

4

Changement climatique et ressources en eau par système et par domaine

4.1 Écosystèmes et biodiversité

4.1.1 Contexte

Les régimes de températures et d'humidité font partie des principales variables qui déterminent la distribution, la croissance, la productivité et la reproduction des plantes et des animaux. Les changements de l'hydrologie peuvent influencer des espèces de bien des manières différentes, mais les processus les mieux compris sont ceux qui lient la disponibilité de l'humidité aux seuils intrinsèques qui gouvernent les processus métaboliques et reproductifs (Burkett *et al.*, 2005). Les changements climatiques prévus dans les décennies à venir auront des effets variés sur la disponibilité de l'humidité, allant des modifications dans la variation dans le temps et dans le volume de l'écoulement fluvial jusqu'à la diminution des niveaux d'eau dans un grand nombre de zones humides, en passant par l'extension des lacs thermokarstiques de l'Arctique, et par une diminution de la disponibilité en eau des brumes dans les forêts des montagnes tropicales.

Les tendances mondiales observées pour la précipitation, l'humidité, la sécheresse et le ruissellement au cours du siècle dernier sont résumées dans le chapitre 3 de la contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation. Bien que les changements de précipitations au cours du siècle dernier soient extrêmement variables selon les régions [GT I figure 3.14], on observe tout de même des tendances importantes et hautement significatives. Les précipitations ont globalement augmenté dans l'hémisphère Nord de 1900 à 2005, mais la tendance à une sécheresse plus généralisée a augmenté simultanément dans de nombreuses grandes régions des tropiques et de l'hémisphère Sud, en particulier au Sahel, dans le sud de l'Afrique, en Amérique centrale, dans le sud de l'Asie et dans l'est de l'Australie. [GT I 3.3.5]

4.1.2 Changements prévus de l'hydrologie et implications pour la biodiversité mondiale

Les estimations du quatrième Rapport d'évaluation du GIEC pour le réchauffement mondial varient de 0,5 °C dans l'hémisphère Sud à 2 °C dans la région polaire septentrionale d'ici 2030, selon les scénarios SRES B1, A1 et A2, le scénario B1 étant celui qui prévoit le réchauffement le plus important. Tandis que les modèles simulent une augmentation des précipitations moyennes mondiales, les variations spatiales et temporelles sont grandes. Les modèles de la circulation générale (MCG) prévoient une augmentation des précipitations aux latitudes élevées, bien que l'ampleur de cette augmentation varie d'un modèle à l'autre. Ils prévoient également une diminution des précipitations dans un grand nombre de régions subtropicales et de moyenne latitude dans les deux hémisphères. [GT I figures 10.8 et 10.12] Au cours des prochaines décennies, les précipitations devraient être davantage concentrées dans des épisodes plus intenses,

entre lesquels s'installeront des périodes plus longues de faibles précipitations. [GT I 10.3.6.1] L'augmentation du nombre de jours secs consécutifs devrait être plus importante en Amérique du Nord et en Amérique centrale, dans les Caraïbes, le nord-est et le sud-ouest de l'Amérique du Sud, le sud de l'Europe et la Méditerranée, le sud de l'Afrique et l'ouest de l'Australie. [GT I figure 10.18] Les incidences du réchauffement et des changements de configuration des précipitations dans les régions tropicales et subtropicales ont des implications importantes sur la biodiversité mondiale, car la diversité des espèces diminue généralement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur.

Les changements de l'hydrologie prévus pour le XXI^e siècle par le Groupe de travail I dans sa contribution au quatrième Rapport d'évaluation (voir la section 2) auront *très probablement* une influence sur la biodiversité sur tous les continents. Des incidences ont déjà été détectées sur les espèces dans la plupart des régions du monde. [GT II 1.3, 4.2] Root *et al.* (2003) ont examiné 143 études publiées et indiquent que les plantes et les animaux démontrent déjà des changements visibles en accord avec les tendances climatiques du XX^e siècle. Environ 80 % des changements correspondaient au changement de température observé, mais il convient de noter que la température peut également exercer une influence sur les espèces via des changements de disponibilité de l'humidité. [GT II 1.4.1]

Les réponses des écosystèmes aux changements hydrologiques impliquent souvent des interactions complexes entre les processus biotiques et abiotiques. L'assemblage d'espèces dans les communautés écologiques reflète le fait que ces interactions et réponses sont souvent non linéaires, ce qui augmente la difficulté de projection de résultats écologiques spécifiques. Étant donné que le moment où se produisent les réponses n'est pas toujours le même pour les espèces de groupes taxinomiques différents, une dissociation des espèces de leurs sources d'aliments et une perturbation des relations de symbiose, de facilitation ou de compétition entre les espèces pourraient survenir. En raison de la combinaison des réponses différentes d'une espèce à l'autre et des interactions pouvant se produire en théorie en un point quelconque du réseau alimentaire, certaines des communautés écologiques qui existent actuellement pourraient facilement se décomposer dans le futur (Root et Schneider, 2002; Burkett *et al.*, 2005). [GT II 1.3.5.5, 4.2.2, 4.4]

Du fait de l'effet combiné de la température et du stress hydrique, l'extinction de certains amphibiens et d'autres espèces aquatiques est prévue au Costa Rica, en Espagne et en Australie (Pounds *et al.*, 2006). [GT II tableau 4.1] Au Sahel, l'assèchement des zones humides compromettra la migration des oiseaux qui font étape dans ces régions lors de leur déplacement vers les sites de reproduction de l'hémisphère Nord. Dans le sud de l'Afrique, sont envisagés des niveaux inédits d'extinction tant de plantes que d'animaux.

[GT II tableau 9.1] Dans les forêts montagnardes, de nombreuses espèces dépendent du brouillard en tant que source d'eau: le réchauffement mondial élèvera la base des nuages et touchera les espèces qui sont dépendantes de cette ressource. [GT II 13.4.1] Parmi tous les écosystèmes, ce sont cependant les écosystèmes aquatiques d'eau douce qui semblent contenir la proportion la plus élevée d'espèces menacées d'extinction du fait du changement climatique (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b). [GT II 3.5.1]

4.1.3 Incidences des changements hydrologiques sur les principaux types d'écosystèmes

4.1.3.1 Lacs et rivières

Les incidences du réchauffement mondial sur les lacs sont, entre autres, une extension de la période de croissance aux latitudes élevées, une intensification de la stratification et de la perte d'éléments nutritifs des eaux de surface, une diminution de l'oxygène hypolimnique (en dessous de la thermocline) dans les lacs profonds et stratifiés, et une extension de nombreuses plantes aquatiques invasives. Les niveaux d'eau devraient augmenter dans les lacs des latitudes élevées où les modèles climatiques prévoient des précipitations accrues, tandis que les niveaux d'eau des lacs des latitudes moyennes et basses devraient diminuer. Les lacs endoréiques (fermés) sont les lacs les plus vulnérables au changement climatique car ils sont très sensibles aux changements d'équilibre entre les apports et l'évaporation. Les changements des apports de ces lacs peuvent avoir des répercussions très importantes qui, dans certaines conditions climatiques, peuvent entraîner leur disparition complète. L'étendue de la mer d'Aral, par exemple, a été considérablement réduite à cause de l'augmentation des prélèvements pour l'irrigation en amont; en Chine, le lac Qinghai a rétréci suite à une diminution des précipitations dans le bassin hydrographique. [GT II TRE 4.3.7]

La durée de la couche de glace des lacs et des rivières aux latitudes moyennes à élevées a diminué d'environ deux semaines dans l'hémisphère Nord, au cours du siècle dernier. [GT I TRE RiD] Une augmentation de la température de l'eau en été peut entraîner une anoxie accrue dans les lacs stratifiés, une augmentation du relargage de phosphore par les sédiments au fond des lacs, et l'apparition de fleurs d'eau qui restructurent le réseau alimentaire aquatique. [GT II 4.4.8] Une augmentation de la température de 1 °C entraîne une différence de densité proportionnellement plus élevée dans les lacs tropicaux que dans les lacs tempérés plus froids. Ainsi, les températures tropicales prévues [GT I chapitres 10 et 11] provoqueraient une grande stratification thermique, avec une anoxie des couches profondes des lacs et un appauvrissement en éléments nutritifs des eaux peu profondes. Des concentrations réduites en oxygène entraîneraient généralement la réduction de la diversité des espèces aquatiques, en particulier lorsque la qualité de l'eau serait compromise par l'eutrophisation. [CCB 4.4]

Ces mêmes concentrations réduites en oxygène ont tendance à modifier les assemblages biotiques, la biogéochimie et la productivité globale des lacs et des rivières. Pour de nombreux taxons des eaux froides des latitudes moyennes et élevées, l'optimum thermique est inférieur à 20 °C. Des extinctions d'espèces sont prévues lorsque les températures estivales chaudes et l'anoxie supprimeront les refuges des eaux froides profondes. Dans le sud des Grandes Plaines des États-Unis, les températures de l'eau approchent déjà des limites létales pour de nombreux poissons indigènes des rivières. Le taux de décomposition de la matière organique augmente avec la température, ce qui raccourcit la période pendant laquelle les détritiques sont disponibles pour les invertébrés aquatiques. [CCB 6.2] Les espèces exotiques invasives représentent une menace majeure pour la biodiversité indigène des écosystèmes aquatiques. [GT II 4.2.2] La hausse de la température mondiale aura tendance à étendre vers les pôles les aires de répartition d'un grand nombre de plantes aquatiques invasives telles que *Eichhornia* et *Salvinia*. [RICC 2.3.6]

Les effets du réchauffement sur les systèmes riverains peuvent être plus importants dans les régions humides où les flux sont moins variables et où les interactions biologiques contrôlent l'abondance des organismes. L'assèchement des lits des cours d'eau et des lacs pendant des périodes prolongées pourrait réduire la productivité des écosystèmes du fait de la restriction de l'habitat écologique, combinée à une moins bonne qualité de l'eau résultant d'une augmentation des déficits en oxygène et des concentrations en polluants. Dans les régions semi-arides du monde, la réduction de l'écoulement fluvial saisonnier et l'assèchement complet des lacs (notamment au Sahel en Afrique) peuvent avoir des répercussions graves sur les écoservices, y compris sur le maintien de la biodiversité. [CCB 6.7]

Actuellement, la richesse spécifique est à son maximum dans les systèmes d'eau douce de l'Europe centrale et elle diminue vers le nord et vers le sud du fait des sécheresses périodiques et de la salinisation (Declerck *et al.*, 2005). Des analyses d'ensembles de MCG effectuées pour le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC mettent en évidence un contraste sud-nord des précipitations, avec une augmentation au nord et une diminution au sud. [GT I 11.3.3.2] Une augmentation du ruissellement prévu et un risque de sécheresse diminué pourraient avantager la faune des systèmes aquatiques du nord de l'Europe, tandis qu'une diminution de la disponibilité en eau dans le sud pourrait avoir l'effet opposé (Álvarez Cobelas *et al.*, 2005). [GT II 12.4.6]

4.1.3.2 Zones humides d'eau douce

La grande variabilité de structure des systèmes de zones humides découle principalement de leur hydrologie particulière, qui comprend aussi bien les tourbières des forêts boréales à latitudes élevées que les zones humides de haute altitude des montagnes tibétaines et andines et les zones humides tropicales des moussons (notamment les zones humides de Kakadu, en Australie). Les répercussions les plus

prononcées du changement climatique se manifesteront sur les zones humides d'eau douce à l'intérieur des terres via une altération des précipitations et des épisodes de perturbations plus fréquents ou plus intenses (sécheresses, tempêtes, inondations). Une augmentation relativement faible de la variabilité des précipitations peut affecter significativement les plantes et les animaux des zones humides à différentes étapes de leur cycle de vie (Keddy, 2000). [GT II 4.4.8] En général, le réchauffement climatique devrait déclencher une tendance à l'assèchement des écosystèmes des zones humides. Cette influence essentiellement indirecte du changement climatique, entraînant des modifications du niveau d'eau, serait la principale cause du changement des écosystèmes des zones humides et occulterait les incidences de l'augmentation de la température et de l'allongement des périodes de croissance dans les tourbières boréales et subarctiques (Gorham, 1991). Les régions à mousson assisteront plus probablement à des épisodes de chutes de pluie plus intenses, concentrés dans des saisons de pluies plus courtes, aggravant les inondations et l'érosion dans les bassins hydrographiques et dans les zones humides elles-mêmes. [GT II TRE 5.8.3]

La plupart des processus des zones humides dépendent de l'hydrologie au niveau du bassin hydrographique, qui peut souffrir des changements d'affectation des terres ainsi que des pratiques de gestion des ressources en eaux de surface. [GT II TRE 5.RE] L'alimentation des réseaux locaux ou régionaux d'eaux souterraines, la position des zones humides par rapport à la topographie locale et le gradient de réseaux régionaux d'eaux souterraines plus étendus sont aussi des éléments critiques qui déterminent la variabilité et la stabilité du stockage de l'humidité dans les zones humides de régions climatiques où les précipitations ne dépassent pas de beaucoup l'évaporation (Winter et Woo, 1990). Les changements de l'alimentation externe de la zone humide peuvent être tout aussi importants que les changements des précipitations directes et l'évaporation pour le devenir de la zone, dans des conditions de changement climatique (Woo *et al.*, 1993). [GT II TRE 5.8.2.1] Ainsi, il sera peut-être très difficile, voire impossible, de s'adapter aux conséquences des changements prévus pour la disponibilité en eau. [GT II TRE 5.8.4] Du fait, en partie, de leur capacité d'adaptation limitée, les zones humides font partie des écosystèmes jugés les plus vulnérables au changement climatique. [GT II 4.4.8]

Les zones humides sont très souvent des points chauds de la biodiversité, qui sont nombreux à être protégés au niveau de la planète (sites Ramsar, sites du patrimoine mondial). Leur perte pourrait entraîner de nombreuses extinctions, en particulier parmi les amphibiens et les reptiles aquatiques. [GT II 4.4.8] Le troisième Rapport d'évaluation a identifié des tourbières ombrotrophiques («alimentées par les nuages») arctiques et subarctiques et des zones humides dépressionnaires ayant des bassins hydrographiques peu étendus comme étant les systèmes aquatiques les plus vulnérables au changement climatique. [GT II TRE 5.8.5] Le quatrième Rapport d'évaluation, plus récent, met toutefois en avant

la grande vulnérabilité de nombreux autres types de zones humides, à savoir les zones humides à mousson de l'Inde et de l'Australie, les tourbières boréales, les zones humides de la cuvette des prairies en Amérique du Nord et celles de la région des Grands Lacs africains. [GT II 4.4.8, 4.4.10] Les modes et les itinéraires migratoires saisonniers de nombreuses espèces des zones humides devront évoluer au risque de voir certaines espèces menacées d'extinction. [GT II 4.4.8] En ce qui concerne les principaux habitats, leur restauration pourrait être possible à petite échelle, dans la mesure où la disponibilité en eau est suffisante. [GT II TRE 5.8.4]

En raison des changements hydrologiques associés au réchauffement atmosphérique, l'étendue de l'habitat des zones humides a augmenté dans certaines régions. Dans la région arctique, le dégel du pergélisol entraîne la création de nouvelles zones humides. [GT II 1.3] Les propriétés thermokarstiques, qui sont issues de la fonte de la glace du sol dans une région surmontant le pergélisol, peuvent déplacer le biote arctique suite à une saturation excessive ou à un assèchement (Hinzman *et al.*, 2005; Walsh *et al.*, 2005). En Amérique du Nord, près de Council, en Alaska (Yoshikawa et Hinzman, 2003), et dans le centre de la République de Sakha (Gavriliév et Efremov, 2003), on a mis en évidence un développement extensif de thermokarst. [GT I 4.7.2.3] Le dégel du pergélisol crée initialement des dépressions où se forment des zones humides et des étangs qui sont reliés par de nouveaux drainages. Au fur et à mesure que le dégel se poursuit, les eaux de surface percolent vers les réseaux souterrains, et sont perdues pour l'habitat d'eau douce. [GT II 15.4.1.3] Il se pourrait que le réchauffement ait déjà provoqué la diminution de la superficie des zones humides du fait de l'extension des lacs du delta du Yukon au cours du siècle dernier (Coleman et Huh, 2004). [GT II 15.6.2]

Une faible augmentation de la variabilité des régimes de pluie peut affecter significativement les plantes et les animaux des zones humides (Keddy, 2000; Burkett et Kusler, 2000). La biodiversité des zones humides saisonnières, comme les mares vernaies, peut être fortement influencée par les changements des précipitations et de l'humidité des sols (Bauder, 2005). Dans les régions touchées par la mousson, des périodes sèches prolongées favorisent la terrestrialisation des zones humides, telle qu'on a pu l'observer dans le parc national Keoladeo (Chauhan et Gopal, 2001). [GT II 4.4.8]

4.1.3.3 Côtes et estuaires

Des changements dans la périodicité et le volume du ruissellement d'eau douce peuvent altérer la salinité, la disponibilité des sédiments et des éléments nutritifs, ainsi que les régimes d'humidité des écosystèmes côtiers. Le changement climatique peut influencer chacune de ces variables en modifiant les précipitations et le ruissellement local, ou de manière plus importante, le ruissellement des bassins versants vers la région côtière. [GT II 6.4.1.3] L'hydrologie exerce une grande influence sur la distribution des communautés végétales des zones humides côtières

qui se répartissent généralement à l'intérieur des terres, des espèces d'eau salée jusqu'à celles d'eau douce, en passant par celles d'eau saumâtre. [GT II 6.4.1.4]

