



**LABORATOIRE D'ECONOMIE DE LA PRODUCTION
ET DE L'INTEGRATION INTERNATIONALE**

UMR 5252 CNRS - UPMF

Les ressources en eau sur Terre **Origine, utilisation et perspectives dans le** **contexte du changement climatique**

Un tour d'horizon de la littérature

Note de synthèse

Julien Morel

Février 2007

Les ressources en eau sur Terre : origine, utilisation et perspectives dans le contexte du changement climatique – un tour d’horizon de la littérature

2 février 2007

Julien Morel

Résumé

L’eau est un enjeu essentiel pour le siècle à venir. Les secteurs, agricole, industriel, domestique, utilisent de grandes quantités d’eau, mais de façon inégale selon les régions du monde. L’objet de cette synthèse est de cerner et de comprendre l’ensemble des éléments essentiels de la problématique de l’eau aujourd’hui, en terme d’adéquation besoin/ressource.

Pour cela, on aborde successivement les concepts clés des ressources en eau à partir du cycle hydrologique, l’usage mondial de l’eau, le changement climatique et ses conséquences sur l’eau, et enfin l’impact de l’augmentation ou de la diminution de la disponibilité en eau par personne sur la population mondiale.

Les besoins en eau de la planète ne sont pas du tout satisfaits aujourd’hui et on ne peut que penser que les conditions vont se détériorer à l’avenir, sous les contraintes de la population et du changement climatique. Les projections sur les précipitations et l’écoulement dépendent des modèles et des scénarios d’émission de gaz à effet de serre et ces projections restent incertaines localement. Les estimations de demande future sont par ailleurs peu fiables. On peut toutefois retenir que le cycle hydrologique est accéléré, amplifié, et que sa variabilité augmente à cause du réchauffement global ; la fréquence des évènements extrêmes, tels que sécheresse, inondations, augmente. Pour certaines zones, comme la Méditerranée, les modèles s’accordent pour prévoir une diminution des précipitations d’ici 2050.

La ressource en eau renouvelable ne permettant pas de garantir les besoins de la population mondiale, à cause de l’inégale répartition dans le temps et dans l’espace, il faut envisager des solutions pour l’avenir, de deux types : gestion par l’offre, avec production d’eau non conventionnelle, ou gestion par la demande.

Plan

Introduction

1. L'eau sur Terre : du cycle hydrologique aux ressources en eau disponibles
2. Usage mondial de l'eau
3. Le changement climatique
 - 3.1. Le réchauffement global
 - 3.2. Les précipitations
 - 3.3. L'écoulement
 - 3.4. Qualité de l'eau, phénomènes climatiques extrêmes, vulnérabilité
4. Conséquences futures sur les usages et les populations
 - 4.1. Demande en eau future
 - 4.2. Sensibilité de la demande en eau au changement climatique
 - 4.3. Impact sur les populations

Conclusion

Bibliographie

Annexe A : des concepts hydrologiques aux concepts de ressource en eau

Annexe B : ressource en eau disponible par personne, taux de prélèvements : comment définir la notion de stress hydrique et de pénurie

Annexe C : agriculture et irrigation

Introduction

Depuis quelques années, on entend de plus en plus parler de l'eau comme étant le grand enjeu du XXI^e siècle. Dans le monde entier on parle régulièrement de sécheresses.

Celles-ci peuvent être temporaires, comme c'est le cas en France, mais ne sont pas négligeables pour autant. Un exemple le montre bien : pendant la canicule de l'été 2006, le débit des rivières a diminué et leur température a augmenté ; cette eau étant prélevée pour refroidir les centrales thermiques classiques et nucléaires, EDF a été contraint de réduire sa production électrique en France, et d'acheter de l'électricité à l'Allemagne, alors que la demande d'électricité était élevée, à cause de la mise en route de nombreux climatiseurs.

Dans certaines régions du monde, les sécheresses sont durables, par exemple dans les régions sahéliennes. On évoque aussi très souvent de nombreux conflits, tels que celui du Darfour, ou encore celui d'Israël-Palestine, dont un des aspects est la rivalité pour l'eau.

Outre son utilisation domestique, il faut aussi se souvenir que l'eau est utilisée de façon massive par l'agriculture irriguée, qui permet de produire plus de la moitié de la nourriture mondiale, et par l'industrie, en particulier pour la production d'énergie (et pas seulement pour refroidir les centrales thermiques).

L'eau étant la ressource la plus essentielle à la vie, et nécessaire à tous les secteurs, il faut se poser la question suivante : parviendrons-nous à approvisionner en eau douce une population de 9 milliards d'habitants en 2050 (soit 3 milliards de personnes de plus qu'aujourd'hui), pour tous ses besoins, domestiques, agricoles, industriels (donc pour leur accès au minimum vital, nourriture, eau douce, assainissement, électricité, facteurs clés de développement), sachant qu'en 1995, il y avait environ 5,8 milliards d'habitants sur Terre, environ 91,8 millions vivant dans des pays en pénurie d'eau¹ (Arnell, 2004). Le problème n'est pas tant la quantité totale d'eau douce disponible sur Terre, que sa très inégale répartition, dans l'espace et le temps.

La question est d'autant plus douloureuse que le changement climatique accentue cette pression exercée par l'homme sur le cycle hydrologique et sur la ressource en eau.

D'autre part, il existe des problèmes d'infrastructures dans de nombreuses régions (absence de réseau d'eau potable et d'assainissement) ; environ 35 % de la population mondiale n'a aujourd'hui pas accès à l'eau potable (Lacoste, 2003). Ces problèmes de gestion de l'eau seront peu abordés par la suite, car ils sortent du cadre de ce travail.

L'objet de cette étude est de cerner et de comprendre l'ensemble des éléments essentiels de la problématique de l'eau aujourd'hui, en terme d'adéquation besoin/ressource. Dans un premier temps, on abordera les concepts clés, le premier étant la notion de ressource en eau, définie à partir du cycle hydrologique ; puis nous évoquerons l'usage mondial de l'eau, le changement climatique et ses conséquences sur l'eau, et enfin l'impact de l'augmentation ou de la diminution de la disponibilité en eau par personne sur les populations.

¹ Un pays est en pénurie d'eau lorsqu'il se trouve en dessous de 1 000 m³/habitant/an.

1. L'eau sur Terre : du cycle hydrologique aux ressources en eau disponibles

La masse d'eau totale de l'hydrosphère ne varie pas au cours des années. L'eau change d'état au cours de son cycle mais sa quantité globale reste inchangée depuis 3 milliards d'années, date de son apparition sur Terre. C'est l'énergie solaire qui est le moteur du cycle de l'eau en entraînant ses changements d'état (Maurel, 2006).

La quantité d'eau sur Terre est gigantesque : environ 1,4 milliards de km³, d'après les estimations de Shiklomanov et Rodda, 2003 (cité dans UNESCO, 2006). Cependant, 97,5 % de cette quantité se trouve sous forme d'eau salée et 2,5 % sous forme d'eau douce, soit environ 35 millions de km³.

69,5 % de l'eau douce se présente sous forme de glace et de neige permanente, 30,1 % sous forme d'eau souterraine, 0,27 % sous forme d'eau dans les lacs et rivières, 0,13 % sous une autre forme (atmosphère, humidité dans le sol, marais, etc.). La Figure 1 ci-après récapitule cette répartition.

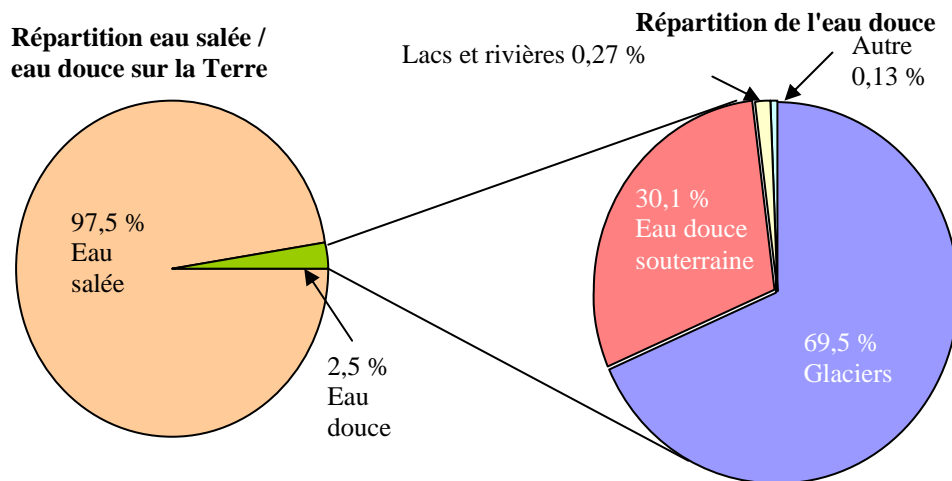


Figure 1. Répartition eau salée/eau douce sur Terre

Le Tableau 1 ci-dessous décrit cette répartition de manière plus détaillée, en incluant les volumes d'eau, les volumes recyclés annuellement et les périodes de renouvellement.

Tableau 1 Répartition eau salée/ eau douce sur Terre ; volume recyclé annuellement

| Lieu | Volume (10 ³ km ³) | Répartition du volume total de l'hydrosphère (%) | Répartition de l'eau douce (%) | Volume recyclé annuellement (km ³) | Période de renouvellement (années) |
|--|---|--|--------------------------------|--|------------------------------------|
| Océan | 1 338 000 | 96,5 | - | 505 000 | 2500 |
| Eau souterraine (gravité et capillarité) * | 23 400 | 1,7 | - | 16 700 | 1400 |
| Eau douce souterraine | 10 530 | 0,76 | 30,1 | | |
| Humidité du sol | 16,5 | 0,001 | 0,05 | 16 500 | 1 |
| Glaciers et couverture neigeuse permanente | 24 064 | 1,74 | 68,7 | | |
| Glace du sol (permafrost) | 300 | 0,022 | 0,86 | 30 | 10 000 |
| Eau dans les lacs | 176,4 | 0,013 | - | 10 376 | 17 |
| Douce | 91 | 0,007 | 0,26 | | |
| Salée | 85,4 | 0,006 | - | | |
| Marais, marécages | 11,5 | 0,0008 | 0,03 | 2 294 | 5 |
| Eau de rivière | 2,1 | 0,0002 | 0,006 | 43 000 | 16 jours |
| Eau des plantes et animaux | 1,1 | 0,0001 | 0,003 | | - |
| Eau dans l'atmosphère | 12,9 | 0,001 | 0,04 | 600 000 | 8 jours |
| Volume Total de l'hydrosphère | 1 386 000 | 100 | - | | |
| Eau douce totale | 35 029,2 | 2,53 | 100 | | |

* A l'exception de l'eau souterraine de l'Antarctique, estimée à 2 millions de km³, dont environ 1 million de km³ d'eau douce. D'après UNESCO, 2003 et Shiklomanov et Rodda, 2003 (cité dans UNESCO, 2006).

