

SYNTHESE TECHNIQUE

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ÉVÈNEMENTS HYDROLOGIQUES EXTRÊMES EN EUROPE

RECOUVREUR Romain

mél: recouvreur@engref.fr

Janvier 2005

ENGREF Centre de Montpellier
B.P.44494 - 34093 MONTPELLIER CEDEX 5
Tél. (33) 4 67 04 71 00
Fax (33) 4 67 04 71 01

RÉSUMÉ

Il apparaît désormais comme très probable qu'un changement climatique d'origine anthropique de grande ampleur menace l'équilibre de notre planète au cours du présent siècle. Parmi les différents impacts, ceux liés à l'hydrologie – intimement liée aux facteurs climatiques – et plus particulièrement ceux relatifs aux événements hydrologiques extrêmes – crues et sécheresses – sont au cœur des préoccupations scientifiques et politiques, notamment en Europe. D'un point de vue théorique et qualitatif, l'élévation de température va intensifier le cycle de l'eau, avec des précipitations et une évaporation accrues. Un rapide retour sur les décennies passées ne permet pas de mettre en évidence une réelle tendance à l'augmentation des phénomènes exceptionnels en Europe. Une analyse prospective table sur une augmentation des crues et des sécheresses tant en terme d'intensité que de fréquence. Enfin, si les tendances globales sont connues, de nombreuses incertitudes restent néanmoins associées aux résultats précédents, l'état de connaissance actuel étant insuffisant.

MOTS CLÉS

changement climatique – réchauffement climatique – événement hydrologiques extrêmes – crues – sécheresses – analyse prospective – Europe - hydrologie

PRÉCISION

L'ensemble des travaux de recherche dans le domaine du changement climatique sont analysés et synthétisés dans les rapports de l'IPCC (International Panel on Climate Change), entité créée par l'Organisation Météorologique Mondiale et par le Programme pour l'Environnement des Nations Unies et dont la vocation est d'expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le changement climatique provoqué par l'Homme. Les documents sur le thème du changement climatique sont abondants et souvent redondants. Devant l'exhaustivité des rapports de l'IPCC et la référence qu'ils constituent pour l'ensemble de la communauté scientifique, cette synthèse bibliographique y fait largement référence et particulièrement au chapitre 4 du rapport du groupe de travail 2 qui est consacré aux impacts du changement climatique sur l'hydrologie et aux ressources en eaux [14], document qui revient sur les résultats publiés dans près de 300 références. La version la plus récente de ces rapports a été publiée en 2001 et comporte plus de 2500 pages. La prochaine version est actuellement en cours de rédaction.

INTRODUCTION : DÉMARCHE ET OBJECTIFS

L'apparente recrudescence des épisodes de crue et de sécheresse au cours des dernières décennies nous incite à nous interroger sur l'origine de cette évolution et en particulier à analyser le lien existant entre changement climatique et événements hydrologiques extrêmes.

Postulant l'émergence du processus de changement climatique global, le présent document se propose d'en étudier les conséquences sur les événements hydrologiques extrêmes en termes de fréquence et d'intensité.

Pour ce faire, après un rappel des phénomènes étudiés et des processus physiques mis en jeu, il sera exposé pourquoi et comment le changement climatique est susceptible de perturber de façon générale le cycle hydrologique. Une analyse rétrospective sera ensuite proposée afin d'appréhender le rôle joué par le changement climatique dans l'évolution des événements hydrologiques extrêmes au cours des dernières décennies. Enfin, une étude prospective abordera la question des impacts potentiels du changement climatique sur les événements hydrologiques extrêmes au cours de ce siècle.

Face au débat passionné que ne manque pas de susciter un sujet polémique comme peut l'être celui du changement climatique et face aux enjeux humains, écologiques, matériels et économiques associés aux crues et sécheresses, ce document tente de faire le point entre idées reçues et faits réels, entre affirmations péremptoires ou prématurées et incertitudes actuelles afin de proposer une analyse rationnelle des phénomènes considérés.