Les conséquences de l'élévation du niveau de la mer sur le relief côtier varient d'une région côtière à l'autre, du fait que la vitesse de l'élévation n'est pas uniforme dans l'espace [GT I 5.5.2] et que certaines régions côtières subissent des soulèvements ou des affaissements dus à des processus indépendants du changement climatique. De tels processus incluent les prélèvements d'eau souterraine, l'extraction de pétrole et de gaz et l'isostasie (ajustement de la surface de la Terre, à l'échelle géologique, aux changements de masse surfacique, dus par exemple aux changements de la masse des nappes glaciaires suite à la dernière déglaciation). En sus des changements d'élévation le long de la côte, des facteurs survenant à l'intérieur des terres peuvent influencer l'effet net de l'élévation du niveau de la mer sur les écosystèmes côtiers. Les écosystèmes naturels ont été fragmentés à l'intérieur des bassins versants, et l'écoulement de l'eau, des sédiments et des éléments nutritifs vers la côte en a été perturbé (Nilsson *et al.*, 2005). Outre les influences localisées, y compris le développement humain sur la côte, le changement d'affectation des terres et les modifications hydrologiques ont eu des incidences en aval. L'érosion a augmenté la charge de sédiments qui atteint la côte. Par exemple, les charges en suspension dans le fleuve Huang He (fleuve Jaune) ont augmenté de 2 à 10 fois au cours des 2 000 dernières années (Jiongxin, 2003). En revanche, pour d'autres rivières, la construction de barrages et de canaux a réduit de beaucoup l'apport de sédiments à la côte, car ces derniers sont retenus dans les réservoirs (Syvitski *et al.*, 2005). Cet effet sera probablement prévalent au XXI^e siècle. [GT II 6.4]

Des passages d'ensembles de modèles climatiques réalisés par Milly *et al.* (2005) indiquent que, pendant les 50 à 100 années à venir, le changement climatique entraînera l'augmentation des débits vers les eaux côtières dans l'Arctique, le nord de l'Argentine et le sud du Brésil, des régions du sous-continent indien et en Chine, tandis qu'une réduction des débits est prévue dans le sud de l'Argentine et du Chili, l'ouest de l'Australie, l'ouest et le sud de l'Afrique et le bassin méditerranéen. [GT II 6.3.2; voir la figure 2.10 de la présente publication] Si les débits des rivières diminuent, la salinité des zones humides et des estuaires côtiers devrait augmenter, alors que la quantité de sédiments et d'éléments nutritifs apportés vers la côte devrait diminuer. Dans les régions côtières où l'écoulement fluvial diminue, la salinité aura tendance à remonter les cours d'eau et donc altérera la zonation des espèces animales et végétales, ainsi que la disponibilité en eau douce pour l'homme. La salinité accrue des eaux côtières depuis 1950 a contribué au recul des forêts de chou palmiste en Floride (Williams *et al.*, 1999) et de cyprès chauve en Louisiane (Krauss *et al.*, 2000). Elle a également joué un rôle dans l'extension des mangroves vers les marécages avoisinants dans la région des Everglades, en Floride (Ross *et al.*, 2000) et dans tout le sud-est de

l'Australie au cours des 50 dernières années (Saintilan et Williams, 1999). [GT II 6.4.1.4] L'intrusion d'eau salée consécutive à l'élévation du niveau de la mer, combinée à la diminution du débit des rivières et à l'augmentation de la fréquence des sécheresses, devrait perturber les pêcheries côtières dépendantes des estuaires au cours de ce siècle dans des régions d'Afrique, d'Australie et d'Asie. [GT II 6.4.1.3, 9.4.4, 10.4.1, 11.4.2]

Les côtes des deltas sont particulièrement vulnérables aux changements du ruissellement et du transport des sédiments, qui ont une influence sur la capacité d'un delta à faire face aux incidences physiques du changement climatique. En Asie, où les activités humaines ont entraîné une augmentation des charges en sédiments des principales rivières dans le passé, la construction de barrages en amont appauvrit l'apport en sédiments vers de nombreux deltas avec, comme répercussion généralisée, une augmentation de l'érosion côtière (Li *et al.*, 2004; Syvitski *et al.*, 2005; Ericson *et al.*, 2006). [GT II 6.2.3, 6.4.1] Dans la plaine subsidente du delta du Mississippi, au sud-est de la Louisiane, le faible remplissage sédimentaire consécutif à l'intervention humaine dans les processus du delta et l'augmentation simultanée de la salinité et du niveau de l'eau des marécages côtiers se sont produits si rapidement que les marécages côtiers intertidaux et les basses terres côtières adjacentes (soit une superficie de 1 565 km²) se sont transformés en hautes eaux entre 1978 et 2000 (Barras *et al.*, 2003). [GT II 6.4.1]

Certaines des plus fortes incidences potentielles du changement climatique sur les estuaires pourraient être la conséquence de changements des caractéristiques de mélange physique dus aux changements du ruissellement d'eau douce (Scavia *et al.*, 2002). Les apports d'eau douce dans les estuaires influencent le temps de séjour de l'eau, l'apport d'éléments nutritifs, la stratification verticale, la salinité et le contrôle des taux de croissance du phytoplancton (Moore *et al.*, 1997). Les changements des débits des cours d'eau dans les environnements marins peu profonds et proches de la côte entraîneront des changements de la turbidité, de la salinité, de la stratification et de la disponibilité en éléments nutritifs (Justic *et al.*, 2005). [GT II 6.4.1.3]

4.1.3.4 Écosystèmes de montagne

La zonation des écosystèmes le long des pentes des montagnes dépend de la température et de l'humidité des sols. Des études récentes (Williams *et al.*, 2003; Pounds et Puschendorf, 2004; Andreone *et al.*, 2005; Pounds *et al.*, 2006) ont montré le danger disproportionné qui pèse sur les écosystèmes de montagne quant au risque d'extinction, en particulier d'espèces endémiques. [GT II 4.4.7] De nombreuses espèces d'amphibiens, de petits mammifères, de poissons, d'oiseaux et de plantes sont très vulnérables aux changements climatiques actuels et à venir qui altèrent leur niche de montagne hautement spécifique. [GT II 1.3.5.2, 4.4.7, 9.4.5]

Dans de nombreux bassins versants alimentés par la fonte des neiges, l'augmentation de la température a provoqué le décalage de l'ampleur et de la périodicité des épisodes hydrologiques. Une tendance à la précocité du débit fluvial de pointe au printemps et à l'augmentation des débits de base d'hiver a été observée en Amérique du Nord et en Eurasie. [GT II 1.3.2] Une plus grande partie des précipitations annuelles provient des chutes de pluie plutôt que des chutes de neige dans 74 % des stations météorologiques étudiées dans les montagnes de l'ouest des États-Unis entre 1949 et 2004 (Knowles *et al.*, 2006). Depuis les années 1970, la profondeur de la neige d'hiver et la couverture neigeuse de printemps ont diminué au Canada, en particulier dans l'ouest, où les températures de l'air ont augmenté constamment (Brown et Braaten, 1998). La couverture neigeuse au printemps et en été diminue dans l'ouest des États-Unis (Groisman *et al.*, 2004). L'équivalent en eau de la neige au 1^{er} avril a diminué entre 15 et 30 % depuis 1950 dans les montagnes de l'ouest de l'Amérique du Nord, en particulier à basse altitude au printemps, surtout du fait du réchauffement plutôt que des changements de précipitation (Mote *et al.*, 2005). Les pics d'écoulement fluvial dans les montagnes de l'ouest des États-Unis alimentées par la fonte des neiges se sont produits de 1 à 4 semaines plus tôt en 2002 qu'en 1948 (Stewart *et al.*, 2005). [GT II 14.2.1]

La durée et la profondeur de la couverture neigeuse, souvent liées à la température et aux précipitations moyennes (Keller *et al.*, 2005; Monson *et al.*, 2006), sont des facteurs essentiels pour de nombreux écosystèmes alpins (Körner, 1999). Le manque de couverture neigeuse expose les plantes et les animaux au gel, et influence l'approvisionnement en eau au printemps (Keller *et al.*, 2005). Si les déplacements des animaux sont perturbés par des configurations neigeuses changeantes, comme cela a été observé au Colorado (Inouye *et al.*, 2000), la mortalité des espèces sauvages pourrait augmenter du fait d'un décalage entre ces dernières et l'environnement. [GT II 4.4.7] Pour chaque degré Celsius d'augmentation de la température, la durée de la couverture neigeuse devrait diminuer de plusieurs semaines aux altitudes moyennes dans les Alpes européennes. Il est *pratiquement certain* que la flore européenne subira des changements majeurs en réponse au changement climatique, les changements de la durée de la couverture neigeuse étant un moteur plus important que les effets directs de la température sur le métabolisme animal. [GT II 12.4.3]

Un changement de ruissellement des glaciers a des répercussions significatives sur les écoservices. Le biote des cours d'eau de petits bassins versants dépendants de la fonte des glaciers est très vulnérable à la disparition locale. [GT II 1.3.1, 3.2, 3.4.3]

4.1.3.5 Forêts, savanes et pâturages

La disponibilité en eau est un facteur essentiel pour la reconstruction des systèmes forestiers et des pâturages au fur et à mesure du réchauffement climatique. On sait que le changement climatique modifie la probabilité d'une augmentation de l'ampleur et de la fréquence des feux incontrôlés, tout en créant des facteurs de stress pour les arbres, ce qui aggrave

indirectement les effets de ces perturbations. De nombreux écosystèmes forestiers sous les tropiques, les latitudes élevées et les hautes altitudes deviennent de plus en plus sensibles à la sécheresse et donc aux incendies, aux maladies et aux parasites consécutifs. [GT II chapitre 4, 5.1.2, 13.4] On a estimé que jusqu'à 40 % des forêts amazoniennes pourraient être affectées par des diminutions des précipitations, si minimales soient elles (Rowell et Moore, 2000). Les simulations de plusieurs modèles MCG sur les changements de précipitation en Amérique du Sud pour les 100 prochaines années prévoient une diminution significative (20 % ou plus) aux mois de juin, juillet et août dans le bassin amazonien, mais une légère augmentation (environ 5 %) aux mois de décembre, janvier et février. [GT I 11.6.3.2] Ces changements prévus des précipitations, couplés à une augmentation de la température, laissent présager le remplacement de certaines forêts amazoniennes par des écosystèmes qui sont plus résistants aux multiples contraintes occasionnées par l'augmentation de la température, des sécheresses et des incendies. [GT II 13.4.2]

Une augmentation des conditions de sécheresse dans plusieurs régions (Europe, quelques régions d'Amérique latine) pendant la période de croissance devrait accompagner l'augmentation des températures en été et la diminution des précipitations, avec des effets généralisés sur la productivité nette des écosystèmes forestiers. Les effets de la sécheresse sur les forêts incluent la mortalité due aux maladies, le stress de sécheresse et les parasites, une réduction de la résilience et des rétroactions biotiques qui varient d'un endroit à l'autre. [GT II 4.4.5] Dans certaines régions, les forêts devraient remplacer d'autres types de végétation, notamment la toundra et les pâturages, et la disponibilité en eau peut être un paramètre tout aussi important que la température et les effets de l'enrichissement en CO₂ sur la photosynthèse. [GT II 4.4.3, 4.4.5]

De nombreuses études ont évalué l'incidence directe de la fertilisation par le CO₂ et les effets du réchauffement sur les types de forêts et de pâturages dominants. Des études portant sur un large éventail d'espèces ligneuses et herbacées laissent entendre que l'augmentation de la photosynthèse en raison de l'enrichissement en CO₂ prévu dépendra de la disponibilité en eau. [GT II 4.4.3] Des effets plus importants de l'enrichissement en CO₂ dans les forêts et les savanes peuvent entraîner de notables rétroactions sur les ressources en eau. Par exemple, l'enrichissement en CO₂ de l'atmosphère peut nuire à la valeur nutritionnelle de la litière dans les cours d'eau (Tuchman *et al.*, 2003), et l'équilibre hydrique du sol peut être fortement influencé par une teneur élevée en CO₂ dans la plupart des types de pâturages. [GT II 4.4.10] La productivité des pâturages et de la savane est très sensible à la variabilité des précipitations. Par exemple, dans les évaluations de la productivité des prairies à herbes hautes, une augmentation de la variabilité des précipitations était plus significative que le volume des pluies, une augmentation de 50 % de la durée des périodes de sécheresse entraînant une réduction de 10 % de la productivité primaire nette (Fay *et al.*, 2003a). [GT II 4.4.3]

4.2 Agriculture et sécurité alimentaire, utilisation des terres et foresterie

4.2.1 Contexte

La productivité des systèmes agricoles et forestiers et des pêcheries dépend en grande partie de la distribution temporelle et spatiale des précipitations et de l'évaporation, ainsi que de la disponibilité des ressources en eau douce pour l'irrigation, en particulier pour les cultures. [GT II 5.2.1] Avec le changement climatique, les systèmes de production des régions marginales sont confrontés à une augmentation de la vulnérabilité climatique et des risques, en ce qui concerne l'eau à cause de facteurs dont la dégradation des ressources en sols via l'érosion des sols, une extraction excessive des eaux souterraines et la salinisation correspondante, ainsi que le surpâturage des terres arides (FAO, 2003). [GT II 5.2.2] Dans ces régions marginales, les cultures des petites exploitations sont particulièrement vulnérables au changement climatique et la variabilité du climat, et les sources de stress socioéconomique viennent souvent aggraver des conditions environnementales déjà difficiles. [GT II 5.2.2, tableau 5.2, encadré 5.3] Dans les forêts, on a démontré que les incendies et les pullulations d'insectes liés à la fréquence de phénomènes extrêmes augmentent la vulnérabilité au climat. Dans les pêcheries, la pollution de l'eau et les changements des ressources en eau augmentent également la vulnérabilité et le risque. [GT II 5.2.2]

4.2.1.1 Agriculture et sécurité alimentaire

L'eau joue un rôle prépondérant dans la production alimentaire au niveau régional et mondial. D'un côté, plus de 80 % des terres agricoles mondiales ne sont pas irriguées. Dans

ces régions, la productivité des cultures dépend uniquement d'un volume de pluie suffisant pour répondre aux besoins d'évaporation et assurer la distribution correspondante de l'humidité dans le sol (FAO, 2003). [GT II 5.4.1.2] Lorsque ces variables sont limitées par le climat, comme dans les régions arides et semi-arides des régions tropicales et subtropicales, ainsi que dans les régions de type méditerranéen en Europe, Australie et Amérique du Sud, la production agricole est très vulnérable au changement climatique (FAO, 2003). D'un autre côté, la production mondiale d'aliments dépend de l'eau, non seulement sous forme de précipitations, mais aussi en grande partie sous forme de ressources en eau disponibles pour l'irrigation. En effet, les terres irriguées, qui ne représentent que 18 % des terres agricoles mondiales, produisent 1 milliard de tonnes de blé par an, à savoir environ la moitié de l'approvisionnement total du monde. Cela s'explique par le rendement des cultures irriguées qui est de 2 à 3 fois plus élevé en moyenne que celui des terres non irriguées¹⁹ (FAO, 2003).

Tandis qu'un déficit d'eau entraîne la vulnérabilité de la production, l'excès d'eau peut également avoir des effets préjudiciables sur la productivité des cultures, soit directement, par exemple en affectant les propriétés du sol et en perturbant la croissance des plantes, soit indirectement, par exemple en troublant ou en retardant les actions nécessaires pour l'exploitation. Des phénomènes de pluies intenses, une humidité excessive dans le sol et les inondations perturbent la production d'aliments et les moyens de subsistance ruraux au niveau mondial (Rosenzweig *et al.*, 2002). [GT II 5.4.2.1]

¹⁹ Voir le paragraphe 1.3 pour une analyse des relations entre l'irrigation, le changement climatique et l'alimentation des nappes souterraines. Ces sujets sont également abordés dans les paragraphes 5.1.3 (concernant l'Afrique) et 5.2.3 (concernant l'Asie).

