

3

Relation entre le changement climatique et les ressources en eau: incidences et mesures d'intervention

3.1 Incidences observées du changement climatique

3.1.1 Effets observés dus aux changements dans la cryosphère

Les effets des changements dans la cryosphère ont été constatés dans presque toutes les composantes cryosphériques, avec des preuves solides qu'ils constituent, en général, une réaction à la réduction des masses de neige et de glace due au réchauffement accru.

3.1.1.1 Glaciers, calottes glaciaires, nappes glaciaires et plates-formes de glace

Les effets des changements dans les glaciers et les calottes glaciaires ont été constatés en termes de ruissellement (Kaser *et al.*, 2003; Box *et al.*, 2006), de modification des conditions dangereuses (Haeberli et Burn, 2002) et d'adoucissement des océans (Bindoff *et al.*, 2007). Il existe également de nouvelles preuves d'un soulèvement actuel de la croûte dû à la récente fonte des glaciers en Alaska (Larsen *et al.*, 2005). L'accélération de la fonte et l'allongement de la saison de fonte des glaciers, conduisent en premier lieu à un écoulement et à des débits de pointe accrus des cours d'eau, alors que, sur une échelle de temps plus longue (d'une décennie à un siècle), on s'attend à une diminution du ruissellement des glaciers (Jansson *et al.*, 2003). Au cours de ces dernières décennies, des preuves de l'augmentation du ruissellement due à l'accroissement de la fonte des glaciers ont déjà été découvertes dans les Andes tropicales et dans les Alpes. [GT I 4.6.2; GT II 1.3.1.1]

La formation de lacs se produit lorsque les glaciers reculent dans les moraines saillantes du petit âge glaciaire (PAG), dans plusieurs chaînes de montagnes escarpées, dont l'Himalaya (voir encadré 5.4), les Andes et les Alpes. Le dégel des glaces souterraines menace également de déstabiliser les moraines du petit âge glaciaire. Ces lacs ont ainsi un potentiel élevé de débâcles glaciaires. Les organismes publics des pays concernés ont entrepris un intense travail de sécurisation, et plusieurs de ces lacs sont désormais solidement drainés ou pourvus de barrages. Cependant, une vigilance permanente est nécessaire, car il reste encore plusieurs dizaines de lacs glaciaires potentiellement dangereux dans l'Himalaya (Yamada, 1998) et les Andes (Ames, 1998), ainsi que dans d'autres chaînes de montagne à travers le monde. [GT II 1.3.1.1]

Le recul des glaciers provoque des modifications spectaculaires du paysage, avec des répercussions sur les conditions de vie et le tourisme local dans de nombreuses régions montagneuses du monde (Watson et Haeberli, 2004; Mölg *et al.*, 2005). La figure 5.10 indique les effets du recul du glacier Chacaltaya sur le paysage local et sur l'industrie des sports d'hiver. Le réchauffement engendre une accélération de la fonte des glaciers au printemps et en été, notamment dans les zones d'ablation, avec une perte analogue du manteau neigeux saisonnier.

Cette perte génère une exposition accrue des crevasses de surface, qui peut affecter à son tour, par exemple, les opérations d'entretien des pistes, comme on l'a observé dans la péninsule antarctique (Rivera *et al.*, 2005). [GT II 1.3.1.1]

3.1.1.2 Manteau neigeux et gélisol

En raison d'une plus faible étendue et d'une durée moins longue du manteau neigeux, les débits maximaux des cours d'eau au printemps se sont produits une à deux semaines plus tôt ces 65 dernières années en Amérique du Nord et en Eurasie septentrionale. Il existe également des preuves d'une augmentation du débit de base en hiver dans ces régions, ainsi qu'une tendance modérée à une baisse des volumes de neige à basse altitude, ce qui a des répercussions sur les régions de sports d'hiver. [GT II 1.3.1.1]

La diminution de l'étendue du gélisol saisonnier et du pergélisol, ainsi qu'une augmentation de l'épaisseur de la couche active, ont eu les effets suivants:

- Une disparition des lacs due au drainage à l'intérieur du pergélisol, comme détecté en Alaska (Yoshikawa et Hinzman, 2003) et en Sibérie (voir la figure 5.12) (Smith *et al.*, 2005);
- Une diminution du nombre de jours de circulation potentielle des véhicules sur les routes gelées de l'Alaska;
- Une plus grande érosion des côtes arctiques (par exemple, Beaulieu et Allard, 2003).

[GT II 1.3.1.1, chapitre 15]

3.1.2 Hydrologie et ressources en eau

3.1.2.1 Changements dans les systèmes des eaux de surface et des nappes souterraines

Les nombreuses études réalisées depuis la parution du troisième Rapport d'évaluation ont traité des tendances de l'écoulement fluvial au XX^e siècle, à des échelles allant des bassins hydrographiques au monde entier. Certaines de ces études ont décelé des évolutions significatives de certains indicateurs de l'écoulement fluvial et d'autres ont mis en évidence des liens statistiquement significatifs avec les tendances de la température ou des précipitations; toutefois, aucune tendance globalement homogène n'a été rapportée. Néanmoins, de nombreuses études n'ont ni fait état de tendance ni été capables de faire une distinction entre les effets des variations de température et des précipitations, et les effets des activités humaines sur les bassins hydrographiques, comme le changement d'affectation des terres et la construction de réservoirs. Les variations de l'écoulement des rivières d'une année sur l'autre sont également très fortement influencées dans certaines régions par les modes de la circulation atmosphérique à grande échelle associés aux phénomènes ENSO et NAO, ainsi qu'à d'autres systèmes de variabilité qui se produisent au cours d'une décennie et sur des échelles pluridécennales. [GT II 1.3.2.1]

À l'échelle mondiale, il existe des preuves d'un profil d'évolution du ruissellement annuel largement cohérent, certaines régions connaissant une augmentation (Tao *et al.*,

2003a, b, pour la Chine; Hyvarinen, 2003, pour la Finlande; Walter *et al.*, 2004, pour les 48 États contigus des États-Unis), notamment aux hautes latitudes, et d'autres une diminution, par exemple dans certaines régions d'Afrique de l'Ouest, d'Europe méridionale et du sud de l'Amérique latine (Milly *et al.*, 2005). Labat *et al.* (2004) ont avancé une augmentation de 4 % du ruissellement total mondial pour une élévation de 1 °C de la température au XX^e siècle, avec une variation régionale autour de cette tendance. Néanmoins, ce chiffre a été contesté en raison des effets de moteurs non climatiques sur le ruissellement, et de biais dus au petit nombre de points de données (Legates *et al.*, 2005). Gedney *et al.* (2006) ont été les premiers à fournir des éléments de preuve provisoires indiquant que le forçage du CO₂ conduit à une augmentation du ruissellement en raison des effets des concentrations élevées de ce gaz sur la physiologie végétale, bien qu'il soit difficile de trouver d'autres preuves de ce lien. La méthodologie utilisée pour rechercher les tendances peut également influencer les résultats, puisque la non prise en compte des effets des corrélations croisées entre les bassins fluviaux peut conduire à une surestimation du nombre de bassins présentant des tendances significatives (Douglas *et al.*, 2000). [GT II 1.3.2.1]

L'écoulement souterrain des aquifères peu profonds fait partie du cycle hydrologique et est affecté par la variabilité du climat et le changement climatique via les processus d'alimentation (Chen *et al.*, 2002), ainsi que par les interventions humaines en de nombreux lieux (Petheram *et al.*, 2001). [GT II 1.3.2.1] Les niveaux de nombreux aquifères dans le monde montrent une tendance à diminuer ces dernières décennies [GT II 3.2, 10.4.2], cela étant néanmoins généralement dû à ce que les taux de pompage des nappes souterraines dépassent les taux d'alimentation de celles-ci, et non pas à une diminution de l'alimentation liée au climat. Il peut y avoir des régions, comme le sud-ouest de l'Australie, où les prélèvements accrus des eaux souterraines n'ont pas résulté uniquement d'une augmentation de la demande en eau, mais aussi de la diminution, liée au climat, de l'alimentation des nappes par l'eau de surface (Gouvernement d'Australie-Occidentale, 2003). Dans l'aquifère carbonaté supérieur proche de Winnipeg (Canada), les hydrogrammes des puits peu profonds ne présentent pas de tendance nette, mais montrent des variations sur 3 à 4 ans corrélées avec les changements de la température et des précipitations annuelles (Ferguson et George, 2003). Du fait d'un manque de données et de la grande lenteur de réaction des systèmes phréatiques au changement des conditions d'alimentation, on n'a pas observé de modification de l'alimentation des nappes souterraines qui soit liée au climat. [GT II 1.3.2, 3.2]

Pour le moment, aucune tendance cohérente au niveau mondial n'a été trouvée en ce qui concerne le niveau des lacs. Alors que le niveau de certains lacs s'est élevé en Mongolie et en Chine (Xinjiang) en raison de la fonte accrue de la neige et de la glace, celui d'autres lacs a diminué en Chine (Qinghai), en Australie, en Afrique (Zimbabwe, Zambie et Malawi), en Amérique du

Nord (Dakota du Nord) et en Europe (centre de l'Italie), en raison des effets combinés de la sécheresse, du réchauffement et des activités humaines. Le réchauffement récent dans les zones de pergélisol de l'Arctique a provoqué la formation temporaire de lacs due à la survenue de la fonte; ces lacs se sont ensuite rapidement vidés du fait de la dégradation du pergélisol (par exemple, Smith *et al.*, 2005). Un effet analogue a été signalé pour un lac formé sur une plate-forme de glace en Arctique (c'est-à-dire, un lac épi-plateforme¹²), qui a disparu lorsque la plate-forme de glace s'est affaïssée (Mueller *et al.*, 2003). Le pergélisol et les lacs épi-plateformes sont examinés en détail par Le Treut *et al.* (2007). [GT II 1.3.2.1]

3.1.2.2 Qualité de l'eau

Un réchauffement des lacs et des cours d'eau lié au climat a été observé au cours des dernières décennies. [GT II 1.3.2] Ce phénomène a eu pour conséquence que les écosystèmes d'eau douce ont présenté des changements dans la composition des espèces, l'abondance d'organismes et la productivité, ainsi que des variations phénologiques, dont une migration plus précoce des poissons. [GT II 1.3.4] Le réchauffement a également été la cause d'une stratification prolongée de nombreux lacs, avec des diminutions de la concentration en nutriments dans les couches superficielles [GT II 1.3.2], et un appauvrissement prolongé en oxygène des couches profondes. [GT II encadré 4.1] Les fortes incidences des activités humaines non liées au changement climatique n'ont pas permis d'établir la preuve de tendances cohérentes liées au climat dans les autres paramètres de qualité de l'eau (par exemple, la salinité, les agents pathogènes ou les nutriments) des lacs, des cours d'eau et des nappes souterraines. [GT II 3.2]

Structure thermique des lacs

On a relevé des températures plus élevées de l'eau des lacs dues à des conditions plus chaudes (tableau 3.1). Les périodes raccourcies de la couverture de glace et la diminution de l'épaisseur de la glace lacustre et de la glace de rivière sont examinées au paragraphe 2.1.2 et dans Le Treut *et al.* (2007). La dynamique et la productivité primaire du phytoplancton ont également été altérées en conjonction avec les changements de la physique des lacs. [GT II 1.3.4.4, figure 1.2, tableau 1.6] Depuis les années 1960, les températures des eaux de surface se sont élevées entre 0,2 et 2,0 °C dans les lacs et les cours d'eau en Europe, en Amérique du Nord et en Asie. Parallèlement au réchauffement des eaux de surface, les températures des eaux profondes (qui reflètent les tendances à long terme) des grands lacs d'Afrique de l'Est (Édouard, Albert, Kivu, Victoria, Tanganyika et Malawi) ont gagné entre 0,2 et 0,7 °C depuis le début des années 1900. Une température de l'eau plus élevée et des saisons sans glace plus longues influent sur la stratification thermique et l'hydrodynamique interne des lacs. Durant les années plus

¹² Masse d'eau, le plus souvent douce, retenue derrière une plate-forme de glace.

chaudes, les températures des eaux de surface sont plus élevées, les pertes en eau par évaporation augmentent, la stratification estivale se produit plus tôt dans la saison et les thermoclines sont moins profondes. Dans plusieurs lacs d'Europe et d'Amérique du Nord, la période stratifiée a été avancée jusqu'à 20 jours et allongée de 2 à 3 semaines, avec une stabilité thermique accrue. [GT II 1.3.2.3]

Chimie

Une stratification accrue diminue le mouvement de l'eau à travers la thermocline, empêchant la remontée et le mélange des eaux, qui fournissent les nutriments essentiels au réseau alimentaire. Les nutriments ont diminué dans les eaux de surface et leur concentration a augmenté dans la même proportion dans les eaux profondes des lacs d'Europe et d'Afrique de l'Est, en raison d'une diminution de la remontée des eaux due à une plus grande stabilité thermique. Un grand nombre de lacs et de rivières connaissent, au niveau de leur bassin, une augmentation de leurs concentrations en sulfates, en cations basiques et en silice, ainsi qu'une plus grande alcalinité et conductivité liées à l'augmentation de la dissolution de silicates et de sulfates ou de carbonates de calcium et de magnésium. Au contraire, lorsque des températures plus élevées ont accéléré le développement végétatif et du sol dans certains écosystèmes alpins de haute montagne, l'alcalinité a diminué en raison de l'augmentation des apports en acide organique (Karst-Riddoch *et al.*, 2005). La fonte des glaciers a augmenté l'apport en organochlorés (qui ont été transportés par l'atmosphère et ont été stockés dans le glacier) d'un lac subalpin au Canada (Blais *et al.*, 2001). [GT II 1.3.2.3]

Une température plus élevée affecte également les processus chimiques lacustres (tableau 3.1; voir également GT II, tableau SM1.3 pour les autres changements observés des propriétés chimiques de l'eau). Des diminutions de l'azote inorganique dissous provenant d'une plus grande productivité du phytoplancton (Sommaruga-Wogratz *et al.*, 1997; Rogora *et al.*, 2003), une production accrue d'alcalinité lacustre et des augmentations du pH des lacs d'eau douce ont été constatées (Psenner et Schmidt, 1992). La solubilité plus faible découlant de températures supérieures a contribué de manière significative à 11 à 13 % de la diminution de la concentration en aluminium (Vesely *et al.*, 2003), alors que les lacs qui ont connu des températures de l'eau plus chaudes ont vu augmenter la méthylation du mercure et la teneur en mercure dans les poissons (Bodaly *et al.*, 1993). Une diminution de la teneur en silicium liée au réchauffement régional a été enregistrée dans le lac Baïkal en Russie. Des données sur la qualité des eaux de 27 cours d'eau japonais suggèrent également une détérioration des propriétés chimiques et biologiques due aux augmentations de la température de l'air. [GT II 1.3.2.3]