PROPOS LIMINAIRES

o LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : FAITS ET CHIFFRES [12] [15] [17]

La Terre connaît actuellement un réchauffement dont l'ampleur et la rapidité – accroissement de 0,6°C de la température moyenne en un demi-siècle – dépassent largement les variations observées à l'échelle du dernier millénaire [16]. Parallèlement, depuis la révolution industrielle, l'Homme a généré une augmentation quasi exponentielle des émissions de gaz à effet de serre ce qui a conduit à un accroissement de plus de 30% de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère.

La très grande majorité des scientifiques s'accorde à établir un lien de causalité direct entre ces deux phénomènes et parle de changement climatique d'origine anthropique dont l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe est une des multiples et complexes manifestations.

Plusieurs scénarios, du plus optimiste au plus pessimiste, ont été élaborés afin de quantifier l'évolution du climat au cours du présent siècle et d'en prévoir les conséquences. Ces études prospectives concluent à une élévation de la température allant de 1,8°C à 5,6°C en fonction du scénario considéré. Les dérèglements observés à l'heure actuelle ne semblent donc être, compte tenu de l'inertie des processus mis en jeu et des perspectives d'évolution des rejets de CO₂, que les prémises de bouleversements futurs plus importants.

À côté de cette tendance générale d'évolution du climat, les études mettent aussi en évidence d'importantes disparités géographiques dans les changements qui interviendront au niveau du climat au cours des prochaines décennies, certaines régions du globe étant davantage touchées que d'autres. Ce sont a priori les pays déjà les plus pauvres qui devraient subir les évolutions les plus conséquentes ; au sein même du continent européen, des différences notables devraient être observées entre le Nord et le Sud.

Les impacts potentiels de ce changement climatique sont nombreux (agriculture, écosystèmes, santé, hydrologie...) et restent encore incertains et mal compris, les experts demeurant partagés quant à leur nature et leur importance.

o RAPPELS SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES : LE CYCLE DE L'EAU

Afin de comprendre l'origine des événements hydrologiques extrêmes et d'appréhender l'importance du climat sur leur genèse, il est nécessaire de revenir sur quelques notions d'hydrologie.

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet le refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de condensation. Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents. Une partie de la pluie qui tombe peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol. Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Un écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle [21].

Le cycle de l'eau est donc sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains [17].

Les processus hydrologiques sont donc régis par deux grandes composantes : les facteurs climatiques (précipitations et température essentiellement) et les facteurs « géographiques » (topographie, géologie, occupation des sols...).

o QU'ENTEND-ON PAR « ÉVÈNEMENTS HYDROLOGIQUES EXTRÊMES » ?

L'adjectif « extrême » doit ici s'entendre au sens d'exceptionnel, d'inhabituel, de rare. La frontière entre « normal » et « extrême » peut être définie par une période de retour supérieure à 100 ans, c'est-à-dire à une probabilité d'occurrence inférieure à 1%.

Les événements hydrologiques extrêmes sont classés en deux catégories : les crues extrêmes et les sécheresses extrêmes [9].

Les crues

Une crue, phénomène hydrologique de base, est l'augmentation plus ou moins brutale du débit et par conséquent de la hauteur d'un cours d'eau, en réponse à des précipitations [21]. Les crues « extrêmes » sont donc des crues rares, n'arrivant en moyenne qu'à des intervalles de temps supérieurs à cent ans.

Les sécheresses [9] [14]

La notion de sécheresse est beaucoup plus difficile à définir en termes quantitatifs. Elle peut être associée à un déficit pluviométrique, à un déficit d'humidité du sol, à un niveau d'écoulement très faible, à un niveau de nappe très bas ou à un faible remplissage des réservoirs naturels (barrages, lacs).