En réalité, cette répartition de l'eau n'est pas statique, comme l'indiquent les périodes de renouvellement. Le point essentiel pour les ressources en eau disponibles est le cycle continental. Chaque année, 577 000 km³ d'eau se renouvellent sur Terre : c'est l'eau qui s'évapore de la surface de l'océan (502 800 km³) et des continents (74 200 km³). Cette quantité d'eau retombe lors des précipitations (458 000 km³ sur l'océan et 119 000 km³ sur les continents). La différence entre les précipitations et l'évaporation sur les continents (119 000 - 74 200 = 44 800 km³/an) représente l'écoulement total des rivières de la Terre (42 600 km³/an) et un écoulement direct des eaux souterraines vers l'océan (2 200 km³/an) (Shiklomanov, 1999).

La notion de « **ressource en eau**² » (ou « ressource en eau renouvelable », ou « ressource en eau disponible ») désigne les eaux liquides en écoulement, entrant dans le cycle annuel, accessibles aux usages humains. On parle alors « d'**eau bleue** ». Elle néglige l'eau de pluie utilisée directement par l'agriculture non irriguée, qui fait partie de ce qu'on appelle « l'**eau verte** », utilisée par l'ensemble des écosystèmes naturels (d'après Marsily, 2006).

Il faut noter que l'eau **verte produit 60 % de la nourriture mondiale** (Cosgrove, 2000, Chap. 2, p.6 ; WCD, 2000, p. 49), mais que **seule l'eau bleue mobilise de l'énergie**.

Les ressources en eau se constituent à partir des 45 000 km³/an d'eau douce qui s'écoulent sur Terre, mais on estime que seulement 10 000 à 12 000 km³/an sont utilisables. En effet, une partie de l'eau s'écoule en des lieux inhabités, une partie s'écoule trop vite pour être stockée (lors de crues) et une certaine quantité d'eau doit continuer à s'écouler au sein des écosystèmes naturels et des nappes souterraines, pour ne pas mettre en danger les équilibres et dynamiques naturels.

² Il existe de nombreuses définitions sur les ressources en eau ; la réalité est plus complexe, comme le montre le schéma de l'Annexe A.

Remarquons toutefois que de grandes quantités d'eau douce ne sont pas comptabilisées dans les ressources en eau, car elles n'entrent pas dans le cycle annuel de l'eau : les glaces représentent 24 millions de km³ d'eau, les nappes souterraines 10 millions de km³ et les lacs 90 000 km³ (Marsily, 2006).

2. Usage mondial de l'eau

Quelques définitions préalables sont nécessaires :

- Le **prélèvement** total : il désigne la quantité totale prélevée annuellement pour les besoins domestiques, industriels et agricoles.
- Le **prélèvement domestique** : il comprend les prélèvements d'eau de consommation personnelle, ceux des établissements commerciaux, services publics et autres usages municipaux. Il peut inclure des données de prélèvements d'usines raccordées au système d'égout.
- Le **prélèvement industriel** : il comprend les prélèvements d'eau des usines non raccordées au système d'égout municipal, et peut comprendre, dans certains pays, l'eau de refroidissement utilisée par des usines.
- Le **prélèvement agricole** : il comprend les prélèvements pour l'irrigation et l'élevage du bétail (d'après Lacoste, 2003).

A l'échelle mondiale, il semble que les prélèvements n'exercent qu'une pression modérée sur les ressources en eau : ils ne représentent en 2000 que 9 % des ressources renouvelables et les **consommations** (part de l'eau prélevée non restituée au milieu de prélèvements sous forme liquide) environ 5 %³.

Le Tableau 2.1 ci-dessous détaille les différents prélèvements et consommations d'eau par secteur depuis 1900 jusqu'aux prévisions de 2050. D'après ce tableau, pour l'an 2000 :

- Le principal utilisateur d'eau est l'agriculture irriguée (65 % des prélèvements et 84 % des consommations). Le ratio consommation/prélèvement de l'irrigation est de 70%⁴. Ces prélèvements sont peu importants dans les pays tempérés (13 % du total en France). Mais plus le climat est sec, plus l'agriculture doit avoir recours à l'irrigation et plus sa part dans les prélèvements augmente. Des valeurs de l'ordre de 90 % sont fréquentes dans les pays arides (Marsily, 2006).
- La part des prélèvements industriels dans les prélèvements totaux est de 20 % et de 4 % pour les consommations. Le ratio consommation/prélèvement est de 11 %.
- L'eau prélevée pour les usages domestiques représente 10 % des prélèvements totaux et 2 % des consommations. Le ratio consommation/prélèvement est de 14 %.

³ Toutefois, l'eau non consommée, rendue au milieu naturel, est de moins bonne qualité que l'eau prélevée (FAO, 2002).

⁴ Ce ratio représente l'efficacité de l'eau ; sa valeur est controversée : on trouve des valeurs différentes allant de 33 à 50 %, dans d'autres rapports, d'après Marsily, 2006.

- L'eau évaporée par les barrages et réservoirs représente 5 % des prélèvements et 10 % des consommations totales.

Tableau 2.1 Evolution mondiale de la population, des prélèvements et des consommations d'eau des principaux secteurs au cours du XX^e siècle.

| | 1900 | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | 1995 | 2000 | 2025 | 2050 |
|---|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Population (million) | | | 2542 | 3029 | 3603 | 4410 | 5285 | 5735 | 6181 | 8000 | 9200 |
| Superficie irriguée (M ha) | 47,3 | 75,9 | 101 | 142 | 169 | 198 | 243 | 253 | 264 | 307 | 331 |
| Prélèvements agricoles | 513 | 895 | 1080 | 1481 | 1743 | 2112 | 2425 | 2504 | 2605 | 3053 | 3283 |
| Consommation agricole | 321 | 586 | 722 | 1005 | 1186 | 1445 | 1691 | 1753 | 1834 | 2143 | 2309 |
| Ratio consommation/ prélèvement | 63% | 65% | 67% | 68% | 68% | 68% | 70% | 70% | 70% | 70% | 70% |
| Prélèvements Municipaux (ou Domestiques) | 21,5 | 58,9 | 86,7 | 118 | 160 | 219 | 305 | 344 | 384 | 522 | 618 |
| Consommation municipale | 4,61 | 12,5 | 16,7 | 20,6 | 28,5 | 38,3 | 45 | 49,8 | 52,8 | 73,6 | 86,4 |
| Ratio consommation/ prélèvement | 21% | 21% | 19% | 17% | 18% | 17% | 15% | 14% | 14% | 14% | 14% |
| Prélèvements industriels | 43,7 | 127 | 204 | 339 | 547 | 713 | 735 | 752 | 776 | 834 | 875 |
| Consommation industrielle | 4,81 | 11,9 | 19,1 | 30,6 | 51 | 70,9 | 78,8 | 82,6 | 87,9 | 104 | 116 |
| Ratio consommation/ prélèvement | 11% | 9% | 9% | 9% | 9% | 10% | 11% | 11% | 11% | 12% | 13% |
| Evaporation des réservoirs | 0,3 | 7 | 11,1 | 30,2 | 76,1 | 131 | 167 | 188 | 208 | 302 | 362 |
| Prélèvements totaux | 579 | 1088 | 1382 | 1968 | 2526 | 3175 | 3633 | 3788 | 3973 | 4711 | 5138 |
| Consommation totale | 331 | 617 | 768 | 1086 | 1341 | 1686 | 1982 | 2074 | 2182 | 2623 | 2873 |

Valeurs en km³/an, sauf indication. Prévisions pour 2025 et 2050 basées sur la poursuite des tendances observées au XX^e siècle. D'après Shiklomanov, 1999 et Marsily, 2006.

La Figure 2.1 ci-dessous synthétise la répartition des prélèvements et des consommations d'eau par secteur en 2000 :

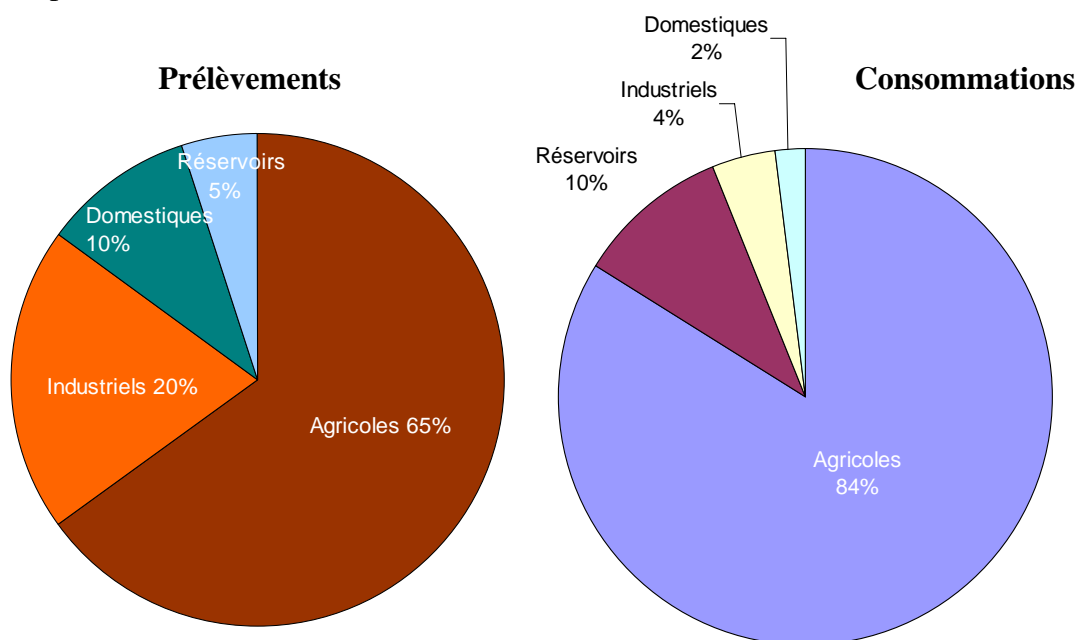


Figure 2.1 Prélèvements et consommations d'eau par secteur (2000)

Il faut noter que les barrages et réservoirs sont utilisés pour l'irrigation (secteur agricole), pour la production hydroélectrique (secteur industriel), pour l'approvisionnement domestique (secteur domestique), et pour le contrôle des inondations.

