

Ingénieurs, chercheurs, étudiants, gestionnaires

ISABELLE LA JEUNESSE

PHILIPPE QUEVAUVILLER



Changement climatique et cycle de l'eau

Impacts, adaptation, législation
et avancées scientifiques



Lavoisier
TEC & DOC

Changement climatique et cycle de l'eau

Impacts, adaptation, législation
et avancées scientifiques

ISABELLE **LA JEUNESSE**

Docteur en géographie de l'environnement,
maître de conférences à l'Université François-
Rabelais de Tours, chercheur à l'UMR CNRS 7324
CITERES, Maison des Sciences de l'Homme,
chercheur associé à l'UMR CNRS 6554 LETG-Angers

PHILIPPE **QUEVAUVILLER**

HDR en chimie, docteur d'université en chimie,
docteur de 3^e cycle en océanographie,
professeur associé à l'Université libre
de Bruxelles (VUB)



Changement climatique et cycle de l'eau

Impacts, adaptation, législation
et avancées scientifiques

L*avoisier*
TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Du même auteur

Protection des eaux souterraines

Ph. Quevauviller, 2010

Métrologie en chimie de l'environnement

Ph. Quevauviller, 2^e édition, 2006

Matériaux de référence pour l'environnement

Ph. Quevauviller, 2002

Chez le même éditeur

Chimie et pollution des eaux souterraines

O. Atteia, 2015

Écologie des zones humides – Concepts, méthodes et démarches

J.-B. Bouzillé, 2014

Connaissance de la biodiversité végétale – Démarches et outils technologiques

J.-B. Bouzillé, 2014

Surveillance sanitaire et microbiologique des eaux

C. Delarras, B. Trébaol, J. durand, 2^e édition, 2010

Diagnostic, aménagement et gestion des rivières

G. Degoutte, 2012

Eau, environnement et santé publique

R. Vilagines, 3^e édition

Écologie des eaux courantes

E. Angelier, 2000

Les biomarqueurs dans l'évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques

J.-C. Amiard, C. Amiard-Triquet, 2008

Direction éditoriale : Fabienne Roulleaux

Édition : Mélanie Kucharczyk

Couverture : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq

Fabrication : Estelle Perez

Composition : Desk (53)

Impression : Snel Grafics (Belgique)

Photo de couverture : © Ph. Quevauviller

PRÉAMBULE

Ce livre est pour moi le résultat d'un parcours mêlant diverses expériences dans les mondes de la recherche scientifique, la législation et l'enseignement universitaire. Comme mes précédents ouvrages publiés par les Éditions Tec & Doc-Lavoisier (*Matériaux de référence pour l'environnement* en 2002, 2^e édition de *Métrologie en chimie de l'environnement* en 2006 et le dernier en date sur la protection des eaux souterraines en 2010), il représente la fin d'un cycle qui a concerné la programmation de la recherche dans le domaine du changement climatique et de son impact sur le cycle de l'eau.

Le sujet du changement climatique est au cœur des débats politiques depuis plus d'une décennie, et il mêle étroitement des considérations d'ordre politique avec des bases de connaissances en constante évolution. Ma formation universitaire en géologie et océanographie ne pouvait pas me laisser insensible à ces débats, souvent contradictoires, sur l'impact du changement climatique sur notre environnement. Mes expériences au sein de la Commission européenne en matière de programmation de la recherche et de législation (avec ma participation à l'adoption de deux directives liées à la directive-cadre sur l'eau) m'ont conduit à aborder le sujet du changement climatique tout d'abord avec un œil législatif par les discussions sur les besoins d'adaptation dans le contexte des plans de réseaux hydrographiques de la directive-cadre sur l'eau, puis par curiosité scientifique par la gestion de programmes européens de recherche. Mon activité d'enseignement universitaire est une prolongation naturelle de ce mélange entre la législation et la science, avec la direction de thèses de master d'étudiants d'Asie, d'Afrique ou d'Amérique du Sud sur le thème de l'impact du changement climatique sur la gestion des ressources en eau dans leurs pays.