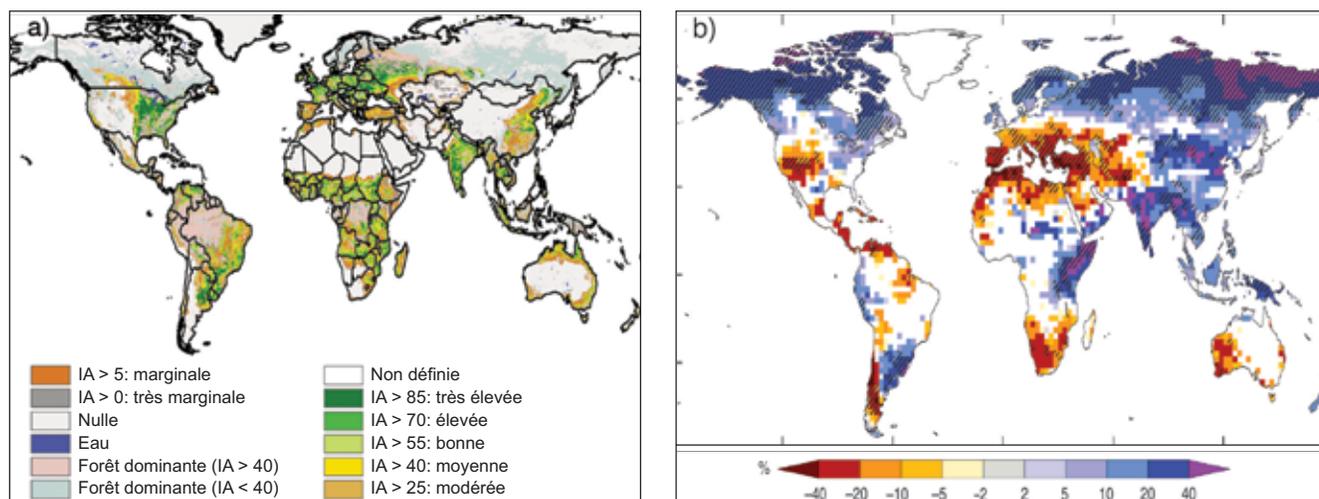


Figure 4.1: a) Adéquation actuelle des terres aux cultures non irriguées (hormis les écosystèmes forestiers) (d'après Fischer *et al.*, 2002b). IA = Indice d'adéquation [GT II figure 5.1a]; b) changement moyen prévu (en pourcentage) du ruissellement annuel moyen, simulé par un ensemble, entre la période actuelle (1980 à 1999) et 2090 à 2099. [D'après RSY figure 3.5]

L'eau joue un rôle prépondérant dans la sécurité alimentaire, car non seulement elle est indispensable dans les processus de préparation des aliments, mais elle influence aussi la productivité des récoltes et la production des aliments. Actuellement, 850 millions de personnes souffrent encore de malnutrition dans le monde (FAO, 2003). [GT II 5.3.2.1, 5.6.5] Les contraintes socioéconomiques des prochaines décennies entraîneront une augmentation de la compétition entre les besoins pour l'irrigation et la demande des secteurs non agricoles, et réduiront potentiellement la disponibilité et la qualité des ressources en eau pour les aliments. [GT II 3.3.2] Des études récentes indiquent qu'il est *improbable* que les objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) concernant la faim soient atteints d'ici 2015. [GT II 5.6.5] En même temps, au cours du siècle, le changement climatique pourrait davantage réduire la disponibilité en eau pour la production alimentaire mondiale du fait des changements moyens prévus des régimes de température et de précipitations, mais également du fait de l'augmentation prévue de la fréquence des phénomènes extrêmes, tels que les sécheresses et les inondations (Rosenzweig *et al.*, 2002). [GT II 5.6.5]

Les évaluations des incidences climatiques sur la production d'aliments sont, en général, grandement dépendantes des particularités des projections de précipitations du MCG utilisées. [GT II 5.4.1.2] Un large éventail de scénarios est actuellement disponible pour les précipitations. En général, les évaluations fondées sur des scénarios de diminution des précipitations régionales laissent entrevoir une diminution de la production des cultures et inversement. Les projections d'une augmentation de l'aridité dans plusieurs environnements de type méditerranéen (Europe, Australie et Amérique du Sud), ainsi que dans des régions tropicales arides et semi-arides marginales, en particulier l'Afrique subsaharienne, semblent être fondées quel que soit le modèle (voir figure 2.10). Ces régions risquent d'être plus vulnérables avec le changement climatique, comme indiqué à la figure 4.1. [GT II 5.3.1]

4.2.1.2 *Utilisation des terres et écosystèmes forestiers*

Les écosystèmes forestiers occupent environ quatre milliards d'hectares de terres, une superficie comparable à celle occupée par les cultures et les pâturages combinés. De ces terres, seulement environ 200 millions d'hectares sont exploitées pour la production forestière commerciale à l'échelle mondiale (FAO, 2003). [GT II 4.4.5, 5.1.1, 5.4.5]

Les forêts jouent un rôle déterminant dans l'approvisionnement, la qualité et la quantité de l'eau, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. L'importance des forêts en tant que bassins versants peut être amenée à augmenter considérablement dans les prochaines décennies, car les ressources en eau douce se raréfient, en particulier dans les pays en développement (Mountain Agenda, 1997; Liniger et Weingartner, 1998). [LULUCF 2.5.1.1.4; GT II 4.1.1]

Les forêts sont impliquées dans le cycle régional de l'eau, avec des effets potentiels importants des changements d'affectation des terres sur les climats locaux et régionaux (Harding, 1992; Lean *et al.*, 1996). En revanche, la protection des forêts peut avoir des effets bénéfiques sur l'atténuation des sécheresses et des crues, en particulier sous les tropiques (Kramer *et al.*, 1997; Pattanayak et Kramer, 2000). [LULUCF 2.5.1.1.6]

Le boisement et le reboisement sont susceptibles d'augmenter l'humidité, de diminuer la température et d'augmenter les précipitations dans les régions concernées (Harding, 1992; Blythe *et al.*, 1994). En revanche, le déboisement peut entraîner une diminution locale des précipitations et une augmentation de la température. En Amazonie et en Asie, il peut entraîner de nouvelles conditions climatiques inadaptées pour la régénération des espèces de la forêt tropicale (Chan, 1986; Gash et Shuttleworth, 1991; Meher-Homji, 1992). [LULUCF 2.5.1.1.6]

Les écosystèmes forestiers sont différemment sensibles au changement climatique (par exemple, Kirschbaum et Fischlin, 1996; Sala *et al.*, 2000; Gitay *et al.*, 2001), les biomes dont le facteur limitant est la température étant sensibles aux impacts du réchauffement, et les biomes dont le facteur limitant est l'eau étant sensibles à l'augmentation de la sécheresse. Certains écosystèmes, comme ceux qui dépendent des incendies, peuvent changer rapidement suite à des changements climatiques ou à d'autres changements environnementaux (Scheffer *et al.*, 2001; Sankaran *et al.*, 2005). [GT II 4.1, 4.4.5]

Les écosystèmes forestiers et leur biodiversité peuvent être particulièrement menacés en Afrique, du fait d'une combinaison de contraintes socioéconomiques et de facteurs liés à l'utilisation des terres et au changement climatique. [GT II 4.2] À l'horizon 2100, les incidences négatives peuvent entraîner une diminution de la qualité de l'eau ainsi que des biens et des services des écosystèmes sur 25 % de l'Afrique (notamment le sud et l'ouest). [GT II 4.RE, 4.4.8] En effet, des changements sont déjà détectés et documentés dans divers écosystèmes, en particulier dans le sud de l'Afrique. [GT II 9.2.1.4]

4.2.2 Observations

4.2.2.1 *Incidences climatiques et eau*

Bien qu'il soit admis que l'agriculture et la sylviculture sont très dépendantes du climat, il est difficile de trouver des preuves de changements observés liés aux changements climatiques régionaux, et en particulier à l'eau. L'agriculture et la sylviculture sont également fortement influencées par des facteurs non climatiques, en particulier des pratiques de gestion et des changements technologiques (Easterling, 2003) à l'échelle locale et régionale, ainsi que par les prix du marché et les politiques relatives aux subventions. [GT II 1.3.6]

Bien qu'il soit difficile d'identifier les réponses au récent changement climatique dans les systèmes humains, en raison de nombreux éléments moteurs non climatiques et de l'existence d'adaptations, des effets ont été détectés dans les systèmes forestiers et dans quelques systèmes agricoles. Des changements concernant plusieurs aspects du système de santé publique ont été liés au réchauffement récent. L'adaptation à ce réchauffement commence à être systématiquement documentée. Par rapport à d'autres facteurs, ce phénomène a eu des conséquences limitées sur l'agriculture et la sylviculture. On a cependant observé une progression significative de la phénologie dans ces deux domaines dans de grandes régions de l'hémisphère Nord, avec des réponses limitées de gestion des cultures. Dans de nombreuses régions, l'allongement de la période de croissance a contribué à l'augmentation observée de la productivité des forêts, tandis que des conditions plus chaudes et plus sèches sont en partie responsables de la réduction de la productivité des forêts et de l'augmentation des incendies de forêt en Amérique du Nord et dans le bassin méditerranéen. Tant l'agriculture que la sylviculture ont démontré leur vulnérabilité aux tendances récentes aux vagues de chaleur, aux sécheresses et aux crues. [GT II 1.3.6, 1.3.9, 5.2]

4.2.2.2 *CO₂ atmosphérique et dynamique de l'eau*

Les effets de la concentration élevée de CO₂ atmosphérique sur les fonctions végétales peuvent avoir des répercussions importantes sur les ressources en eau, étant donné que le rendement hydraulique au niveau de la feuille augmente du fait d'une résistance stomatique accrue par rapport aux concentrations actuelles. Pour les espèces végétales en C₃ (c'est-à-dire la plupart des cultures alimentaires), l'effet du CO₂ peut être relativement plus fort sur les plantes qui souffrent d'un stress hydrique que sur celles qui sont bien irriguées. [GT II TRE 5.3.3.1]

Cependant, les implications des interactions du CO₂ avec l'eau à grande échelle (c'est-à-dire au niveau du couvert forestier, du champ et de la région) sont vraiment incertaines. En général, on admet que les avantages d'une concentration élevée de CO₂ sur les relations entre les plantes et l'eau devraient être diminués par des besoins accrus en évaporation dans des conditions thermiques plus chaudes. [GT II TRE 5.3.3.1]

De nombreuses études récentes confirment et généralisent les résultats du troisième Rapport d'évaluation, selon lequel les changements des températures et des précipitations attendus au cours des prochaines décennies modifieront et, souvent, limiteront les effets directs du CO₂ sur les plantes. Par exemple, des températures élevées pendant la floraison peuvent diminuer les effets du CO₂ en réduisant le nombre, la taille et la qualité des graines (Thomas *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2004; Caldwell *et al.*, 2005). De même, une augmentation de la demande en eau liée au réchauffement peut réduire les éventuels effets positifs du

CO₂. Le rendement en grains de cultures de blé non irriguées poussant dans une atmosphère de 450 ppm de CO₂ s'accroît pour une augmentation de la température jusqu'à 0,8 °C, mais diminue si le réchauffement se poursuit au-delà de 1,5 °C; une irrigation est alors nécessaire pour contrecarrer les effets négatifs. [GT II 5.4.1.2]

Enfin, les physiologistes végétaux et les modélisateurs de cultures reconnaissent que les effets d'une concentration élevée de CO₂, mesurés dans un contexte expérimental et mis en œuvre dans les modèles, pourraient surestimer les réponses réelles au niveau du champ et de l'exploitation agricole. Cela s'explique par les nombreux facteurs limitants qui agissent typiquement au niveau du champ, tels que les parasites, les mauvaises herbes, la compétition pour les ressources, la qualité de l'eau, du sol et de l'air. Ces facteurs critiques sont peu étudiés en contexte expérimental à grande échelle et ne sont donc pas correctement intégrés dans les principaux modèles de croissance végétale. La compréhension de la dynamique essentielle qui caractérise les interactions d'un CO₂ élevé avec le climat, la qualité du sol et de l'eau, les parasites, les mauvaises herbes et les maladies, la variabilité climatique et la vulnérabilité des écosystèmes, reste une priorité pour la compréhension des incidences futures du changement climatique sur les systèmes gérés. [GT II 5.4.1, 5.8.2]

4.2.3 Projections

Les changements de la demande et de la disponibilité en eau suite au changement climatique affecteront grandement les activités agricoles et la sécurité alimentaire, la sylviculture et les pêcheries au XXI^e siècle. D'un côté, les changements des rapports évaporation/précipitations modifieront la demande en eau des plantes par rapport à une courbe de référence sans changement climatique. D'un autre côté, les configurations modifiées des pluies et des cycles de stockage au niveau des bassins versants changeront la disponibilité en eau saisonnière, annuelle et interannuelle pour les agroécosystèmes terrestres et aquatiques (FAO, 2003). Les changements climatiques augmentent la demande en irrigation dans la plupart des régions du monde en raison d'une diminution des précipitations et d'une augmentation de l'évaporation sous l'effet de l'augmentation de la température. [GT II 5.8.1]

Il est attendu que les changements prévus de la fréquence et de la sévérité des phénomènes climatiques extrêmes, notamment l'augmentation de la fréquence du stress thermique, des sécheresses et des inondations, auront des conséquences significatives sur les aliments, la sylviculture (et le risque d'incendies de forêt) et d'autres productions des agrosystèmes, en plus des incidences des changements des variables moyennes seules. [GT II 5.RE] En particulier, plus de 90 % des simulations prévoient des sécheresses accrues dans les régions subtropicales d'ici la fin du XXI^e siècle

[GT I RiD], tandis qu'une augmentation des extrêmes des précipitations est attendue dans les principales régions agricoles du sud et de l'est de l'Asie, de l'est de l'Australie et du nord de l'Europe. [GT I 11.3, 11.4, 11.7] Il convient de noter que les modèles d'incidence du changement climatique pour les aliments, les produits forestiers et les fibres n'incluent pas encore ces résultats récents sur les configurations prévues du changement de précipitations; une fois les effets des phénomènes extrêmes sur la productivité inclus, les incidences négatives devraient être plus graves que celles qui sont calculées actuellement. [GT II 5.4.1, 5.4.2]

Les changements des chiffres du ruissellement annuel moyen sont un indice de la disponibilité moyenne en eau pour la couverture végétale. Les changements prévus d'ici 2100 [GT II chapitre 3] suivent des configurations cohérentes: augmentation aux latitudes élevées et dans les régions tropicales humides, et diminution aux latitudes moyennes et dans certaines régions tropicales sèches (figure 4.1b)). Une diminution de la disponibilité en eau est un indice de stress hydrique accru et, en particulier, d'aggravation dans les régions dans lesquelles l'eau utilisable pour la production est déjà rare (par exemple, le bassin méditerranéen, l'Amérique centrale et les régions subtropicales d'Afrique et d'Australie, voir figure 4.1b)). [GT II 5.3.1]

Enfin, il sera important de reconnaître que les systèmes de production et les ressources en eau seront largement influencés par les interactions concurrentes des moteurs socioéconomiques et climatiques dans les décennies à venir. Par exemple, une demande accrue en eau d'irrigation dans l'agriculture dépendra des conditions climatiques modifiées et d'une augmentation de la demande alimentaire du fait de la croissance démographique; de plus, la disponibilité en eau pour la productivité forestière dépendra tout aussi bien des moteurs climatiques que des impacts anthropiques critiques, en particulier du déboisement dans les régions tropicales. Par exemple, dans le bassin amazonien, le déboisement combiné à un morcellement accru sont susceptibles de déclencher des sécheresses sévères dépassant le signal climatique, et donc d'augmenter les risques d'incendie. [GT II 5.3.2.2]

4.2.3.1 Cultures

En général, tandis qu'un réchauffement modéré des régions des latitudes élevées avantagerait les rendements des cultures et des pâturages, un réchauffement, même léger, dans les régions de faible latitude ou dans les régions à saisons sèches serait préjudiciable pour les rendements. Les résultats des modélisations sur un éventail de sites indiquent, dans les régions de latitude élevée, qu'une augmentation modérée à moyenne de la température locale (de 1 à 3 °C), accompagnée d'une augmentation du CO₂ et des changements de précipitations correspondants, peut avoir une incidence légèrement bénéfique sur les rendements des cultures. Cependant, dans les régions de faible

latitude, une augmentation même modérée de la température (de 1 à 2 °C) aurait *probablement* une incidence négative sur les rendements des principales cultures céréalières. Un réchauffement plus important aurait des répercussions de plus en plus négatives sur toutes les régions. [GT II 5.RE]

Les régions dans lesquelles l'agriculture est actuellement marginale, en grande partie à cause de sols pauvres combinés à une pénurie d'eau et à une pauvreté rurale, pourront être de plus en plus vulnérables aux incidences du changement climatique sur l'eau. De ce fait, même des changements climatiques minimes augmenteront le nombre de personnes susceptibles de souffrir de la faim, l'incidence se faisant surtout sentir en Afrique subsaharienne. [GT II 5.RE]

Une augmentation de la fréquence des extrêmes climatiques peut diminuer les rendements des cultures au-delà des incidences du changement climatique moyen. Depuis le troisième Rapport d'évaluation, des études de simulation ont considéré différents aspects de la variabilité climatique accrue dans les scénarios de changement climatique. Rosenzweig *et al.* (2002) ont calculé que, selon des scénarios d'augmentation des précipitations intenses, les pertes de production dues à une humidité du sol excessive (déjà significative actuellement) doubleraient aux États-Unis pour atteindre 3 milliards de dollars des États-Unis par an en 2030. Au Bangladesh, le risque de perte des cultures devrait augmenter en raison de l'augmentation de la fréquence des crues, du fait du changement climatique. Enfin, les études d'impact du changement climatique qui intègrent une augmentation de l'intensité des chutes de pluie indiquent une augmentation du risque d'érosion des sols, dans les régions arides et semi-arides, l'intensification des précipitations peut être associée à un risque accru de salinisation, à cause de l'augmentation de la perte d'eau au-delà de la zone racinaire de la culture. [GT II 5.4.2.1]

Les impacts du changement climatique sur les besoins en eau d'irrigation peuvent être importants. Quelques nouvelles études ont poursuivi la quantification des incidences du changement climatique sur les besoins d'irrigation au niveau mondial et régional, indépendamment des effets positifs du CO₂ élevé sur le rendement hydraulique des cultures. Döll (2002), en considérant les incidences directes du changement climatique sur la demande en évaporation, mais sans tenir compte des effets du CO₂, a estimé que les besoins nets en irrigation des cultures (c'est-à-dire, après les pertes par transpiration) augmenteraient entre 5 et 8 % dans le monde d'ici 2070, avec des augmentations régionales plus importantes (à savoir +15 %) dans le sud-est de l'Asie. [GT II 5.4.2.1]

Dans une étude qui englobait les effets positifs du CO₂ sur le rendement hydraulique des cultures, Fischer *et al.* (2006) ont trouvé une augmentation de 20 % des besoins nets en irrigation au niveau mondial à l'horizon 2080, avec des incidences plus

importantes dans les pays développés que dans les pays en développement, qui s'expliqueraient par une augmentation de la demande en évaporation et par un allongement des périodes de croissance dans un contexte de changement climatique. Fischer *et al.* (2006) et Arnell *et al.* (2004) ont également prévu une augmentation du stress hydrique (mesuré en tant que rapport des prélèvements pour l'irrigation sur les ressources en eau renouvelables) au Moyen-Orient et dans le sud-est de l'Asie. Des études régionales récentes ont également souligné la dynamique critique du changement climatique et de l'eau dans des régions irriguées importantes, telles que le nord de l'Afrique (augmentation des besoins en irrigation; Abou-Hadid *et al.*, 2003) et la Chine (diminution des besoins; Tao *et al.*, 2003a). [GT II 5.4.2.1]