On vient de voir la répartition des prélèvements et consommations par secteur, à l'échelle globale. Regardons maintenant ce qu'il en est à l'échelle des continents. Comme l'illustrent le Tableau 2.2 et la Figure 2.2, page suivante, ces répartitions sont très inégales (ce qui a déjà été évoqué à propos des pénuries et des prélèvements agricoles, page précédente) :

Tableau 2.2 Prélèvements d'eau douce par région et par secteur (2001)⁵. Source: FAO, 2006

| Continent/Région | Ressource en eau renouvelable | Volume total de l'eau douce utilisée | Prélèvements d'eau douce par secteur | | | | | | Taux de prélèvement des ressources renouvelables (%) |
|------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|--|
| | | | Domestiques | | Industriels | | Agricoles | | |
| | km ³ /an | km ³ /an | km ³ /an | % | km ³ /an | % | km ³ /an | % | |
| Monde | 43 659 | 3 830 | 381 | 10 | 785 | 20 | 2 664 | 70 | 8,8 |
| Afrique | 3 936 | 215 | 21 | 10 | 9 | 4 | 184 | 86 | 5,5 |
| Asie | 11 594 | 2 378 | 172 | 7 | 270 | 11 | 1 936 | 81 | 20,5 |
| Amérique latine | 13 477 | 252 | 47 | 19 | 26 | 10 | 178 | 71 | 1,9 |
| Caraïbes | 93 | 13 | 3 | 23 | 1 | 9 | 9 | 68 | 14,4 |
| Amérique du Nord | 6 253 | 525 | 70 | 13 | 252 | 48 | 203 | 39 | 8,4 |
| Océanie | 1 703 | 26 | 5 | 18 | 3 | 10 | 19 | 72 | 1,5 |
| Europe | 6 603 | 418 | 63 | 15 | 223 | 53 | 132 | 32 | 6,3 |

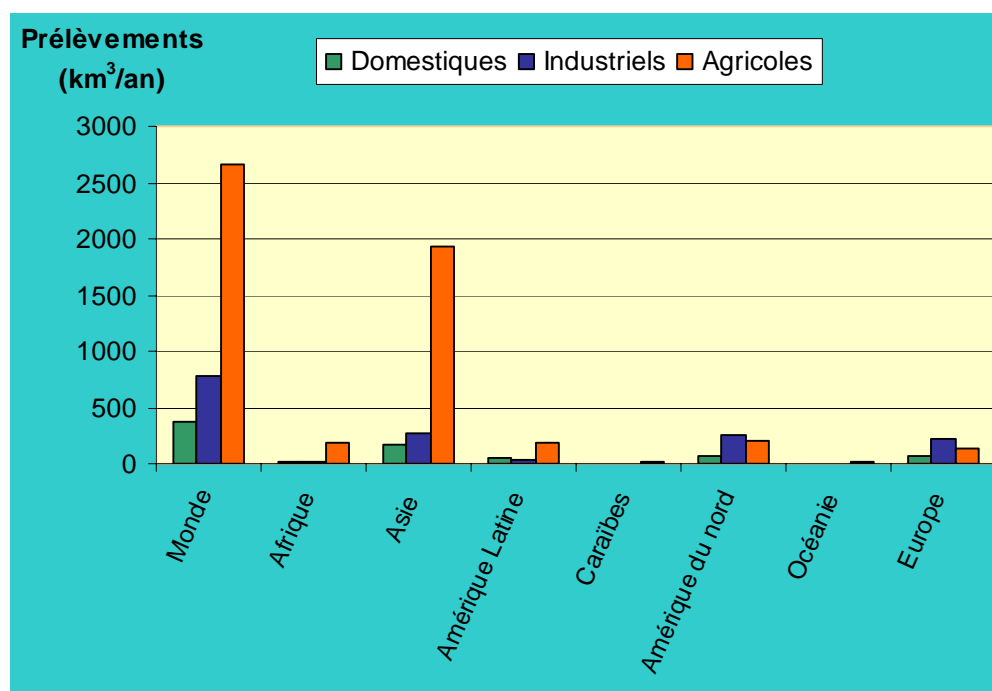


Figure 2.2 Prélèvements en eau par région et secteur en 2001

⁵ Remarque : ces données ne tiennent pas compte des barrages et réservoirs. On trouvera dans FAO, 2003, p.1 et 2, des explications sur les sources de bases de données de la FAO et sur les méthodes utilisées.

On constate que l'Asie est le plus gros préleveur d'eau mondial, à cause de son agriculture irriguée, loin devant les autres continents ; on note qu'en Amérique du Nord et en Europe, les prélèvements industriels dépassent les prélèvements agricoles.

3. Le changement climatique

Avant toute chose, rappelons que le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC, IPCC en anglais) définit le changement climatique comme étant *une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité persistant pendant de longues périodes (généralement, pendant des décennies ou plus). Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels, à des forçages externes, ou à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'affectation des terres. On notera que la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son Article 1, définit les « changements climatiques » comme étant des « changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ». La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les « changements climatiques » qui peuvent être attribués aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère, et la « variabilité climatique » due à des causes naturelles.* (IPCC, 2001a).

3.1. Le réchauffement global

Examinons maintenant deux caractéristiques particulières du changement climatique : le réchauffement global et l'évolution du cycle hydrologique.

Au cours du XX^e siècle, la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0,6 °C. Pour le XXI^e siècle, les projections utilisant les scénarios d'émissions du Special Report on Emission Scenario (SRES)⁶ dans divers modèles climatiques mettent en évidence une augmentation de la température moyenne mondiale à la surface de 1,4 à 5,8 °C entre 1990 et 2100 (IPCC, 2001a).

3.2. Les précipitations

Parmi les effets associés du changement climatique, on observe une intensification du cycle hydrologique, conséquence d'une disponibilité d'énergie plus grande dans le système climatique. En certains endroits, cela mènera à des **changements de la quantité totale de précipitations, de leur distribution saisonnière et de leur fréquence et intensité.** (UNESCO, 2003).

Au cours du XX^e siècle, les précipitations ont très probablement augmenté de 5 à 10 % sur la plupart des moyennes et hautes latitudes des continents de l'hémisphère Nord, mais, à l'opposé, il est probable que les pluies ont diminué de 3% en moyenne sur une grande partie des zones terrestres subtropicales (voir Figure 3.1). Les précipitations ont diminué sur les zones désertiques d'Afrique, d'Amérique du Sud et sur le bassin méditerranéen.

⁶ Les scénarios du SRES sont des scénarios d'émissions élaborés par Nakicenovic et al. (2000) et servent de base, notamment, aux projections climatiques dans la contribution du Groupe de Travail I du GIEC au Troisième rapport d'évaluation (IPCC 2001 b).

Pendant la deuxième moitié du XX^e siècle, la fréquence des fortes précipitations aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord a probablement augmenté de 2 à 4 %. Des augmentations à long terme relativement faibles ont été observées dans les zones terrestres touchées par des sécheresses ou des inondations importantes, mais dans grand nombre de régions, une variabilité climatique interdécennale et multidécennale caractérise les changements, sans qu'aucune tendance importante ne soit évidente pour le XX^e siècle.

Dans certaines régions, telles que certaines parties de l'Asie et de l'Afrique, on a observé une augmentation de la fréquence et de l'intensité de la sécheresse au cours des dernières décennies (IPCC, 2001a).

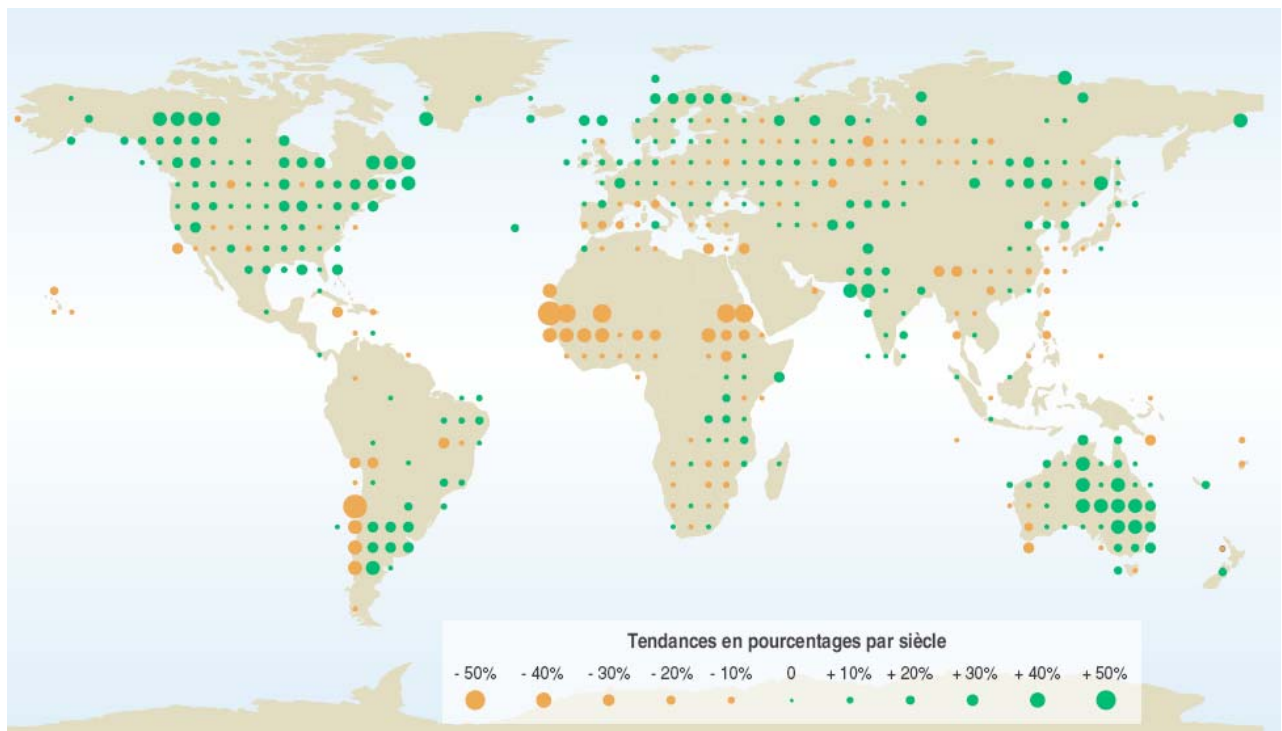


Figure 3.1 Tendances des précipitations annuelles, de 1 900 à 2 000 (Source : IPCC, 2001a)