Érosion et sédimentation

De nombreuses régions du monde connaissent une augmentation de l'érosion due à l'eau, le plus souvent en raison d'un

changement d'affectation des terres. Il n'existe pas de preuves, en raison du manque de données d'observation, de l'existence ou de l'absence de changements passés liés au climat dans l'érosion et dans le transport des sédiments. [GT II 3.2]

3.1.2.3 Crues

Un grand nombre de processus climatiques et non climatiques ont des répercussions sur les processus des crues et provoquent des crues des cours d'eau, des crues éclair, des crues en milieu urbain ou des débordements des égouts, des crues de rupture de lacs glaciaires (GLOF, voir encadré 5.4) et des inondations côtières. Ces processus de formation des crues comprennent des précipitations intenses ou de longue durée, la fonte des neiges, la rupture de barrages, une débitance réduite par l'embâcle ou un glissement de terrain, ou l'orage. Les crues dépendent de l'intensité, du volume, de la répartition dans le temps et de la phase (pluie ou neige) des précipitations, de l'état antérieur des cours d'eau et de leurs bassins hydrographiques (par exemple, présence de neige et de glace, du caractère et de l'état du sol (gelé ou non, saturé ou non saturé), de l'humidité, de la vitesse et de la répartition dans le temps de la fonte de la neige ou de la glace, de l'urbanisation et de l'existence de digues, de barrages et de réservoirs). L'empiètement humain sur les plaines inondables et le manque de plans d'intervention face aux crues augmentent les dommages potentiels. [GT II 3.4.3] L'augmentation observée de l'intensité des précipitations et d'autres changements climatiques observés, par exemple, une augmentation des situations météorologiques liées au courant d'ouest pendant l'hiver sur l'Europe qui conduit à des systèmes de basse pression très pluvieux, souvent à l'origine de crues (Kron et Berz, 2007), indique que le changement climatique pourrait d'ores et déjà avoir eu une incidence sur l'intensité et la fréquence des crues. [GT II 3.2] Le «Résumé à l'intention des décideurs» figurant dans la contribution au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe de travail I a conclu qu'il est *probable* que la fréquence des épisodes de fortes précipitations ait augmenté sur la plupart des régions à la fin du XX^e siècle, et qu'il est *plus probable qu'improbable* que le genre humain ait contribué à cette tendance. [GT I tableau RiD-2]

Au niveau mondial, le nombre de grandes catastrophes par décennie provoquées par les crues continentales au cours de la période 1996-2005 a doublé par rapport à la période 1950-1980 et les pertes économiques associées ont été multipliées par cinq (Kron et Berz, 2007). Les moteurs dominants de cette tendance à la hausse des dommages causés par les crues sont des facteurs socioéconomiques comme la croissance économique, les augmentations de la population et de la richesse concentrées dans des zones vulnérables, ainsi que le changement d'affectation des terres. Affectant 140 millions de personnes par an en moyenne, les crues constituent les catastrophes naturelles les plus signalées dans de nombreuses régions (WDR, 2003, 2004). Au Bangladesh, pendant l'inondation de 1998,

environ 70 % du pays a été inondé (comparé à une moyenne de 20 à 25 %) (Mirza, 2003; Clarke et King, 2004). [GT II 3.2]

Puisque les dommages causés par les inondations se sont accrus plus rapidement que la population ou que la croissance économique, il faut examiner d'autres facteurs, dont le changement climatique (Mills, 2005). La tendance générale des observations indique une accélération constante du cycle de l'eau (Huntington, 2006). [GT II 3.4.3] La fréquence des épisodes de fortes précipitations a augmenté en phase avec le réchauffement et les augmentations observées de la teneur atmosphérique en vapeur d'eau. [GT I RiD, 3.8, 3.9] Cependant, aucun accroissement généralisé n'est visible dans les tendances observées pour les écoulements fluviaux élevés. Bien que Milly *et al.* (2002) aient identifié une apparente augmentation de la fréquence des crues «de grande ampleur» (périodicité >100 ans) sur la plus grande partie du globe, à

partir de l'analyse des données provenant de larges bassins fluviaux, les études suivantes ont apporté des preuves moins évidentes. Sur les 195 bassins hydrographiques examinés dans le monde entier, Kundzewicz *et al.* (2005) ont trouvé des augmentations dans 27 lieux, des diminutions dans 31 lieux et aucune tendance dans les 137 autres. [GT II 1.3.2.2]

3.1.2.4 Sécheresses

Le terme sécheresse peut faire référence à une sécheresse météorologique (précipitations très inférieures à la moyenne), hydrologique (faibles écoulements fluviaux et niveau d'eau peu élevé dans les cours d'eau, les lacs et les nappes souterraines), agricole (faible humidité du sol) ou environnementale (une association des précédentes). Les incidences socioéconomiques des sécheresses peuvent résulter de l'interaction entre les conditions naturelles et les facteurs humains, comme le changement d'affectation des terres et la modification de la couverture terrestre, de la demande en eau et de son utilisation.

Tableau 3.1: Changements observés dans le ruissellement ou l'écoulement fluvial, le niveau des lacs, les crues et les sécheresses. [GT II, tableau 1.3]

| Facteur environnemental | Changements observés | Période de temps | Lieu |
|--|---|------------------|--|
| Ruissellement/ écoulement fluvial | Augmentation annuelle de 5 %, augmentation hivernale de 25 à 90 %, augmentation hivernale du débit de base due à la fonte et au dégel accrus du pergélisol | 1935-1999 | Bassin hydrographique arctique: Ob, Lena, Iénisseï, Mackenzie |
| | Écoulement fluvial maximal se produisant 1 à 2 semaines en avance en raison de la fonte précoce de la neige due au réchauffement | 1936-2000 | Ouest de l'Amérique du Nord, Nouvelle-Angleterre, Canada, Eurasie septentrionale |
| Crues | Augmentation de la fréquence des crues catastrophiques (0,5 à 1 %) due à la débâcle plus précoce des rivières gelées et à de fortes pluies | Années récentes | Cours d'eau arctiques russes |
| Sécheresses | Diminution de 29 % du maximum annuel de l'écoulement fluvial journalier due à l'élévation de température et à l'accroissement de l'évaporation sans modification des précipitations | 1847-1996 | Sud du Canada |
| | En raison des étés inhabituellement secs et chauds liés au réchauffement de l'océan Pacifique tropical ouest et de l'océan Indien ces dernières années | 1998-2004 | Ouest des États-Unis |
| Température de l'eau | Augmentation de 0,1 à 1,5 °C de la température des lacs | 40 ans | Europe, Amérique du Nord, Asie (100 stations) |
| | Augmentation de 0,2 à 0,7 °C de la température (des eaux profondes) des lacs | 100 ans | Afrique de l'Est (6 stations) |
| Chimie de l'eau | Diminution des nutriments provenant d'une stratification accrue ou de l'augmentation de la période de végétation dans les lacs et les cours d'eau | 100 ans | Amérique du Nord, Europe, Europe de l'Est, Afrique de l'Est (8 stations) |
| | Augmentation de la dissolution ou des processus internes au niveau du bassin des lacs et des cours d'eau | 10 à 20 ans | Amérique du Nord, Europe (88 stations) |

Le captage excessif des eaux peut aggraver les incidences de la sécheresse. [GT II 3.4.3]

Les sécheresses sont devenues plus fréquentes, en particulier dans les zones tropicales et subtropicales, depuis les années 1970. Le «Résumé à l'intention des décideurs» figurant dans la contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation a conclu qu'il est *probable* que les superficies touchées par la sécheresse aient augmenté depuis les années 1970, et qu'il est *plus probable qu'improbable* que les activités humaines y aient contribué. [GT I tableau RiD-2] La diminution des précipitations terrestres et l'augmentation des températures, qui accroissent l'évapotranspiration et réduisent l'humidité du sol, sont des facteurs importants qui ont contribué à ce que davantage de régions connaissent des sécheresses, comme l'a mesuré l'Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI) (Dai *et al.*, 2004b). [GT II 3.3.4]

Les zones où des sécheresses sont survenues semblent être déterminées en grande partie par la variation de la température de surface océanique, en particulier sous les tropiques, via des changements associés de la circulation atmosphérique et des précipitations. À l'ouest des États-Unis, la diminution du manteau neigeux et les réductions consécutives de l'humidité du sol paraissent y contribuer également. En Australie et en Europe, des liens directs avec le réchauffement planétaire ont été déduits en raison du caractère extrême des températures élevées et des vagues de chaleur accompagnant les récentes sécheresses. [GT I 3.RE 3.3.4]

En utilisant l'indice PDSI, Dai *et al.* (2004b) ont trouvé une importante tendance à l'aridité dans les zones terrestres de l'hémisphère Nord depuis le milieu des années 1950, avec une sécheresse étendue sur la plus grande partie de l'Eurasie, de l'Afrique du Nord, du Canada et de l'Alaska (figure 3.1). Dans l'hémisphère Sud, les terres émergées étaient humides dans les années 1970 et relativement sèches dans les années 1960 et 1990. Ces régions ont présenté une tendance à l'aridité de 1974 à 1998, bien que la tendance sur l'ensemble de la période de 1948 à 2002 ait été faible. Ces dernières décennies, la diminution des précipitations terrestres est la cause première de la tendance à l'aridité, bien qu'au cours des 20 à 30 dernières années, un réchauffement important de la température à la surface ait *probablement* contribué à la sécheresse. Au niveau mondial, les zones très sèches (définies comme des zones continentales qui présentent un indice PDSI inférieur à -3,0) ont plus que doublé (d'environ 12 % à 30 %) depuis les années 1970, avec un bond important au début des années 1980 en raison de la diminution des précipitations terrestres liée au phénomène ENSO, et des augmentations consécutives dues essentiellement au réchauffement de surface (Dai *et al.*, 2004b). [GT I 3.3.4]

Les sécheresses ont une incidence sur la production agricole pluviale ainsi que sur l'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques, industriels et agricoles. Certaines régions semi-arides et subhumides, par exemple l'Australie [GT II

11.2.1], l'ouest des États-Unis et le sud du Canada [GT II 14.2.1], ainsi que le Sahel (Nicholson, 2005), ont souffert de sécheresses plus intenses et pluriannuelles. [GT II 3.2]

En Europe, la vague de chaleur de 2003, imputable au réchauffement mondial (Schär *et al.*, 2004), a été accompagnée d'un déficit des précipitations annuelles pouvant atteindre 300 mm. Cette sécheresse a contribué à la réduction estimée de 30 % de la production primaire brute des écosystèmes terrestres européens (Ciais *et al.*, 2005). Bon nombre de fleuves importants (par exemple, le Pô, le Rhin, la Loire et le Danube) sont descendus à des niveaux bas records, ce qui a conduit à une interruption de la navigation intérieure, de l'irrigation et du refroidissement des centrales électriques (Beniston et Diaz, 2004; Zebisch *et al.*, 2005). La fonte extrême des glaciers alpins a permis d'éviter un écoulement encore plus faible du Danube et du Rhin (Fink *et al.*, 2004). [GT II 12.6.1]

3.2 Changements à venir de la disponibilité et de la demande en eau dus au changement climatique

3.2.1 Facteurs climatiques pouvant influencer sur les systèmes d'eau douce dans le futur

Les agents climatiques les plus importants pour la disponibilité en eau sont les précipitations, la température et la demande évaporative (déterminée par le rayonnement net au niveau du sol, l'humidité atmosphérique, la vitesse du vent et la température). La température est particulièrement importante dans les bassins dominés par la neige et dans les zones côtières, en raison de l'incidence de la température sur le niveau de la mer pour ces dernières (élévation du niveau de la mer par effet stérique en raison de la dilatation thermique de l'eau). [GT II 3.3.1]

Les changements prévus de ces composantes du bilan hydrique sont décrits au paragraphe 2.3. En résumé, il est prévu que le ruissellement fluvial annuel total sur l'ensemble des terres émergées augmente, même si certaines régions connaissent une augmentation ou une diminution significative du ruissellement. Toutefois, le ruissellement accru ne peut pas être entièrement utilisé tant qu'il n'existe pas d'infrastructures adéquates pour capter et stocker l'eau supplémentaire. Au-dessus des océans, l'on s'attend à une augmentation nette de la différence entre évaporation et précipitations.