Quelques études d'intégration ont été réalisées à l'échelle nationale. Aux États-Unis, deux études de modélisation sur l'adaptation du secteur agricole au changement climatique (c'est-à-dire sur les décalages entre production irriguée et production non irriguée) prévoient une diminution des régions irriguées et des prélèvements au-delà de 2030, selon divers scénarios climatiques (Reilly *et al.*, 2003; Thomson *et al.*, 2005a). Cela s'explique par la diminution de l'écart de rendement entre l'agriculture irriguée et non irriguée, engendrée par une réduction du rendement des cultures irriguées du fait de la hausse de la température, ou par l'augmentation du rendement des cultures non irriguées du fait de l'augmentation des précipitations. Ces études ne tiennent pas compte de l'augmentation de la variabilité des précipitations journalières et, de ce fait, les rendements des cultures non irriguées sont probablement surestimés. [GT II 3.5.1]

Dans le cas des pays en développement, une augmentation de 14 % du prélèvement d'eau pour l'irrigation d'ici 2030 a été prévue dans une étude de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) qui ne tenait pas compte des incidences du changement climatique (Bruinsma, 2003). Cependant, les quatre scénarios de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire prévoient des augmentations bien inférieures du prélèvement pour l'irrigation à l'échelle mondiale, étant donné qu'ils estiment que les régions irriguées n'augmenteront que de 0 à 6 % d'ici 2030, et de 0 à 10 % d'ici 2050. [GT II 3.5.1]

L'augmentation de la consommation d'eau sera *probablement* spectaculaire dans les secteurs domestique et industriel, les prélèvements augmentant de 14 à 83 % d'ici 2050 (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005a, b). Cette hypothèse est fondée sur l'idée que la valeur de l'eau sera beaucoup plus élevée pour les utilisations domestique et industrielle, ce qui est particulièrement vrai dans des conditions de stress hydrique. [GT II 3.5.1]

L'agriculture irriguée pourrait être localement confrontée à de nouveaux problèmes liés à la distribution spatiale et

temporelle de l'écoulement fluvial. Par exemple, aux basses latitudes, en particulier dans le sud-est de l'Asie, une fonte des neiges précoce pourrait entraîner des inondations au printemps et une pénurie d'eau pour l'irrigation en été. [GT II 5.8.2]

4.2.3.2 Pâturages et bétail

De nombreux parcours du monde se trouvent dans les régions semi-arides et sont sensibles aux déficits d'eau; toute diminution future des ressources en eau aura une grande influence sur leur capacité de charge. De ce fait, une augmentation de la variabilité climatique et des sécheresses pourrait entraîner une perte de bétail. En particulier, l'incidence sur la productivité animale de l'augmentation de la variabilité des situations météorologiques sera *probablement* bien supérieure aux effets liés aux changements des conditions climatiques moyennes. Les pertes catastrophiques les plus fréquentes dues à un manque de conditionnement préalable aux phénomènes météorologiques se produisent dans les terrains d'élevage confinés, les pertes économiques découlant d'une diminution de la performance du bétail étant plusieurs fois supérieures aux pertes par mort de bétail. [GT II 5.4.3.1]

De nombreux parcours dans le monde sont influencés par les épisodes d'*El Niño*-oscillation australe (ENSO). Lors de sécheresses liées à ces épisodes, les régions sèches sont exposées à une rétroaction positive entre la dégradation des sols et de la végétation, et les réductions des précipitations, avec des conséquences en termes de perte de terres pastorales et cultivées. [GT II 5.4.3.1] Cependant, alors que, dans sa contribution au troisième Rapport d'évaluation, le Groupe de travail I a indiqué la probabilité accrue d'une augmentation de la fréquence du phénomène ENSO avec le changement climatique, dans sa contribution au quatrième Rapport d'évaluation, le Groupe de travail n'a pas trouvé de corrélation entre le phénomène ENSO et le changement climatique. [GT I TRE RiD; GT I 10.3.5.4]

Une étude portant sur des données expérimentales dans le monde entier laisse à penser qu'un faible réchauffement augmente généralement la productivité des pâturages, les réponses positives les plus nettes correspondant aux latitudes élevées, et que la productivité et la composition des espèces végétales dans les parcours sont en corrélation étroite avec les précipitations. De surcroît, des résultats récents (voir figure 4.1) laissent envisager une diminution des précipitations dans certaines des principales régions de pâturage et de parcours (notamment l'Amérique du Sud, le sud et le nord de l'Afrique, l'ouest de l'Asie, l'Australie et le sud de l'Europe). [GT II 5.4.3.2]

Un CO₂ atmosphérique élevé peut réduire l'appauvrissement en eau des sols dans divers pâturages indigènes et semi-indigènes méditerranéens et tempérés. Cependant, si elles viennent s'ajouter au changement climatique, l'augmentation de la variabilité des précipitations et la

hausse de la température pourraient engendrer des restrictions d'humidité du sol plus sévères, et donc une réduction de la productivité qui viendrait compenser les avantages du CO₂. D'autres incidences sur le bétail agissent directement via l'augmentation de la charge thermique. [GT II 5.4.3.2]

4.2.3.3 Pêcheries

Les incidences négatives du changement climatique sur l'aquaculture et les pêcheries d'eau douce sont, entre autres: le stress dû à une augmentation de la température et de la demande en oxygène et à une diminution du pH, les incertitudes quant à la qualité et au volume de l'eau dans l'avenir, les phénomènes météorologiques extrêmes, l'augmentation de la fréquence des maladies et des épisodes toxiques, l'élévation du niveau de la mer et les conflits d'intérêts avec la protection du littoral, l'incertitude quant à l'approvisionnement futur en farines et huiles de poisson issues des pêches de capture.

Une étude de cas des divers stress pouvant affecter les pêcheries dans les pays en développement est présentée dans l'encadré 4.1. [GT II 5.4.6.1]

Les incidences positives incluent une augmentation de la vitesse de croissance et de l'efficacité de conversion de la nourriture, un allongement de la période de croissance, l'extension des territoires et l'utilisation de nouvelles zones du fait de la réduction de la couche de glace. [GT II 5.4.6.1]

4.2.4 Adaptation, vulnérabilité et développement durable

La gestion de l'eau est un volet critique qui doit s'adapter en vue des contraintes climatiques et socioéconomiques des décennies à venir. Les changements de la consommation d'eau découleront des effets combinés des changements de

Encadré 4.1: Changement climatique et pêcheries dans la partie inférieure du Mékong: un exemple des multiples stress dus à l'activité humaine dans un système de pêcheries de mégadelta [GT II encadré 5.3]

Les pêcheries sont essentielles pour la vie des personnes, en particulier pour les populations pauvres des zones rurales qui habitent dans les pays de la partie inférieure du Mékong. Deux tiers des 60 millions de personnes vivant dans ce bassin participent de près ou de loin aux pêcheries, qui représentent près de 10 % du PIB du Cambodge et de la République démocratique populaire lao. On dénombre environ 1 000 espèces de poissons dans ce fleuve, en sus des nombreuses espèces marines vagabondes, ce qui en fait l'une des faunes les plus prolifiques et variées du monde (MRC, 2003). Les estimations récentes des prises annuelles effectuées par les pêches de capture uniquement dépassent les 2,5 millions de tonnes (Hortle et Bush, 2003), dont 30 % provenant du delta.

Les effets directs du changement climatique auront pour origine le changement de la configuration des précipitations, de la fonte des neiges et de l'élévation du niveau de la mer, qui affecteront l'hydrologie et la qualité de l'eau. Les effets indirects résulteront d'un changement de la configuration végétale qui pourrait altérer la chaîne alimentaire et augmenter l'érosion des sols. Il est probable que les incidences humaines sur les pêcheries (provoquées par la croissance démographique, l'atténuation des crues, l'augmentation des prélèvements d'eau, les changements d'affectation des terres et la surexploitation de la pêche) seront plus importantes que les effets climatiques, mais les contraintes sont étroitement liées.

Une analyse de l'incidence des scénarios du changement climatique sur le débit du Mékong (Hoanh *et al.*, 2004) a estimé que le débit mensuel maximal augmenterait de 35 à 41 % dans le bassin et de 16 à 19 % dans le delta (la valeur la plus basse correspondant aux années 2010 à 2038 et la valeur la plus élevée aux années 2070 à 2099, par rapport aux niveaux de 1961 à 1990). Le débit mensuel minimum devrait diminuer entre 17 et 24 % dans le bassin et entre 26 et 29 % dans le delta. Une augmentation des inondations serait bénéfique pour les rendements des pêcheries, mais une diminution des habitats en saison sèche pourrait diminuer le recrutement de certaines espèces. Cependant, les interventions de gestion planifiée de l'eau, principalement sous forme de barrages, devraient avoir des effets opposés sur l'hydrologie, à savoir diminuer légèrement les débits de saison humide et augmenter considérablement les débits de la saison sèche (Banque mondiale, 2004b).

Les modèles indiquent que même une légère élévation du niveau de la mer de 20 cm entraînerait un décalage des lignes de contour des niveaux d'eau dans le delta du Mékong de 25 km vers l'intérieur des terres pendant la saison des crues, et la remontée de l'eau de mer vers l'amont des rivières (même si elle est confinée dans des canaux) pendant la saison sèche (Wassmann *et al.*, 2004). Le déplacement de l'eau de mer vers l'intérieur des terres modifierait significativement la composition des espèces des pêcheries, mais ne nuirait pas à leurs rendements globaux.

la disponibilité en eau, des changements de la demande en eau des terres, ainsi que d'autres secteurs concurrents, notamment les zones urbaines, et des changements de gestion de l'eau.

Les pratiques qui augmentent la productivité de l'utilisation d'eau pour l'irrigation, définie comme la production des cultures par unité d'utilisation de l'eau, peuvent fournir un potentiel d'adaptation significatif pour tous les systèmes de production des terres dans le cadre du changement climatique à venir. En même temps, il est nécessaire d'améliorer l'efficacité de l'irrigation pour garantir la disponibilité en eau pour la production alimentaire et pour les besoins concurrents de l'homme et de l'environnement. [GT II 3.5.1]

Plusieurs études de simulation permettent d'envisager la possibilité d'avantages d'adaptation relatifs dans le secteur des terres avec un réchauffement faible à modéré, bien que plusieurs stratégies de réponse risquent d'aggraver le stress relatif à l'eau et à d'autres ressources de l'environnement au fur et à mesure du réchauffement. Les actions d'*adaptation autonome* sont définies comme des réponses qui seront mises en œuvre par des agriculteurs individuels, des communautés rurales et/ou des organisations d'agriculteurs, en fonction du changement climatique réel ou perçu dans les décennies à venir, et sans intervention ni coordination des gouvernements régionaux et nationaux, ni sans accords internationaux. C'est ainsi qu'une mauvaise adaptation, par exemple, la décision de cultiver des terres marginales ou l'adoption de pratiques culturelles non durables lorsque les rendements chutent, peut augmenter la dégradation des terres et mettre en danger la biodiversité des espèces sauvages et domestiques, et éventuellement mettre en péril la capacité future à répondre à un risque climatique croissant ultérieurement au cours du siècle. Une *adaptation planifiée*, incluant des changements de politiques, d'institutions et d'infrastructures dédiées, sera par conséquent nécessaire pour faciliter et maximiser les bénéfices à long terme des réponses d'adaptation au changement climatique. [GT II 5.5]

4.2.4.1 Adaptation autonome

Les solutions pour une adaptation autonome sont essentiellement des extensions ou des intensifications des activités existantes de gestion des risques et d'amélioration de la production, et sont donc déjà disponibles pour les agriculteurs et les communautés. En ce qui concerne l'eau, ces solutions comprennent :

- L'adoption de variétés ou d'espèces plus résistantes au choc thermique et à la sécheresse;
- La modification des techniques d'irrigation, y compris le volume, la périodicité ou la technologie;
- L'adoption de techniques d'utilisation rationnelle de l'eau pour la «capture» de l'eau, la conservation de l'humidité du sol (par exemple, la rétention des résidus de culture), et la diminution de l'engorgement et de l'intrusion d'eau salée;
- L'amélioration de la gestion de l'eau pour éviter l'engorgement, l'érosion et le lessivage;

- La modification des calendriers culturels, c'est-à-dire le calendrier ou le lieu des activités culturelles;
 - La mise en œuvre de prévisions climatiques saisonnières.
- D'autres stratégies d'adaptation peuvent impliquer des changements d'affectation des terres, pour profiter de conditions agroclimatiques modifiées. [GT II 5.5.1]

Quelques études de simulation montrent l'importance de l'eau d'irrigation en tant que technique d'adaptation destinée à réduire les incidences du changement climatique. Cependant, en général, les projections suggèrent que le plus grand avantage relatif de l'adaptation devrait intervenir dans un contexte de réchauffement faible à modéré, et que les pratiques d'adaptation qui impliquent une augmentation de la consommation d'eau d'irrigation peuvent en réalité faire peser des contraintes supplémentaires sur les ressources aquatiques et environnementales au fur et à mesure de l'augmentation du réchauffement et de la demande d'évaporation. [GT II 5.8.1]

De nombreuses stratégies d'adaptation dans des secteurs essentiels de la production autres que l'agriculture ont également été explorées, bien qu'elles ne soient pas centrées directement sur des problèmes liés à l'eau. Les stratégies d'adaptation qui peuvent néanmoins influencer la consommation d'eau incluent, pour les systèmes d'élevage, un changement de la rotation des pâturages, une modification des périodes de pâture, une altération des espèces ou des races fourragères et animales, un changement de l'intégration dans les systèmes mixtes de cultures ou d'élevage, notamment l'utilisation de cultures fourragères adaptées, la garantie d'un approvisionnement en eau adéquat, ainsi que l'utilisation d'aliments complémentaires et de concentrats. Les stratégies d'adaptation des éleveurs des régions semi-arides et arides du Kenya et du sud de l'Éthiopie, sont abordées dans l'encadré 4.2. [GT II 5.4.7]

Les stratégies d'adaptation dans la sylviculture peuvent inclure des changements dans l'intensité de la gestion, le mélange des espèces, les périodes de rotation, l'adaptation à une modification de la dimension et de la qualité du bois, ainsi que l'adaptation des systèmes de gestion des incendies. [GT II 5.5.1]

En ce qui concerne les écosystèmes marins, hormis l'aquaculture et certaines pêcheries d'eau douce, l'exploitation des populations naturelles de poissons empêche une adaptation de la gestion au changement climatique recommandée pour les secteurs de l'agriculture, de l'élevage et de la sylviculture. Les solutions d'adaptation sont donc centrées sur la modification de l'étendue et de l'effort de capture. L'étendue des mesures d'adaptation autonome est de plus en plus restreinte du fait de l'application de nouvelles réglementations qui régissent l'exploitation des écosystèmes marins et des pêcheries. [GT II 5.5.1]

Si elles sont largement adoptées, les stratégies d'adaptation des systèmes de production ont un potentiel important pour contrecarrer les incidences négatives du changement

climatique et profiter des incidences positives. Cependant, peu d'évaluations ont porté sur l'efficacité et l'étendue de l'adoption de ces adaptations, étant donné la nature complexe de la prise de décisions, la diversité des réponses d'une région à l'autre, les délais de mise en œuvre et les éventuelles barrières économiques, institutionnelles et culturelles à surmonter. Par exemple, la capacité d'adaptation réalisable des communautés d'agriculteurs ou d'éleveurs à faibles moyens de subsistance est généralement considérée comme très faible. De même, de vastes superficies de forêt sont soumises à une gestion humaine directe minimale, ce qui limite les opportunités d'adaptation. Même dans les forêts plus intensivement gérées, où les activités d'adaptation sont plus réalisables, des délais importants entre la plantation et la récolte peuvent compliquer l'adoption de stratégies d'adaptation efficaces. [GT II 5.1.1]

4.2.4.2 Adaptation planifiée

Les solutions d'adaptation planifiée devraient se concentrer sur le développement de nouvelles infrastructures, politiques et institutions qui soutiennent, facilitent, coordonnent et maximisent les avantages de nouvelles mesures de gestion et d'utilisation des terres. Cela peut être obtenu en général via une meilleure gouvernance, y compris la prise en compte du changement climatique dans des programmes de développement, l'augmentation des investissements dans des infrastructures d'irrigation et des

techniques d'utilisation rationnelle de l'eau, la garantie d'infrastructures adéquates pour le transport et le stockage, la révision du régime foncier (notamment des droits de propriétés bien définis) et l'établissement de marchés accessibles et performants pour les produits, les apports (notamment des stratégies de tarification de l'eau) et les services financiers (dont l'assurance). [GT II 5.5]

Une adaptation planifiée et la coordination des politiques entre diverses institutions peuvent être nécessaires pour faciliter l'adaptation au changement climatique, en particulier lorsque la chute des rendements entraîne des contraintes qui poussent à cultiver des terres marginales ou à adopter des pratiques culturelles non durables qui augmentent la dégradation des terres et l'utilisation des ressources, dont l'eau. [GT II 5.4.7]

Un certain nombre d'évaluations d'adaptation à l'échelle mondiale, nationale et du bassin montrent que, en général, les bassins semi-arides et arides sont les plus vulnérables au stress hydrique. Si les précipitations diminuent, la demande en eau d'irrigation ne permettra pas de satisfaire toutes les autres demandes. Les changements prévus pour l'écoulement fluvial dans les bassins du Sacramento-Joaquin et du fleuve Colorado indiquent que la demande en eau actuelle ne pourra pas être satisfaite à l'horizon 2020, même avec des pratiques de gestion adaptatives. Une utilisation accrue de

Encadré 4.2: Stratégies d'adaptation adoptées par les éleveurs du nord du Kenya et du sud de l'Éthiopie [GT II encadré 5.5]

En Afrique, l'élevage s'est adapté aux environnements rudes avec une très grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations (Ellis, 1995). Plusieurs études récentes (Ndikumana *et al.*, 2000; Hendy et Morton, 2001; Oba, 2001; McPeak et Barrett, 2001; Morton, 2006) ont été dédiées aux stratégies d'adaptation utilisées par les éleveurs lors des récentes sécheresses dans le nord du Kenya et le sud de l'Éthiopie, et aux adaptations à long terme sous-jacentes.