Au cours du XXI^e siècle : les précipitations moyennes annuelles à l'échelle mondiale devraient augmenter. On prévoit également une augmentation des moyennes mondiales de vapeur d'eau et d'évaporation. A l'échelle régionale, on prévoit des variations des précipitations de l'ordre de 5 à 20 %. Il y aura probablement une augmentation des précipitations en été et en hiver sur les régions aux latitudes supérieures. Des augmentations sont également prévues en hiver pour les latitudes nord moyennes, en Afrique tropicale et en Antarctique, et en été en Asie australe et orientale. Les précipitations hivernales devraient diminuer en Australie, Amérique centrale et Afrique australe. Très probablement, les variations des précipitations interannuelles seront plus importantes dans la plupart des régions pour lesquelles on prévoit une augmentation des précipitations moyennes (voir Figure 3.2, page suivante) (IPCC, 2001a).

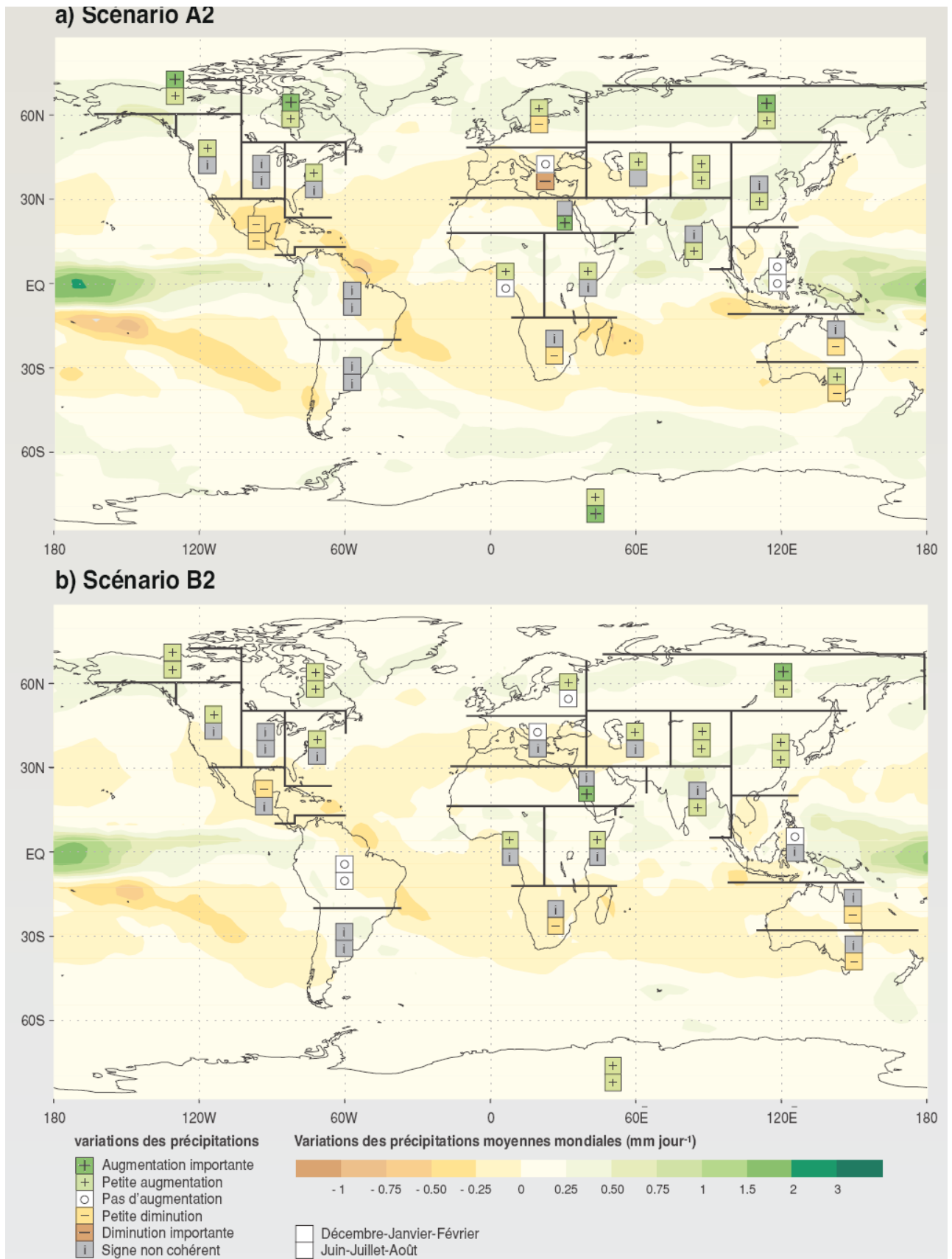


Figure 3.2 Variation des précipitations pour les scénarios A2 et B2.

L'arrière-plan indique la variation moyenne annuelle des précipitations (ombrage en couleur) pour :

- (a) le scénario A2 du RSSE
- (b) le scénario B2 du RSSE.

Les deux scénarios du RSSE indiquent la période 2071-2100, comparée à la période 1961-1990, et ont été exécutés par AOGCM.

Les encadrés indiquent un accord sur les variations des précipitations régionales entre les différents modèles (accord si résultat cohérent fourni par au moins sept des neuf modèles).

La légende est la suivante :

Augmentation (respectivement diminution) importante : accord sur l'augmentation (respectivement diminution) avec une variation moyenne de plus de 20 %.

Petite augmentation (respectivement diminution) : accord sur l'augmentation (respectivement diminution) avec une variation moyenne entre 5 et 20 %.

Pas de changement : changement entre -5 et +5 % ou un accord sur une variation moyenne entre -5 et +5 %

Signe non cohérent : désaccord (D'après IPCC, 2001a).

3.3. L'écoulement

« L'écoulement » désigne la quantité d'eau qui s'écoule sur la surface terrestre et donne une bonne indication de l'eau disponible, comme on a pu le voir dans la 1^{ère} partie de ce texte.

D'après l'IPCC (2001a), les changements climatiques prévus aggraveraient les problèmes de pénurie et de qualité de l'eau dans de nombreuses régions aréiques (c'est-à-dire privées d'écoulements de surface), mais les amélioreraient dans d'autres régions du monde.

Selon les prévisions, les changements climatiques devraient réduire l'écoulement fluvial et l'alimentation des nappes souterraines dans de nombreuses régions du monde, mais les augmenteraient dans certaines régions.

L'ampleur des changements varie selon les scénarios, en partie en raison des différences au niveau des précipitations prévues (notamment à propos de l'intensité des pluies) et en partie en raison des différences au niveau de l'évaporation prévue. Les variations de l'écoulement fluvial prévues dans deux scénarios de changements climatiques sont illustrées à la Figure 3.3, ci-dessous.