Une sécheresse « hydrologique » correspond à un cours d'eau ou à une nappe anormalement bas et n'engendre pas nécessairement d'impact sur l'utilisation de la ressource en eau. Les sécheresses « ressource en eau » ne dépend pas seulement des facteurs climatiques et hydrologiques mais aussi des caractéristiques de la ressource et de sa gestion.

o QUELQUES PRÉCISIONS SUR L'APPARITION DES ÉVÈNEMENTS HYDROLOGIQUES EXTRÊMES

Les événements hydrologiques extrêmes sont des phénomènes naturels et surviennent lorsque un ou plusieurs des processus hydrologiques cités précédemment connaît une intensité extrême : principalement précipitations extrêmement importantes pour les crues et évapotranspiration extrêmement élevée ou précipitations extrêmement faibles pour les sécheresses. Cette notion d'« extrême » – c'est-à-dire de rare rappelons-le – est à définir en fonction de l'entité hydrologique étudiée, des précipitations identiques n'ayant pas par exemple les mêmes conséquences sur le bassin versant de la Seine que sur celui du Vidourle. Des échelles de temps et d'espace très différentes interviennent donc selon les caractéristiques physiques du site considéré [17] [21].

Pour les épisodes de sécheresse, un paramètre important rentre aussi en jeu : l'Homme. Ses différents prélèvements sur la ressource et les infrastructures qu'il a mises en place afin d'obtenir davantage de flexibilité dans sa gestion sont autant d'éléments au moins aussi importants – sinon plus – que la météo dans l'apparition de sécheresses.

L'Homme peut aussi jouer un rôle important dans la genèse des crues. Son utilisation des sols, leur imperméabilisation, l'urbanisation grandissante, le rôle joué par les infrastructures de transport ou encore les conséquences imprévues de certains aménagements hydrauliques impactent grandement l'apparition des crues [9] [14].

Ces quelques remarques mettent ainsi en évidence une dualité de facteurs naturels et de facteurs humains dans la genèse des événements hydrologiques extrêmes.

o CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE GÉOGRAPHIQUE D'ÉTUDE

Les résultats mentionnés dans la suite du document ne concernent que l'Europe géographique.

L'Europe est située au cœur de la zone tempérée de l'hémisphère nord, entre les latitudes de 37°N et 72°N. On y observe une relative diversité climatique avec la coexistence d'un climat océanique (Ouest de l'Europe), d'un climat semi continental (centre de l'Europe), d'un climat continental (Est de l'Europe) et d'un climat méditerranéen (Sud de l'Europe), climats dont une caractéristique commune essentielle est l'alternance d'une saison « chaude » et d'une saison « froide » [10].

L'Europe est, proportionnellement, l'une des régions du globe les plus riches en rivières et en fleuves et dispose de ce fait d'un réseau hydrographique très dense. La grande variété des reliefs et des sols rencontrée en Europe combinée à celle des climats engendre une importante diversité des cours d'eau qui le composent.

Le même constat pouvant être fait pour les eaux souterraines, l'Europe apparaît donc comme le lieu de situations hydrologiques fortement contrastées.

EFFETS OBSERVÉS ET EFFETS « THÉORIQUES » DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE CYCLE HYDROLOGIQUE GLOBAL

Cette partie revient sur les modifications observées du cycle de l'eau et s'intéresse de manière générale à l'incidence « théorique » d'une modification du climat sur les différents compartiments (atmosphère, sol, sous-sol) du bilan hydrologique. Cette approche permet ainsi de fournir les bases rationnelles afin de mieux comprendre les conclusions et les incertitudes formulées par la suite.

Les résultats énoncés ici se limitent à une approche qualitative et traduisent la relative difficulté d'une quantification précise de l'ampleur des évolutions.

o PRÉCIPITATIONS

Les précipitations constituent, dans les régions tempérées et en particulier en Europe [10], la source principale de variabilités spatiales et temporelles du cycle hydrologique et leur évolution ont des implications très importantes sur l'hydrologie et les ressources en eau.

La variabilité hydrologique temporelle à l'échelle d'un bassin versant est conditionnée par la variation des précipitations à des échelles journalière ou au niveau d'un événement, saisonnières, annuelles et décennales [14].

La fréquence et l'intensité des crues est affectée par des changements de la variabilité d'une année à l'autre des précipitations – caractéristique importante pour les grands bassins versants où le temps de concentration peut être très grand et influant de manière générale sur les conditions initiales (degré de saturation du sol) – et par des variations des propriétés de la pluie sur un pas temps infra événement (telles que son intensité) – caractéristique jouant sur la forme de la crue [14].