Dans ce contexte, j'ai participé à de nombreux débats entre scientifiques et législateurs, en me confrontant souvent à la difficulté d'établir un dialogue entre les différentes communautés et en jouant parfois le rôle de médiateur pour assurer un meilleur transfert des connaissances et une identification plus structurée des besoins de recherche répondant aux agendas législatifs. J'ai ainsi été amené à créer des ponts entre des projets de recherche sous ma responsabilité et des législateurs et parties prenantes, potentiellement utilisateurs des résultats de la recherche. Je me souviens de l'impression très mitigée que j'ai eu de la 15^e Conférence des Parties (COP15) à laquelle j'ai assisté à Copenhague en décembre 2009, une sorte de foire du Trône aux très décevantes conclusions... La 21^e Conférence sur le climat se tiendra à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015 ; on peut espérer que ses résultats seront plus probants, en particulier pour ce qui concerne les efforts d'atténuation et d'adaptation.

C'est dans le cadre d'un projet européen sur l'impact du changement climatique sur l'eau et la sécurité en Méditerranée (projet CLIMB) que j'ai rencontré Isabelle La Jeunesse, maîtresse de conférences à l'université de Tours, qui travaillait au cœur de cette interface entre science et législation, et que nous avons décidé d'unir nos expériences pour proposer une synthèse sur le changement climatique et le cycle de l'eau en langue française.

Ce livre reflète notre travail commun, et en particulier le cadre de travail européen en matière d'avancées législatives et scientifiques dans le domaine de la gestion des ressources en eau et des incidences du changement climatique. Il tient compte du 5^e rapport du GIEC et d'ouvrages de référence en langue anglaise pour ce qui concerne la base de connaissances sur le climat et l'eau, et donne un aperçu des perspectives en matière de législation (principalement liées à la directive-cadre sur l'eau) et de recherche

(informations sur des projets du 7^e programme-cadre de recherche et développement, et sujets ouverts dans le nouveau programme Horizon 2020).

La liste de celles et ceux qui ont contribué à la somme de connaissances sur laquelle se fonde cet ouvrage serait trop longue pour un préambule. Elle comprend plus d'une centaine d'organismes de recherche qui ont participé aux différents projets de recherche européens que j'ai eu le plaisir et l'honneur de gérer pour la Commission européenne, ainsi que des femmes et hommes « de terrain » qui sont directement confrontés aux défis scientifiques et techniques de la mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau et des mesures d'adaptation au changement climatique qui devront être prises dans le cadre du 2^e plan de gestion des réseaux hydrographiques (2015-2021). Parmi eux, je souhaite exprimer ma reconnaissance particulière aux « piliers » sur lesquels je me suis appuyé pour établir des ponts effectifs entre la science et la législation dans le domaine du changement climatique et de la sécurité avec Ralf Ludwig (université de Munich), de l'impact du changement climatique sur les glaciers avec Daniel Beniston (université de Genève), des inondations avec Philippe Goursbeville (université de Nice-Sophia Antipolis) et Daniel Sempere Torres (université de Barcelone), des tempêtes côtières avec Paolo Ciavola (université de Ferrara), Oscar Ferreira (université d'Algarve) et Barbara Zanuttigh (université de Bologne), des sécheresses avec Henny Van Lanen (université de Wageningen), Dyonisis Assimacopoulos (université d'Athènes), Ana Iglesias (université de Madrid) et Thierry Davy (alors représentant des agences de l'eau à Bruxelles), sans oublier les connaissances acquises en matière de modèles climatiques avec Richard Harding (*Center for Ecology and Hydrology*, Wallingford) et les débats passionnés et passionnants sur la dimension historique des aléas climatiques avec Emmanuel Garnier (Institut universitaire de France). Je remercie enfin Isabelle La Jeunesse de s'être jointe à moi pour la rédaction de cet ouvrage qui n'aurait pas pu être mené à bien sans elle !

Je remercie également Francis Grousset, paléo-climatologue de renom, qui se qualifie désormais de « post-actif », d'avoir bien voulu rédiger la préface de notre ouvrage. Nous avons une longue histoire commune depuis plus de trente ans, tant sur le plan scientifique que privé, et voir son nom associé à mes écrits est pour moi une joie sincère. Francis fait partie des personnes qui ont représenté pour moi une « croisée de chemins » et je suis heureux et fier de notre amitié.