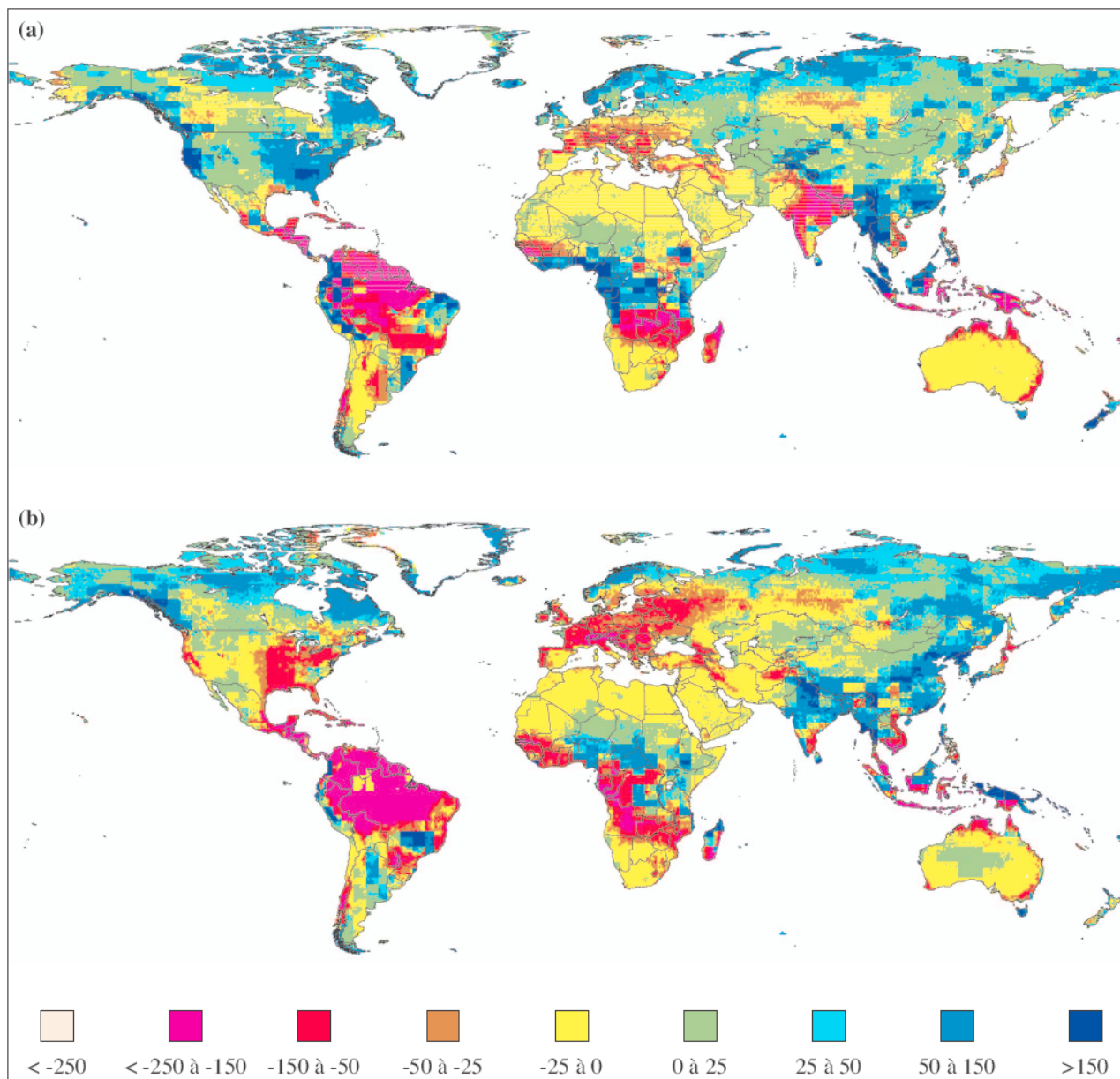


Figure 3.3 Variation du ruissellement annuel (mm/an).

Comparées au ruissellement moyen pour les années 1961-1990, les prévisions des changements du ruissellement annuel moyen d'ici 2050 correspondent en grande partie aux changements prévus pour les précipitations.

Les variations du ruissellement sont calculées à l'aide d'un modèle hydrologique utilisant des projections climatiques provenant de deux versions du modèle de circulation générale atmosphère/océans du Hadley Centre (AOGCM) pour un scénario avec 1 % d'augmentation annuelle effective de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère :

(a) moyenne d'ensemble HadCM2

(b) HadCM3.

Les projections d'augmentation du ruissellement aux hautes latitudes et en Asie du Sud-Est et de diminution en Asie Centrale, autour de la Méditerranée, en Afrique australe, et en Australie sont, dans l'ensemble, cohérentes pour les expériences du Hadley Centre, et par rapport aux projections de précipitations d'autres expériences du AOGCM. Pour d'autres parties du monde, les variations des précipitations et du ruissellement dépendent des scénarios et des modèles (IPCC, 2001a).

Il faut cependant noter la **non-linéarité** et les effets de seuil de l'hydrologie terrestre dans les processus hydrologiques : les composantes terrestres du cycle hydrologique amplifient les données climatiques. La sécheresse régionale qui a frappé l'Afrique durant les années 1970 et

1980 fournit une illustration de ces concepts : tandis que la diminution des précipitations sur cette région pendant ces deux décades était d'une intensité de 25% comparée à la période 1950-1989, les principales rivières s'écoulant dans la région ont subi des réductions dans les flux annuels de l'ordre de 50 % (Servat et al., 1998, cité dans UNESCO, 2003). En d'autres termes, ce qui peut être considéré comme un changement mineur dans le total ou dans le schéma temporel de précipitation pourrait avoir des effets tangibles sur la ressource en eau.

Outre cette non-linéarité, il est essentiel de remarquer qu'une augmentation dans le débit annuel des rivières n'est pas nécessairement bénéfique, en particulier dans les climats à caractéristique très saisonnière, parce que cette eau supplémentaire pourrait ne pas être disponible à l'usage en l'absence du stockage adéquat, et elle pourrait aussi se présenter sous forme d'inondations plus fortes et plus fréquentes (Arnell, 2006).

Notons enfin que l'augmentation de température globale joue aussi sur la période des écoulements : au cours des dernières décennies, dans une grande partie de l'Europe de l'Est, la Russie européenne, et l'Amérique du Nord, les débits fluviaux maximaux sont observés à la fin de l'hiver plutôt qu'au printemps (IPCC, 2001a) : l'eau n'est plus stockée sous forme de neige. Ceci a une influence sur le pic de **production hydroélectrique**, déplacé du printemps à l'hiver.

3.4. Qualité de l'eau, phénomènes climatiques extrêmes, vulnérabilité

Outre les problèmes de ressource en eau, l'eau est associée à de nombreux phénomènes extrêmes pouvant créer des dégâts, qui ont des conséquences par exemple sur les infrastructures d'approvisionnement en eau.

Au cours du 21^{ème} siècle, on prévoit des changements pour les phénomènes climatiques extrêmes et leur probabilité : augmentation des températures maximales, du nombre de jours chauds et de vagues de chaleur pour la quasi-totalité des zones terrestres, des températures minimales plus élevées, moins de jours froids, de jours de gel et de vagues de froid pour la quasi-totalité des zones terrestres, des précipitations plus intenses sur de nombreuses régions, une sécheresse estivale accrue sur la plupart des terres continentales à moyenne latitude et des risques de sécheresse associés.

En général, une hausse de la température de l'eau nuit à la qualité de l'eau douce, bien que, dans certaines régions, ceci puisse être compensé par des débits plus importants.

Les effets des changements climatiques sur la pénurie d'eau, la qualité de l'eau et la fréquence et l'intensité des inondations et des sécheresses aggraveraient les problèmes de gestion de l'eau et des inondations. Ce sont les systèmes hydriques non gérés ou mal gérés qui sont les plus vulnérables aux effets néfastes des changements climatiques (IPCC, 2001a).

4. Conséquences futures sur les usages et les populations

Dans cette dernière partie, nous allons nous intéresser aux conséquences du changement climatique sur l'eau pour les populations, en étudiant d'abord la demande future en eau, puis la sensibilité de la demande au changement climatique, et enfin les conséquences sur les populations des futures ressources renouvelables en eau disponibles par personne.

4.1. Demande⁷ en eau future (d'après IPCC, 2001c)

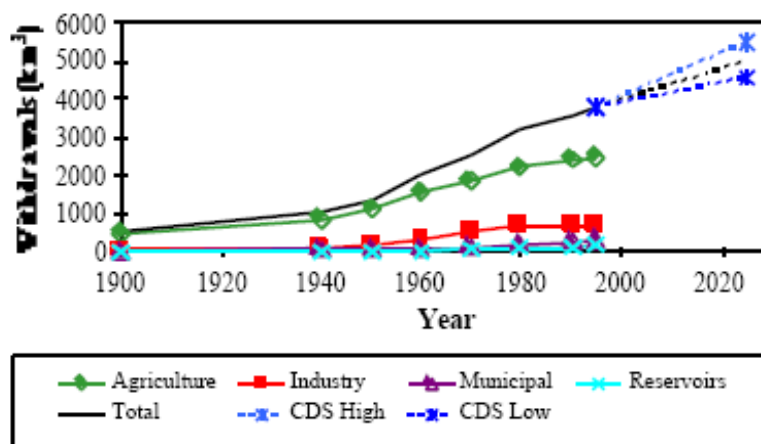


Figure 4. Prélèvements en eau globaux, 1900-1995, avec des projections jusqu'en 2025 (D'après données de Shiklomanov et al., 2000 et d'après Raskin et al., 1997).

La figure 4 ci-dessus montre les estimations de prélèvements totaux projetés pour le UN Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World (Raskin et al., 1997) ; dans les conditions du scénario CDS⁸, les prélèvements d'eau globaux augmenteraient d'environ 35% au-dessus des valeurs de 1995, d'ici 2025, les plus grands taux d'augmentation concernant l'Afrique et le Moyen-Orient. **Cette projection ne prend pas en compte le changement climatique.**

Concernant les prélèvements pour l'eau municipale, les prélèvements par personne vont chuter dans beaucoup de pays développés, ce qui pourrait plus que compenser la croissance de population, tandis qu'on peut s'attendre à ce qu'ils augmentent avec le niveau de vie dans les pays en développement, d'après le scénario CDS. On s'attend à ce que l'urbanisation dans les pays en développement conduise à des augmentations substantielles dans les prélèvements d'eau municipale.

Pour le secteur industriel, on s'attend à ce que l'utilisation de l'eau augmente substantiellement avec l'essor industriel des pays en développement, mais avec probablement une utilisation de l'eau plus efficace (par exemple, moins d'utilisation par unité de production, ou **déplacement des centrales électriques sur les côtes** pour utiliser l'eau de mer pour le refroidissement). D'après le scénario CDS, l'usage industriel de l'eau augmente ; cette augmentation devrait se concentrer largement sur l'Asie et l'Amérique latine.

La quantité d'eau utilisée pour l'agriculture dépend du niveau de développement de l'irrigation, du prix de l'eau et de la fiabilité de la réserve. Les usages futurs de l'irrigation dépendent de l'expansion des terres irriguées, de l'efficacité de l'irrigation et des pratiques de prix. La quantité d'augmentation est très incertaine et dépend notamment du taux de

⁷ Ici la demande en eau représente les prélèvements, mais en toute rigueur elle devrait représenter la somme des prélèvements et des productions non conventionnelles (dessalement, réutilisation des eaux usées...).

⁸ Conventional Development Scenario : utilise des estimations de la croissance des populations, de développement économique et d'intensité de l'utilisation de l'eau.

croissance des populations (augmentation de la demande) et des marchés agricoles. Le niveau de prix reflétant la pénurie d'eau affectera les quantités utilisées.

Les **estimations des futurs prélèvements en eau sont donc incertaines**, reflétant largement les incertitudes sur la croissance de la population mondiale et sur la croissance économique.