La fréquence des sécheresses est affectée principalement par des changements dans la distribution saisonnière des précipitations, leur variabilité d'une année sur l'autre ainsi que par l'existence d'épisodes prolongés de sécheresse pluviométrique [14].

De manière globale, le réchauffement climatique pourrait entraîner une augmentation des précipitations annuelles dans les moyennes et hautes latitudes. Si on veut être plus précis, il faut distinguer le Nord et le Sud de l'Europe. L'Europe du Nord verrait ses précipitations augmenter en hiver et les précipitations neigeuses devraient se raréfier sous l'effet de l'augmentation de la température pour laisser place à des précipitations sous forme de pluie. L'Europe du Sud devrait quant à elle voir ses précipitations diminuer pendant l'été [6] [7] [13] [14].

Différentes tendances de variations des précipitations aux échelles saisonnière et annuelle ont déjà pu être mises en valeur au cours du dernier siècle : stabilité de certaines régions, augmentation de 10 à 40% pour certains pays d'Europe du Nord et jusqu'à 20% de diminution pour l'Europe du Sud [2] [3] [6] [7] [18].

Cependant, il faut comparer de manière quantitative ces évolutions avec les changements résultant de la variabilité multi décennale naturelle, ces changements naturels étant selon les experts d'une ampleur supérieure à ceux provoqués par le changement climatique d'ici à la fin du siècle [14].

o ÉVAPOTRANSPIRATION ET HUMIDITÉ DU SOL

L'humidité du sol est un indicateur très intéressant lorsque l'on aborde la question des épisodes de sécheresse puisqu'il intègre à la fois les effets des précipitations et de l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est fonction de la température, du rayonnement solaire, du vent, du taux d'humidité relative de l'air et du type de couvert végétal. Or la capacité de l'air à contenir de l'eau – sous forme de vapeur – et donc sa capacité à favoriser les processus d'évaporation et de transpiration est d'autant plus importante que sa température est grande. La question de l'humidité du sol est intimement liée au problème de l'évapotranspiration puisqu'elle dépend de l'ETP dont le sol est l'objet mais qu'inversement l'évaporation réellement constatée est limitée par la quantité d'eau présente dans le sol [21].

En conséquence, dans les régions humides, où le taux d'humidité est le facteur limitant, l'évapotranspiration réelle est égale à l'ETP et le réchauffement de la planète qui s'amorce est donc susceptible d'entraîner une augmentation de l'évapotranspiration du sol. Pour des régions sèches, l'évapotranspiration réelle n'est gouvernée que par les ressources en eau du sol et des plantes et elle est très inférieure à l'ETP et de ce fait peu de changements devraient être observés [14].

D'autre part, si on s'intéresse aux aspects saisonniers des phénomènes, les conclusions auxquelles ont abouti les experts sont les suivantes : en Europe, suite à l'augmentation de température, l'évapotranspiration serait plus forte qu'avant en hiver et au printemps et donc que l'humidité du sol serait de plus en plus faible pendant l'été puisque les précipitations durant cette même période devraient, dans le cas le plus favorable, rester stable [14].

Précisons enfin qu'une modification de l'humidité du sol entraînera une modification du couvert végétal, phénomène qui viendra à son tour modifier l'évapotranspiration et le ruissellement du sol considéré [14].

Quantitativement, à titre d'exemple, sur le bassin versant du Rhône, l'évapotranspiration potentielle pourrait augmenter de 15% d'ici 2050 [20]. En Espagne, d'ici 2060, c'est une augmentation allant de 11% à 40% suivant le bassin versant considéré qui est avancée [2].

o EAUX SOUTERRAINES

La disponibilité des eaux souterraines est directement liée à la notion de sécheresse mais aussi à celle de crue (cas des crues de nappe qui sont les conséquences de remontées du niveau piézométrique au dessus du niveau du sol).