Je dédie ce livre à mon père, Pierre Quevauviller, qui après une carrière brillante d'ingénieur aéronautique, ne cesse de s'interroger sur la pertinence de tous les débats sur le changement climatique en considération de notre place dans l'univers... Je partage certains de ses questionnements souvent sceptiques sur ces débats, en particulier pour ce qui concerne la validité de beaucoup de modèles climatiques et la proportion entre le cycle naturel et la responsabilité anthropogénique du changement qui reste à ce jour controversée, mais ces incertitudes, qui demandent au demeurant un renforcement de la recherche dans ce domaine, ne peuvent pas cacher le fait scientifiquement démontré que le changement climatique est une réalité et qu'il a un impact direct sur les ressources en eau. J'espère que la lecture de cet ouvrage pourra l'en convaincre. Je dédie également ces écrits à mon cercle familial, sans qui ce livre n'aurait pas vu le jour : mon épouse et mon pilier, Sabine, qui accepte que ses soirées soient rythmées par le cliquetis de mon clavier, mes enfants Élodie, Adrien et Louis qui m'ont permis de grappiller toutes les minutes nécessaires à la rédaction de cette synthèse, et ma chienne Samba qui s'est régulièrement vautrée sans vergogne sur les épreuves à corriger de l'ouvrage.

PRÉFACE

Pourquoi écrire un livre sur les relations entre le changement climatique et le cycle de l'eau ? Cette préoccupation s'inscrit dans un débat plus vaste, engagé il y a plus de vingt ans : la planète est en train de vivre un changement climatique majeur provoqué par l'action de l'homme, qui a des impacts considérables, en particulier sur le cycle de l'eau. Les scientifiques en ont pris conscience, les décideurs travaillent sur les mesures à prendre, sur la politique à mettre en place pour s'adapter à la situation et pour éventuellement l'enrayer.

Cet ouvrage est une contribution inédite en ce sens qu'il aborde successivement tous les aspects du problème, allant de ce que la communauté scientifique sait sur le changement climatique, sur les impacts attendus pour la planète – en particulier sur le cycle de l'eau –, mais aussi sur les mesures d'adaptation qui sont progressivement mises en place, sur la législation qui est progressivement élaborée (en particulier au niveau européen), et enfin il promeut l'idée qu'il faut absolument faire travailler ensemble toutes les communautés concernées.

Rappelons quel est l'enjeu. Depuis quelques décennies les scientifiques observent des événements inquiétants à la surface de la Terre. Il ne se passe pas un mois sans que les médias ne nous annoncent des catastrophes majeures : inondations violentes, sécheresses, érosions littorales intenses, contaminations de nappes d'eau, glissements de terrain, atteintes à la biodiversité, etc. Pendant longtemps les scientifiques étaient réticents à relier systématiquement ces événements au changement climatique global. Leur discours commence à évoluer, et désormais ils confirment souvent un lien direct pour nombre de ces catastrophes.

Depuis la publication en 2014 du 5^e rapport du GIEC, nous disposons de nouvelles sorties de modèles sur la durée du XXI^e siècle. Nous savons bien que ces projections sont imparfaites et qu'elles sont affectées par de fortes incertitudes, que les modélisateurs travaillent désormais à réduire. Ces projections sont fondées sur quatre scénarios, allant d'une hypothèse optimiste (suppression totale et immédiate de toute émission de gaz à effet de serre à la surface de la Terre) à une hypothèse pessimiste (on ne change rien à rien, scénario que les Anglo-Saxons nomment *business as usual*). Nous avons désormais vingt-cinq ans de recul depuis le premier rapport du GIEC (1990). Il est donc possible de comparer ses projections avec les données instrumentales. Il apparaît que le climat de la Terre évolue selon la trajectoire la plus pessimiste (scénario RCP8.5) et que cette tendance est vérifiée pour plusieurs paramètres (température, niveau des océans, acidité de l'océan, albédo, précipitations, etc.).

Cet ouvrage est plus particulièrement dédié aux impacts sur le cycle de l'eau. En effet, les modèles révèlent qu'une très forte redistribution géographique des précipitations est attendue à la surface des continents. D'ici la fin du siècle, on peut s'attendre à des déficits de précipitations pouvant atteindre 25 % dans de nombreuses régions (zone péri-méditerranéenne, Amérique centrale, sud de l'Afrique, Chili, nord du Brésil, etc.) et donc à des sécheresses catastrophiques. On a d'ores et déjà pu constater des réductions du débit de certaines rivières : c'est le cas pour les fleuves et rivières du sud de la France (-30 % en trente ans). Simultanément, d'autres régions seront sujettes à un fort accroissement des précipitations (Philippines, sud de la Chine, Inde, Scandinavie, Québec, Sibérie), et donc à des inondations majeures.

