978-1-84971-279-8 Hardcover, 224 pages.
- IWMI, 2007. International Water Management Institute, *Water for food, water for life : the Comprehensive assessment of water management in agriculture*, Molden , D. (éditeur), Colombo, Sri Lanka. Publié par Earthscan, London, UK.
- J.C. LEFEUVRE, 2011. *De l'eau et des hommes*. Éditions de Monza, Paris, 400 p.
- H. LERIDON, G. DE MARSILY, 2011. Démographie, climat et alimentation mondiale. Rapport de l'Académie des Sciences, Les Ulis, EDP Sciences, 313 p.
- F.R. LIU, ROBERTSON C.A., SCHLOSSER J., SHEFFIELD J., WOOD E.F., 2015. The observed state of the water cycle in the early twenty-first century. *J. Clim.*, 28, 8289-8318. doi:10.1175/jcli-d-14-00555.1
- G. DE MARSILY, 2006. Les Eaux continentales. Rapport de l'Académie des Sciences, Les Ulis, EDP Sciences, 328 p.
- G. DE MARSILY, 2009. *L'eau, un trésor en partage*. Dunod, Paris.
- G. DE MARSILY, 2016. Chap. 3 « Les chemins de l'eau dans le sol ». *In* : Le sol, une merveille sous nos pieds. C. Feller, Ed. Belin et AFES, Paris, 256 p.
- G. DE MARSILY, ABARCA-DEL-RIO R., 2016. Water and food in the 21st century. *Surv. Geophys.*, 37, 503-527. doi: 10.1007/s10712-015-9335-1
- G. DE MARSILY, ABARCA-DEL-RIO R., CAZENAVE, A., RIBSTEIN, P., 2018. Allons-nous bientôt manquer d'eau ? *La Météorologie, Revue de l'atmosphère et du climat*. N° 101, p. 39-49. http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/67429/meteo_2018_101_39.pdf
- R.I. MCDONALD, R.I., GREEN, P., BALK, D., FEKETE, B.M., REVENGA, C., TODD, M., MONTGOMERY, M., 2011. Urban growth, climate change, and freshwater availability. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 108, 6312-6317. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011615108>
- M. MEYBECK, E. FUSTEC & G. DE MARSILY, 1998. Edit., La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé, Elsevier, Paris.

- S. MICHAÏLOF, 2015. *Africanistan*. Paris, Fayard, 320 p.
- NATIONS UNIES, 2006. *Rapport mondial sur le développement*.
- NATIONS UNIES, 2010. www.un.org/fr/millenniumgoals/poverty.shtml.
- L. ORTLIEB, 2000. « The documented historical period of El Niño events in Peru: an update of the Quinn record (16th to 19th centuries) », in H. F. Diaz et V. Markgraf, Edit., *El Niño and the southern oscillation. Multiscale variability and local and regional impacts*. Cambridge University Press.
- OMS - Organisation mondiale de la santé et Unicef, 2007. *Atteindre l'OMD relatif à l'eau potable et à l'assainissement, le défi urbain et rural de la décennie*.
- ONU, 2017. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World population prospects, the 2017 revision*. Publié le 22 juin 2017.
- E. ORSENNA, 2008. *L'avenir de l'eau. Petit précis de mondialisation II*, Fayard, Paris.
- S. PAILLARD, DORIN B., LE COTTY T., RONZON T., TREYER S., 2010. *Agrimonde – Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*. Versailles, Editions Quæ, 295 p.
- C. PRUDHOMME, GIUNTOLI I., ROBINSON E.L., CLARK D.B., ARNELL N.W., DANKERS R., FEKETE B.M., FRANSSSEN W., GERTEN D., GOSLING S.N., HAGEMANN S., HANNAH D.M., KIM H., MASAKI Y., SATOH Y., STACKE T., WADA Y., WISSER D., 2013. Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 111, 3262-3267. doi: 10.1073/pnas.1222473110
- J. ROCKSTRÖM, 1999. On-farm green water estimates as a tool for increased food production in water scarce regions. *Phys. Chem. Earth*, 24, 375-383.
- M. RODELL M., BEAUDOING H.K., L'ECUYER T.S., OLSON W.S., FAMIGLIETTI J.S., HOUSER P.R., ADLER R., BOSILOVICH M.G., CLAYSON C.A., CHAMBERS D., CLARK E., FETZER E.J., GAO X., GU G., HILBURN K., HUFFMAN G.J., LETTENMAIER D.P., LIU W.T., ROBERTSON F.R., SCHLOSSER C.A., SHEFFIELD J., WOOD E.F., 2015. The observed state of the water cycle in the early twentyfirst century. *J. Clim.*, 28, 8289-8318. doi: 10.1175/jcli-d-14-00555.1
- J. SCHEFF, FRIERSON, D.M.W., 2012. Robust future precipitation declines in CMIP5 largely reflect the poleward expansion of model subtropical dry zones. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L18704. doi: 10.1029/2012GL052910
- J. SELBY, DAHI O.S., FRÖHLICH C., HULME M., 2017. Climate change and the Syrian civil war revisited. *Political Geography*, 60, 232-244. doi: 10.1016/j.polgeo.2017.05.007
- A. SEN & J. DRÈZE, 1999. *Omnibus*, Oxford University Press, New Delhi.
- I.A. SHIKLOMANOV, RODDA J.C. (eds.), 1993. *World water resources at the beginning of the twenty-first century*. Cambridge, Cambridge University Press, Royaume-Uni.
- I. A. SHIKLOMANOV, J.C. RODDA, 1999. *World Water Resources at the beginning of the twenty first century*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003, aussi disponible en CD-ROM à l'Unesco, Paris.
- L.A. STORY, 2015. *Étude de cas : le Proche et le Moyen-Orient par les cartes*. Disponible à l'adresse : <http://la-story.over-blog.com/2015/01/le-moyen-orient-par-les-cartes.html>
- F. TARDIEU, 2005. Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress, in *Comptes rendus Geoscience*, no 337, pp. 57-67, Académie des sciences.
- K.E. TRENBERTH et al., 2007. Estimate of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *J. of Hydrometeorology, Special Section*, v. 8, 758-769.
- K.E. TRENBERTH, DAI A., VAN DER SCHRIER G., JONES P.D., BARICHIVICH J., BRIFFA K.R., SHEFFIELD J., 2014. Global warming and changes in drought. *Nat. Clim. Change*, 4, 17-22. doi: 10.1038/nclimate2067
- D. VIVIROLI et al., 2007. Mountains of the World -Water Towers for Humanity: Typology, Mapping and Global Significance. *Water Resources Research*, 43, W07447, doi:10.1029/2006WR005663.
- H. WELZER, 2009. *Les guerres du climat. Pourquoi on tue au XXI^e siècle*. Paris, Gallimard, 352 p.
- W. WILS, CARAEL M., TONDEUR G., 1986. Le Kivu montagneux : surpopulation, sous-nutrition, érosion du sol. *Mem. Acad. Royale Sci. Outremer Belgique*, 21, 3.
- WWF Rapport Empreinte eau de la France, T. THOUVENOT et al., 2012.
- WWF Newsletter Empreinte Écologique, T. THOUVENOT, n°7 juillet 2010.
- D. ZIMMER, 2013. *L'Empreinte eau*. Paris, Éditions Léopold Meyer