L'augmentation des précipitations hivernales permettra une recharge plus importante des nappes phréatiques durant cette même période. Mais à l'opposé, l'évapotranspiration accrue durant l'hiver est susceptible d'atténuer voire d'annuler ces bénéfices sans que l'on sache à l'heure actuelle quel sera le bilan net de ces deux processus concurrents, celui-ci étant grandement dépendant des caractéristiques physiques de la nappe souterraine considérée [14].

Considérons tout d'abord le cas – le plus répandu – des nappes libres, c'est-à-dire dont le toit est la surface piézométrique coïncident. Elles sont rechargées directement par les précipitations locales, les rivières et lacs. Elles apparaissent donc comme très sensibles aux changements climatiques. Le stock d'eau qu'elles contiennent est directement influencé par les flux : volume des précipitations, pertes par remontées capillaires dues à l'évapotranspiration. Les pertes par remontées capillaires diminuant au fur et à mesure que le toit de la nappe baisse, une nappe profonde sera, en proportion, moins touchée par une augmentation de la température à la surface du globe [14].

Le cas des aquifères confinés, c'est-à-dire comprises entre deux couches géologiques imperméables est différent. En effets les échanges qui se produisent à leurs limites se font à

des échelles temporelles et spatiales beaucoup plus grandes ; on a donc un effet tampon qui limite les impacts du changement climatique sur ce type de ressource. Cependant elles sont beaucoup plus sensibles à l'utilisation que l'Homme en fait [14] [21].

À titre d'exemple, en Espagne, d'ici 2060, une baisse de près de 20% de la ressource disponible est prévue [2]. Dans le bassin versant de la Seine, la nappe de la Craie pourrait subir une variation piézométrique pouvant aller jusqu'à 7 m à certains endroits [5].

o LES ÉCOULEMENTS DE SURFACE

Ils sont en relation directe avec les éléments évoqués précédemment et le rapprochement avec les crues et les sécheresses est immédiat.

Les modifications des volumes annuels sont les conséquences de deux phénomènes concomitants : la variation de la quantité annuelle de pluie et l'augmentation de la température [10] [14].

D'un point de vue « théorique », l'augmentation des précipitations en hiver dans les régions du Nord induirait plusieurs changements. Là où les précipitations neigeuses se transformeront en précipitations pluvieuses, c'est-à-dire essentiellement dans l'Ouest, on assisterait à la fois une augmentation des débits en hiver mais aussi un bouleversement du régime hydrologique pour les cours d'eau à régime nival dans la mesure où le stockage des précipitations hivernales sous forme de neige diminuerait ; les débits au printemps et en été, issus majoritairement de la fonte des neiges, devraient quant à eux diminuer fortement. Ailleurs, ce sont les débits au printemps et en été qui devraient augmenter. Au Sud de l'Europe, la baisse des précipitations en été provoquera elle aussi une baisse des débits d'étiage, favorisant donc les épisodes de sécheresse, augmentant à la fois leur durée et leur intensité [2] [14].

Les tendances proposées ci dessus sont confirmées par les observations récentes. En effet, une légère augmentation des débits annuels a pu être observée dans les régions d'Europe de l'Ouest [14]. En Europe de l'Est, on a assisté à un décalage des périodes de crue. Habituellement situées au printemps, elles se produisent de plus en plus tôt [14]. On retrouve bien ici la manifestation du changement du régime hydrologique des cours d'eau. De même, dans les régions sub-arctiques, ce phénomène a aussi pu être mis en évidence [3] [23].

ÉVÈNEMENTS HYDROLOGIQUES EXTRÊMES : RETOUR D'EXPÉRIENCE ET PERSPECTIVES

o ANALYSES RÉTROSPECTIVE DES ÉVÈNEMENTS HYDROLOGIQUES EXTRÊMES DES DERNIÈRES DÉCENNIES

Cette partie revient sur les différentes observations qui ont pu être faites au cours des dernières décennies en matière de crues et de sécheresses (fréquence, intensité...).