3.2.1.1 Nappes souterraines

Le changement climatique a des incidences sur le rythme d'alimentation des nappes souterraines (c'est-à-dire les ressources souterraines renouvelables) sur la hauteur de leur surface libre. Toutefois, les connaissances sur l'alimentation et les niveaux actuels, tant pour les pays développés que pour les pays en

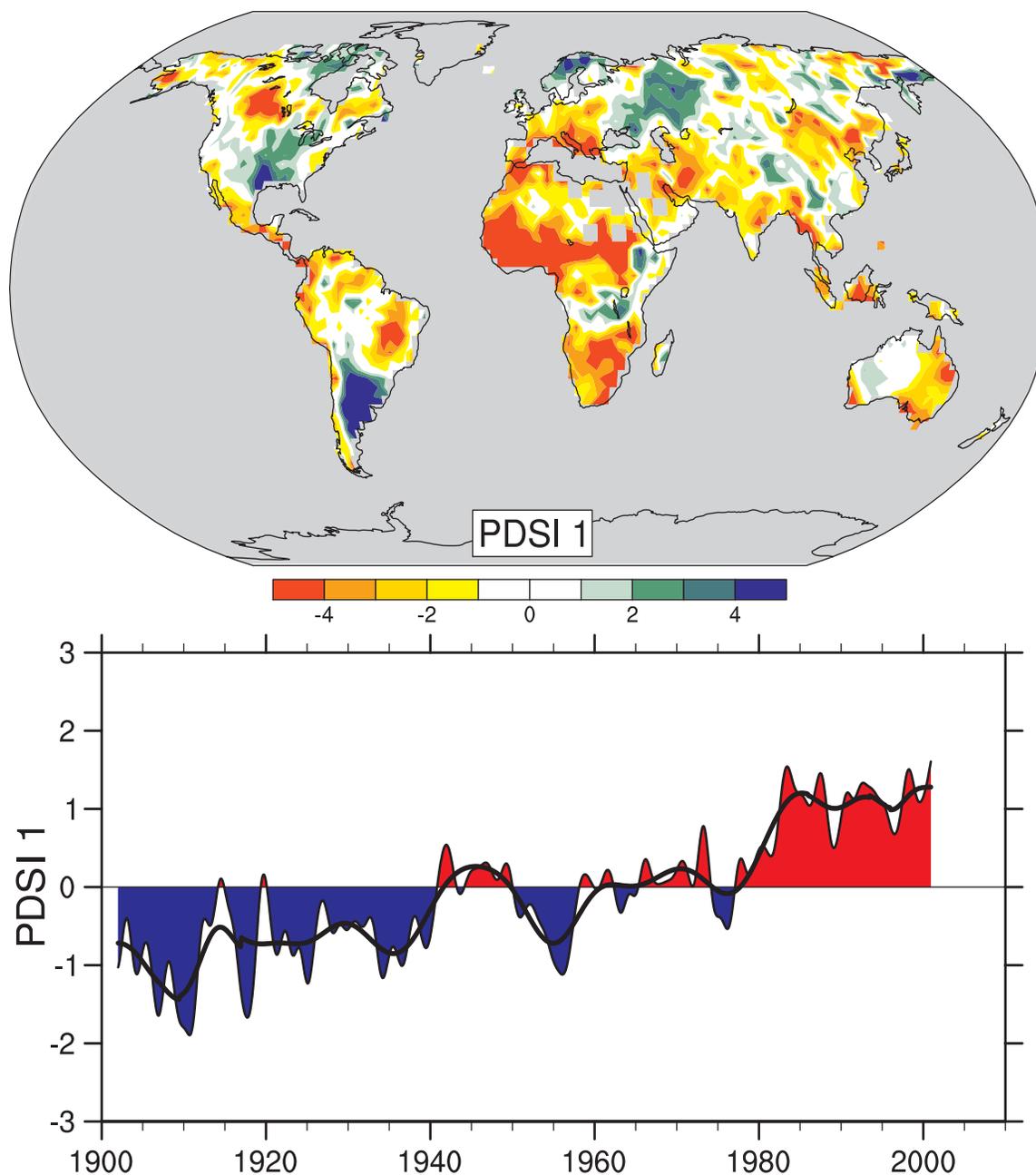


Figure 3.1: La configuration spatiale la plus importante (le premier élément de l'analyse des composantes principales; en haut) de l'Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI) mensuel de 1900 à 2002. Le PDSI est un indice majeur de la sécheresse qui mesure le déficit cumulé (par rapport aux conditions locales moyennes) d'humidité à la surface des terres émergées, en intégrant les précipitations antérieures et les estimations de l'humidité passée dans l'atmosphère (sur la base des températures atmosphériques) dans un système comptable hydrologique.¹³ Le graphique du bas indique l'évolution du signe et de l'intensité de cette configuration depuis 1900. Lorsque les valeurs de ce graphique sont positives (ou négatives), les zones en rouge et en orange de la carte du haut sont plus arides (ou plus humides) et les zones en bleu et en vert sont plus humides (ou plus arides) que la moyenne. La courbe lissée noire indique les variations décennales. Les séries chronologiques correspondent approximativement à une tendance, et cette configuration et ses variations représentent 67 % de la tendance linéaire du PDSI de 1900 à 2002, sur la surface émergée du globe. Elles montrent ainsi une augmentation généralisée de la sécheresse africaine, notamment au Sahel, par exemple. On relève également des zones plus humides, en particulier à l'est de l'Amérique du Nord et du Sud, ainsi qu'en Eurasie septentrionale (d'après Dai et al., 2004b). [GT I QF 3.2]

¹³ Il convient de noter que le PDSI ne modélise pas la sécheresse de manière réaliste dans les régions où les précipitations sont comprises dans le manteau neigeux, par exemple dans les régions polaires.

développement, sont limitées. En outre, très peu de recherches ont été menées sur l'incidence à venir du changement climatique sur les eaux souterraines ou sur leurs interactions avec les eaux de surface. Aux latitudes élevées, le dégel du pergélisol modifie le niveau et la qualité des nappes souterraines, en raison du couplage renforcé avec les eaux de surface. [GT II 15.4.1] Du fait qu'un grand nombre de nappes souterraines sont à la fois transformées en eaux de surface et alimentées par celles-ci, les incidences des régimes d'écoulement des eaux de surface pourraient affecter les nappes souterraines. La variabilité accrue des précipitations peut diminuer l'alimentation de ces nappes dans les zones humides du fait que l'augmentation de la fréquence des épisodes de fortes précipitations peut conduire plus souvent à un dépassement de la capacité d'infiltration du sol. Cependant, dans les zones arides et semi-arides, la variabilité accrue des précipitations peut augmenter l'alimentation des nappes souterraines, car seules des précipitations intenses sont capables de s'infiltrer assez rapidement avant de

s'évaporer et du fait que les nappes alluviales sont principalement alimentées par les inondations causées par les crues. [GT II 3.4.2]

D'après les résultats d'un modèle hydrologique mondial (voir la figure 3.2), l'alimentation moyenne des nappes souterraines au niveau mondial augmente moins que le ruissellement total (de 2 % en comparaison avec les 9 % prévus jusque dans les années 2050, en ce qui concerne la réponse au changement climatique du modèle ECHAM4 selon le scénario A2 du SRES: Döll et Flörke, 2005). Pour les quatre scénarios de changement climatique examinés (modèles de la circulation générale ECHAM4 et HadCM3, avec les scénarios d'émissions A2 et B2 du SRES¹⁴), il a été calculé que l'alimentation des nappes souterraines diminuera dans les années 2050 de plus de 70 % au nord-est du Brésil, au sud-ouest de l'Afrique et

¹⁴ Voir l'appendice I pour la description des modèles.

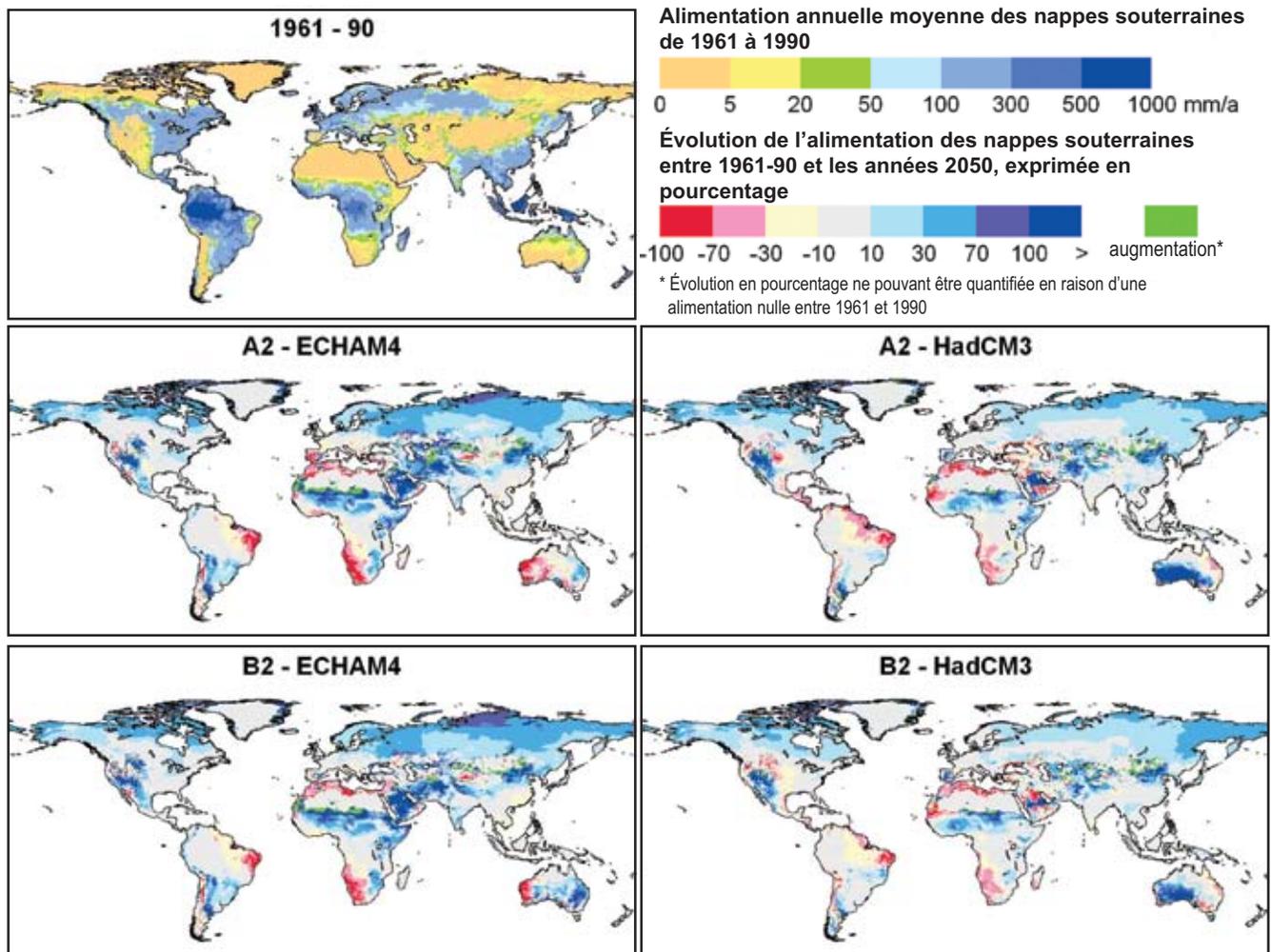


Figure 3.2: Incidence simulée du changement climatique sur l'alimentation diffuse annuelle moyenne des nappes souterraines à long terme. Variations exprimées en pourcentage de l'alimentation moyenne des nappes souterraines sur 30 ans, depuis la période actuelle (1961-1990) jusqu'aux années 2050 (2041-2070), calculées par le modèle hydrologique mondial WGHM à partir de quatre scénarios de changement climatique différents (sur la base des modèles climatiques ECHAM4 et HadCM3, ainsi que des scénarios d'émissions A2 et B2 du SRES) (Döll et Flörke, 2005). [GT II figure 3.5]

à l'extrémité sud de la mer Méditerranée. Cependant, comme cette étude n'a pas tenu compte de l'augmentation attendue de la variabilité des précipitations quotidiennes, il est possible que la diminution soit quelque peu surévaluée. Lorsque la hauteur de la surface libre augmente et que l'alimentation des nappes souterraines diminue, les zones humides dépendantes des aquifères sont mises en danger et le débit de base des cours d'eau est réduit pendant la saison sèche. Les régions dans lesquelles il est estimé que l'alimentation des nappes souterraines pourrait s'accroître de plus de 30 % d'ici les années 2050 comprennent le Sahel, le Proche-Orient, le nord de la Chine, la Sibérie et l'ouest des États-Unis. Dans les zones où le niveau des nappes phréatiques est déjà haut, une augmentation de l'alimentation pourrait provoquer des problèmes dans les villes et dans les zones agricoles, sous l'effet de la salinisation du sol et de la saturation des sols en eau. [GT II 3.4.2]

Les quelques études des incidences du changement climatique sur les nappes phréatiques pour les aquifères individuels montrent des résultats particulièrement spécifiques aux différents sites et modèles climatiques (par exemple, Eckhardt et Ulbrich, 2003, pour un bassin hydrographique de chaîne de montagnes de faible altitude en Europe centrale; Brouyere *et al.*, 2004, pour un aquifère crayeux en Belgique). Par exemple, dans la région de l'aquifère Ogallala, il est attendu que l'alimentation naturelle des nappes souterraines diminue de plus de 20 % dans toutes les simulations avec un réchauffement de 2,5 °C ou plus (Rosenberg *et al.*, 1999). [GT II 14.4] Le résultat du changement climatique est que, dans de nombreux aquifères du monde, l'alimentation de printemps se décale vers l'hiver et celle d'été décline. [GT II 3.4.2]

3.2.1.2 Crues

Comme examiné au paragraphe 2.3.1, les épisodes de fortes précipitations devraient devenir plus fréquents dans la plupart des régions au cours du XXI^e siècle, ce qui devrait entraîner des risques de crues éclair et d'inondations en milieu urbain. [GT I 10.3.5, 10.3.6; GT II 3.4.3] Le tableau 3.2 montre quelques incidences potentielles de ce phénomène.