4.2. Sensibilité de la demande en eau au changement climatique

Le changement climatique est un autre facteur potentiel d'influence sur la demande en eau (IPCC, 2001c). La sensibilité de la demande municipale au changement climatique sera probablement très dépendante des usages qu'on fait de l'eau ; les domaines les plus sensibles sont l'augmentation de la demande d'eau pour la toilette personnelle et l'arrosage du jardin et de la pelouse.

L'usage industriel à des buts de fabrication est insensible au changement climatique. Les demandes pour le *refroidissement*, elles, pourraient être affectées : l'augmentation des températures réduiront l'efficacité du refroidissement, nécessitant plus d'extraction d'eau (ou plus d'efficacité technologique, ou encore un changement radical de technologie : déplacement des centrales électriques sur les côtes pour utiliser l'eau de mer pour le refroidissement, par exemple (déjà évoqué au paragraphe 4.1.), utilisation du refroidissement à air humide ou air sec, etc.

La *demande agricole* est beaucoup plus sensible au changement climatique que la demande municipale et industrielle. Il y a deux effets potentiels.

D'abord le changement climatique pourrait changer les besoins et la durée de l'irrigation ; l'augmentation de sécheresse pourrait mener à une augmentation de la demande, mais la demande pourrait être réduite si l'humidité des sols augmente à des périodes critiques de l'année ; au niveau local, les prévisions divergent selon les scénarios ; les besoins nets et globaux en irrigation augmenteraient, par rapport à une situation sans changement climatique, de 3.5-5 % d'ici 2025 et 6-8 % d'ici 2075 (deux scénarios considérés par Döll et Siebert, 2001).

Le deuxième effet potentiel sur la demande d'irrigation est conséquent à l'augmentation des concentrations en CO₂ atmosphérique, qui diminuent la conductance stomatale des plantes et donc augmentent l'efficacité de l'utilisation de l'eau ; mais ceci pourrait être diminué dans une large mesure par la croissance accélérée des plantes, à cause de l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère.

Il existe de très grandes incertitudes concernant les prélèvements pour l'irrigation future.

4.3. Impact sur les populations

On s'intéresse dans ce paragraphe à l'impact de l'évolution des ressources renouvelables en eau disponible par personne sur les populations. On considère les ressources renouvelables disponibles par personne, plutôt que le taux de prélèvement, car les prévisions sur la demande se révèlent trop peu fiables (voir Annexe B).

On retient l'étude de Warren et al. (2006), basée sur une analyse de Arnell (2004) pour les années 2080 (résultats basés sur des modèles hydrologiques utilisant des données mensuelles

provenant de cinq modèles climatiques et sur des prévisions d'évolution de la population à partir de scénarios du SRES ; ces résultats précisent la disponibilité en eau par personne, établie par bassin versant, mais n'indiquent qu'un stress hydrique⁹ potentiel et n'incluent pas l'adaptation, parce que les résultats concernent des mesures de disponibilité et non d'utilisation de l'eau).

D'après l'étude, les différents scénarios du SRES prévoient entre 7 et 14 milliards de personnes sur Terre, d'ici les années 2080. Dans le cas d'une augmentation de température de 2°C par rapport à 1990, 1 à 4 milliards de personnes subiraient une augmentation de la pénurie d'eau d'ici les années 2080 (essentiellement en Afrique, au Moyen-Orient, dans le sud de l'Europe, et dans des certaines parties de l'Amérique du Sud et Centrale). Dans le même temps, 1 à 5 milliards de personnes, la plupart au sud et à l'est de l'Asie, connaîtraient une diminution de la pénurie d'eau (les grands intervalles proviennent des différences de prédiction des cinq modèles climatiques – en particulier pour les zones tropicales où les impacts sont incertains à cause de l'influence dominante de d'El Niño et de la mousson, et des difficultés de prévoir des interactions avec le changement climatique).

L'augmentation de la pénurie indique ici le nombre de personnes vivant dans des bassins versants dont la disponibilité en eau chute en dessous de 1000 m³/personne/an, plus ceux vivant dans des bassins déjà en pénurie, mais dont l'écoulement diminue significativement (une diminution significative est supérieure à l'écart-type de l'écoulement moyen à long terme, dont les valeurs varient typiquement de 5 à 10 %).

La diminution de la pénurie indique le nombre de personnes vivant dans des bassins versants dont la disponibilité en eau augmente au-dessus de 1000 m³/personne/an, plus ceux vivant dans des bassins toujours en pénurie, mais dont l'écoulement augmente significativement.

Ces chiffres agrégés cachent l'importance des variabilités annuelles et saisonnières dans la ressource en eau et le rôle potentiel de la gestion de l'eau pour réduire la pénurie, mais souvent à un coût considérable.

Il n'est pas approprié de calculer le changement net du nombre de personnes exposées à la pénurie parce que les effets d'une réduction apparente de la pénurie ne sont pas symétriques à ceux d'une augmentation apparente (les bénéfices apportés par une augmentation de 10 % de l'écoulement dans un bassin en pénurie sont plus faibles que les nuisances apportées par une diminution de 10 % de l'écoulement). De plus, l'écoulement additionnel survient souvent pendant la saison humide, et pourrait ne pas améliorer la disponibilité en eau pendant la saison sèche, tout en augmentant le risque d'inondation.

Conclusion

Le panorama sur le changement climatique et l'eau que nous avons dressé ici met en avant plusieurs points essentiels.

D'abord la difficulté des concepts touchant à la ressource en eau, dont les définitions sont très variables – quand les choses sont définies ; la notion de stress hydrique est un paramètre sujet à controverse, incomplet, qui ne permet pas actuellement d'indiquer à lui seul la capacité d'un

⁹ Voir la discussion sur les notions de stress hydrique et de pénurie, dans l'Annexe B.

pays à approvisionner sa population, ou à indiquer correctement la pression anthropique sur l'eau.

Ensuite les projections sur les précipitations et l'écoulement dépendent des modèles et des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Ces projections restent incertaines localement. Les estimations de demande future sont par ailleurs peu fiables. On peut toutefois retenir que le cycle hydrologique est accéléré, amplifié, et que sa variabilité augmente à cause du réchauffement global ; la fréquence des événements extrêmes, tels que sécheresse, inondations, augmente. Pour certaines zones, telles que la Méditerranée, les modèles s'accordent pour prévoir une diminution des précipitations d'ici 2050.

Les besoins en eau de la planète n'étant aujourd'hui pas du tout satisfaits, on ne peut que penser que les conditions vont se détériorer à l'avenir, sous les contraintes de la population et du changement climatique. Puisque ce n'est pas la ressource en eau renouvelable qui permettra de garantir les besoins de la population mondiale, il est nécessaire d'utiliser d'autres moyens durables. On peut alors évoquer les solutions locales potentielles que constituent les procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, tels que le dessalement de l'eau de mer. Certains pays comme l'Arabie Saoudite sont approvisionnés en premier lieu par l'eau dessalée : sa capitale, Riyad, est approvisionnée à 80 % par l'eau dessalée provenant des usines de dessalement du golfe Persique, distant de 400 km (Lacoste, 2003). Le problème du dessalement provient de son coût énergétique très élevé. Pour dessaler massivement, il faut un accès à de l'énergie bon marché, comme dans les pays du Golfe. Les coûts du dessalement ont cependant diminué et son marché est actuellement en pleine expansion, ce qui pourrait faire penser que le dessalement pourrait résoudre la crise de l'eau. Il n'en est rien : les quantités d'eau produites par les usines de dessalement sont négligeables à l'échelle globale¹⁰, et son accès reste limité aux côtes.

Le dessalement fait partie d'un ensemble de solutions techniques qu'on peut appeler « gestion par l'offre », qui n'est pas toujours durable.

On parle aussi de « gestion par la demande » : il s'agit cette fois-ci de réduire la demande par personne. Cette réduction peut se faire par une meilleure gestion de l'eau. Les problèmes de pertes dans les réseaux d'eau (pertes entre les prélèvements et la distribution) illustrent bien ce propos : à cause de fuites, de connections illégales ou de problèmes de mesure, les pertes peuvent atteindre un taux de 35-40 % dans les villes d'Asie, certaines villes atteignant même 60 % (WCD, 2000, p.14). Une diminution des pertes permettrait donc d'augmenter l'eau disponible en sortie du réseau, sans augmenter les prélèvements initiaux. Réduire les fuites a un coût très élevé.

On oppose souvent la gestion par la demande à la gestion par l'offre, mais chaque option est locale et mêler les deux approches peut être la meilleure solution. Le choix dépend aussi du coût de mise en œuvre et du coût de l'eau.

On peut encore considérer qu'une partie de l'eau indisponible est apportée de façon virtuelle par les aliments et diverses marchandises, c'est ce qu'on appelle « l'eau virtuelle ». Les

¹⁰ La capacité totale actuelle des usines de dessalement est environ de 40 millions de m³/jour (GWI, Oct. 2006), c'est-à-dire 14,6 km³/an, ce qui représente à peine 0,4 % des prélèvements (environ 4000 km³/an en 2000). On projette que la capacité de dessalement pourrait atteindre 98 millions de m³/jour d'ici 2015 (GWI, Oct. 2006), donc plus d'un doublement, ce qui serait encore inférieur à 1 % des prélèvements.

quantités d'eau échangées virtuellement sont gigantesques, et sont à prendre compte dans le cadre d'une évaluation globale de l'utilisation de l'eau.

L'évaluation des besoins mondiaux dépend aussi de la quantité d'eau qu'on estime nécessaire par personne. L'utilisation de l'eau dépend aussi de son coût. L'exemple de Riyad est très significatif : la consommation journalière en eau (à 80 % dessalée) y est de 285 L/personne, ce qui est le double d'un français, et le prix du mètre cube d'eau y est 100 fois moins cher qu'à Paris (Lacoste, 2003). Les habitants de Riyad ne payent pas le prix réel de l'eau.