Les observations

Les dix dernières années ont été le théâtre d'évènements hydrologiques extrêmes importants et largement médiatisés : sécheresse de l'été 2003, crue de l'Oder en 1997, crue du Rhône en 2003, crue du Danube et de l'Elbe en 2002, crue du Gard en 2002, etc [9].

Ceci a pu laisser dans l'esprit des gens l'impression que les crues et les sécheresses récentes ont été plus nombreuses et plus intenses et nombreux sont ceux qui ont relié cette apparente recrudescence au changement climatique, et ce pour diverses raisons.

Or qu'observe-t-on ? En ce qui concerne les crues, une légère augmentation du nombre de crues au cours des dix dernières années sans pour autant pouvoir percevoir une quelconque tendance [8] [9] [14] [18], des statistiques fiables en la matière ne remontant qu'aux années

soixante-dix. Si on raisonne en termes d'impacts et non pas en termes purement hydrologiques, les mêmes conclusions peuvent être formulées.

De la même manière, les épisodes de sécheresse apparaissent comme plus fréquents mais là encore aucune tendance nette n'est apparue [8] [9] [14].

Quelques tentatives d'explication

Les évolutions récentes peuvent conforter certains dans leurs inquiétudes et amplifier le débat existant autour du changement climatique. Il faut néanmoins prendre garde à la signification et à la pertinence des observations et des indicateurs considérés et à la confiance qu'on peut leur accorder.

On peut tout d'abord évoquer l'évolution des connaissances et des moyens de mesure et insister sur la baisse du niveau d'acceptabilité des populations, qui peuvent laisser croire à une recrudescence dramatique des crues depuis quelques années, alors qu'une analyse historique plus approfondie s'impose. Il est en effet peut-être utile de rappeler que les crues les plus importantes observées sur la Loire ou le Rhône remontent au XIX^{ème} siècle.

De plus et surtout, comme il a déjà été signalé précédemment, le climat, et donc le changement climatique, n'est qu'une des multiples causes de développement des crues et des sécheresses. L'Homme a, par ses activités, ses aménagements et sa gestion de la ressource, parfois aggravé aussi bien l'aléa que la vulnérabilité. Certaines études montrent d'ailleurs que les modifications induites par ces facteurs sont supérieures à celles imputables au réchauffement récent de la planète [8] [9] [14].

Enfin, dans le même ordre d'idées, il convient d'insister sur les aspects sociologiques et psychologiques liés aux événements hydrologiques extrêmes. La médiatisation croissante des crues et des sécheresses et la perte de la culture du risque ont laissé croire à leur amplification.

On voit donc qu'au-delà d'observations déjà peu probantes, il n'est pas si aisé d'en attribuer les responsabilités. Le changement climatique est parfois mis en avant comme étant à l'origine des évolutions récentes et ce afin d'éviter une remise en cause d'aménagements passés. Ceci tend à faire apparaître les crues et les sécheresses comme des événements inéluctables. À l'inverse, les crues et sécheresses récentes sont parfois utilisées comme des preuves de l'existence d'un changement climatique de grande ampleur.

o COMMENT VONT ÉVOLUER LES ÉVÈNEMENTS HYDROLOGIQUES EXTRÊMES À L'HORIZON 2100 SOUS L'EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

De la difficulté d'établir des prévisions

La première source d'incertitude vient de celle issue des scénarios de changement climatique. Il a déjà été signalé que selon les scénarios d'émission et d'adaptation considérés, l'élévation de température pourrait se situer entre 1,8°C et 5,6°C [12] [15]. Cette grande imprécision s'accroît encore lorsque l'on essaie de déterminer les évolutions climatiques régionales et la variabilité des prévisions devient très importante lorsqu'on aborde la question des impacts.

Quand bien même un scénario d'évolution potentielle aurait été choisi, un second problème se pose. Les impacts du changement climatique sur l'hydrologie sont habituellement estimés à partir de scénarios de changements des données climatiques utilisées en entrée des modèles hydrologiques à partir des résultats de sorties des modèles climatiques globaux (GCM pour Global Climate Models) [14] [17] [18]. Les trois clés de développement reposent sur la construction de scénarios adéquats pour l'estimation des impacts hydrologiques, le développement et l'utilisation de modèles hydrologiques réalistes et la meilleure compréhension des liens existant entre climat et systèmes hydrologiques [14] [18].