- La *mobilité* reste l'adaptation aux variations temporelles et spatiales des précipitations la plus importante adoptée par les éleveurs. Pendant les années de sécheresse, de nombreuses communautés utilisent des zones de pâturage de repli qui sont inutilisées lors des saisons sèches «normales» du fait de la distance, de contraintes liées au régime foncier et de problèmes de maladies animales ou de conflits. Cependant, l'invasion et l'individualisation des terres communales de pâturage, ainsi que le souhait de s'établir pour accéder aux services humains et à l'aide alimentaire, ont sévèrement limité la mobilité des éleveurs.
- Les éleveurs procèdent au *regroupement des troupeaux*, et de très nombreux indices laissent maintenant à penser qu'il s'agit là d'une forme rationnelle d'assurance contre la sécheresse.
- Une petite proportion d'éleveurs placent désormais une partie de leurs richesses sur des comptes en banque et d'autres utilisent des mécanismes d'épargne et de crédit officieux via des commerçants.
- Les éleveurs utilisent également des *compléments alimentaires* pour le bétail, achetés ou issus de l'ébranchage des arbres, en tant que stratégie d'adaptation. Ils intensifient leur *gestion des maladies animales* via des techniques indigènes et scientifiques. Ils paient pour *accéder à l'eau* via des forages électriques.
- La *diversification des moyens de subsistance* dans cette région s'oriente principalement vers des activités à bas revenus ou non durables vis-à-vis de l'environnement, telle la production de charbon, plutôt que vers des stratégies d'adaptation visant à réduire la vulnérabilité préalablement.
- Un certain nombre de *mécanismes intracommunautaires* assurent aux populations démunies un accès aux produits de l'élevage et à l'exploitation d'animaux vivants. Ces mécanismes semblent cependant se dégrader du fait de risques covariables élevés au sein des communautés.

l'irrigation réduirait à la fois le ruissellement et l'écoulement vers l'aval (Eheart et Tornil, 1999). [GT II 3.5.1]

Les politiques visant à récompenser les améliorations de l'efficacité de l'irrigation, via des mécanismes de marché ou un développement de la réglementation et une meilleure gouvernance, représentent un outil important pour améliorer la capacité d'adaptation à l'échelle régionale. Les conséquences involontaires pourraient être une augmentation de la consommation d'eau en amont, les utilisateurs en aval étant privés d'une eau qui serait retournée au cours d'eau sous forme de restitution (Huffaker, 2005). [GT II 3.5.1]

En sus des techniques déjà disponibles actuellement pour les agriculteurs et les gestionnaires des terres, il est nécessaire de proposer de nouvelles solutions techniques via une recherche dédiée et des efforts de développement. Ces solutions doivent être planifiées et mises en œuvre dès à présent, afin d'augmenter la capacité globale à répondre au changement climatique dans les décennies à venir. Les solutions techniques visant à étendre la recherche-développement incluent la sélection traditionnelle et la biotechnologie pour améliorer la résistance des espèces cultivées et fourragères, du bétail, des forêts et des poissons des pêcheries aux stress climatiques, tels que la sécheresse et les inondations (encadré 4.3).

Encadré 4.3: La biotechnologie facilitera-t-elle l'adaptation agricole et forestière? [GT II encadré 5.6]

La biotechnologie et la sélection traditionnelle peuvent permettre de développer de nouveaux cultivars dotés de qualités améliorées et mieux adaptés aux conditions du changement climatique. Ces qualités sont la résistance au stress dû à la sécheresse et aux températures, ainsi que la résistance aux parasites, à la salinité et à l'engorgement. Des adaptations supplémentaires recherchées dans les nouveaux cultivars sont des changements de phénologie ou des réponses améliorées à une concentration élevée en CO₂. En ce qui concerne l'eau, un certain nombre d'études se sont penchées sur les modifications génétiques des principales espèces cultivées (notamment, le maïs et le soja), qui augmentent la tolérance au déficit en eau (telles qu'examinées par Drennen *et al.*, 1993; Kishor *et al.*, 1995; Pilon-Smits *et al.*, 1995; Cheikh *et al.*, 2000) même si cette propriété ne s'étend pas à l'ensemble des plantes cultivées. En général, on n'en sait actuellement pas assez sur la manière dont les qualités désirées obtenues par modification génétique se réalisent dans les applications agricoles et forestières réelles (Sinclair et Purcell, 2005).

4.2.4.3 Sécurité alimentaire et vulnérabilité

Les quatre dimensions de la sécurité alimentaire, à savoir, la disponibilité alimentaire (production et commerce), l'accès aux aliments, la stabilité des approvisionnements alimentaires et l'utilisation des aliments (processus réels impliqués dans la préparation et la consommation d'aliments) seront *probablement* affectées par le changement climatique. Fait important, la sécurité alimentaire dépendra non seulement des incidences climatiques et socioéconomiques sur la production alimentaire, mais également (et de manière critique) sur les changements des flux commerciaux, des stocks et de la politique de l'aide alimentaire. En particulier, le changement climatique entraînera des incidences mixtes et géographiquement variables sur la production des aliments, et donc sur l'accès aux aliments. Les pays tropicaux en développement, dont beaucoup disposent de faibles ressources en terres et en eau et qui sont déjà confrontés à une grave insécurité alimentaire, pourraient être particulièrement vulnérables au changement climatique. [GT II 5.6.5]

Les changements de fréquence et d'intensité des sécheresses et des inondations affecteront la stabilité des approvisionnements alimentaires critiques et leur accès. Les déficits de pluie peuvent réduire considérablement les rendements des cultures et le nombre de têtes de bétail dans les régions tropicales semi-arides. L'insécurité alimentaire et la perte de moyens de subsistance seraient aggravées par la perte de terres cultivées et de nourriceries littorales suite à l'inondation et à l'érosion du littoral dans les régions basses. [GT II 5.6.5]

Le changement climatique peut également affecter l'utilisation des aliments via des incidences sur les ressources environnementales, avec des conséquences supplémentaires importantes pour la santé. [GT II chapitre 8] Par exemple, une diminution de la disponibilité en eau dans les régions déjà pauvres en eau, en particulier les régions subtropicales, a des répercussions négatives directes sur la transformation et la consommation des aliments. En revanche, le risque accru d'inondation des établissements humains dans les régions côtières dû à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation des fortes précipitations peut augmenter la contamination des aliments et les maladies, et restreindre les habitudes de consommation. [GT II 5.6.5]

4.2.4.4 Problèmes liés à la qualité de l'eau

Dans les pays en développement, la qualité microbiologique de l'eau est médiocre du fait du manque d'assainissement, de l'absence de procédés de traitement adéquats et de conditions sanitaires médiocres (Lipp *et al.*, 2001; Jiménez, 2003; Maya *et al.*, 2003; OMS, 2004). Le changement climatique pourrait imposer des contraintes supplémentaires sur la qualité de l'eau, en particulier dans les pays en développement (Magadza, 2000; Kashyap, 2004; Pachauri, 2004). À l'heure actuelle, aucune étude ne s'est encore

penchée sur les cycles de vie des micro-organismes dans les pays en développement dans un contexte de changement climatique, notamment sur les effets de la consommation d'eaux usées mal traitées pour l'irrigation et ses liens avec les épidémies endémiques d'helminthiase (OMS/UNICEF, 2000). [GT II 3.4.4]

Environ 10 % de la population mondiale consomme des cultures irriguées avec des eaux usées non traitées ou mal traitées, surtout dans les pays en développement d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine. Ce nombre devrait augmenter avec la croissance démographique et la demande alimentaire. [GT II 8.2.5] L'utilisation accrue d'eaux usées correctement traitées pour l'irrigation est donc une stratégie pour combattre tant la rareté de l'eau que certains problèmes de santé connexes. [GT II 3.4.4]

4.2.4.5 *Communautés rurales, développement durable et conflits pour l'eau*

La coopération transfrontalière dans le domaine de l'eau est reconnue comme une politique efficace et un outil de gestion qui permettrait d'améliorer la gestion de l'eau dans de vastes régions qui partagent des ressources communes. Le changement climatique et une demande en eau accrue dans les décennies à venir représenteront un défi supplémentaire pour de tels accords-cadres, en augmentant la probabilité de conflits au niveau local. Par exemple, des mesures unilatérales qui visent à s'adapter aux pénuries d'eau dues au changement climatique peuvent mener à une concurrence accrue pour les ressources en eau. De plus, des décalages dans la productivité des terres pourraient déboucher sur la mise en place d'un éventail de systèmes agricoles nouveaux ou modifiés nécessaires pour maintenir la production, et notamment des pratiques d'intensification. Ces dernières pourraient, à leur tour, entraîner des contraintes environnementales supplémentaires et provoquer une perte d'habitat, une réduction de la biodiversité, l'envasement, l'érosion et la dégradation des sols. [GT II 5.7]

Des incidences sur le commerce, sur le développement économique et environnemental et sur l'utilisation des terres pourraient également découler de mesures mises en œuvre pour remplacer les combustibles fossiles par des biocarburants, par exemple via le Plan d'action européen pour la biomasse. La production de biocarburants à grande échelle pose divers problèmes, concernant en particulier les besoins en engrais et en pesticides, le cycle des éléments nutritifs, le bilan énergétique, les incidences sur la biodiversité, l'hydrologie et l'érosion, les conflits avec la production d'aliments et le montant des subventions financières indispensables. En fait, les décennies à venir obligeront notamment à équilibrer la concurrence autour des terres et des matières premières nécessaires pour l'alimentation et pour les secteurs forestiers et énergétiques, par exemple en trouvant des solutions qui garantissent

l'alimentation et le droit au développement rural à l'échelle locale tout en optimisant les besoins en matière d'énergie et d'atténuation des effets climatiques. [LULUCF 4.5.1]

En Amérique du Nord, les sécheresses pourraient augmenter à l'intérieur du continent et les zones de production pourraient se décaler vers le nord (Mills, 1994), en particulier en ce qui concerne la production de maïs et de soja (Brklacich *et al.*, 1997). [GT II TRE 15.2.3.1] Au Mexique, des pertes de production pourraient être entraînées par les sécheresses, au fur et à mesure de la diminution des zones agroécologiques propices à la culture du maïs (Conde *et al.*, 1997). [GT II TRE 14.2.2.1] Pour des raisons sociales, politiques, géographiques et environnementales, la sécheresse est un problème important dans toute l'Australie. Un changement climatique vers des conditions plus sèches dues à une diminution des précipitations et à une augmentation de la demande d'évaporation, pourrait conduire à déclarer un état de sécheresse plus fréquemment ou pour une durée plus longue dans le cadre de la politique australienne actuelle de lutte contre la sécheresse. [GT II TRE 12.5.6]

Les ressources en eau pour une consommation domestique, agricole et industrielle font partie des principales vulnérabilités de l'Afrique. Dans des bassins fluviaux communs, des protocoles de coopération régionale sont nécessaires pour réduire le plus possible les incidences négatives et le risque de conflit. Par exemple, la superficie du lac Tchad varie de 20 000 km² pendant la saison sèche à 50 000 km² pendant la saison des pluies. Tandis que des frontières précises ont été définies entre le Tchad, le Nigéria, le Cameroun et le Niger, des secteurs de ces frontières qui sont situés dans les rivières qui se déversent dans le lac Tchad n'ont jamais été définis et des complications supplémentaires surviennent lors des inondations et des décrues. Des problèmes similaires entre le Botswana et la Namibie autour du fleuve Kovango ont provoqué une confrontation militaire. [GT II TRE 10.2.1.2]

La rareté croissante de l'eau, l'augmentation de la population, la dégradation des écosystèmes d'eau douce partagés et des demandes concurrentes pour des ressources naturelles en diminution, réparties dans une région si vaste qui concerne de nombreux pays, sont susceptibles de générer des conflits bilatéraux et multilatéraux. En Afrique semi-aride, l'élevage est la principale activité économique, les communautés d'éleveurs incluant des migrants transnationaux à la recherche de nouveaux pâturages saisonniers. Dans des conditions de sécheresse, ces éleveurs pourraient entrer en conflit avec les systèmes agraires sédentaires. [GT II TRE 10.2.1.2]

L'Asie domine l'aquiculture mondiale, la Chine produisant à elle seule près de 70 % des poissons, crevettes et crustacés d'élevage (FAO, 2006). Le poisson, importante source de protéines alimentaires, est indispensable pour la sécurité alimentaire dans de nombreux pays d'Asie, en particulier pour les communautés pauvres des régions côtières. L'élevage de

poissons nécessite des terres et de l'eau, deux ressources qui sont déjà rares dans de nombreux pays d'Asie. La dérivation des eaux vers des bassins d'élevage de crevettes a nettement abaissé les niveaux des eaux souterraines dans les régions côtières de la Thaïlande. [GT II TRE 11.2.4.4]

L'Asie abrite au moins 14 grands bassins versants de fleuves internationaux. La gestion des bassins versants est problématique dans les pays à forte densité démographique, qui sont souvent responsables de l'utilisation des zones même les plus fragiles et inadaptées des bassins versants à des fins de culture, d'habitation et d'autres activités intensives. Par conséquent, dans de nombreux pays, notamment le Bangladesh, le Népal, les Philippines, l'Indonésie et le Viet Nam, un grand nombre de bassins souffrent énormément du déboisement, d'une conversion inconsidérée des terres, d'une érosion excessive des sols et du déclin de la productivité des terres. En l'absence de stratégies d'adaptation adéquates, ces bassins versants sont très vulnérables au changement climatique. [GT II TRE 11. 2.3.2]

4.2.4.6 Atténuation

Les mesures d'adaptation et d'atténuation peuvent intervenir simultanément dans le secteur agricole et forestier; leur efficacité dépendra de la configuration réelle du changement climatique dans les décennies à venir. Les interactions entre ces facteurs (changement climatique, adaptation et atténuation) impliqueront fréquemment les ressources en eau. [GT III 8.5, tableau 8.9]

Les stratégies d'adaptation et d'atténuation peuvent créer des synergies, dans lesquelles chaque action renforce l'autre, ou s'annuler mutuellement. En ce qui concerne l'eau, des exemples de stratégies d'adaptation qui limitent l'efficacité des solutions d'atténuation impliquent grandement l'irrigation, en termes de coûts énergétiques de la fourniture de l'eau et d'émissions supplémentaires de gaz à effet de serre pouvant être liées à des pratiques culturelles modifiées. L'utilisation d'énergie renouvelable pour l'extraction et la distribution de l'eau pourrait cependant résoudre ce conflit. De même, certaines stratégies d'atténuation pourraient avoir des conséquences négatives pour l'adaptation, par exemple l'augmentation de la dépendance aux cultures dédiées à l'énergie, qui peuvent entrer en concurrence pour les ressources en eau, réduire la biodiversité et donc augmenter la vulnérabilité aux extrêmes climatiques. [GT III 12.1.4, 12.1.4]

D'un autre côté, de nombreuses pratiques de piégeage du carbone impliquant une réduction du labour, une augmentation de la superficie cultivée et l'utilisation de systèmes de rotation améliorés, constituent en soi de bonnes pratiques en agrosylviculture (et elles ont été initialement développées en tant que telles) qui rendent les systèmes de production plus résilients à la variabilité climatique, et donc permettent une bonne adaptation dans un contexte d'augmentation des

contraintes sur l'eau et les ressources du sol (Rosenzweig et Tubiello, 2007). [GT II 5.4.2; GT III 8.5]

4.3 Santé humaine

4.3.1 Contexte

La santé humaine, qui englobe le bien-être physique, social et psychologique, dépend d'un approvisionnement adéquat en eau potable et d'un environnement sûr. Les êtres humains sont directement exposés au changement climatique via des configurations météorologiques (phénomènes extrêmes plus intenses et plus fréquents), et indirectement via des changements de l'eau, de l'air, de la qualité et de la quantité des aliments, des écosystèmes, de l'agriculture, des moyens de subsistance et des infrastructures. [GT II 8.1.1] En raison du très grand nombre de personnes risquant d'être touchées, la malnutrition et la rareté de l'eau pourraient être les conséquences les plus importantes du changement climatique sur la santé (voir paragraphes 4.2 et 4.4). [GT II 8.4.2.3]

La santé des populations s'est remarquablement améliorée au fil des 50 dernières années, mais il persiste des inégalités substantielles d'un pays à l'autre et au sein même des pays. Il est *improbable* que les objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) visant à réduire de deux tiers le taux de mortalité chez les enfants de moins de cinq ans d'ici 2015 ne soient atteints dans certains pays en développement. Une santé médiocre augmente la vulnérabilité et réduit la capacité des individus et des groupes à s'adapter au changement climatique. Les populations aux taux élevés d'occurrence des maladies et de handicaps résistent moins bien aux stress de toutes sortes, y compris ceux liés au changement climatique. [GT II 8.1.1]

Le Programme conjoint de surveillance de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et du Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF) estime actuellement à 1,1 milliard de personnes (17 % de la population mondiale) la population dépourvue d'un accès aux ressources en eau, l'accès étant défini comme la disponibilité d'au moins 20 litres d'eau par personne et par jour à partir d'une source d'eau améliorée, dans un rayon d'un kilomètre. Une source d'eau améliorée est une source d'eau «sûre», telle un raccordement domestique ou un trou de forage. Près des deux tiers des personnes dépourvues d'accès à l'eau vivent en Asie. En Afrique subsaharienne, 42 % de la population n'a pas accès à de l'eau améliorée. L'OMS estime qu'au total, les maladies dues à un approvisionnement en eau inadéquat, ainsi qu'à un assainissement et une hygiène médiocres tuent 1,7 million de personnes par an. Les résultats sanitaires liés à l'approvisionnement en eau et à l'assainissement sont un point essentiel des préoccupations en matière de changement climatique dans de nombreux pays. Dans les

régions vulnérables, la concentration des risques concernant l'insécurité alimentaire et hydrique peut rendre l'incidence d'un phénomène météorologique extrême (par exemple, les crues et la sécheresse) particulièrement grave pour les foyers touchés. [GT II 9.2.2]

Les changements des extrêmes climatiques sont susceptibles d'entraîner des incidences graves sur la santé humaine. Les inondations devraient devenir de plus en plus importantes avec le changement climatique, ce qui aura des répercussions sur la santé humaine. La vulnérabilité aux inondations est réduite lorsqu'il existe des infrastructures permettant de supprimer les déchets solides, de gérer les eaux usées et de fournir de l'eau potable. [GT II 8.2.2]

Le manque d'eau pour l'hygiène est actuellement responsable d'une morbidité significative dans le monde entier. Une petite partie non quantifiée de cette morbidité peut être attribuée à la variabilité ou aux extrêmes climatiques. La «pénurie d'eau» est liée à de multiples résultats sanitaires négatifs, notamment les maladies associées à l'eau contaminée par des matières fécales et d'autres substances dangereuses (par exemple, des parasites).