Enfin, remarquons qu'au-delà de la nécessité d'avoir une adéquation besoins/ressource en eau, le développement des infrastructures d'approvisionnement accompagne souvent le développement des sociétés ; ainsi en est-il de la construction des barrages, qui peuvent être utilisés aussi bien pour contrôler le débit des cours et éviter des inondations et destructions, que pour approvisionner en eau potable, irriguer et produire de l'électricité ; l'accès à l'eau et à l'électricité sont deux facteurs essentiels de développement des sociétés. En Afrique, la part exploitée du potentiel hydroélectrique techniquement faisable ne serait que de 3.5% au minimum (WCD (2000), Annex V : Dams, Water and Energy - A statistical Profile). Le barrage est toutefois un facteur de développement, dans la mesure où les populations ne sont pas déplacées en masse et les écosystèmes ne sont pas détruits.

Bibliographie

Arnell N.W. (2000). *Impact of climate change on global water resources: Volume 2, unmitigated emissions*. Report to Department of the Environment, Transport and the Regions. Southampton, United Kingdom : University of Southampton. 53 p.

Arnell N.W. (2004). *Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios*. Global Environmental Change n°14, p.31-52.

Arnell N.W. (2006). *Climate change and water resources*. In *Avoiding dangerous climate change*, Schellnhuber H.J (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, p. 167-176.

Büchs A. (2006). *La normalisation de l'eau : Genèse, multiplication et usage des normes*. Mémoire de Master 2 Recherche « Economie et politiques internationales ». Grenoble : Université Pierre Mendès France.

Cosgrove W. J., Rijsberman F.R (2000). *World Water Vision, Making Water Everybody's Business*. World Water Council. London: Earthscan Publications Ltd.

Diop S., Rekacewicz P. (2003). *Atlas Mondial de l'eau, une pénurie annoncée*. Ed. Autrement. 60 p.

Döll P., Siebert S. (2001). *Global Modeling of Irrigation Water Requirements*. Kassel: University of Kassel.

Falkenmark M., Lunquist J., Widstrand C. (1989). *Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development*. Natural Resources Forum n°13, p.258-267.

FAO (2002). *Eau et agriculture, produire plus avec moins d'eau*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (2003). *Review of World Water Resources by country*. Water reports, n° 23. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (2006). Base de données AQUASTAT. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Disponible sur : <http://www.fao.org/ag/aquastat> [Accédé le 15 déc. 2006].

GWJ (Oct. 2006). *Desalination Markets 2007 preview*. Oxford: Global Water Intelligence.

IPCC (2001a). *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2001b). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2001c). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. Chap. 4: Hydrology and Water Resources.

Lacoste Y. (2003). *L'eau dans le monde, les batailles pour la vie*. Larousse, 128 p.

Marsily G. de, sous la dir. (2006), Académie des Sciences. *Les eaux continentales*. Rapport sur la Science et la Technologie n° 25. Paris : EDP sciences. 328 p.

Maurel A. (2006). *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce*. 2^{ème} édition. Paris : TEC & DOC. 286 p.

Milly P.C.D., Wetherald R.T., Dunne K.A., Delworth T.L. (2002). *Increasing risk of great floods in a changing climate*. Nature n° 415, p. 514-517.

Nakicenovic N. J., Alcamo G., Davis H.J.M. et al., Intergovernmental Panel on Climate Change (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge.

Raskin P., Gleick P., Kirshen P., Pontius G., Strzepek K. (1997). *Water Futures: Assessment of Long-Range Patterns and Problems*. Background Report for the Comprehensive Assessment for the Freshwater Resources of the World. Stockholm, Sweden : Stockholm Environment Institute, 78 p.

Servat E., Hughes D., Fritsch J.-M., Hulme M. (1998). *Water Resources Variability in Africa During the Twentieth Century*. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences. Pub. n° 252.

Shiklomanov I.A. (1999). *Summary of the monograph « World Water Resources at the beginning of the 21st century » prepared in the framework of the IHP UNESCO*. Saint-Petersbourg: State Hydrological Institute (SHI).

Disponible sur

<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/summary/html/summary.html#2.%20Water%20storage> [Accédé le 10 janvier 2007].

Shiklomanov I.A., Lammers R.B., Peterson B.J., Vörösmarty C. (2000). *The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean*. In *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Shiklomanov I. A., Rodda J. C. (2003). *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. Cambridge: Cambridge University Press.

UNESCO (2003). *The 1st UN World Water Development Report: « Water for People. Water for life »*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization; New York: Berghahn Books. Chap. 4: The Natural Water Cycle.

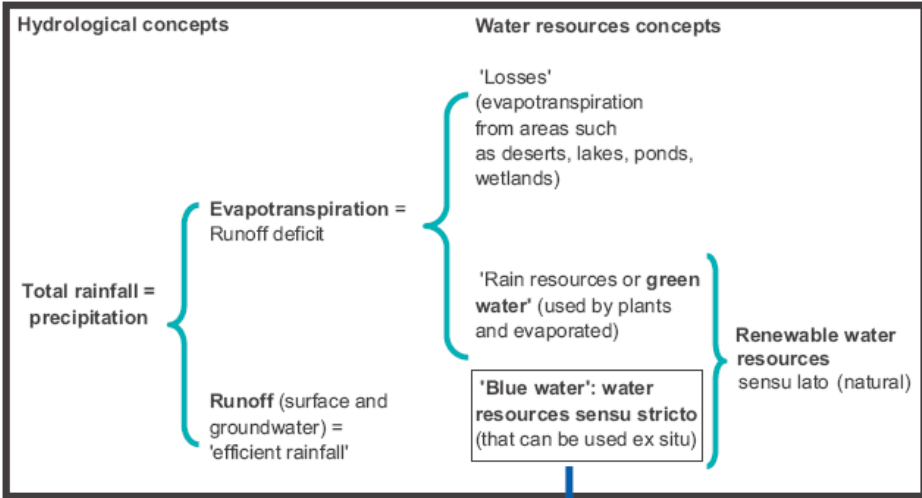
UNESCO (2006). *The 2nd UN World Water Development Report: « Water a shared responsibility »*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO); New York: Berghahn Books. Chap. 4: The State of Resource.

Warren R., Arnell N., Nicholls R., Levy P., Price J. (2006). *Understanding the regional impacts of climate change*. Research report prepared for the Stern Review. Tyndall Centre Working Paper n° 90. Norwich: Tyndall Centre.

Disponible sur http://www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/twp90.pdf [Accédé le 18 janvier 2006].

WCD (2000). *Dams and development: a new framework*. The report of the World Commission on Dams. London : Earthscan Publications Ltd.

Annexe A : des concepts hydrologiques aux concepts de ressource en eau



| Different concepts of resources according to criteria | | | |
|---|--|--|---|
| Constraints | | Political, economic | Political, social, economic, environmental |
| | Natural water resources = Potential or theoretical | Actual water resources (1) | Exploitable or manageable water resources (2) |
| <i>Internal resources</i> | Internal natural resources (IRWR) | Actual internal resources (with no constraints of water conservation for downstream country) | Exploitable internal resources |
| <i>External resources</i> | External natural resources | Actual external resources (taking into account the water reservation by an upstream country or for a downstream country) (3) | Exploitable external resources |
| Total water resources | Total natural resources | Total actual resources (ARWR) | Total exploitable water resources |

Notes:

- (1) Actual resources: when taking into account the resources shared with neighbouring countries (geopolitical constraints)
- (2) Exploitable resources: according to socio-economic and environmental criteria.
- (3) A country may have to reserve for downstream a part of its external resources (e.g. Sudan and Syria).

NB: Where one takes into account both the geopolitical constraints and the socio-economic and environmental criteria, one should speak of 'actual and manageable water resources'.

(D'après FAO, 2003).

Annexe B : ressource en eau disponible par personne, taux de prélèvements : comment définir la notion de stress hydrique et de pénurie

On peut retenir les définitions suivantes :

Pénurie d'eau : moins de 1000 m³/personne/an.

Stress hydrique : de 1000 à 1700 m³/personne/an.

Vulnérabilité hydrique : 1700 à 2500 m³/personne/an (Diop, 2003, p.33).

Ces définitions sont établies par rapport à la **disponibilité en eau renouvelable par personne et par an**. Mais souvent, ces notions de stress et de pénurie (qui n'est qu'une forme plus grave du stress hydrique) sont définies par rapport au **taux de prélèvement par rapport à la ressource renouvelable** (ou indice d'exploitation) ; dans ce cas on parle souvent de stress hydrique lorsqu'on utilise plus de 20 % de la ressource renouvelable (FAO, 2002), et de pénurie lorsqu'on dépasse 40 % (Marsily, 2006, p.14). Ces seuils de 20 % et 40 % sont discutables, ainsi que les seuils de 1000, 1700 et 2500 m³/personne/an. D'autres seuils peuvent être définis (voir Büchs, 2006, p.111 et Maurel, 2006, p.7).

On peut ajouter que la notion de stress hydrique par rapport au taux de prélèvement indique la pression anthropique sur la ressource renouvelable, mais ne reflète pas l'accès à l'eau des populations. Quant à la notion de disponibilité en eau par personne, elle indique la quantité d'eau théoriquement disponible par personne dans un pays, donc prend en compte la dimension humaine de la ressource en eau, mais reflète mal l'accès à l'eau des populations (car l'accès dépend aussi des infrastructures, de la gestion et des coûts de l'eau), sans indiquer la pression anthropique sur la ressource.

Les deux choix sont présents dans la littérature.

Ainsi, Marsily (2006) évoque des pénuries d'eau en utilisant la notion de taux de prélèvement : les pénuries éventuelles d'eau sont à rechercher principalement dans la très grande hétérogénéité spatiale et temporelle des ressources disponibles, qui impliquent des pressions locales plus fortes que la moyenne. La notion de pénurie, difficile à définir, doit tenir compte d'une part du taux de prélèvement par rapport à la ressource disponible, et d'autre part, d'éléments statistiques du type « intensité-durée-fréquence » pour caractériser la variabilité temporelle. A défaut de ces éléments statistiques, une approche plus simple peut être choisie, qui consiste à utiliser un seuil de 40% des ressources renouvelables disponibles comme seuil d'apparition de pénuries pour une région ou un pays donnés (Marsily, 2006).

Alors que dans ses précédentes publications, Arnell se basait sur le taux de prélèvement (Arnell, 2000), il fait maintenant le choix de la disponibilité en eau par personne.