Le cœur du problème se situe dans la différence d'échelles entre les modèles climatiques globaux (dont les résultats sont souvent exprimés à un pas de temps mensuel et avec une résolution spatiale de plusieurs dizaines de kilomètres carrés) et les modèles hydrologiques de bassins versants (qui nécessitent des données dont l'échelle temporelle est au moins le jour et l'échelle spatiale est de l'ordre de quelques kilomètres carrés) [14] [17]. En dépit des tentatives qui ont été faites afin de transformer les données issues de GCM en vue de leur utilisation en hydrologie, d'importants travaux restent à réaliser afin d'obtenir des résultats intéressants.

Les grandes tendances

Les éléments mis en avant dans les parties précédentes donnaient déjà un aperçu des évolutions prévisibles en matière d'évènements hydrologiques extrêmes.

Bien qu'une augmentation du risque d'inondation soit fréquemment citée comme un impact majeur du changement climatique, peu d'études se sont penchées de façon précise sur la problématique des crues. Cela reflète largement les difficultés à définir des scénarios crédibles d'évolution des grandes pluies (ou neiges), évènements qui conditionnent l'apparition des crues. Les modèles climatiques globaux sont actuellement incapables de simuler avec précision des pluies localisées de courte durée et de forte intensité et un changement de la moyenne mensuelle des précipitations n'est pas a priori représentative d'un changement des propriétés à pas de temps faible des pluies [14] [17].

Reynard et al ont par exemple mis en évidence une augmentation de l'amplitude des crues de la Tamise mais à une diminution de leur fréquence, phénomènes dus à l'augmentation des précipitations hivernales [22]. En Grèce, sur un bassin où les crues sont principalement générées par la fonte des neiges, l'augmentation des précipitations en hiver est susceptible de provoquer des crues, plus précoces, plus fréquentes et plus longues [19].

Comme il a déjà été précisé, les sécheresses sont beaucoup plus difficiles à définir que les inondations en termes quantitatifs. Les échelles de temps et d'espace considérées sont beaucoup plus grandes que celles utilisées lors de l'étude des crues. Une absence prolongée de précipitations peut en effet avoir des conséquences très différentes selon le stock initial d'eau dans le sol et l'utilisation qui en a été faite. Il apparaît donc beaucoup plus difficile de prévoir l'évolution des épisodes de sécheresse dans la mesure où des facteurs humains interviennent de manière notable.

Arnell a montré qu'il fallait s'attendre à une diminution des débits d'étiage en Europe de l'Ouest et à leur augmentation et à leur décalage dans l'Europe de l'Est [1]. Döll et al ont montré qu'en fonction du scénario d'émission de CO₂ retenu, les débits d'étiages de période de retour 10 ans pourraient soit diminuer d'une vingtaine de pourcents soit augmenter de près de 50% [4]. En outre, pour un même scénario, des résultats opposés ont été obtenus suivant le bassin versant considéré et en particulier sa géologie et sa capacité de stockage de l'excédent de précipitations hivernales prévu [11]. Les changements prévus au niveau des débits d'étiages sont dans tous les cas supérieurs à ceux des précipitations [2] [14].

On s'aperçoit donc qu'il est illusoire à l'heure actuelle de vouloir obtenir des prévisions globales et fiables, la grande sensibilité au scénario considéré ainsi que les caractéristiques locales de chaque bassin versant intervenant grandement dans les tendances prévues, des études locales s'avèrent donc nécessaires.

CONCLUSION

Si le changement climatique est désormais un fait avéré et en voie d'intensification, ses impacts présents et futurs restent encore en 2005 difficiles à quantifier et à prévoir de manière précise, la complexité des phénomènes mis en jeu et l'impossibilité d'établir un scénario laissant la place à de nombreuses incertitudes. L'hydrologie ne déroge pas à cette règle et les résultats avancés restent souvent très qualitatifs et généraux.