La mortalité et la morbidité infantiles imputables à la diarrhée restent élevées dans les pays à faibles revenus, en particulier en Afrique subsaharienne, malgré les améliorations apportées aux soins et le traitement de réhydratation par voie orale. Le changement climatique devrait aggraver la pénurie d'eau, mais il est difficile d'évaluer ce que cela représente au niveau du foyer pour ce qui est de la disponibilité en eau, et donc pour la santé et l'hygiène. Il n'existe pas d'informations liant la modélisation à grande échelle du changement climatique à des incidences à petite échelle, au niveau de la population ou du foyer. De plus, toute évaluation des incidences futures sur la santé via des changements de disponibilité en eau doit tenir compte des améliorations futures de l'accès à de l'eau «sûre». [GT II 8.2.5, 8.4.2.2]

4.3.1.1 Implications pour la qualité de l'eau potable

La relation qui existe entre les précipitations, l'écoulement fluvial et la contamination de l'approvisionnement en eau est très complexe, comme indiqué ci-après en ce qui concerne les approvisionnements en eau courante et le contact direct avec les eaux de surface. Si l'écoulement fluvial diminue du fait de précipitations réduites, sa capacité à diluer les effluents est également réduite, ce qui entraîne donc une augmentation de la charge en agents pathogènes ou en substances chimiques. Cela pourrait augmenter le risque humain ou, dans le cas d'approvisionnements en eau courante, la charge des stations de traitement de l'eau. Au cours de l'été sec de 2003, les faibles débits aux Pays-Bas ont entraîné une modification apparente de la qualité de l'eau (Senhorst et Zwolsman, 2005). La saisonnalité marquée des épidémies de choléra en Amazonie est associée à un faible écoulement fluvial pendant la saison sèche

(Gerolomo et Penna, 1999), probablement du fait d'une grande concentration d'agents pathogènes dans les bassins. [GT II 8.2.5]

La gestion des eaux du drainage et d'orage est importante dans les communautés urbaines à faibles revenus, car les canalisations bouchées peuvent entraîner des inondations et une augmentation de la transmission de maladies à vecteur (Parkinson et Butler, 2005). Les villes disposant de déversoirs d'orage peuvent subir une plus grande contamination des systèmes d'assainissement pendant les épisodes de crues. [GT II 8.2.5]

Dans les pays à revenus élevés, les épisodes de chutes de pluie et de ruissellement peuvent augmenter la charge microbienne totale dans les cours d'eau et les réservoirs d'eau potable, bien que le lien avec des cas de maladies humaines soit incertain du fait que la concentration de contaminants est diluée. La contamination saisonnière de l'eau de surface au début du printemps en Amérique du Nord et en Europe peut, en partie, expliquer la saisonnalité des cas sporadiques de maladies à transmission hydrique telles la cryptosporidiose et la campylobactériose. Une proportion importante des épidémies de maladies d'origine hydrique rapportées est liée à des épisodes de précipitations intenses, souvent concomitants avec des échecs de traitement. [GT II 14.2.5, 8.2.5]

Les fleurs d'eau toxiques des eaux douces génèrent des toxines susceptibles de provoquer des maladies humaines. La survenue de telles fleurs d'eau à la surface de l'eau (rivières et lacs) peut augmenter avec une hausse de la température. Cependant, le risque pour la santé humaine est très faible car le contact direct avec les fleurs d'eau est généralement limité. Les toxines des algues risquent peu de contaminer les approvisionnements en eau, mais les implications pour la santé humaine sont incertaines. [GT II 8.2.4, 3.4.4]

Dans les régions où les infrastructures d'approvisionnement en eau sont médiocres, la transmission d'entéropathogènes est plus élevée pendant la saison des pluies. De plus, on a découvert que des températures plus élevées sont liées à une augmentation des épisodes de maladies diarrhéiques (Checkley *et al.*, 2000; Singh *et al.*, 2001; Vasilev, 2003; Lama *et al.*, 2004). L'incidence sous-jacente de ces maladies est associée à une mauvaise hygiène et au manque d'accès à une eau sûre. [GT II 8.2.5]

4.3.1.2 Catastrophes naturelles, y compris les tempêtes de vent et les crues

Les sections précédentes ont décrit comment le changement climatique influencera le risque des catastrophes liées à l'eau, y compris les crues de rupture de lacs glaciaires (GLOF), l'augmentation de l'intensité des ondes de tempête et les changements du risque de crues (voir paragraphe 3.2), notamment les crues soudaines et les inondations urbaines,

avec quelques réductions du risque de crues liées à la fonte de la neige au printemps. [GT II 3.4.3] Les crues ont une incidence considérable sur la santé, qu'il s'agisse du nombre de décès, du poids des maladies ou des dommages aux infrastructures sanitaires. [GT II 8.2.2] Tandis que le risque de maladies infectieuses suite à des inondations est généralement faible dans les pays à revenus élevés, les populations dotées d'infrastructures médiocres et qui connaissent une morbidité élevée due aux maladies infectieuses voient souvent augmenter les cas de maladies diarrhéiques après des épisodes de crues. Les preuves de l'incidence des catastrophes liées au climat sur la santé mentale sont de plus en plus nombreuses, les personnes ayant subi les effets de crues souffrant durablement d'anxiété et dépression. [GT II 8.2.2, 16.4.5]

Les inondations et les chutes de pluie intenses peuvent entraîner la contamination de l'eau par des produits chimiques, des métaux lourds ou d'autres substances dangereuses, provenant de stocks ou de substances chimiques déjà présentes dans l'environnement (notamment, les pesticides). L'augmentation de la densité démographique et du développement industriel dans des régions sujettes à des catastrophes naturelles entraîne l'augmentation de la probabilité de catastrophes futures et le risque d'une exposition humaine massive à des matériaux dangereux au cours de ces épisodes. [GT II 8.2.2]

4.3.1.3 *Sécheresse et maladies infectieuses*

Quelques maladies infectieuses ont un lien reconnu avec la pluie, mais pas avec la consommation d'eau potable (qualité ou quantité) ni avec des vecteurs arthropodes. La répartition spatiale, l'intensité et la saisonnalité de la méningite à méningocoques (épidémique) dans la région du Sahel, en Afrique, sont liées à des facteurs climatiques et environnementaux, en particulier la sécheresse, bien que le mécanisme causal ne soit pas bien compris. La distribution géographique de la méningite s'est étendue en Afrique de l'Ouest au cours des dernières années, ce qui peut être attribué à un changement environnemental dû à des changements d'affectation des terres et à un changement climatique régional. [GT II 8.2.3.1]

4.3.1.4 *Tempêtes de poussière*

La poussière portée par le vent provenant des régions désertiques d'Afrique, de la péninsule Arabique, du centre de l'Asie et de la Chine, peut affecter la qualité de l'air et la santé publique dans des régions éloignées. La poussière peut charrier une concentration élevée de particules respirables, d'éléments à l'état de traces qui peuvent affecter la santé humaine, des spores de champignons et des bactéries. [GT II 8.2.6.4]

4.3.1.5 *Maladies à vecteur*

Le climat influence la répartition dans l'espace, l'intensité de la transmission et la saisonnalité des maladies transmises

par des vecteurs (notamment le paludisme) et des maladies dont l'hôte intermédiaire est un mollusque aquatique (notamment la schistosomiase). [GT II 8.2.8] Pendant les sécheresses, l'activité du moustique est réduite, mais si la transmission chute significativement, le nombre d'individus non immunisés peut alors augmenter. Sur le long terme, l'incidence des maladies transmises par les moustiques telles que le paludisme diminue par suite de la diminution de l'abondance des moustiques, même si des épidémies peuvent survenir encore lorsque les conditions climatiques sont propices. [GT II 8.2.3.1]

La distribution de la schistosomiase, maladie parasitaire liée à l'eau dont l'hôte intermédiaire est un mollusque aquatique, est influencée en certains endroits par des facteurs climatiques. Par exemple, le changement observé dans la distribution de cette maladie en Chine au cours de la dernière décennie peut refléter, en partie, la tendance récente au réchauffement. Les programmes d'irrigation augmentent également l'incidence de cette maladie, lorsque les mesures de contrôle adéquates ne sont pas mises en place. [GT II 8.2.8.3]

4.3.2 Observations

L'éventail des éléments moteurs pouvant influencer et modifier l'incidence du changement climatique sur la santé humaine est vaste. Étant donné la complexité de l'association qui existe entre les facteurs climatiques et les maladies, il n'est souvent pas possible d'attribuer des changements de configuration d'une maladie spécifique à des changements climatiques observés. De plus, les séries de données sanitaires d'une qualité et d'une durée suffisantes sont rarement disponibles pour de telles analyses. Aucune étude publiée sur les incidences liées à l'eau sur la santé ne décrit des configurations de maladies solidement attribuées à un changement climatique observé. Cependant, il existe plusieurs rapports sur les réponses adaptatives visant à réduire les incidences du changement climatique dans le secteur de l'eau. [GT II chapitre 7]

Les tendances observées des catastrophes liées à l'eau (crues, tempêtes de vent) et le rôle du changement climatique sont abordés ailleurs. [GT II 1.3]

4.3.3 Projections

Il est prévu que le changement climatique ait un éventail d'effets négatifs sur les populations dans les régions où les infrastructures d'approvisionnement en eau et d'assainissement ne peuvent pas satisfaire les besoins locaux. L'accès à une eau sûre reste un problème sanitaire extrêmement important à l'échelle mondiale. Plus de deux milliards de personnes vivent dans les régions sèches du monde, et ces personnes souffrent plus que les autres de malnutrition, de mortalité infantile et de maladies liées à de l'eau

contaminée ou insuffisante. La rareté de l'eau représente une contrainte sérieuse pour le développement durable (Rockstrom, 2003). [GT II 8.2.5, 8.4.2.2]

4.3.4 Adaptation, vulnérabilité et développement durable

Des systèmes médiocres de santé publique et un accès limité à des soins de santé primaires contribuent à la grande vulnérabilité et la faible capacité d'adaptation de centaines de millions de personnes. [GT II 8.6] Il existe des contraintes fondamentales dans des pays à faibles revenus, où la santé publique dépend d'améliorations dans les secteurs de la santé, de l'eau, de l'agriculture, des transports, de l'énergie et du logement. La pauvreté et une gouvernance faible sont les obstacles les plus importants pour une adaptation efficace. Malgré la croissance économique, les pays à faibles revenus resteront *probablement* vulnérables à moyen terme, car ils disposent de moins de solutions que les pays à hauts revenus pour s'adapter au changement climatique. C'est pourquoi, pour qu'elles soient efficaces, les stratégies d'adaptation doivent être conçues dans le contexte des politiques de développement, d'environnement et de santé publique mises en œuvre dans les régions concernées. De nombreuses solutions utilisables pour réduire une vulnérabilité future sont utiles pour s'adapter au climat actuel et peuvent être mises à profit pour atteindre d'autres objectifs environnementaux et sociaux. [GT II 8.6.3]

Les éventuels effets négatifs pour la santé d'une quelconque stratégie d'adaptation doivent être évalués avant son application. Par exemple, on a montré que la construction d'un micro-barrage et la mise en place de programmes d'irrigation peuvent augmenter la mortalité locale liée au paludisme. [GT II 8.6.4] Les mesures prévues pour lutter contre la pénurie d'eau, telles que la réutilisation d'eaux usées non traitées ou partiellement traitées pour l'irrigation, peuvent également avoir des conséquences sur la santé humaine. L'irrigation est actuellement déterminante pour la propagation de maladies infectieuses telles que le paludisme et la schistosomiase (Sutherst, 2004). Des directives strictes de qualité pour l'irrigation avec des eaux usées sont prévues pour limiter les risques sanitaires venant des organismes pathogènes, et pour garantir la qualité des cultures (Steenvoorden et Endreny, 2004). Certaines maladies, telles que l'helminthiase, sont transmises par la consommation des cultures irriguées avec des eaux polluées ou usées et, dans les zones rurales et périurbaines de la plupart des pays à faibles revenus, l'utilisation d'eaux d'égouts ou d'eaux usées pour l'irrigation (une pratique commune) est une source de transmission de maladies par voie féco-orale. Actuellement, au moins un dixième de la population mondiale consomme des cultures irriguées avec des eaux usées. Cependant, l'augmentation de la pénurie d'eau et de la demande alimentaire, couplée à un assainissement médiocre, va encourager l'utilisation d'une eau de mauvaise

qualité. Afin de contrôler de tels problèmes, il est nécessaire de développer des programmes de traitement des eaux usées et de réutilisation planifiée de celles-ci. [GT II 8.6.4, 3.4.4]

4.4 Alimentation en eau et assainissement

Les effets observés du changement climatique sur la quantité et la qualité des ressources en eau ont été abordés en détail dans les paragraphes 4.2 et 4.3. Le présent paragraphe résume les principaux points et décrit leurs implications pour les services d'alimentation en eau et d'assainissement.

4.4.1 Contexte

Les statistiques sur l'accès actuel à une eau sûre ont déjà été indiquées dans le paragraphe 4.3.1. L'accès à une eau sûre est actuellement considéré comme un droit de l'homme universel. Cependant, le monde est confronté à une augmentation des problèmes liés à la fourniture de services hydrologiques, en particulier dans les pays en développement. Les raisons sont diverses et ne sont pas nécessairement liées au changement climatique. Un manque de disponibilité en eau, une demande en eau accrue et plus irrégulière résultant de la croissance démographique dans des zones concentrées, une augmentation de l'urbanisation, une utilisation plus intensive de l'eau pour améliorer le bien-être général, et le défi d'améliorer la gouvernance de l'eau sont déjà autant d'obstacles majeurs à la fourniture satisfaisante de services hydrologiques. Dans ce contexte, le changement climatique représente tout simplement une charge supplémentaire pour les services d'approvisionnement en eau ou pour tout organisme fournisseur de services hydrologiques souhaitant satisfaire la demande des clients. Il est difficile d'identifier localement les effets du changement climatique, mais les effets observés combinés à des projections fournissent une base utile pour préparer le futur.

4.4.2 Observations

Le tableau 4.1 résume les éventuels liens existant entre le changement climatique et les services hydrologiques.

4.4.3 Projections

Une *réduction de la disponibilité en eau* peut être causée par:

- Une diminution de l'écoulement dans les bassins alimentés par les glaciers qui reculent et une augmentation de la durée et de la fréquence des saisons sèches;
- Une diminution des précipitations en été qui entraîne une réduction de l'eau stockée dans les réservoirs alimentés par des rivières saisonnières (du Plessis *et al.*, 2003);

Tableau 4.1: Effets observés du changement climatique et incidences observées/possibles sur les services hydrologiques. [GT II chapitre 3]

Effet observé	Incidences observées/possibles
Augmentation de la température atmosphérique	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la disponibilité en eau dans les bassins alimentés par les glaciers qui reculent, comme observé dans des villes dans les Andes en Amérique du Sud (Ames, 1998; Kaser et Osmaston, 2002)
Augmentation de la température de l'eau de surface	<ul style="list-style-type: none"> Réductions de la teneur en oxygène dissous, des configurations de mélange et de la capacité d'auto-épuration Augmentation des fleurs d'eau
Élévation du niveau de la mer	<ul style="list-style-type: none"> Salinisation des aquifères côtiers
Décalage du régime des précipitations	<ul style="list-style-type: none"> Changement de la disponibilité en eau dû aux changements des précipitations et à d'autres phénomènes apparentés (notamment, l'alimentation des nappes souterraines et l'évapotranspiration)
Augmentation de la variabilité interannuelle des précipitations	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la difficulté de la maîtrise des crues et de l'utilisation des réservoirs pendant la période des inondations
Augmentation de l'évapotranspiration	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la disponibilité en eau Salinisation des ressources en eau Diminution du niveau des eaux souterraines
Augmentation de l'intensité et de la fréquence des phénomènes extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> Les crues influencent la qualité de l'eau et l'intégrité des infrastructures de l'eau et augmentent l'érosion fluviale, ce qui introduit différentes sortes de polluants dans les ressources en eau Les sécheresses influencent la disponibilité et la qualité de l'eau

- c) Une variabilité interannuelle des précipitations et un décalage saisonnier de l'écoulement fluvial;
- d) Une réduction du niveau des eaux souterraines à l'intérieur des terres;
- e) Une augmentation de l'évapotranspiration suite à l'augmentation de la température de l'air, au prolongement de la période de croissance et à l'augmentation de la consommation d'eau pour l'irrigation;
- f) La salinisation (Chen *et al.*, 2004).