Dans une analyse multimodèle, Palmer et Räisänen (2002) ont prévu une augmentation considérable du risque d'hivers très humides sur la plupart des régions de l'Europe centrale et du Nord en raison de l'augmentation des précipitations intenses associées aux orages des latitudes moyennes. Ces auteurs ont estimé que la probabilité que les précipitations hivernales boréales totales dépassent la normale de deux écarts types augmenterait considérablement (de cinq à sept fois) pour un doublement du CO₂ sur de vastes régions européennes, avec *probablement* des conséquences sur le risque de crue hivernale. Il est également prévu un accroissement du risque de mousson très humide en Asie (Palmer et Räisänen, 2002). Selon Milly *et al.* (2002), pour 15 des 16 grands bassins mondiaux, les volumes de pointe centennaux de contrôle des écoulements fluviaux mensuels devraient être dépassés plus fréquemment pour un quadruplement du CO₂. Dans certaines zones, il a été estimé

que les crues actuellement indiquées comme centennales (dans le passage de contrôle) devraient se produire beaucoup plus fréquemment, voire tous les 2 à 5 ans, bien que ces projections soient très incertaines. Dans de nombreuses régions tempérées, la contribution de la fonte de la neige aux crues de printemps va *probablement* diminuer (Zhang *et al.*, 2005). [GT II 3.4.3]

Sur la base des modèles climatiques, les régions inondées au Bangladesh devraient augmenter d'au moins 23 à 29 %, pour une élévation mondiale de la température de 2 °C (Mirza, 2003). [GT II 3.4.3]

La réduction de la couverture de névés¹⁵ sur les glaciers induite par le réchauffement provoque un ruissellement accru et immédiat de l'eau de fonte et peut aboutir à une crue des rivières alimentées par les glaciers. [GT II 3.4.3]

Il existe un degré d'incertitude quant aux estimations des changements à venir de la fréquence de crue dans tout le Royaume-Uni. Selon le modèle climatique utilisé, l'importance de la contribution de la neige fondue, les caractéristiques et l'emplacement du bassin hydrographique, l'incidence du changement climatique sur le régime de crue (amplitude et fréquence) peut être positive ou négative, soulignant l'importance de l'incertitude résiduelle sur les incidences du changement climatique (Reynard *et al.*, 2004). [GT II 3.4.3]

3.2.1.3 Sécheresses

Il est *probable* que les surfaces affectées par la sécheresse augmentent. [GT I RiD] Il existe une tendance à l'aridité des régions situées au centre des continents pendant l'été, ce qui indique un risque plus élevé de sécheresse dans ces régions. [GT I 10.RE] Selon une étude à un seul modèle de la fréquence de la sécheresse dans le monde, la proportion de terres émergées qui subissent une sécheresse extrême à un moment donné devrait être multipliée par 10 à 30, la fréquence des épisodes de sécheresse extrême par deux et la durée moyenne de la sécheresse par six d'ici les années 2090 pour le scénario A2 du SRES (Burke *et al.*, 2006). [GT I 10.3.6; GT II 3.4.3] Une diminution des précipitations estivales en Europe du Sud et en Europe centrale, accompagnée d'une hausse des températures (qui accroît la demande évaporative), conduirait inévitablement à une réduction de l'humidité estivale du sol (Douville *et al.*, 2002; Christensen *et al.*, 2007) et à des sécheresses plus fréquentes et plus intenses. [GT II 3.4.3] Comme indiqué dans la figure 3.3, d'ici les années 2070, il est attendu qu'une sécheresse centennale¹⁶ d'une amplitude comparable aux sécheresses actuelles revienne à une fréquence accrue (intervalles de moins de 10 ans en moyenne) dans certaines zones de l'Espagne, du Portugal, de l'ouest de la France, du bassin de la Vistule en Pologne et de l'ouest de la Turquie (Lehner *et al.*, 2005). [GT II 3.4.3]

¹⁵ Névé: vieille neige (encore perméable) qui se trouve dans un état intermédiaire avant la transformation en glace (imperméable).

¹⁶ Chaque année, la probabilité de dépassement d'une crue centennale est de 1 %, alors que celle d'une crue décennale est de 10 %.

Certaines des incidences de l'augmentation des sécheresses sont présentées dans le tableau 3.2. La fonte de neige devrait se produire plus tôt et être moins abondante pendant la période de fonte, ce qui pourrait augmenter le risque de sécheresse dans les bassins alimentés par la fonte des neiges à la saison de débit d'étiage, en été et en automne. Une augmentation du risque de sécheresse pourrait se produire dans les régions qui dépendent fortement de l'eau de fonte des glaciers pour leurs principaux approvisionnements en eau à la saison sèche (Barnett *et al.*, 2005). Dans les Andes, l'eau de fonte des glaciers concourt à l'écoulement des rivières et contribue à l'approvisionnement en eau de dizaines de millions d'habitants pendant la longue saison sèche. Il est attendu que de nombreux petits glaciers, par exemple

en Bolivie, en Équateur et au Pérou (Ramírez *et al.*, 2001; encadré 5.5) disparaissent au cours des prochaines décennies. L'approvisionnement en eau dans les zones alimentées par l'eau de fonte des glaciers et de la neige de l'Hindū Kush et de l'Himalaya, dont dépendent des centaines de millions de personnes en Chine, au Pakistan et en Inde, sera compromis (Barnett *et al.*, 2005). [GT II 3.4.3]

3.2.1.4 Qualité de l'eau

Des températures de l'eau plus élevées, une intensité accrue des précipitations et des périodes plus longues du débit d'étiage devraient aggraver de nombreuses formes de pollution de l'eau, y compris les sédiments, les nutriments, le carbone organique dissous, les agents pathogènes, les pesticides, le

Tableau 3.2: Exemples d'incidences possibles du changement climatique dues aux changements dans les phénomènes météorologiques et climatiques liés aux précipitations extrêmes, sur la base des projections sur la seconde moitié du XXI^e siècle. Ne sont pas pris en compte les changements ou le renforcement des capacités d'adaptation. Les probabilités indiquées dans la deuxième colonne concernent les phénomènes recensés qui figurent dans la première colonne. La direction des tendances et de la probabilité des phénomènes correspondent aux projections SRES du GIEC sur le changement climatique. [GT I tableau RiD-2; GT II tableau RiD-2]

| Phénomène ^a et évolution anticipée | Probabilité de l'évolution future selon les projections établies pour le XXI ^e siècle sur la base des scénarios SRES | Exemples des principales incidences anticipées par secteur | | | |
|--|---|--|--|---|--|
| | | Agriculture, foresterie et écosystèmes [4.4, 5.4] | Ressources en eau [3.4] | Santé [8.2] | Industrie, établissements humains et société [7.4] |
| Fortes précipitations plus fréquentes dans la plupart des régions | Très probable | Perte de récoltes; érosion des sols; impossibilité de cultiver les terres détrempées | Effets néfastes sur la qualité de l'eau de surface ou souterraine; contamination des sources d'approvisionnement; atténuation possible de la pénurie d'eau | Risque accru de décès, de blessures, de maladies infectieuses, d'affections des voies respiratoires et de maladies de la peau | Perturbation des établissements humains, du commerce, des transports et de l'organisation sociale lors des inondations; pressions sur les infrastructures urbaines et rurales; pertes matérielles |
| Progression de la sécheresse | Probable | Dégradation des sols; baisse des rendements ou perte de récoltes; mortalité plus fréquente du bétail; risque accru d'incendies | Intensification du stress hydrique | Risque accru de pénurie d'aliments et d'eau, de malnutrition, de maladies d'origine hydrique et alimentaire | Pénurie d'eau dans les établissements humains, l'industrie et les collectivités; baisse du potentiel hydroélectrique; possibilité de migration des populations |
| Augmentation de l'activité cyclonique intense | Probable | Perte de récolte; déracinement d'arbres par le vent; dégâts causés aux récifs coralliens | Perturbation de l'approvisionnement en eau lors des pannes de courant | Risque accru de décès, de blessures et de maladies d'origine hydrique et alimentaire; états de stress post-traumatique | Perturbations causées par les inondations et les vents violents; impossibilité de s'assurer auprès du secteur privé dans les zones vulnérables; possibilité de migration des populations; pertes matérielles |

^a Voir le tableau 3.7 pour de plus amples renseignements sur les définitions.

sel et la pollution thermique. Ce phénomène va favoriser la prolifération de fleurs d'eau (Hall *et al.*, 2002; Kumagai *et al.*, 2003) et accroître les teneurs en bactéries et champignons (Environnement Canada, 2001), ce qui pourrait avoir une incidence sur les écosystèmes et la santé humaine, ainsi que sur la fiabilité et les coûts de fonctionnement des systèmes hydriques. [GT II 3.RE]

L'augmentation des températures va *probablement* baisser la qualité de l'eau dans les lacs en raison d'une stabilité thermique accrue et des modifications des types de mélange,

avec pour résultat une diminution des concentrations en oxygène et une émission accrue du phosphore contenu dans les sédiments. Par exemple, les concentrations en phosphore déjà élevées pendant l'été dans la baie du lac Ontario pourraient doubler pour une élévation de la température de l'eau de 3 à 4 °C (Nicholls, 1999). Cependant, l'élévation des températures peut également améliorer la qualité de l'eau pendant l'hiver ou au printemps, en raison de la rupture plus précoce de la glace, de l'augmentation consécutive des taux d'oxygène et de la diminution de l'hécatombe des poissons en hiver. [GT II 4.4.8, 14.4.1]

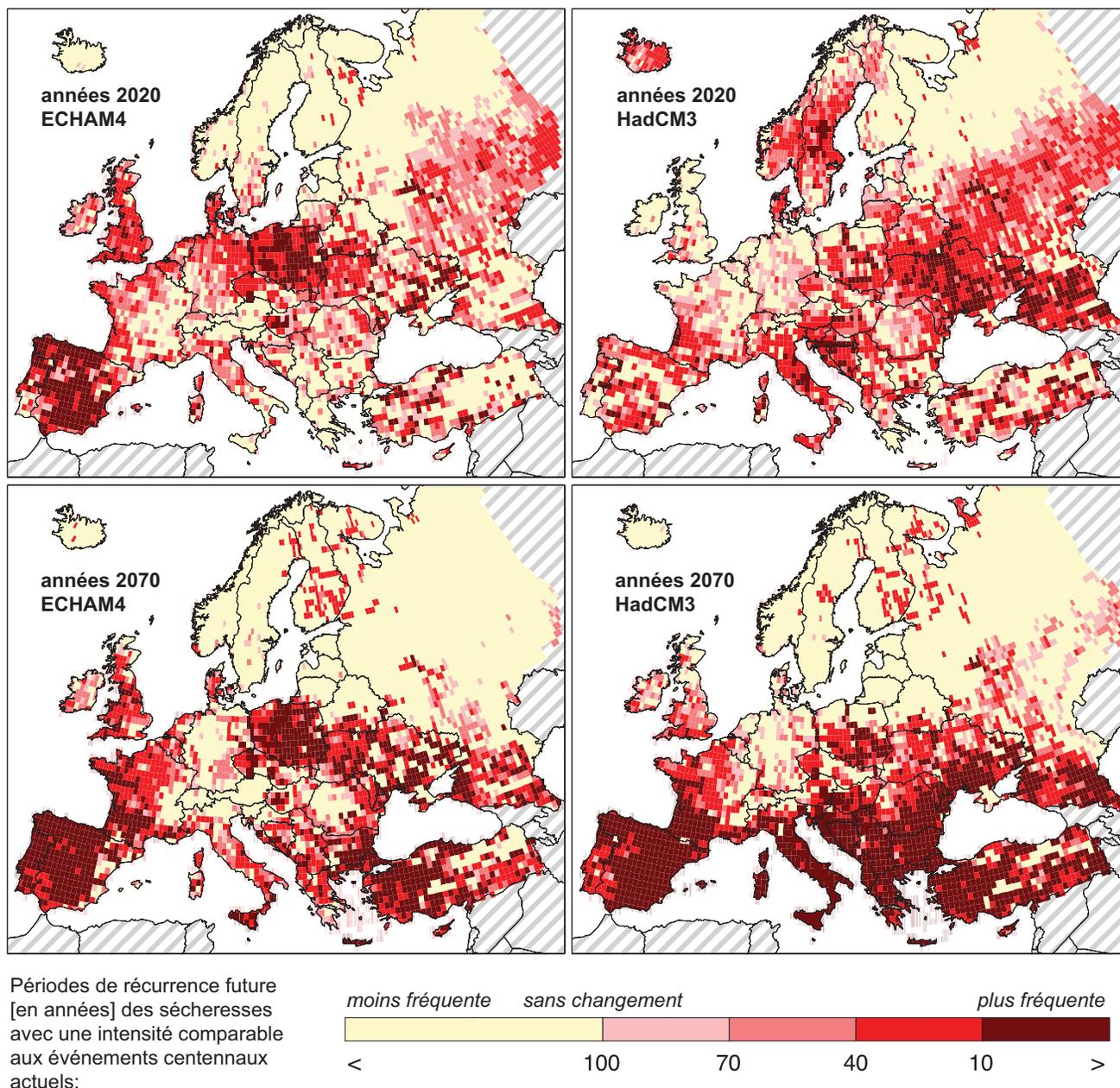


Figure 3.3: Changement de la récurrence à venir des sécheresses centennales, fondée sur des comparaisons entre le climat et l'utilisation de l'eau de 1961 à 1990 (Lehner *et al.*, 2005). [GT II figure 3.6]

Des pluies plus intenses conduiront à une augmentation des matières solides en suspension (turbidité) dans les lacs et dans les réservoirs, en raison de l'érosion fluviale du sol (Leemans et Kleidon, 2002), et à une introduction de polluants (Mimikou *et al.*, 2000; Neff *et al.*, 2000; Bouraoui *et al.*, 2004). Il est attendu que l'augmentation de l'intensité des précipitations prévue conduise à une détérioration de la qualité de l'eau, puisqu'elle résulterait en un transport accru d'agents pathogènes et d'autres polluants dissous (par exemple, des pesticides) vers les eaux de surface et souterraines; elle entraînerait aussi une érosion accrue, qui à son tour conduirait à la mobilisation des polluants absorbés tels que le phosphore et les métaux lourds. En outre, des épisodes de fortes pluies plus fréquents surchargeront plus souvent les capacités des systèmes d'assainissement et des usines de traitement de l'eau et des eaux usées. [GT II 3.4.4] Une occurrence plus élevée des débits d'étiage conduira à une diminution de la capacité de dilution des contaminants, et ainsi à l'augmentation des concentrations en polluants, dont les agents pathogènes. [GT II 3.4.4, 14.4.1] Dans les zones qui subiront une diminution du ruissellement global (par exemple, dans de nombreuses régions semi-arides), la détérioration de la qualité de l'eau sera encore pire.