Dans Warren et al. (2006), Arnell fait l'analyse suivante : *la disponibilité de la ressource en eau dans un bassin versant est indiquée par la ressource en eau disponible par personne, calculée en divisant l'écoulement annuel moyen à long terme (ou la « ressource renouvelable ») par le nombre de personnes vivant dans le bassin (Falkenmark et al., 1989). La disponibilité en eau par personne par an est l'unité de mesure de la disponibilité de la ressource en eau la plus fréquemment utilisée, adoptée largement par l'ONU, et pour laquelle des données sont déjà disponibles ; la mesure la plus fréquemment utilisée ensuite est le taux de prélèvements par rapport à la disponibilité, mais ceci requiert des estimations fiables de prélèvements réels et futurs.*

Un pays est en pénurie d'eau (water scarcity) quand la ressource est en dessous de 1000 m³/personne/an et en pénurie absolue (absolute scarcity) quand la ressource est inférieure à 500 m³/personne/an. Ces seuils sont basés sur des estimations des besoins en eau dans les secteurs domestiques, agricoles, industriels (y compris énergétiques), et les besoins de l'environnement. La disponibilité en eau est égale à la ressource renouvelable annuelle moyenne.

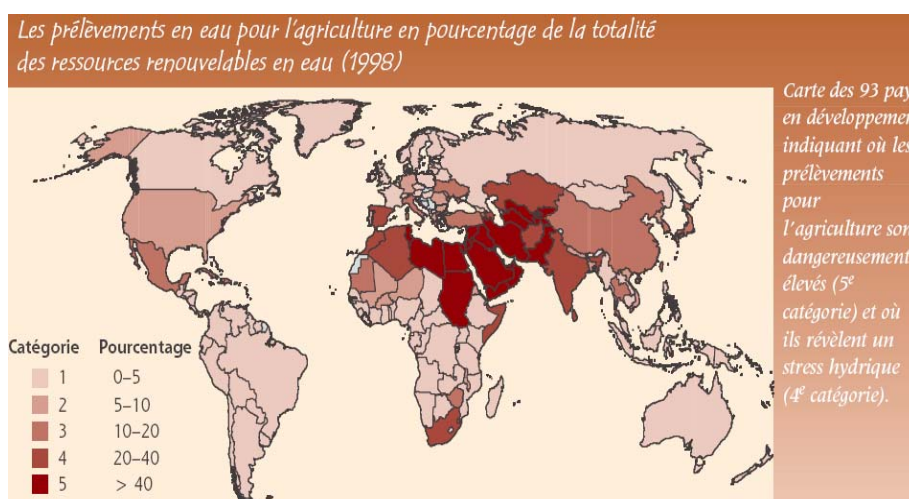
La disponibilité par personne n'est qu'un indicateur d'une exposition potentielle au stress. Certains des bassins en stress ont en fait des systèmes de gestion efficace qui remplacent un approvisionnement supplémentaire adéquat, par exemple grâce au stockage (il s'agit de « gestion par la demande ») ; certains bassins dépassant le seuil de 1000 m³/personne/an pourraient subir une pénurie grave à cause du manque d'accès à l'eau potentiellement disponible.

Pour des détails complémentaires sur les notions de stress hydrique et de besoins en eau, voir Büchs (2006), qui en fait une analyse critique approfondie.

Annexe C : agriculture et irrigation

Les chiffres donnés pour les prélèvements en eau pour l'agriculture ne tiennent pas compte des eaux de pluie directement employées dans l'agriculture pluviale. En fait, la quantité d'aliments produits par l'utilisation directe des eaux de pluie (60 % de la production alimentaire, d'après Cosgrove, 2000, Chap. 2, p. 6) est plus importante que la production issue de l'utilisation des eaux d'irrigation (40% de la production) – et même l'agriculture irriguée utilise des volumes importants d'eaux de pluie.

Bien qu'il y ait beaucoup à faire pour augmenter la productivité de chaque mètre cube d'eau utilisée en agriculture pluviale, c'est l'agriculture irriguée, essentiellement tributaire des eaux superficielles ou souterraines, qui focalise aujourd'hui l'attention (FAO, 2002). De nombreux pays en développement recourent massivement à l'irrigation, ce qui fragilise les disponibilités en eau. La carte ci-dessous indique que 20 pays vivent une situation critique où plus de 40% de leurs ressources renouvelables en eau sont utilisées pour l'agriculture.



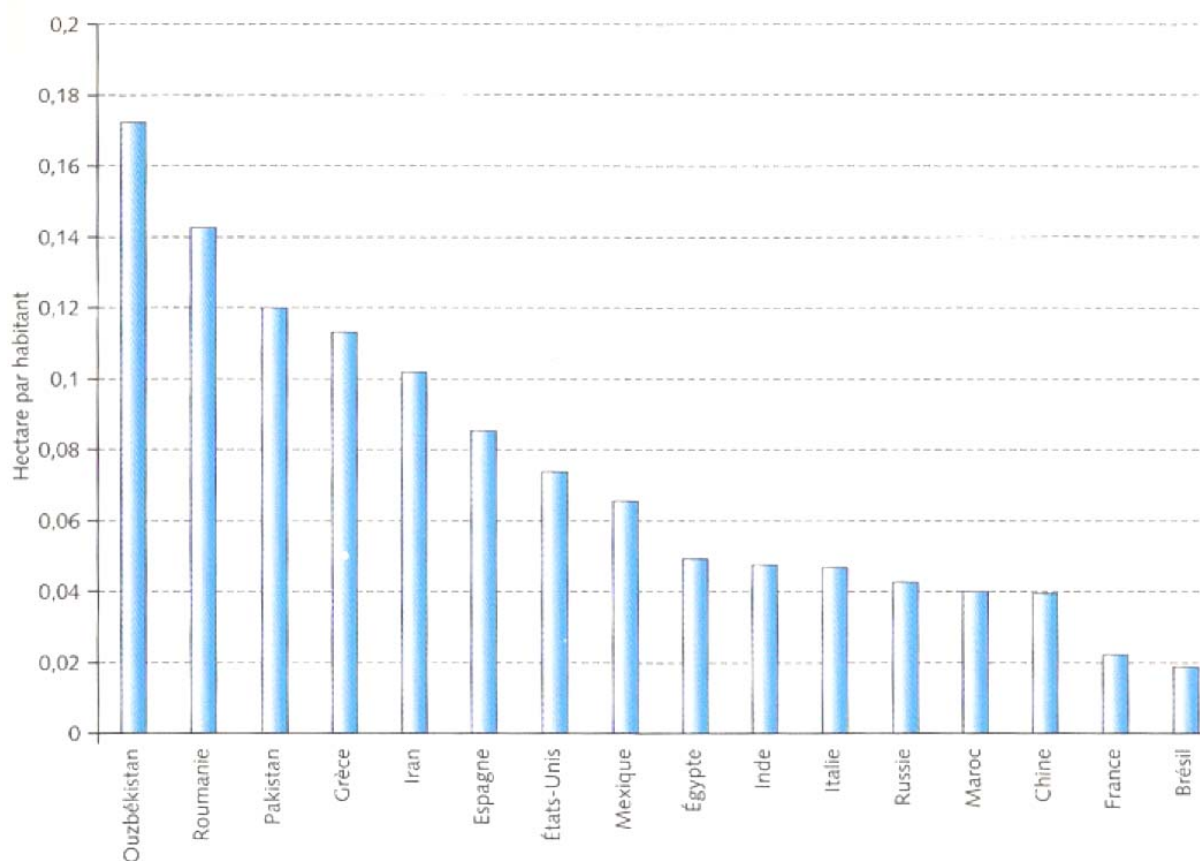
Carte du monde des prélèvements en eau pour l'agriculture en pourcentage de la totalité des ressources renouvelables en eau (1998). Source : FAO, 2002.

Le tableau ci-dessous indique l'évolution des surfaces irriguées. L'Asie est le continent qui irrigue le plus, et de très loin (193.9 millions d'hectares irrigués en 2003, contre 25.2 pour l'Europe).

Tableau des régions équipées pour l'irrigation et pourcentage des terres cultivées. Source: FAO (2006).

| Continent/Région | Irrigation | | | | | |
|------------------|------------------------------|-------|-------|---------------------------|-------------|-------------|
| | Surface (million d'hectares) | | | En % des terres cultivées | | |
| Année | 1980 | 1990 | 2003 | 1980 | 1990 | 2003 |
| Monde | 193 | 224,2 | 277,1 | 15,8 | 17,3 | 17,9 |
| Afrique | 9,5 | 11,2 | 13,4 | 5,1 | 5,7 | 5,9 |
| Asie | 132,4 | 155 | 193,9 | 28,9 | 30,5 | 34,0 |
| Amérique latine | 12,7 | 15,5 | 17,3 | 9,4 | 10,9 | 11,1 |
| Caraïbes | 1,1 | 1,3 | 1,3 | 16,4 | 17,9 | 18,2 |
| Amérique du Nord | 21,2 | 21,6 | 23,2 | 8,6 | 8,8 | 9,9 |
| Océanie | 1,7 | 2,1 | 2,8 | 3,4 | 4,0 | 5,4 |
| Europe | 14,5 | 17,4 | 25,2 | 10,3 | 12,6 | 8,4 |

Cependant, on constate qu'en termes de surfaces irriguées rapportées au nombre d'habitants, la Chine arrive loin derrière l'Ouzbékistan ou la Roumanie (voir figure ci-dessous)... Pour mieux comprendre ces différences, il faudrait tenir compte du type de cultures, lesquelles ne consomment pas les mêmes quantités d'eau, s'intéresser à la localisation géographique (l'humidité et l'évaporation varient dans l'espace). Il serait aussi intéressant de savoir par qui sont utilisés les produits de l'agriculture irriguée dans un pays : si les produits sont exportés vers un autre pays, la variable « surface irriguée divisée par le nombre d'habitants du pays » n'est pas pertinente, une meilleure variable pourrait être « surface irriguée/nombre d'habitants utilisant ces produits dans le monde ».



Superficie irriguée par habitant pour quelques pays du monde en 2000 (Source : Lacoste, 2003).