Selon les projections, le nombre de personnes risquant de souffrir d'une augmentation du stress hydrique sera compris entre 0,4 et 1,7 milliard à l'horizon 2020, entre 1,0 et 2,0 milliards à l'horizon 2050 et entre 1,1 et 3,2 milliards à l'horizon 2080 (Arnell, 2004), l'intervalle étant le résultat des différents scénarios SRES considérés. [GT II 3.2, 3.5.1]

Dans certaines régions, la faible disponibilité en eau entraînera une surexploitation des eaux souterraines qui s'accompagnera d'une augmentation des coûts de l'approvisionnement en eau quelle que soit l'utilisation, du fait de la nécessité de pomper l'eau de plus en plus profondément et loin. De surcroît, la surexploitation des eaux souterraines peut entraîner, dans certains cas, une dégradation de la qualité de l'eau. Dans certaines régions de l'Inde, du Bangladesh, de la Chine, du nord de l'Afrique, du Mexique et de l'Argentine, plus de 100 millions de personnes souffrent d'un empoisonnement à l'arsenic et de fluorose (maladie des dents ou des os consécutive à une consommation excessive de fluorure dans l'eau potable) (NU, 2003). Ce phénomène peut aggraver la situation si les personnes sont obligées d'utiliser davantage d'eau des nappes souterraines du fait que les sources d'eau de surface ne sont pas fiables. [GT II 3.4.4]

L'augmentation de la pénurie d'eau, combinée à la hausse de la demande alimentaire ou de la consommation d'eau pour l'irrigation du fait de la hausse de la température, entraînera

probablement une augmentation de la réutilisation de l'eau. Les régions mal desservies par les infrastructures d'assainissement pourraient recourir à des pratiques (en tant que nouvelle activité ou à un degré plus important) de réutilisation incontrôlée de l'eau (réutilisation d'eau polluée ou même d'eaux usées). [GT II 3.3.2, 8.6.4]

Dégradation de la qualité de l'eau suite à la variation des débits. Lorsqu'une réduction des ressources en eau est prévue, la concentration en polluants de l'eau augmente du fait de la diminution de la capacité de dilution. [GT II 3.4.4, 14.4.1] En même temps, l'augmentation du débit déplace et transporte divers composés du sol vers les ressources en eau via l'érosion fluviale. [GT II 3.4]

De même, une augmentation des taux de morbidité et de mortalité par des maladies d'origine hydrique est attendue selon les scénarios qui prévoient davantage d'humidité et de sécheresse, du fait d'un approvisionnement insuffisant en eau potable (Kovats *et al.*, 2005; Ebi *et al.*, 2006), et la présence accrue d'agents pathogènes transportés par les débits accrus lors des extrêmes de précipitations. L'augmentation des précipitations peut également entraîner une plus grande turbidité et une hausse de la charge en éléments nutritifs de l'eau. Les services de l'eau de la ville de New York ont identifié des épisodes de chutes de pluie intenses comme étant l'une des plus grandes préoccupations liées au changement climatique, car ils peuvent augmenter la turbidité de certains des principaux réservoirs de la ville jusqu'à 100 fois la limite légale pour la qualité d'une source au niveau de l'admission, et ils nécessitent un traitement et des coûts de suivi supplémentaires conséquents (Miller et Yates, 2006). [GT II 3.5.1]

Augmentation du ruissellement. Dans certaines régions, la disponibilité en eau augmentera, ce qui sera généralement

avantageux compte tenu de la situation mondiale actuelle dans ce domaine. Cependant, il est nécessaire de prendre des dispositions pour que cela reste avantageux à l'échelle mondiale. Par exemple, tandis qu'une augmentation du ruissellement dans l'est et le sud de l'Asie devrait résulter du changement climatique, les pénuries d'eau dans ces régions pourraient ne pas être résolues du fait du manque de ressources pour l'investissement dans les nouvelles capacités de stockage nécessaires pour capturer l'eau supplémentaire et permettre son utilisation pendant la saison sèche. [GT II 3.5.1]

Une augmentation des précipitations dans les villes pourrait compromettre la performance des réseaux d'égouts; des surcharges incontrôlées pourraient introduire des polluants microbiens et chimiques dans les ressources en eau qui sont difficiles à traiter par les processus classiques de traitement de l'eau potable. Plusieurs études ont montré que la transmission d'entéropathogènes résistants à la chloration, notamment le *Cryptosporidium*, est plus élevée pendant la saison des pluies (Nchito *et al.*, 1998; Kang *et al.*, 2001). Cette situation pourrait être aggravée dans les pays en développement, où les niveaux de santé sont inférieurs et la teneur des eaux usées en agents pathogènes est supérieure (Jiménez, 2003). De plus, les précipitations extrêmes génératrices de crues représentent un risque pour les infrastructures de l'eau. Pendant les crues, les installations de traitement de l'eau et des eaux usées sont souvent hors service, laissant la population sans protection sanitaire. [GT II 3.2, 3.4.4, 8.2.5]

Dégradation de la qualité de l'eau du fait de l'augmentation de la température. Des températures plus élevées, combinées à des concentrations en phosphore accrues dans les lacs et les réservoirs, favorisent les fleurs d'eau qui compromettent la qualité de l'eau en modifiant la couleur, l'odeur et le goût et en engendrant une éventuelle toxicité pour l'homme, le bétail, la faune et la flore. Le traitement de ces eaux polluées est coûteux avec les technologies disponibles, même pour les installations des pays développés (Environnement Canada, 2001). Des températures plus élevées de l'eau favorisent également le transfert de polluants volatils et semi-volatils (ammoniac, mercure, PCB (biphényles polychlorés), dioxines et pesticides) de l'eau et des eaux usées vers l'atmosphère. [GT II 3.4.4]

Augmentation de la salinisation. La salinisation des approvisionnements en eau à partir des aquifères côtiers en raison de l'élévation du niveau de la mer est un problème important, étant donné que près d'un quart de la population mondiale vit dans des régions côtières qui sont généralement pauvres en eau et dont la croissance démographique est rapide (Small et Nicholls, 2003; Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b). La salinisation peut également concerner les aquifères à l'intérieur des terres en raison d'une réduction de l'alimentation des nappes souterraines (Chen *et al.*, 2004). [GT II 3.2, 3.4.2]

Les populations les plus touchées par le changement climatique au regard des services hydrologiques sont situées dans les bassins souffrant déjà de stress hydrique en Afrique, dans la région méditerranéenne, au Proche-Orient, en Asie du Sud, au nord de la Chine, en Australie, aux États-Unis, au centre et au nord du Mexique, au nord-est du Brésil et sur la côte ouest de l'Amérique du Sud. Les populations les plus à risque sont les populations vivant dans les mégapoles, les zones rurales très dépendantes des eaux souterraines, les petites îles et les bassins alimentés par la fonte des glaciers ou des neiges (plus d'un sixième de la population mondiale réside dans les bassins alimentés par la fonte des neiges). Les problèmes seront plus critiques dans les régions économiquement déprimées, où le stress hydrique sera aggravé par des facteurs socioéconomiques (Alcamo et Henrichs, 2002; Ragab et Prudhomme, 2002). [GT II 3.3.2, 3.5.1]

4.4.4 Adaptation, vulnérabilité et développement durable

Dans le contexte des problèmes évoqués ci-dessus, il est important que les services hydrologiques situés dans les régions à risque planifient en conséquence. La plupart des réseaux d'alimentation en eau sont capables de faire face aux changements relativement petits des températures et des précipitations moyennes qui devraient intervenir dans les prochaines décennies, sauf lorsque les variations des moyennes requièrent la modification de la conception du réseau ou de la technologie utilisée; c'est par exemple le cas lorsque la réduction des précipitations nécessite des réservoirs supplémentaires (Harman *et al.*, 2005), entraîne l'intrusion d'eau salée dans le cours inférieur d'une rivière, ou nécessite de nouveaux réseaux de traitement de l'eau pour opérer le dessalement. Un exemple récent de l'adaptation se situe dans le sud de l'Afrique (Ruosteenoja *et al.*, 2003), où la ville de Beira, au Mozambique, étend déjà de 5 km de plus ses conduites de pompage de 50 km pour être sûre d'avoir de l'eau douce. [GT II 7.4.2.3.1]

Les services hydrologiques sont généralement fournis via des réseaux aménagés. Ces réseaux sont conçus avec des facteurs de sécurité et ont une espérance de vie de 20 à 50 ans (cette durée peut être plus longue pour les réservoirs de stockage). Les examens de la résilience des approvisionnements en eau et de la performance des infrastructures de l'eau ont généralement été réalisés d'après les conditions observées uniquement. L'utilisation de projections climatiques devrait également être envisagée, en particulier dans des cas qui impliquent des réseaux qui sont confrontés à des crues et à des sécheresses.

Diminution de la disponibilité en eau. Hormis quelques pays industrialisés, la consommation d'eau augmente dans le monde entier du fait de la croissance démographique et économique, des changements de mode de vie et de l'extension des réseaux d'approvisionnement en eau.

[GT II 3.3] Il est important de mettre en œuvre des programmes efficaces d'utilisation de l'eau dans les régions où la disponibilité en eau diminuera *probablement*, étant donné qu'il sera peut-être nécessaire de faire de gros investissements pour garantir l'approvisionnement adéquat, soit par la construction de nouveaux réservoirs de stockage, soit en utilisant des sources d'eau alternatives. Les réductions de consommation d'eau peuvent retarder, voire éliminer le besoin d'infrastructures supplémentaires. L'une des manières les plus rapides d'augmenter la disponibilité en eau est de réduire au minimum les pertes d'eau dans les réseaux urbains et les réseaux d'irrigation. D'autres solutions pour réduire le besoin de nouveaux approvisionnements en eau sont notamment la récupération des eaux de pluie et la réutilisation contrôlée. [GT II 3.5, 3.6]

Dégradation de la qualité de l'eau suite à des variations de débit. La protection des ressources en eau est une stratégie rentable et importante pour faire face aux problèmes futurs relatifs à la qualité de l'eau. Tandis que ces pratiques sont courantes dans certains pays, de nouvelles approches pour la gestion de la qualité de l'eau sont nécessaires dans le monde entier. Une telle approche est la mise en œuvre de plans pour la sécurité de l'eau permettant de réaliser une évaluation détaillée ainsi que la gestion des risques depuis le bassin hydrographique jusqu'au consommateur, telle que proposée par l'OMS (2005). De même, la conception et l'exploitation des usines de traitement des eaux et des eaux usées doivent être régulièrement revues, en particulier dans les zones vulnérables, pour garantir ou augmenter leur fiabilité et leur capacité à faire face à des variations de débit incertaines.

Dessalement. Les procédés de traitement de l'eau sont une solution pour traiter une concentration en sel accrue dans les lieux à risque, telles des zones côtières fortement urbanisées qui dépendent d'aquifères sensibles à l'intrusion d'eau salée. Actuellement, les technologies disponibles se fondent principalement sur les membranes et sont plus coûteuses que les procédés classiques de traitement des approvisionnements en eau douce. Le coût du dessalement est estimé à environ un dollar des États-Unis/m³ pour l'eau de mer et 0,60 dollar des États-Unis/m³ pour l'eau saumâtre (Zhou et Tol, 2005), tandis que la chloration de l'eau douce coûte 0,02 dollar des États-Unis/m³. Fort heureusement, le coût du dessalement diminue, même si sa demande énergétique est élevée. Il est nécessaire de comparer les coûts du dessalement aux coûts de l'extension des conduites et de la réimplantation éventuelle des installations de traitement de l'eau pour assurer l'accès à l'eau douce. À titre indicatif, le coût de la construction des installations de captage et de traitement et des canalisations de pompage pour l'approvisionnement en eau d'un établissement urbain représente environ la moitié du coût de la totalité du réseau. [GT II 7.5] Cependant, dans les régions côtières à forte densité de population de l'Égypte, de la Chine, du Bangladesh, de l'Inde et du sud-est de l'Asie, les coûts du dessalement peuvent être encore prohibitifs. [GT II 3.5.1] Si le recours au dessalement vient à augmenter

dans l'avenir, il sera nécessaire de tenir compte des effets secondaires pour l'environnement tels que l'incidence sur les organismes marins et leur entraînement par les usines de dessalement de l'eau de mer, et de l'évacuation sûre des saumures très concentrées qui peuvent également contenir d'autres substances chimiques. [GT II 3.3.2]

Approches complémentaires et approches différentes pour traiter les eaux usées. Des stratégies seront nécessaires pour faire face à des débits supérieurs et plus variables dans les systèmes d'assainissement et les usines de traitement des eaux usées. Ces stratégies devront inclure de nouvelles approches telles que l'utilisation de réseaux décentralisés, la construction de réseaux d'égouts distincts, le traitement de déversoirs d'orage (c'est-à-dire le mélange des eaux usées et du ruissellement dans les villes) et l'injection d'eau de pluie dans le sous-sol. Étant donné le coût élevé impliqué dans l'augmentation de la capacité des usines de traitement des eaux usées urbaines, il est nécessaire de mettre en œuvre des programmes adéquatement financés pour tenir compte des conditions locales. En ce qui concerne les zones rurales, l'étendue de l'assainissement est généralement trop faible, et il est nécessaire de formuler des plans d'action locaux utilisant des technologies à bas coût, dépendant de la localité et impliquant la communauté. [GT II 7.4.2.3]

Gestion améliorée des ressources en eau. Tout en tenant compte des mesures d'adaptation déjà abordées, il convient d'envisager la gestion intégrée de l'eau comme un outil efficace, en prenant le changement climatique comme variable supplémentaire. La réduction ou l'augmentation de la variabilité de la disponibilité en eau entraîneront des conflits entre les divers utilisateurs de l'eau (agriculture, industries, écosystèmes et établissements humains). Les institutions qui gèrent l'affectation de l'eau joueront un rôle prépondérant dans la détermination de l'incidence sociale globale d'un changement de la disponibilité en eau, ainsi que de la distribution des gains et des pertes pour les différents secteurs de la société. Les cadres institutionnels doivent trouver de meilleures manières d'affecter l'eau, à l'aide de principes (tels que l'équité et l'efficacité) qui, d'un point de vue politique, pourraient être difficiles à mettre en pratique. Ces cadres doivent également envisager la gestion des bassins internationaux, ainsi que des bassins d'eaux de surface et d'eaux souterraines. [GT II 3.5.1]

Pour faire face au stress supplémentaire causé par le changement climatique, il sera nécessaire que le public participe à la planification de l'eau, en particulier pour changer le point de vue concernant la valeur de l'eau, l'importance et le rôle que jouera la réutilisation de l'eau dans le futur et la contribution que la société veut bien apporter à l'atténuation des incidences liées à l'eau.

Pour mettre en œuvre les politiques fondées sur les principes d'une gestion intégrée de l'eau, il faut rechercher une plus grande coordination entre les différentes entités

gouvernementales, et réviser les cadres institutionnels et juridiques pour faciliter l'application de mesures d'adaptation. Le changement climatique sera ressenti par toutes les parties prenantes impliquées dans le processus de gestion de l'eau, y compris les utilisateurs. Par conséquent, tous doivent être conscients des éventuelles incidences sur le réseau afin de prendre les décisions opportunes et d'être prêts à payer les coûts impliqués. Dans le cas des normes d'évacuation des eaux usées, par exemple, la stratégie globale utilisée devra sans doute être réétudiée, dans la mesure où elle est fondée sur la capacité d'auto-épuration des eaux de surface, qui sera réduite avec une augmentation de la température. [GT II 3.4.4]

Pays développés. Dans les pays développés, l'eau potable fait l'objet d'un traitement poussé avant d'être distribuée au consommateur, et le niveau de traitement des eaux usées est élevé. De tels avantages, ainsi qu'une protection adéquate des sources d'eau, doivent être conservés avec le changement climatique futur, même si des coûts supplémentaires doivent être supportés, en incluant par exemple des besoins supplémentaires de traitement de l'eau. En ce qui concerne les petites communautés ou les zones rurales, les mesures à envisager incluent la protection des sources d'eau, qui présente le meilleur rapport coûts-avantages.

Pays en développement. Malheureusement, certains pays ne disposent pas forcément de ressources économiques suffisantes pour faire face aux problèmes posés par le changement climatique. Les pays pauvres ont déjà besoin de ressources supplémentaires pour résoudre des problèmes avec des infrastructures inadaptées, et ils deviendront donc plus vulnérables aux incidences prévues sur la quantité et la qualité de l'eau, à moins que ne soient disponibles des solutions à moindre coût et des options de financement réalistes.