Dans les zones semi-arides et arides, le changement climatique va *probablement* accroître la salinisation des nappes souterraines peu profondes, en raison d'une évapotranspiration accrue. [GT II 3.4.2] Comme il est prévu que l'écoulement fluvial diminue dans de nombreuses zones semi-arides, la salinité des rivières et des estuaires augmentera. [GT II 3.4.4] Par exemple, les taux de salinité des eaux d'amont du bassin du Murray-Darling en Australie devraient augmenter de 13 à 19 % d'ici 2050 (Pittock, 2003). De manière générale, une alimentation moindre des nappes souterraines, qui diminue la mobilisation du sel dans les eaux souterraines, peut contrebalancer l'effet de la dilution plus faible des sels dans les cours d'eau et les estuaires. [GT II 11.4]

Dans les zones côtières, l'élévation du niveau de la mer pourrait avoir des effets négatifs sur le drainage des eaux de pluie et sur les systèmes d'évacuation des eaux [GT II 3.4.4] et accroître le potentiel d'intrusion d'eau salée dans les nappes souterraines d'eau douce des aquifères côtiers, affectant de la sorte négativement les ressources en eau souterraine. [GT II 3.4.2] Pour deux petites îles coralliennes plates situées au large de l'Inde, il a été calculé que l'épaisseur des lentilles d'eau douce diminuerait respectivement de 25 à 10 m et de 36 à 28 m pour une élévation du niveau de la mer de seulement 0,1 m (Bobba *et al.*, 2000). Toute diminution de l'alimentation des nappes souterraines aggravera l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Dans les aquifères intérieurs, une diminution de cette alimentation peut conduire à une intrusion d'eau salée provenant des aquifères salés voisins (Chen *et al.*, 2004). [GT II 3.4.2]

3.2.1.5 Érosion hydrique et sédimentation

Toutes les études sur l'érosion du sol montrent que l'augmentation attendue de l'intensité des pluies conduirait à des taux d'érosion supérieurs. [GT II 3.4.5] En outre, l'évolution des précipitations de neige moins érosive en hiver vers de la pluie plus érosive, suite à l'augmentation des températures hivernales, accroît l'érosion, ce qui conduit, par exemple, à des incidences négatives sur la qualité de l'eau dans les zones agricoles. [GT II 3.4.5, 14.4.1]

La fonte du pergélisol rend érodables les sols qui ne l'étaient pas auparavant. [GT II 3.4.5] D'autres incidences indirectes du changement climatique sur l'érosion sont associées aux changements du sol et de la végétation causés par le changement climatique et par les mesures d'adaptation associées. [GT II 3.4.5] Le très petit nombre d'études sur l'incidence du changement climatique sur le transport des sédiments suggère une augmentation du transport due à une plus forte érosion, en particulier dans les zones qui connaissent une augmentation du ruissellement. [GT II 3.4.5]

3.2.2 Facteurs non climatiques pouvant influencer sur les systèmes d'eau douce dans le futur

De nombreux facteurs non climatiques ont une incidence sur les ressources en eau douce à l'échelle planétaire (NU, 2003). La qualité et la quantité des ressources en eau sont toutes deux influencées par le changement d'affectation des terres, la construction et la gestion de réservoirs, les émissions de polluants et le traitement de l'eau et des eaux usées. L'utilisation de l'eau est liée aux variations démographiques, à la consommation d'aliments, à la politique économique (dont la tarification de l'eau), à la technologie, aux modes de vie et à l'importance accordée par la société à la valeur des écosystèmes d'eau douce. La vulnérabilité des systèmes d'eau douce au changement climatique dépend également de la gestion nationale et internationale de l'eau. Le paradigme de la gestion intégrée des ressources en eau (IWRM)¹⁷ sera de plus en plus suivi dans le monde entier (NU, 2002; Banque mondiale, 2004a; Conseil mondial de l'eau, 2006), et ce mouvement est susceptible de placer les problèmes liés à l'eau, à la fois en tant que ressource et en tant qu'écosystème, au centre du processus décisionnel. Cela va *probablement* décroître

¹⁷ Notion courante pour la gestion de l'eau, mais dont la définition n'est pas sans ambiguïté. La gestion intégrée des ressources en eau est fondée sur quatre principes énoncés lors de la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement qui s'est tenue à Dublin en 1992: 1) l'eau douce est une ressource limitée et vulnérable, nécessaire à la vie, au développement et à l'environnement; 2) la mise en valeur et la gestion des ressources en eau devraient être fondées sur une approche participative faisant intervenir les utilisateurs, les planificateurs et les décideurs de tous niveaux; 3) les femmes ont un rôle prépondérant à jouer en matière d'approvisionnement en eau, et de gestion et de conservation des ressources en eau; 4) du fait de ses multiples usages concurrentiels, l'eau a une valeur économique et devrait être considérée comme un bien économique.

la vulnérabilité des systèmes d'eau douce au changement climatique. La prise en compte du débit écologique réservé peut amener à modifier ultérieurement l'exploitation des réservoirs pour restreindre l'utilisation humaine de ces ressources en eau. [GT II 3.3.2]

3.2.3 Incidences des changements climatiques sur les futures disponibilités en eau douce

En ce qui concerne l'approvisionnement en eau, il est *très probable* que les coûts résultant des changements climatiques soient supérieurs aux bénéfices retirés à l'échelle mondiale. L'une des raisons en est que la variabilité des précipitations va *très probablement* augmenter, et l'on prévoit des crues et des sécheresses plus fréquentes, comme déjà indiqué aux paragraphes 2.1.6 et 2.3.1. Le risque de sécheresses dans les bassins alimentés par les eaux provenant de la fonte des neiges à la saison des basses eaux va s'accroître, comme l'explique le paragraphe 3.2.1. Les incidences des crues et des sécheresses pourraient être tempérées par des investissements appropriés en matière d'infrastructures et par des réformes de la gestion de l'eau et de l'utilisation des terres. Néanmoins, la mise en œuvre de telles mesures engendrera des coûts (US Global Change Research Program, 2000). Les infrastructures hydrauliques, les modes d'utilisation de l'eau et les institutions se sont développés dans les conditions actuelles. Tout changement important de la fréquence des crues et des sécheresses, ou bien de la quantité, de la qualité ou du rythme saisonnier de l'eau disponible nécessitera des ajustements qui pourraient s'avérer coûteux, non seulement en termes monétaires mais aussi en termes d'incidence sur l'environnement et la société, y compris la nécessité de gérer les conflits potentiels entre les différents groupes d'intérêt (Miller *et al.*, 1997). [GT II 3.5]

Les changements hydrologiques peuvent avoir des impacts à la fois positifs et négatifs. Par exemple, l'augmentation du ruissellement annuel peut être bénéfique pour de nombreux usagers faisant de l'eau une utilisation consommatrice ou non, en augmentant les ressources en eau renouvelables, mais elle peut simultanément générer des dangers en augmentant le risque de crues. Ces dernières décennies, la tendance aux conditions plus humides dans certaines régions du sud de l'Amérique du Sud s'est soldée par l'augmentation des surfaces des zones inondées par les crues, mais elle a également amélioré le rendement des cultures dans la pampa argentine et a offert de nouvelles possibilités de pêche commerciale (Magrin *et al.*, 2005). [GT II 13.2.4] L'augmentation du ruissellement pourrait également endommager les zones dont la nappe phréatique est peu profonde. La montée du niveau de la nappe phréatique dans ces zones perturbe l'agriculture et endommage les constructions urbaines. En Russie, par exemple, les dommages annuels actuels provoqués par les nappes phréatiques peu profondes sont estimés entre 5 et 6 milliards de dollars des États-Unis (Kharikina, 2004) et devraient *probablement* augmenter à l'avenir. De surcroît, l'augmentation du

ruissellement annuel peut ne pas conduire à une augmentation bénéfique des ressources en eau facilement disponibles, si ce ruissellement supplémentaire se concentre durant la saison à forts débits. [GT II 3.5]

L'augmentation de l'intensité des précipitations peut engendrer des périodes de plus forte turbidité et des charges en agents pathogènes et en nutriments dans les sources des eaux de surface. Le service des eaux de la ville de New York a identifié les épisodes de fortes précipitations comme l'une de ses principales préoccupations liées aux changements climatiques, parce que de tels épisodes peuvent augmenter les niveaux de turbidité dans certains des principaux réservoirs de la ville jusqu'à plus de 100 fois la limite légale fixée pour la qualité de la source, au niveau de l'adduction par le service des eaux, ce qui nécessite des traitements supplémentaires considérables et entraîne d'importants coûts de surveillance (Miller et Yates, 2006). [GT II 3.5.1]

3.2.4 Incidences des changements climatiques sur la demande future en eau douce

Des températures plus élevées et une augmentation de la variabilité des précipitations peuvent conduire, d'une manière générale, à une hausse de la demande en eau d'irrigation, même si les précipitations totales restent identiques pendant la saison de croissance. L'incidence des changements climatiques sur les périodes culturales optimales et sur une utilisation de l'eau d'irrigation qui optimise les rendements a été modélisée en prenant l'hypothèse d'une surface irriguée et d'une variabilité du climat constantes (Döll, 2002; Döll *et al.*, 2003). En appliquant les scénarios A2 et B2 du SRES/GIEC, tels qu'interprétés dans deux modèles climatiques, les projections établissent que les besoins en eau d'irrigation nets de la Chine et de l'Inde, pays qui ont les plus grandes surfaces irriguées au monde, pourraient fluctuer, d'ici 2020, de +2 % à +15 % pour la Chine, et de -6 % à +5 % pour l'Inde, selon les scénarios d'émissions et les modèles climatiques retenus (Döll, 2002; Döll *et al.*, 2003). Divers modèles climatiques prévoient différents changements mondiaux des besoins nets en eau d'irrigation, avec des augmentations estimées de 1 à 3 % dans les années 2020 et de 2 à 7 % dans les années 2070. À l'échelle mondiale, les plus fortes augmentations des besoins en eau d'irrigation nets résultent d'un scénario climatique fondé sur le scénario d'émissions B2. [GT II 3.5.1]

Selon une étude sur l'irrigation du maïs dans l'Illinois dans des conditions de maximisation des profits, une diminution de 25 % des précipitations annuelles a eu le même effet sur la rentabilité de l'irrigation qu'une diminution de 15 % des précipitations annuelles s'accompagnant d'un doublement de l'écart type des précipitations quotidiennes (Eheart et Tornil, 1999). Cette étude a également montré que l'utilisation de l'eau d'irrigation en situation de maximisation des profits réagit plus fortement aux changements des précipitations que l'usage qui optimise les rendements, et qu'un doublement du taux de CO₂ dans l'atmosphère n'a qu'un effet limité. [GT II 3.5.1]

L'augmentation de la demande en eau des ménages (en raison, par exemple, d'un arrosage accru des jardins) et de l'industrie, due au changement climatique, sera *probablement* plutôt faible, c'est-à-dire inférieure à 5 % d'ici aux années 2050 dans certains endroits spécifiques (Mote *et al.*, 1999; Downing *et al.*, 2003). Un effet secondaire indirect, mais faible, pourrait être une augmentation de la demande d'électricité pour le refroidissement des bâtiments, avec une tendance à la hausse des prélèvements d'eau pour le refroidissement des centrales thermiques. Une analyse statistique de l'utilisation de l'eau dans la ville de New York a montré que, les jours où la température dépasse les 25 °C, l'utilisation quotidienne d'eau par personne augmente de 11 litres/°C (environ 2 % de l'utilisation quotidienne actuelle par personne) (Protopapas *et al.*, 2000). [GT II 3.5.1]

3.2.5 Incidences des changements climatiques sur le stress hydrique à l'avenir

Les estimations mondiales du nombre de personnes vivant dans des zones soumises à un stress hydrique diffèrent considérablement selon les études (Vörösmarty *et al.*, 2000; Alcamo *et al.*, 2003a, b, 2007; Oki *et al.*, 2003; Arnell, 2004). Cependant, le changement climatique n'est que l'un des nombreux facteurs qui influencent le stress hydrique futur; les changements démographiques, socioéconomiques et technologiques jouent peut-être des rôles plus importants, pour la plupart des horizons temporels et dans la majorité des régions. Dans les années 2050, les différences dans les projections démographiques des quatre scénarios SRES du GIEC devraient avoir une incidence plus élevée sur le nombre de personnes vivant dans des bassins fluviaux soumis à un stress hydrique que les différences entre les scénarios climatiques (Arnell, 2004). Le nombre de personnes vivant dans des bassins fluviaux soumis à un stress hydrique devrait beaucoup augmenter (tableau 3.3). L'évolution du nombre de personnes susceptibles de subir un stress hydrique après les années 2050 dépend fortement du scénario SRES retenu. Le scénario A2 prévoit une augmentation importante, alors que le taux d'accroissement est inférieur dans les scénarios A1 et B1, en raison de l'augmentation mondiale des ressources d'eau douce renouvelables et d'une légère diminution de la population (Oki et Kanae, 2006). Il convient de noter qu'en utilisant l'indicateur de disponibilité en eau par personne, le changement climatique semblerait réduire le stress hydrique global au niveau mondial. La raison en est que les augmentations du ruissellement sont fortement concentrées dans les zones les plus fortement peuplées du globe, principalement en Asie de l'Est et du Sud-Est. Cependant, étant donné que ce ruissellement accru se produit principalement pendant les saisons de hautes eaux (Arnell, 2004), il pourrait ne pas atténuer les problèmes engendrés par la saison sèche si l'eau excédentaire n'est pas stockée, ni réduire le stress hydrique dans les autres régions du monde. Les changements des cycles saisonniers et une probabilité croissante de survenance d'épisodes extrêmes peuvent contrebalancer les effets de l'augmentation des

Tableau 3.3: Incidence de la croissance démographique et du changement climatique sur le nombre de personnes vivant dans des bassins fluviaux soumis à un stress hydrique (défini comme étant les ressources en eau renouvelables par personne inférieures à 1 000 m³/an) vers 2050. [GT II tableau 3.2]

| | Estimation de la population vivant dans des bassins fluviaux soumis à un stress hydrique en 2050 (en milliards de personnes) | |
|--------------------------------------|--|-----------------------------|
| | Arnell (2004) | Alcamo <i>et al.</i> (2007) |
| 1995: année de référence | 1,4 | 1,6 |
| 2050: scénario d'émissions A2 | 4,4-5,7 | 6,4-6,9 |
| 2050: scénario d'émissions B2 | 2,8-4,0 | 4,9-5,2 |

Les estimations sont fondées sur les scénarios d'émissions pour plusieurs passages de modèle climatique. L'écart est dû aux différents modèles climatiques utilisés et aux divers passages de modèles qui ont été effectués pour traduire les émissions dans les scénarios climatiques.

ressources d'eau douce annuelles disponibles et des changements démographiques. [GT II 3.5.1]