On peut toutefois apporter quelques éléments de réponse :

- Les observations récentes ne permettent pas d'établir clairement une tendance à l'augmentation des événements hydrologiques extrêmes et encore moins de l'imputer au changement climatique.
- Le réchauffement de la planète va très certainement intensifier le cycle hydrologique et donc renforcer des caractères déjà existant : zones humides plus humides, zones sèches plus sèches.
- Les événements hydrologiques extrêmes seront probablement plus nombreux et plus intenses au cours des décennies à venir sans que pour autant on puisse quantifier dans quelles proportions.

L'ignorance de l'évolution précise du climat d'ici à la fin du siècle, l'inadéquation des résultats issus des modèles climatiques et des besoins des hydrologues ainsi que la grande sensibilité aux contextes régionaux ne permettent pas de bénéficier de prévisions fiables. D'importants travaux sont en cours afin de tenter de remédier à ces lacunes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Arnell N.W.**, Climate change and global water resources. *Global Environmental Change*, 9, S31–S49, 1999, in [14]
- [2] **Ayala-Carcedo F.**, Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España y viabilidad del plan hidrológico nacional 2000, 2002
- [3] **Dankers R., Van der Linden S., Middelkoop H.**, Terrestrial hydrology and climate change in the European sub-arctics, notes to the IRISEN-II Lecture given by Hans Middelkoop, Abisko 2002
- [4] **Döll et al.**, Computation of global water availability and water use at the scale of large drainage Basins. *Mathematische Geologie*, 4, 111–118, 1999, in [14]
- [5] **Ducharne A. et al.**, influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine, *VertigO*, vol. 4, no 3, décembre 2003
- [6] **EEA**, Europe's environment : the third assessment, chapter 3 : climate change, European Environment Agency (EEA), 2003
- [7] **EEA**, Impacts of Europe's changing climate, an indicator based assessment, European Environment Agency (EEA), 2004
- [8] **EEA**, Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe, Environment issue report n°35, European Environment Agency (EEA), 2004
- [9] **EEA**, Sustainable water use, part 3 : extreme hydrological events, floods and droughts, European Environment Agency (EEA)
- [10] **Frécaut R., Pagney P.**, Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial, Masson, 1983
- [11] **Gellens, D., Roulin E.**, Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 210, 242–258, 1998, in [14]
- [12] **GIEC**, Bilan 2001 des changements climatiques : les bases scientifiques, rapport de synthèse du groupe de travail 1 du Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC)
- [13] **IPCC**, Climate change 2001 : the scientific basis : chapter 2 : observed climate variability and change, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press
- [14] **IPCC**, Climate change 2001 : impacts, adaptation and vulnerability, chapter 4 : hydrology and water resources, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press
- [15] **Le Treut H., Jancovici J.-M.**, L'effet de serre : allons-nous changer le climat, Flammarion, 2003
- [16] **Leroy-Ladurie E.**, Histoire du climat depuis l'an mil, volumes 1 et 2, Flammarion, 1997
- [17] **MIES**, Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle, rapport de la Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre, 2000
- [18] **OcCC**, La Suisse face au changement climatique, impacts des précipitations extrêmes, rapport sur l'état des connaissances, Organe consultatif en matière de recherche sur le climat et les Changements Climatiques (OcCC), 1998
- [19] **Panagoulia D., Dimou G.**, Sensitivity of flood events to global climate change. *Journal of Hydrology*, 191, 208–222, 1997

- [20] **Redaud J.-L. et al**, Changement climatique et impact sur le régime des eaux en France, document réalisé pour le compte de l'UICN à la demande de la MIES, 2002
- [21] **Réménieras G.**, L'hydraulique de l'ingénieur, Eyrolles, 1986
- [22] **Reynard et al**, The potential impacts of climate change on the flood characteristics of a large catchment in the UK. In: Proceedings of the Second International Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, August 1998. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland, pp. 320–332, in [14]
- [23] **Saelthun et al**, Climate change impacts on runoff and hydropower in the Nordic countries. TemaNord, 552, 170 pp, 1998, in [14]