Étant donné que plusieurs des solutions d'adaptation et d'atténuation déjà identifiées ne sont tout simplement pas viables, on s'attend à ce que les pays en développement doivent s'adapter via des pratiques non durables, telles que l'augmentation de la surexploitation des eaux souterraines ou la réutilisation de plus gros volumes d'eaux usées non traitées. Ces «solutions» sont attractives car elles peuvent facilement être appliquées à un niveau individuel et personnel. Par conséquent, il est nécessaire de développer des solutions sûres et à bas coût, qui n'impliquent pas nécessairement les voies classiques, en particulier pour la fourniture de services hydrologiques aux communautés pauvres qui, dans bien des cas, ne disposent pas de véritables services dans le domaine de l'eau. Malheureusement, peu d'études sont disponibles sur cette question. [GT II 3.4.3, 8.6.4]

En résumé, le changement climatique peut avoir des incidences positives et négatives sur les services hydrologiques. Il est, par conséquent, important d'avoir conscience de ses

répercussions au niveau local et de dresser des plans en conséquence. Actuellement, seuls certains services d'eau de quelques pays, y compris les Pays-Bas, le Royaume-Uni, le Canada et les États-Unis, ont commencé à envisager les implications d'un changement climatique dans le contexte de la maîtrise des crues et de la gestion de l'approvisionnement en eau. [GT II 3.6]

4.5 Établissements humains et infrastructures

Les changements de la disponibilité en eau, de la qualité de l'eau, et des caractéristiques des précipitations, ainsi que la probabilité et l'ampleur des épisodes d'inondations devraient jouer un rôle important dans les incidences du changement climatique sur les établissements humains et les infrastructures (Shepherd *et al.*, 2002; Klein *et al.*, 2003; London Climate Change Partnership, 2004; Sherbinin *et al.*, 2006). Ces incidences varieront d'une région à l'autre. De plus, les incidences dépendront en grande partie du cadre géophysique, du niveau de développement socioéconomique, des institutions d'affectation de l'eau, de la nature de la base économique locale, des caractéristiques des infrastructures et d'autres facteurs sources de stress. Ces derniers englobent la pollution, la dégradation des écosystèmes, l'affaissement des terres (dû à la perte de pergélisol, à des processus isostatiques naturels ou à des activités humaines telles que la consommation des eaux souterraines) et la croissance démographique (UNWWAP, 2003, 2006; Faruqui *et al.*, 2001; PNUD, 2006). Au niveau mondial, les lieux les plus exposés aux problèmes d'approvisionnement en eau douce dans le contexte du changement climatique sont les petites îles, les pays en développement dans les régions arides et semi-arides, les régions dont l'eau douce est fournie par les rivières alimentées par la fonte des glaciers ou une fonte des neiges saisonnière, et les pays avec une grande proportion de basses terres côtières et de mégalopoles côtières, en particulier dans la région Asie-Pacifique (Alcamo et Henrichs, 2002; Ragab et Prudhomme, 2002). [GT II 6.4.2, 20.3]

Une augmentation de la densité de population dans des lieux à haut risque, telles régions côtières ou riveraines, augmentera *très probablement* la vulnérabilité aux incidences du changement climatique liées à l'eau, y compris les dommages occasionnés par les crues et les tempêtes et la dégradation de la qualité de l'eau suite à une intrusion d'eau salée. [GT II 6.4.2, 7.4.2.4] Les établissements humains dont les économies sont étroitement liées à une activité dépendante de l'eau et sensible au climat, telle que l'agriculture irriguée, le tourisme lié à l'eau et le ski sur neige, seront *probablement* particulièrement vulnérables aux incidences du changement climatique sur les ressources en eau (Elsasser et Burki, 2002; Hayhoe *et al.*, 2004). [GT II 7.4.3, 12.4.9]

Les infrastructures associées aux établissements humains sont les bâtiments, les réseaux de transport, les installations côtières, les infrastructures d'approvisionnement en eau et de traitement des eaux usées et les installations énergétiques. Les incidences sur les infrastructures englobent des dommages directs, par exemple, suite à des épisodes de crues ou à des instabilités structurelles provoquées par l'érosion pluviale ou des changements de la nappe phréatique, ainsi que des incidences sur la performance, le coût et l'adéquation des installations qui n'ont pas été conçues pour les conditions climatiques prévues comme dominantes dans l'avenir. [GT II 3.4.3, 3.5, 7.4.2.3]

4.5.1 Établissements humains

De nombreux établissements humains sont actuellement dépourvus d'un approvisionnement en eau sûr et adapté. L'Organisation mondiale de la santé estime que 1,1 milliard de personnes dans le monde n'ont pas accès à une eau potable sûre, et que 2,4 milliards n'ont pas accès à un assainissement adéquat (OMS/UNICEF, 2000). Les foyers urbains pauvres n'ont souvent pas accès à un approvisionnement en eau canalisée, et sont donc particulièrement vulnérables à l'augmentation des coûts de l'eau potable (NU-HABITAT, 2003; CNUEH, 2003, 2006; PNUD, 2006). Par exemple, à Jakarta, certains foyers dépourvus de services hydrologiques réguliers dépensent jusqu'à 25 % de leurs revenus pour l'eau et, pendant l'été chaud de 1998 à Amman, en Jordanie, les résidents du camp de réfugiés qui n'étaient pas raccordés au réseau municipal des eaux ont payé pour l'eau des prix bien plus élevés que d'autres foyers (Faruqui *et al.*, 2001). Les incidences du changement climatique sur la disponibilité en eau et la qualité de l'eau de source augmenteront *très probablement* les difficultés rencontrées pour résoudre ces problèmes, en particulier dans les régions où le stress hydrique devrait augmenter du fait d'une diminution du ruissellement, couplée à une augmentation de la population. [GT II 3.5.1] Les établissements humains à croissance rapide dans les régions semi-arides des pays en développement, en particulier les communautés pauvres qui ont une capacité d'adaptation limitée, sont particulièrement vulnérables à la diminution de la disponibilité en eau et à l'augmentation correspondante du coût de sécurisation d'un approvisionnement fiable (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b). [GT II 7.4]

Tant dans les pays développés que dans les pays en développement, le maintien de la croissance démographique rapide dans les villes côtières augmentera le risque d'exposition des populations aux inondations et aux dommages liés aux ouragans et à d'autres tempêtes côtières. [GT II 7.4.2.4] Ce même développement contribue à la perte des zones humides des deltas qui pourraient amortir les incidences des tempêtes. [GT II 6.4.1.2] De plus, une grande partie de la croissance se situe dans les régions côtières relativement pauvres en eau, ce qui aggrave le déséquilibre entre la demande en eau et la disponibilité de celle-ci (Small et Nicholls, 2003; Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, 2005b).

4.5.2 Infrastructures

4.5.2.1 Réseaux de transport

Les inondations dues à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes (tels les tempêtes et les ouragans) représentent un danger pour les réseaux de transport dans certaines régions. Ces dangers sont l'inondation localisée des rues, des réseaux de transports souterrains et les dommages subis par les ponts, les routes et les voies ferrées liés aux crues et aux glissements de terrain. Par exemple, à Londres, qui possède le réseau de transport souterrain le plus vieux du monde, on prévoit que des épisodes de chutes de pluie plus intenses accroîtront le risque d'inondation du métro et des autoroutes. Ces réseaux auraient besoin d'améliorer leur système de drainage (Arkell et Darch, 2006). De même, des recherches récentes sur le réseau de transport en surface de la région métropolitaine de Boston ont prévu qu'une augmentation des inondations entraînerait une augmentation des retards et des annulations de voyages, ce qui provoquerait une perte de journées de travail ainsi qu'une diminution des ventes et de la production (Suarez *et al.*, 2005). Cependant, ces coûts seraient minimes, comparés aux dommages aux infrastructures de transport de Boston liés aux inondations (Kirshen *et al.*, 2006). [GT II 7.4.2.3.3] Un exemple de la vulnérabilité actuelle qui pourrait être aggravée par une augmentation de l'intensité des précipitations est celui de la compagnie de chemin de fer Konkan Railway, en Inde, qui enregistre chaque année près d'un million de dollars des États-Unis de dommages dus à des glissements de terrain pendant la saison des pluies (Shukla *et al.*, 2005). [GT II 7.4.2.3.3]

4.5.2.2 Environnement bâti

Les inondations, les glissements de terrain et les fortes tempêtes (telles que les ouragans) représentent les risques de dommages aux bâtiments les plus grands dans les pays développés et en développement, car les logements et autres biens sont de plus en plus souvent situés dans les régions côtières, sur des versants, dans des ravins et dans d'autres lieux à risque (Bigio, 2003; NU-HABITAT, 2003). Les établissements humains non officiellement autorisés dans les zones urbaines des pays en développement sont particulièrement vulnérables étant donné qu'ils sont souvent situés dans des lieux relativement dangereux qui sont exposés aux crues, aux glissements de terrains et à d'autres catastrophes liées au climat (Cross, 2001; NU-HABITAT, 2003). [GT II 7.4.2.4]

D'autres incidences sur les bâtiments incluent le risque de vieillissement climatique accéléré du fait de l'augmentation de l'intensité des précipitations et de la fréquence des tempêtes (par exemple, Graves et Phillipson, 2000), et des dommages structurels accrus du fait de la diminution de la nappe phréatique et de la subsidence (par exemple, Sanders et Phillipson, 2003), ou du fait des incidences de la montée de la nappe phréatique (Kharkina, 2004). [GT II 3.5]

Une autre préoccupation concerne la performance future des réseaux de drainage des eaux d'orage. Dans les régions touchées par une augmentation de l'intensité des tempêtes, la capacité de ces réseaux devra être augmentée pour éviter des inondations locales et les dommages consécutifs qui touchent les bâtiments et les autres infrastructures (UK Water Industry Research, 2004). [GT II 7.6.4]

4.5.2.3 Infrastructures côtières

Dans les régions de basses terres côtières, les infrastructures sont vulnérables aux dommages occasionnés par l'élévation du niveau de la mer, les inondations, les ouragans et les autres tempêtes. Le nombre d'infrastructures à risque augmente rapidement suite à la croissance continue des villes côtières et au développement du tourisme dans des régions telles que les Caraïbes (par exemple, Hareau *et al.*, 1999; Lewsey *et al.*, 2004; Kumar, 2006). Dans certaines régions, les coûts des dommages consécutifs à l'élévation du niveau de la mer ont été estimés et sont souvent conséquents. Par exemple, en Pologne, les coûts des dommages consécutifs à une éventuelle élévation du niveau de la mer d'un mètre à l'horizon 2100 sont estimés à 30 milliards de dollars des États-Unis, en raison des incidences sur les zones urbaines, les égouts, les ports et d'autres infrastructures (Zeidler, 1997). La même étude a évalué que l'élévation prévue d'un mètre du niveau de la mer au Viet Nam pourrait exposer 17 millions de personnes à des inondations et entraîner des dommages pouvant se chiffrer à 17 milliards de dollars des États-Unis, avec des incidences importantes à l'intérieur des terres au-delà des régions côtières. [GT II 6.3, 6.4, 6.5]

4.5.2.4 Infrastructures énergétiques

Les changements hydrologiques affecteront directement la production potentielle des installations hydroélectriques (celles qui existent actuellement et les projets prévus pour le futur). Il existe de grandes différences régionales dans l'étendue du développement de l'énergie hydraulique. En Afrique, où une faible partie du potentiel hydroélectrique du continent a été développée, les simulations du changement climatique pour le projet hydroélectrique de Batoka Gorge sur le fleuve Zambèze prévoient une réduction significative du régime fluvial (soit, une diminution du débit mensuel moyen de $3,21 \times 10^9 \text{ m}^3$ à $2,07 \times 10^9 \text{ m}^3$) et une réduction de la génération d'énergie (soit, une diminution de la production mensuelle moyenne de 780 GWh à 613 GWh) (Harrison et Whittington, 2002). Une diminution de l'énergie hydraulique est également prévue ailleurs, lorsque les régimes fluviaux devraient diminuer (par exemple, Whittington et Gundry, 1998; Magadza, 2000). Dans d'autres régions, la génération d'énergie hydraulique devrait augmenter. Par exemple, les estimations pour les années 2070, selon le scénario d'émissions IS92a, indiquent que le potentiel de production d'énergie des centrales hydroélectriques existant à la fin du XX^e siècle augmentera de 15 à 30 % en Scandinavie et dans le nord de la Russie, où 19 % (Finlande) à près de 100 % (Norvège) de l'électricité est d'origine hydroélectrique (Lehner *et al.*, 2005). [GT II 3.5] D'autres infrastructures

énergétiques, telles que les lignes de distribution électrique, les installations de forage et les canalisations en mer, peuvent être vulnérables aux dommages résultant d'inondations et d'épisodes de tempête plus intenses. [GT II 7.5] De plus, des problèmes liés à la disponibilité en eau de refroidissement (du fait de la diminution du volume ou de l'augmentation de la température de l'eau) pourraient perturber l'approvisionnement énergétique en nuisant à la production énergétique dans les centrales thermiques et nucléaires (AEE, 2005).

4.5.3 Adaptation

Les incidences des changements de la fréquence des crues et des sécheresses ou dans la quantité, la qualité ou la saisonnalité de la disponibilité en eau pourraient être tempérées par des investissements dans des infrastructures adéquates et par des changements de gestion de l'eau et de l'utilisation des terres. Une coordination de la planification serait un atout car il existe de nombreux points où les incidences sur les différentes infrastructures interagissent. Par exemple, la défaillance des ouvrages de protection contre les crues pourrait interrompre l'approvisionnement énergétique, ce qui pourrait alors empêcher le fonctionnement des stations de pompage d'eau et d'eaux usées.

Une amélioration de la prise en compte de la variabilité climatique actuelle dans la gestion liée à l'eau faciliterait l'adaptation aux changements climatiques à venir (*degré de confiance très élevé*). [GT II 3.6] Par exemple, la gestion des risques de crues actuels par le maintien de zones vertes et de zones tampon naturelles le long des cours d'eau dans des zones urbaines aiderait également à réduire les incidences négatives d'un ruissellement plus intense pendant les tempêtes dans l'avenir. Cependant, l'une ou l'autre de ces réponses représente un coût, non seulement en termes d'argent mais également en termes d'incidences sociétales, y compris le besoin de gérer les éventuels conflits entre les différents groupes d'intérêt. [GT II 3.5]

4.6 Économie: assurance, tourisme, industrie et transport

4.6.1 Contexte

Le climat et les ressources en eau ont une influence sur plusieurs secteurs secondaires et tertiaires de l'économie tels que les assurances, l'industrie, le tourisme et les transports. Les effets du changement climatique liés à l'eau dans ces secteurs peuvent être positifs ou négatifs, mais les phénomènes climatiques extrêmes et d'autres changements brusques ont tendance à affecter les systèmes humains plus sévèrement que le changement progressif, en partie car ils laissent moins de temps pour l'adaptation. [GT II 7.1.3]

Les pertes mondiales révèlent une augmentation rapide des coûts du fait d'épisodes météorologiques extrêmes depuis les années 1970. Une étude a révélé que, tandis que la tendance dominante reste celle d'une augmentation significative des valeurs d'une exposition aux risques, une fois les pertes normalisées pour l'exposition, il reste encore une tendance sous-jacente à l'augmentation. Il existe des preuves d'une augmentation de l'occurrence pour des régions et des dangers spécifiques, y compris les crues les plus extrêmes de certains des fleuves les plus grands. [GT II 1.3.8.5]

Pour démontrer la grande incidence de la variabilité climatique sur les pertes des assurances, on peut indiquer que les inondations sont responsables de 10 % des pertes des assurances liées aux phénomènes météorologiques à l'échelle planétaire. La sécheresse a également une incidence: les données du Royaume-Uni indiquent une relation décalée entre le coût des déclarations de sinistres liés à la subsidence et aux (faibles) précipitations d'été. Cependant, dans les pays en développement, les pertes résultant de phénomènes extrêmes sont mesurées plus en termes de vies humaines qu'en termes d'assurances. Par exemple, malgré sa grande intensité, la sécheresse du Sahel n'a eu qu'une faible incidence sur le secteur financier formel, en raison de la faible pénétration des assurances. [GT II TRE 8.2.3]

4.6.2 Coûts socioéconomiques, atténuation, adaptation, vulnérabilité, développement durable

De toutes les éventuelles incidences liées à l'eau sur les transports, le coût le plus élevé est imputable aux inondations. Le coût des retards et des annulations de voyages est relativement faible comparé aux dommages subis par les infrastructures et les autres biens (Kirshen *et al.*, 2006). Au cours des 10 dernières années, on a dénombré quatre cas où l'inondation des systèmes de transport urbain souterrain a entraîné des dommages de plus de 10 millions d'euros (13 millions de dollars des États-Unis) et de nombreux cas où les dommages ont été inférieurs (Compton *et al.*, 2002). [GT II 7.4.2.3.3]

Les secteurs industriels sont souvent considérés comme étant moins vulnérables aux incidences du changement climatique que des secteurs tels celui de l'agriculture. Parmi les principales exceptions, on trouve les installations industrielles situées dans des régions sensibles au climat (telles que des plaines inondables) (Ruth *et al.*, 2004) et

celles dépendant de produits de base sensibles au climat, telles que les installations de transformation des aliments. [GT II 7.4.2.1]

La couverture par les assurances actuellement disponible dans un pays pour les risques spécifiques devra être adaptée à l'incidence des catastrophes passées. En raison de la concentration élevée de pertes dues aux crues catastrophiques, l'assurance du secteur privé contre ces phénomènes est généralement restreinte (voire non disponible), de telle sorte que dans plusieurs pays, les gouvernements ont mis en place des plans alternatifs d'assurance contre les crues garantis par l'état (Swiss Re, 1998). [GT II 7.4.2.2.4]

En ce qui concerne le secteur financier, les risques liés au changement climatique sont de plus en plus souvent pris en compte pour des secteurs spécifiques susceptibles d'être touchés tels que les projets hydroélectriques, l'irrigation et l'agriculture, ainsi que le tourisme (PNUE/GRID-Arendal, 2002). [GT II 7.4.2.2]

Les effets du changement climatique sur le tourisme incluent des changements de disponibilité en eau, qui pourraient être positifs ou négatifs (Braun *et al.*, 1999; Uyarra *et al.*, 2005). Des climats plus chauds ouvrent la possibilité d'extension des environnements exotiques (par exemple, avec la présence de palmiers en Europe occidentale), ce qui pourrait sembler positif à des touristes, mais pourrait entraîner l'extension spatiale et l'amplification de maladies d'origine hydrique et de maladies à vecteur. Les sécheresses et l'extension des environnements arides (et les effets des épisodes météorologiques extrêmes) pourraient décourager les touristes, bien que l'on ne puisse pas encore déterminer clairement ce qu'ils jugeraient inacceptable dans ce domaine. [GT II 7.4.2.2.3] Les régions qui dépendent de la disponibilité de la neige (notamment pour le tourisme hivernal) font parties des régions les plus vulnérables au changement climatique. [GT II 11.4.9, 12.4.9, 14.4.7]

Le fret en vrac par des voies d'eau intérieures, telles que le Rhin, pourrait être perturbé pendant les crues et les sécheresses (Parry, 2000). [GT II 7.4.2.2.2]

Les assurances étendent les risques et contribuent à l'adaptation, et la gestion de fonds d'assurance a des implications pour l'atténuation. [GT II 18.5] Les coûts et les avantages de l'adaptation ont été évalués d'une manière plus restreinte pour les infrastructures de transport (par exemple, Dore et Burton, 2001). [GT II 17.2.3]