Si le stress hydrique est évalué en fonction non seulement de la population et du changement climatique, mais également de la modification de l'utilisation de l'eau, l'importance des moteurs non climatiques (revenu, efficacité de l'utilisation de l'eau, productivité de l'eau et production industrielle) augmente (Alcamo *et al.*, 2007). L'augmentation des revenus a parfois une incidence plus importante que la croissance de la population sur l'augmentation de l'utilisation de l'eau et du stress hydrique (lorsqu'ils sont exprimés comme le prélèvement d'eau: coefficient de ressources en eau). D'après la modélisation, le stress hydrique devrait diminuer d'ici les années 2050 sur 20 à 29 % des terres émergées du globe, et augmenter sur 62 à 76 % de cette surface, selon deux modèles climatiques et les scénarios A2 et B2 du SRES. La plus grande disponibilité en eau due à l'augmentation des précipitations est la cause principale de la diminution du stress hydrique, alors que l'accroissement des prélèvements d'eau est la cause principale d'un stress hydrique plus important. L'on a trouvé que l'augmentation de la consommation d'eau des ménages, favorisée par la croissance des revenus, est dominante (Alcamo *et al.*, 2007). [GT II 3.5.1]

3.2.6 Incidences des changements climatiques sur les coûts et les autres aspects socio-économiques de l'eau douce

La quantité d'eau disponible pour prélèvement dépend du ruissellement, de l'alimentation des nappes souterraines, de l'état de l'aquifère (par exemple, degré de confinement, profondeur, épaisseur et limites), de la qualité de l'eau et des infrastructures d'approvisionnement (par exemple, réservoirs, puits de rabattement et réseaux de distribution). Un accès sûr

à l'eau potable dépend davantage du niveau des infrastructures de distribution d'eau que de la quantité de ruissellement. Cependant, l'amélioration de cet accès à l'eau potable sera plus difficile à concrétiser dans les régions où le ruissellement et l'alimentation des nappes souterraines diminuent du fait du changement climatique. En outre, le changement climatique entraîne des coûts supplémentaires pour le secteur de la distribution d'eau, par exemple en raison des variations des niveaux d'eau qui affectent les infrastructures de distribution d'eau, ce qui peut entraver l'élargissement des services de distribution à davantage de personnes. Il en résulte alors des répercussions socioéconomiques et des coûts de suivi plus importants, en particulier dans les zones où la prévalence du stress hydrique a également augmenté en raison des changements climatiques. [GT II 3.5.1]

Les modifications des régimes de ruissellement saisonniers et de la variabilité interannuelle du ruissellement provoquées par le changement climatique peuvent s'avérer aussi importantes pour la disponibilité en eau que les changements du ruissellement annuel moyen à long terme (*US Global Change Research Program, 2000*). Les personnes vivant dans les bassins alimentés par l'eau provenant de la fonte nivale qui subissent une diminution de la réserve d'eau de la couche nivale en hiver peuvent pâtir de la baisse de l'écoulement fluvial en été et en automne (Barnett *et al.*, 2005). Le Rhin, par exemple, pourrait souffrir d'une diminution des faibles débits d'été de 5 à 12 % d'ici les années 2050, ce qui affecterait de manière négative l'approvisionnement en eau, notamment pour les centrales thermiques (Middelkoop *et al.*, 2001). Les études réalisées pour le bassin de l'Elbe ont montré que l'évapotranspiration réelle devrait augmenter d'ici 2050 (Krysanova et Wechsung, 2002), alors que l'écoulement du fleuve, l'alimentation des nappes souterraines, le rendement des récoltes et la pollution diffuse vont *probablement* diminuer (Krysanova *et al.*, 2005). [GT II 3.5.1]

Dans l'ouest de la Chine, la fonte précoce des neiges au printemps et le recul des glaciers vont *probablement* réduire la disponibilité en eau pour les besoins de l'agriculture irriguée. Les coûts d'investissement et de fonctionnement des puits et des réservoirs supplémentaires, nécessaires pour assurer un approvisionnement en eau fiable dans le contexte du changement climatique, ont été évalués pour la Chine. Ces coûts sont bas dans les bassins où le stress hydrique actuel est faible (par exemple celui du Chang Jiang) et élevé dans ceux où le stress hydrique est élevé (par exemple, celui du fleuve Huang He) (Kirshen *et al.*, 2005a). De surcroît, l'incidence du changement climatique sur le coût de l'approvisionnement en eau va augmenter dans les années à venir, en raison non seulement d'un changement climatique plus marqué, mais également de la croissance de la demande. [GT II 3.5.1]

Pour un aquifère situé dans le Texas, on prévoit une diminution des revenus nets des agriculteurs de 16 à 30 % d'ici aux années 2030 et de 30 à 45 % d'ici aux années 2090, en raison d'une diminution de l'approvisionnement en eau d'irrigation et

d'une augmentation de la demande en cette même eau. Le bénéfice net total dû à l'utilisation de l'eau (essentiellement pour la consommation municipale et industrielle) devrait diminuer de moins de 2 % durant la même période (Chen *et al.*, 2001). [GT II 3.5.1]

Si l'approvisionnement en eau douce doit être remplacé par de l'eau dessalée à cause du changement climatique, le coût du changement climatique inclura alors le coût moyen de dessalement, qui avoisine actuellement 1,00 dollar des États-Unis/m³ pour l'eau de mer et 0,60 dollar des États-Unis/m³ pour les eaux saumâtres (Zhou et Tol, 2005). Le coût de chloration de l'eau douce est d'environ 0,02 dollar des États-Unis/m³. Dans les zones côtières densément peuplées d'Égypte, de Chine, du Bangladesh, d'Inde et de l'Asie du Sud-Est (FAO, 2003), les coûts de dessalement pourraient s'avérer prohibitifs. Dans ces régions, notamment en Égypte, des activités de recherche sur les nouvelles technologies de dessalement sont nécessaires pour réduire les coûts, grâce surtout à l'utilisation de sources d'énergie non conventionnelles qui permettent une réduction des émissions de gaz à effet de serre. En outre, le dessalement des eaux saumâtres permet d'améliorer l'économie de tels projets (voir le paragraphe 4.4.4). [GT II 3.5.1]

Les futurs dommages causés par les crues dépendront fortement des modes de peuplement, des décisions en matière d'utilisation des terres, de la qualité de la prévision des crues, des systèmes d'alerte et d'intervention, ainsi que de la valeur des structures et des autres biens immobiliers implantés dans les zones vulnérables (Mileti, 1999; Pielke et Downton, 2000; Changnon, 2005), et également des changements climatiques en soi, comme la modification de la fréquence des cyclones tropicaux (Schiermeier, 2006). [GT II 3.5.2]

Il est possible de prévoir l'incidence du changement climatique sur les dommages causés par les crues, sur la base des changements modélisés dans l'intervalle actuel de récurrence des crues, de vingt ou de cent ans, et en conjonction avec les dommages causés par les inondations dues à des événements actuels, tels que déterminés par la relation hauteur-débit et les données détaillées disponibles sur les biens immobiliers. Avec une telle méthodologie, il a été possible de prévoir que les dommages directs annuels moyens causés par les crues pour trois bassins hydrographiques australiens seraient de quatre à dix fois plus grands en cas de doublement du taux de CO₂ dans l'atmosphère (Schreider *et al.*, 2000). [GT II 3.5.2]

Choi et Fisher (2003) ont estimé le changement attendu des dommages causés par les crues pour certaines régions des États-Unis selon deux scénarios de changement climatique, dans lesquels la moyenne annuelle des précipitations a augmenté de 13,5 % et de 21,5 %, respectivement, avec un écart type des précipitations annuelles qui reste inchangé ou augmente de manière proportionnelle à la moyenne. En utilisant un modèle économétrique structurel (régression) fondé sur une série chronologique de dommages causés par les crues et avec pour prédicteurs la population, un indicateur de richesse et les

précipitations annuelles, on prévoit que la moyenne et l'écart type des dommages causés par les crues devraient augmenter de plus de 140 % pour une augmentation de la moyenne et de l'écart type des précipitations annuelles de 13,5 %. Cette estimation suggère que les pertes causées par les crues seraient principalement associées à l'exposition des personnes aux risques naturels en raison du manque d'équipements sociaux, étant donné que le pouvoir explicatif du modèle tenant compte de la population et de la richesse est de 82 % et que l'ajout des précipitations au modèle porte le résultat à 89 %. [GT II 3.5.2]

Une autre étude a examiné les incidences potentielles des dommages causés par les crues dues aux modifications des épisodes de précipitations extrêmes, en utilisant le modèle du Centre climatique canadien et le scénario IS92a pour l'agglomération de Boston, au nord-est des États-Unis d'Amérique (Kirshen *et al.*, 2005b). Cette étude a trouvé que, sans investissements d'adaptation, les dégâts matériels et les coûts totaux des dommages causés par les crues doubleraient d'ici 2100 par rapport à ceux qui pourraient survenir sans

changement climatique. Elle a également trouvé que le retard dans les transports liés à ces phénomènes pourrait devenir une nuisance de plus en plus importante au cours de ce siècle. Cette étude a conclu que l'ampleur économique probable de ces dommages est suffisamment élevée pour justifier l'attribution de sommes importantes à la mise en place de stratégies d'adaptation, telles que la mise hors d'eau dans des plaines inondables. [GT II 3.5.2]

Ces résultats sont également renforcés par une étude de scénario sur les dommages causés par les inondations fluviales et côtières en Angleterre et au pays de Galles dans les années 2080, qui a combiné quatre scénarios d'émissions et quatre scénarios de changement socioéconomique dans un cadre similaire aux scénarios du SRES (Hall *et al.*, 2005). Dans tous les scénarios, les dommages causés par les crues devraient augmenter, à moins que les mesures politiques et pratiques actuelles adoptées pour résoudre le problème des crues et que les infrastructures correspondantes ne soient modifiées. D'ici aux années 2080, les dommages annuels

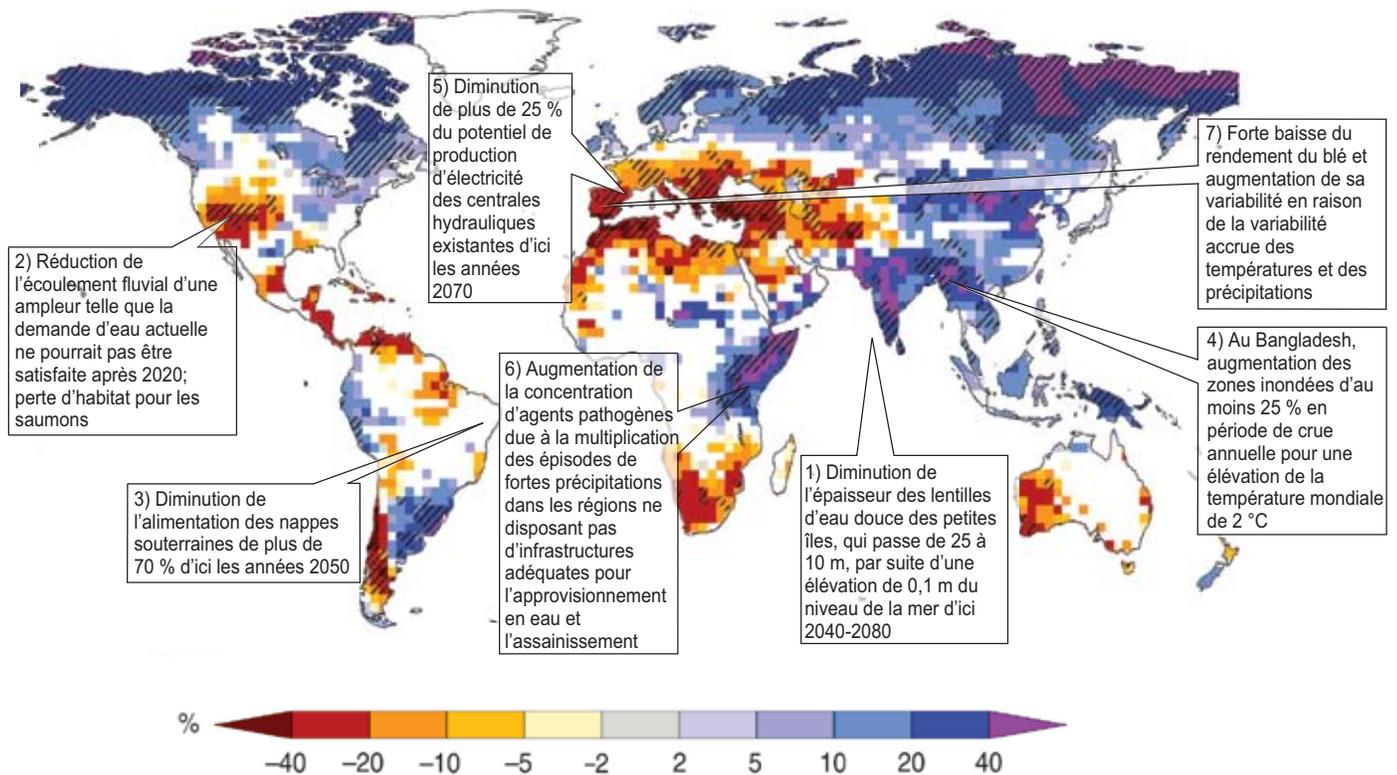


Figure 3.4: Carte illustrant les incidences futures du changement climatique liées à l'eau douce, là où ces incidences représentent une menace pour le développement durable des régions touchées. 1) Bobba *et al.* (2000), 2) Barnett *et al.* (2004), 3) Döll et Flörke (2005), 4) Mirza *et al.* (2003), 5) Lehner *et al.* (2005), 6) Kistemann *et al.* (2002), 7) Porter et Semenov (2005). La carte en arrière-plan, voir (figure 2.10), illustre la variation moyenne du ruissellement annuel (%), simulée par un ensemble, entre la période actuelle (1980 à 1999) et 2090 à 2099, pour le scénario d'émissions A1B du SRES (d'après Milly *et al.*, 2005). Les zones en bleu (rouge) indiquent l'augmentation (la diminution) du ruissellement annuel. [D'après la figure 3.8 du rapport du GT II et la figure 3.5 du RSY]

devraient atteindre cinq milliards de livres sterling dans un monde de type B1, contre un milliard actuellement, alors qu'avec des changements climatiques quasi identiques, les dommages ne seraient que de 1,5 milliard de livres sterling dans un monde de type B2. Les scénarios B1 et B2 donnent des résultats pratiquement similaires lorsque ces chiffres sont pondérés en fonction du produit intérieur brut. Dans un monde de type A1, les dommages annuels atteindraient 15 milliards de livres sterling d'ici les années 2050 et 21 milliards de livres sterling d'ici les années 2080 (Evans *et al.*, 2004; Hall *et al.*, 2005). [GT II 3.5.2]

À l'avenir, l'augmentation des périodes de crue pourrait perturber la navigation plus souvent et le régime de basses eaux qui limite le chargement des bateaux pourrait augmenter. Par exemple, les restrictions au chargement des bateaux navigant sur le Rhin pourraient passer de 19 jours, dans les conditions climatiques actuelles, à 26 et jusqu'à 34 jours dans les années 2050 (Middelkoop *et al.*, 2001). [GT II 3.5.1]

Le changement climatique va *probablement* modifier le débit des rivières, avec d'importantes incidences sur l'eau disponible pour une utilisation non consommatrice, en particulier pour la production d'énergie hydraulique. Les incidences de l'hydroélectricité pour l'Europe ont été évaluées au moyen d'un modèle hydrologique à grande échelle. Les résultats indiquent que d'ici les années 2070, le potentiel de production d'électricité des centrales hydroélectriques existant à la fin du XX^e siècle augmentera (dans l'hypothèse du scénario d'émissions IS92a) de 15 à 30 % en Scandinavie et dans le nord de la Russie, où actuellement entre 19 % (Finlande) et près de 100 % (Norvège) de l'électricité sont d'origine hydraulique (Lehner *et al.*, 2005). Le Portugal, l'Espagne, l'Ukraine et la Bulgarie, où actuellement entre 10 % (Ukraine, Bulgarie) et 39 % de l'électricité proviennent de l'énergie hydraulique, ont connu des diminutions de 20 à 50 % et plus (Lehner *et al.*, 2005). Une diminution du potentiel hydroélectrique de 7 à 12 % dans les années 2070 est prévue dans l'ensemble de l'Europe (avec un pourcentage de 20 % d'hydroélectricité). [GT II 3.5.1]

En Amérique du Nord, les réductions potentielles du débit en sortie des Grands Lacs pourraient engendrer des pertes économiques importantes dues à la diminution de la production d'énergie hydraulique sur les fleuves Niagara et Saint-Laurent (Lofgren *et al.*, 2002). D'après une projection issue du modèle CGCM1 avec un réchauffement mondial de 2 °C, la production d'énergie hydraulique des fleuves Niagara et Saint-Laurent dans l'Ontario déclinerait de 25 à 35 %, avec pour résultat des pertes annuelles de 240 à 350 millions de dollars canadiens aux prix de 2002 (Buttle *et al.*, 2004). Cependant, le modèle climatique HadCM2¹⁸ a établi un faible gain du potentiel hydroélectrique (+3 %), d'une valeur approximative de 25 millions de dollars canadiens par an. Une autre étude qui a examiné différents

scénarios de modèles climatiques est arrivée à la conclusion qu'un réchauffement mondial de 2 °C pourrait réduire la capacité de production d'énergie hydraulique du fleuve Saint-Laurent de 1 à 17 % (LOSLR, 2006). [GT II 3.5.1]

3.2.7 Zones d'eau douce et secteurs particulièrement vulnérables aux changements climatiques

Dans de nombreuses régions du globe, les incidences des changements climatiques sur les ressources en eau douce peuvent avoir des impacts négatifs sur le développement durable et mettre en péril, par exemple, la lutte contre la pauvreté et de la mortalité infantile. Même avec une gestion optimale des ressources en eau, il est *très probable* que les incidences négatives sur le développement durable ne pourront pas être évitées. La figure 3.4 présente quelques cas clés à travers le monde où les incidences des changements climatiques sur l'eau douce constituent une menace pour le développement durable des régions touchées. On s'efforce généralement d'instaurer la gestion «durable» des ressources en eau grâce à la gestion intégrée des ressources en eau (IWRM: se reporter à la note de bas de page n° 17 pour une définition). Cependant, l'interprétation précise de ce terme varie considérablement. Toutes les définitions incluent le concept de conservation et d'amélioration de l'environnement au sens large, et notamment du milieu aquatique, tout en tenant compte des utilisateurs en concurrence, des eaux des écosystèmes et des zones humides. Elles considèrent également les implications environnementales plus larges des politiques de gestion de l'eau, telles que leurs implications sur la gestion des terres et, inversement, les implications des politiques de gestion des terres sur le milieu aquatique. La gouvernance liée à l'eau est une composante importante pour instaurer une gestion de l'eau permettant d'obtenir des ressources en eau durables pour un éventail de systèmes politiques, socioéconomiques et administratifs (GWP, 2002; Eakin et Lemos, 2006). [GT II 3.7]

3.2.8 Incertitudes concernant les incidences prévues du changement climatique sur les systèmes d'eau douce

Les incertitudes concernant les incidences du changement climatique sur les ressources en eau sont principalement dues à l'incertitude concernant les apports qui proviennent des précipitations et, dans une moindre mesure, à l'incertitude liée aux émissions de gaz à effet de serre (Döll *et al.*, 2003; Arnell, 2004), à la sensibilité du climat (Prudhomme *et al.*, 2003) ou aux modèles hydrologiques eux-mêmes (Kaspar, 2003). Une autre source d'incertitude concernant les incidences prévues du changement climatique sur les systèmes d'eau douce réside dans la nature, l'étendue et le succès relatif des initiatives et des mesures dont l'intervention est déjà planifiée. Les incidences indiquées à la figure 3.4 se manifesteraient différemment selon les mesures d'adaptation prises. Les prévisions actuelles ne tiennent pas entièrement

¹⁸ Voir l'appendice I pour la description des modèles.

compte des rétroactions des mesures d'adaptation au changement climatique, telles que l'allongement de la saison de croissance des plantes cultivées ou une meilleure régularisation des cours d'eau grâce à un stockage accru dans les réservoirs. La comparaison de différentes sources d'incertitude dans les statistiques des crues de deux bassins hydrographiques du Royaume-Uni (Kay *et al.*, 2006a) a conduit à la conclusion que la principale source d'incertitude était la structure du MCG, suivie par les scénarios d'émissions et la modélisation hydrologique. Prudhomme et Davies (2006) sont arrivés aux mêmes conclusions sur les débits mensuels moyens et les statistiques sur les étiages en Grande-Bretagne. [GT II 3.3.1]

Les méthodes probabilistes multi-modèles sont préférables à l'utilisation des résultats d'un seul modèle climatique, lors de l'évaluation de l'incertitude de l'incidence du changement climatique sur les ressources en eau. Depuis le troisième Rapport d'évaluation, plusieurs études portant sur les incidences hydrologiques ont utilisé des données climatologiques multi-modèles (par exemple, Arnell (2004) à l'échelle mondiale, et Jasper *et al.* (2004) à l'échelle des bassins fluviaux), mais les études intégrant des évaluations probabilistes sont rares. [GT II 3.3.1]

Dans de nombreuses études d'impact, les séries chronologiques des valeurs climatiques observées sont ajustées en utilisant le changement calculé des variables climatiques afin d'obtenir des scénarios cohérents avec les conditions actuelles. Ces ajustements visent à réduire le plus possible les incidences de l'erreur survenant lors de la modélisation climatique des modèles de la circulation générale, en partant du postulat que les biais liés à la modélisation climatique sont de la même ampleur pour les horizons temporels actuels et futurs. Ceci est particulièrement important pour les projections de précipitations, où les différences entre les valeurs observées et calculées par les modèles climatiques sont importantes. [GT II 3.3.1]

Les changements dans la variabilité interannuelle ou quotidienne des variables climatiques ne sont pas souvent pris en compte dans les études des incidences hydrologiques. Il en résulte une sous-estimation des crues et des sécheresses à venir, ainsi que de l'eau disponible et des besoins en eau d'irrigation. [GT II 3.3.1] Le choix des indicateurs et des valeurs de seuil pour quantifier l'incidence du changement climatique sur les ressources en eau douce constitue également une source d'incertitude.

Afin d'éliminer les incompatibilités entre les échelles des grilles spatiales des modèles de la circulation générale et des processus hydrologiques, des techniques ont été élaborées afin de réduire l'échelle des données des modèles de la circulation générale à une résolution spatiale et temporelle plus fine. [GT I troisième Rapport d'évaluation, chapitre 10] Ces techniques posent comme postulat principal que les relations statistiques identifiées pour le climat actuel resteront

valides si les conditions futures changent. Les techniques de réduction d'échelle peuvent permettre aux modélisateurs d'intégrer la variabilité quotidienne aux changements futurs (par exemple, Diaz-Nieto et Wilby, 2005) et d'appliquer un cadre probabiliste destiné à produire des informations sur l'écoulement fluvial futur pour la planification des ressources en eau (Wilby et Harris, 2006). Ces approches permettent de comparer les différentes sources d'incertitude qui affectent les projections concernant les ressources en eau. [GT II 3.3.1]

Les efforts destinés à quantifier les incidences économiques des variations des ressources en eau liées au climat sont entravés par le manque de données et le fait que les estimations sont extrêmement sensibles aux méthodes d'estimation retenues, ainsi qu'aux différents postulats concernant la répartition des changements de l'eau disponible entre les différents types d'utilisation, par exemple agricole, urbaine ou non consommatrice (Changnon, 2005; Schlenker *et al.*, 2005; Young, 2005). [GT II 3.5]

3.3 Adaptation au changement climatique dans le domaine de l'eau: aperçu général

Les gestionnaires des ressources en eau examinent depuis longtemps l'évolution de la demande d'eau. Jusqu'à présent, en règle générale, ils ont fait l'hypothèse que cette base de ressources naturelles sera relativement constante à moyen terme et, par conséquent, que l'expérience hydrologique acquise offre un bon guide pour déterminer les conditions futures. Le changement climatique remet en cause ces hypothèses conventionnelles et peut modifier la fiabilité des systèmes de gestion de l'eau. [GT II 3.6.1]. Les mesures de gestion permettant de faire face au changement climatique comprennent l'élaboration de nouvelles approches d'évaluation et de conception des systèmes, ainsi que de méthodes non structurelles par le biais de mécanismes tels que la Directive-cadre sur l'eau de l'Union européenne. [GT II 12.2.2]

Le tableau 3.4 résume certaines possibilités d'adaptation du côté de l'offre et de la demande, conçues pour assurer l'approvisionnement dans des conditions moyennes et en cas de sécheresse. Les solutions du côté de l'offre comportent généralement des augmentations de la capacité de stockage de l'eau ou des prélèvements dans les cours d'eau et, ainsi, peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement. Les possibilités du côté demande peuvent manquer d'efficacité pratique parce qu'elles se fondent sur des actions individuelles cumulées. Certaines possibilités peuvent être en contradiction avec les mesures d'atténuation du fait qu'elles demandent une forte consommation d'énergie, comme pour le dessalement et le pompage de l'eau.

Tableau 3.4: Exemples de possibilités d'adaptation en matière d'approvisionnement et de demande d'eau (la liste n'est pas exhaustive). [GT II, tableau 3.5]

| Offre | Demande |
|--|---|
| Prospection et extraction des eaux souterraines | Amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau par son recyclage |
| Accroissement de la capacité de stockage de l'eau grâce à la construction de réservoirs et de barrages | Réduction de la demande d'eau d'irrigation par la modification du calendrier cultural, de la composition des cultures, des méthodes d'irrigation et des surfaces plantées |
| Dessalement de l'eau de mer | Réduction de la demande d'eau d'irrigation grâce à l'importation de produits agricoles, à savoir de l'eau virtuelle |
| Extension de la collecte des eaux de pluie | Promotion des pratiques autochtones pour une utilisation durable de l'eau |
| Défrichement de la végétation allochtone dans les zones riveraines | Utilisation accrue des marchés de l'eau pour redistribuer/transférer l'eau aux utilisations à forte valeur ajoutée |
| Transfert de l'eau | Utilisation accrue des incitations économiques, dont des mesures de comptage et la tarification de l'eau, pour encourager sa conservation |

L'on distingue fréquemment les adaptations autonomes et planifiées. Les *adaptations autonomes* sont celles qui ne constituent pas une réponse consciente aux stimuli liés au climat, mais qui résultent de changements destinés à satisfaire les demandes, attentes et objectifs modifiés qui, bien que n'étant pas délibérément destinés à faire face au changement climatique, peuvent en atténuer les conséquences. Ces adaptations sont largement répandues dans le secteur de l'eau, bien qu'avec des degrés variables d'efficacité d'adaptation au changement climatique (voir le tableau 3.5). [GT II 3.6.1] Certaines mesures d'adaptation autonome ont été mises en place en Amérique latine; parmi elles, la gestion des dérivations transbassins et l'optimisation de l'utilisation de l'eau. [GT II 13.5.1.3] En Afrique, les communautés locales et les agriculteurs ont élaboré des dispositifs d'adaptation, afin de prévoir la pluviosité grâce à l'expérience acquise. Les agriculteurs du Sahel utilisent également des dispositifs traditionnels de récupération de l'eau qui viennent compléter les pratiques d'irrigation. [GT II 9.6.2.1, 9.5.1, tableau 9.2]

Les *adaptations planifiées* résultent de décisions stratégiques délibérées et prennent spécifiquement en compte le changement climatique et la variabilité du climat; cependant, à ce jour, elles n'ont pas souvent été mises en œuvre. Dans quelques pays, dont les Pays-Bas, l'Australie, le Royaume-Uni, l'Allemagne, les États-Unis et le Bangladesh, les gestionnaires des ressources en eau ont commencé à traiter directement les implications du changement climatique comme élément de leurs pratiques normales de gestion de l'approvisionnement en eau et des crues. [GT II 3.2, 3.6.5, 17.2.2] Ces adaptations ont généralement pris la forme d'une modification des méthodes et des procédures, telles que l'adoption de normes de conception et le calcul des indemnités pour les dommages causés par le changement climatique. Par exemple, ces adaptations ont été mises en œuvre pour la préparation aux crues au Royaume-Uni et aux Pays-Bas (Klijn *et al.*, 2001; Richardson, 2002), pour l'approvisionnement en eau au Royaume-Uni (Arnell et

Delaney, 2006), ainsi que pour la planification des ressources en eau en général au Bangladesh. [GT II 3.6.5, 17.2.2] Il y a très peu d'exemples de mesures «concrètes» dans le domaine de l'eau destinées à s'adapter spécifiquement et uniquement à l'évolution du climat. Ce phénomène peut s'expliquer en partie par le fait que le changement climatique peut ne constituer que l'un des nombreux facteurs qui affectent les stratégies et les plans d'investissement (et il peut ne pas être le plus important en matière de planification à court terme); il dépend aussi en partie de l'incertitude des projections des futurs changements hydrologiques.

Non seulement les agences de gestion de l'eau, mais également les utilisateurs privés du milieu aquatique devront s'adapter aux changements de la quantité et de la qualité de l'eau disponible. Cela concerne l'industrie, les agriculteurs (particulièrement les exploitants qui irriguent leurs terres) et les particuliers. En dépit de la grande expérience acquise en matière d'adaptation à l'évolution de la demande évolutive et de la législation, les connaissances restent faibles en ce qui a trait à la manière dont ces entités et ces individus seront capables de s'adapter aux changements climatiques.

Le tableau 3.5 met en valeur certaines mesures d'adaptation, planifiées ou autonomes, actuellement mises en œuvre à travers le monde, telles que présentées dans les chapitres consacrés aux diverses régions du globe qui figurent dans la contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation. Ce tableau n'est pas exhaustif et un grand nombre de mesures individuelles peuvent être prises en de nombreux endroits.

Il existe un *degré de confiance* élevé en ce que l'adaptation permet de réduire la vulnérabilité, en particulier à court terme. [GT II 17.2, 18.1, 18.5, 20.3, 20.8] Cependant, la capacité d'adaptation est étroitement liée au développement social et économique, et elle n'est pas répartie uniformément entre les sociétés et en leur sein. Les populations pauvres, les

Tableau 3.5: Exemples d'adaptation dans la pratique

| Région | Mesure d'adaptation | Source |
|--------------------------------------|--|---|
| Afrique | <ul style="list-style-type: none"> Prévisions saisonnières, leur production, leur diffusion, leur prise en compte et leur intégration dans les systèmes de soutien à la prise de décision fondées sur les modèles Augmentation de la résilience face aux futures périodes de stress causé par la sécheresse, grâce aux améliorations des systèmes d'exploitation agricole pluvieux actuels provenant de l'amélioration des infrastructures matérielles, y compris les systèmes de récupération de l'eau; la construction de barrages, la conservation de l'eau et les pratiques agricoles, l'irrigation au goutte à goutte, la création de variétés culturales résistantes à la sécheresse et à maturité précoce, de cultures alternatives et de variétés hybrides | GT II 9.5, tableau 9.2 |
| Asie | <p>Améliorations de l'infrastructure agricole, y compris:</p> <ul style="list-style-type: none"> Alimentation des pâturages en eau Mécanismes d'irrigation et leur efficacité Utilisation et stockage de l'eau pluviale et nivale Système d'échange d'informations sur les nouvelles technologies au niveau national, ainsi qu'aux niveaux régional et international Accès des éleveurs, pêcheurs et agriculteurs à des prévisions météorologiques disponibles en temps utile (données sur la pluviométrie et les températures) Recyclage et réutilisation des eaux usées municipales, par exemple à Singapour Réduction du gaspillage de l'eau et des fuites d'eau, et utilisation d'approches orientées vers le marché, afin de diminuer le gaspillage de l'eau | GT II 10.5, tableau 10.8 GT II 10.5.2 |
| Australie et Nouvelle-Zélande | <ul style="list-style-type: none"> Initiative nationale sur l'eau Usine de traitement destinée à fournir de l'eau recyclée Diminution des infiltrations au niveau des canaux et mesures de conservation Canalisations pour remplacer les canaux d'irrigation à ciel ouvert Amélioration de l'efficacité et de la qualité de la consommation de l'eau Préparation aux sécheresses, nouvelle tarification de l'eau Installation de réservoirs d'eau de pluie Dessalement de l'eau de mer | GT II 11.2, tableau 11.2, encadré 11.2; voir tableau 5.2 dans la présente publication |
| Europe | <ul style="list-style-type: none"> Mise en place de stratégies au niveau de la demande, telles que la conservation de l'eau domestique, industrielle et agricole, la réparation des réservoirs municipaux et d'eau d'irrigation qui fuient dans les zones situées en altitude et des digues dans les zones de plaine Élargissement de la surface des zones inondables, des réservoirs de maîtrise des crues, des zones de conservation pour l'eau de crue et des systèmes d'alerte aux crues, notamment les crues éclair Mesures au niveau de l'offre, telles que les retenues des cours d'eau, pour constituer des réservoirs dans les cours d'eau eux-mêmes, les systèmes de réutilisation des eaux usées et de dessalement, et la tarification de l'eau Intégration de stratégies, à l'échelle des régions et des bassins versants, d'adaptation aux changements climatiques, dans des plans de gestion intégrée de l'eau | GT II 12.5.1 |
| Amérique latine | <ul style="list-style-type: none"> Bassins hydrographiques et systèmes de stockage Programmes d'«auto-organisation» pour améliorer les systèmes d'approvisionnement en eau dans les communautés très pauvres Techniques de conservation, de réutilisation et de recyclage de l'eau par la modification des procédés industriels et l'optimisation de la consommation de l'eau | GT II 13.2.5.3, encadré 13.2, 13.5.1 |
| Amérique du Nord | <ul style="list-style-type: none"> Meilleure conservation de l'eau et méthodes culturales de conservation du sol Investissement dans les systèmes de conservation de l'eau et dans de nouvelles installations d'approvisionnement en eau et de distribution d'eau Réforme du programme national de l'assurance contre les inondations aux États-Unis, pour réduire le risque d'innombrables déclarations de sinistre après les inondations Les habitations ayant fait l'objet de deux déclarations de sinistre liées à une inondation nécessitent désormais d'être surélevées de 2,5 cm au-dessus du niveau des crues centennales, ou d'être déplacées Chasse des réseaux de drainage et remplacement des systèmes d'égouts principaux pour répondre à des critères de crues quinquennales plus extrêmes Détournement du ruissellement des toits vers les pelouses pour permettre l'infiltration, et accroissement de la rétention dans les dépressions de surface et au niveau des rues | GT II 14.2.4 GT II 14.5.1 |
| Régions polaires | <ul style="list-style-type: none"> Stratégie d'adaptation fructueuse déjà utilisée auparavant utilisée pour contrer les effets de la sécheresse des étangs des deltas, qui implique une bonne gestion des lâchers d'eau des réservoirs pour accroître la probabilité d'embâcle et d'inondations connexes Régulation des flux pour la production hydroélectrique, stratégies de collecte de l'eau et méthodes d'accès à l'eau potable Stratégies destinées à faire face aux dangers accrus/diminués concernant l'eau douce (par exemple, structures de protection destinées à réduire les risques d'inondation ou à accroître les crues des systèmes aquatiques) | GT II 15.6.2 GT II 15.2.2.2 |
| Petites îles | <ul style="list-style-type: none"> Usines de dessalement Grands réservoirs de stockage et amélioration de la récupération de l'eau Protection des nappes souterraines, accroissement de la collecte et des capacités de stockage de l'eau de pluie, utilisation de la distillation solaire, gestion des eaux pluviales et distribution des zones d'alimentation des nappes souterraines insulaires | GT II 16.4.1 Encadré 16.5 |

Tableau 3.6: Problèmes interéchelles posés par la gestion intégrée de l'eau du bassin du fleuve Colorado (Pulwarty et Melis, 2001). [GT II tableau 3.4]

| Échelle temporelle | Problème |
|--------------------------------------|---|
| Indéterminée | Écoulement nécessaire pour protéger les espèces menacées |
| Long terme | Attribution interbassins et entre les bassins de différents États |
| Décennale | Obligation de distribution dans le bassin supérieur |
| Annuelle | Obligations de remplissage du lac Powell, pour atteindre une égalité de niveau avec le stockage du lac Mead |
| Saisonniers | Mois de pointe du chauffage et de la climatisation |
| Quotidienne à mensuelle | Opérations de lutte contre les crues |
| Horaire | Génération électrique de l'Administration de production de la zone ouest |
| Échelle spatiale | |
| Mondiale | Influences climatiques, parc national du Grand Canyon |
| Régionale | Appropriation préalable (par exemple, la Commission du bassin supérieur du fleuve Colorado) |
| Étatique | Différents accords concernant le marketing de l'eau, pour les districts situés à l'intérieur d'un État et à l'extérieur de celui-ci |
| Municipale et des communautés | Horaires d'arrosage, traitement, utilisation domestique |

personnes âgées, les femmes, les personnes malades et les populations autochtones ont généralement des capacités d'adaptation moindres. [GT II 7.1, 7.2, 7.4, 17.3]

Il est possible de définir cinq types différents de limites de l'adaptation aux effets des changements climatiques. [GT II 17.4.2]

- Physique ou écologique:* les moyens techniques et les réformes institutionnelles mis en place peuvent ne pas empêcher les effets néfastes causés par les changements climatiques. Par exemple, une adaptation peut s'avérer impossible là où les rivières sont entièrement asséchées. [GT II 3.6.4]
- Technique, politique ou sociale:* par exemple, il peut être difficile de trouver des sites adaptés à l'implantation de nouveaux réservoirs, ou de faire en sorte que les utilisateurs consomment moins d'eau. [GT II 3.6.4]
- Économique:* une stratégie d'adaptation peut simplement s'avérer trop coûteuse par rapport aux bénéfices retirés de sa mise en œuvre.
- Culturelle et institutionnelle:* ce type de limites peut comprendre le cadre institutionnel au sein duquel est gérée l'eau, la faible priorité donnée à la gestion de l'eau, le manque de coordination interagences, les tensions entre les différents niveaux, l'inefficacité de la gouvernance et l'incertitude quant aux changements climatiques à venir (Ivey *et al.*, 2004; Naess *et al.*, 2005; Crabbe et Robin, 2006). L'ensemble de ces limites agissent comme des contraintes institutionnelles sur l'adaptation. [GT II 3.6.4]
- Cognitive et informationnelle:* par exemple, les gestionnaires des ressources en eau peuvent ne pas reconnaître les défis du changement climatique, ou leur

accorder une faible priorité par rapport aux autres défis auxquels ils doivent faire face. La principale barrière informationnelle est le manque d'accès aux méthodologies permettant de faire face de manière cohérente et rigoureuse au changement climatique. [GT II 17.4.2.4]

Le changement climatique pose un problème conceptuel aux gestionnaires des ressources en eau en introduisant une incertitude dans la détermination des conditions hydrologiques futures. Il peut être également très difficile de détecter une tendance sous-jacente (Wilby, 2006), ce qui signifie que les décisions d'adaptation doivent parfois être prises avant que l'évolution réelle des régimes hydrologiques ne soit clairement connue. La gestion de l'eau dans la perspective du changement climatique exige ainsi d'adopter une approche fondée sur les scénarios (Beuhler, 2003; Simonovic et Li, 2003), comme c'est le cas, par exemple, au Royaume-Uni (Arnell et Delaney, 2006) et en Australie (Dessai *et al.*, 2005). Ceci pose toutefois deux sortes de problèmes. En premier lieu, les incidences sont souvent très différentes entre les scénarios, obligeant à fonder les analyses sur plusieurs scénarios. En second lieu, dans certains pays, les gestionnaires des ressources en eau ont besoin de données sur la probabilité de survenance des résultats définis pour prendre des décisions fondées sur les risques (voir Jones et Page, 2001). Des techniques sont par conséquent développées dans le but de construire des distributions de probabilité de résultats spécifiques, nécessitant des hypothèses concernant les distributions de probabilité des principaux facteurs d'incertitude agissant sur les incidences (par exemple, Wilby et Harris, 2006). [GT II 3.6.4]

Une deuxième approche pour traiter à l'incertitude, appelée «gestion adaptative» (Stakhiv, 1998), implique l'utilisation accrue de mesures de gestion de l'eau relativement robustes par rapport à l'incertitude. Ces outils comprennent des mesures destinées à réduire la demande d'eau et ont été prônés comme moyens de réduire le plus possible l'exposition d'un système au changement climatique (par exemple, en Californie: Beuhler, 2003). De la même façon, certaines stratégies résilientes de gestion des crues, qui consistent par exemple à permettre des crues temporaires des cours d'eau et à réduire l'exposition aux dommages causés par les crues, sont plus robustes par rapport à l'incertitude que les mesures traditionnelles de protection dans ce domaine (Klijn *et al.*, 2004; Olsen, 2006). [GT II 3.6.4]

3.3.1 Gestion intégrée des ressources en eau

La gestion intégrée des ressources en eau (IWRM: voir la note de bas de page n° 17) devrait être un instrument d'exploration des mesures d'adaptation au changement climatique, mais n'en est pour le moment qu'à ses débuts. Les stratégies intégrées de gestion de l'eau qui donnent de bons résultats demandent, entre autres, de tenir compte de l'opinion publique, de réformer les processus de planification, de coordonner la gestion des ressources en sol et en eau, de reconnaître les liens entre quantité et qualité de l'eau, d'utiliser en parallèle les eaux souterraines et les

eaux de surface, de protéger et de restaurer les milieux naturels, en incluant la prise en compte du changement climatique. De surcroît, les stratégies intégrées cherchent à lever de manière explicite les obstacles au flux d'informations. Une approche entièrement intégrée n'est pas toujours nécessaire, mais l'échelle d'intégration appropriée dépendra plutôt de la mesure dans laquelle elle facilite une action efficace en réponse à des besoins spécifiques (Moench *et al.*, 2003). En particulier, une approche intégrée de la gestion de l'eau pourrait aider à résoudre les conflits entre les utilisateurs concurrentiels de l'eau. Dans différentes zones de l'ouest des États-Unis, les gestionnaires des ressources en eau et divers groupes d'intérêt ont expérimenté des méthodes qui favorisent la prise de décisions consensuelles. Ces efforts comprennent des initiatives locales au niveau des bassins versants et des initiatives menées par l'État ou parrainées au niveau fédéral pour obtenir la participation des parties prenantes aux processus de planification (par exemple, Département de l'intérieur, États-Unis, 2005). Ces initiatives permettent de faciliter les négociations entre les groupes ayant des intérêts divergents pour parvenir à une résolution des problèmes mutuellement satisfaisante qui prend en compte tout un ensemble de facteurs. Dans le cas des bassins versants de grande taille, comme le bassin du fleuve Colorado, ces facteurs traversent plusieurs niveaux spatiaux et temporels (tableau 3.6). [GT II 3.6.1, encadré 14.2]