On sait bien que l'eau est un bien précieux qu'il faut préserver à tout prix et que cette préservation va devenir une priorité absolue à l'avenir. Parallèlement, le stress climatique a commencé à affecter toutes les espèces biologiques, et donc la biodiversité. Parmi celles-ci, l'espèce humaine est concernée en premier lieu. En 2006, le concept de « réfugiés climatiques » est apparu dans le rapport d'un groupe de travail présidé par l'économiste Sir Nicolas Stern, ancien vice-directeur de la Banque mondiale. Ce rapport accorde une place privilégiée au problème croissant de l'eau dans le monde (inondations, sécheresses, eau potable, etc.). Dans ses conclusions, il annonce que dans les dix ans (2006 à 2016), ce sont environ 200 millions de réfugiés climatiques qui seront amenés à se déplacer à la suite de perturbations climatiques affectant principalement le cycle de l'eau. Bien que ce chiffre parût excessif en 2006, il semble hélas se confirmer : en effet, le *Norwegian Refugee Council* a évalué à plus de 32 millions le nombre de personnes déplacées à la surface de la planète durant l'année 2012, pour des raisons climatiques. Nous sommes donc en train de vivre une crise qui débute et qui, si rien n'est fait, devrait prendre des proportions que personne ne souhaite.

On comprend dès lors que l'un des défis majeurs que nous devons désormais relever est bien l'évaluation la plus précise possible des impacts du changement climatique en cours sur le cycle de l'eau, et ce à l'échelle de la planète. Pour cela, il faut poursuivre les efforts développés pour mettre en place des systèmes de prévision, des méthodes de gestion et d'adaptation, et cet ouvrage est entièrement orienté vers cet objectif.

Que faire désormais ? Il faudrait travailler simultanément selon trois pistes principales :

- tout d'abord, poursuivre l'étude du problème à un niveau international (c'est ce qui est réalisé par l'ONU, à travers les travaux du GIEC), à un niveau européen (l'EU finance des programmes de recherche tels que le 7^e PCRD et désormais Horizon 2020). Ces programmes ont abordé le problème de l'eau (par exemple, comment prévoir puis gérer des événements extrêmes tels que les sécheresses ou les inondations ?). Des réseaux européens ont été conçus et financés : ils obtiennent déjà des résultats encourageants. Des législations sont mises en place, telles que la DCE (directive-cadre sur l'eau) ;
- par ailleurs, il faut poursuivre l'effort de réduction des gaz à effet de serre. Le responsable principal du changement climatique est d'origine anthropique : nous émettons trop de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, etc.). Ce défi climatique nouveau n'a pas un caractère inéluctable et il convient de mettre en place très vite des contre-mesures visant à réduire nos émissions. De nombreux pays ne font pas suffisamment d'efforts. Néanmoins, beaucoup se sont lancés dans une réflexion active sur l'attitude à adopter désormais. Pour être efficace, ce type d'action ne peut être engagé qu'à l'échelle globale. Depuis vingt-cinq ans, les diverses conférences internationales dédiées à cet effort de réduction se sont pour la plupart soldées par des succès mitigés, pour ne pas dire des échecs. Un grand rendez-vous nous attend désormais à la fin de l'année 2015 : la COP21 doit se tenir à Paris ; plus de 190 pays devraient signer un engagement à réduire leurs émissions de 50 % d'ici 2050. Espérons qu'ils y parviennent enfin, et qu'ensuite cet engagement soit réellement mis en application ;
- enfin, il reste un domaine peu abordé, qui devrait apporter un éclairage nouveau : celui de l'étude de situations climatiques analogues à l'actuelle, qui se sont produites dans le passé. La paléoclimatologie nous apprend que nous avons déjà connu une

situation semblable à la période actuelle Holocène : l'Eémien (stade 5^e). Cette période se situe il y a 125 000 ans. La température était alors probablement plus élevée de +2 °C et le niveau des océans était plus haut de ≈ 4 m. Cette période n'est pas exactement analogue à l'Holocène car l'insolation était alors plus élevée, mais son étude approfondie permettrait de comprendre comment la planète a réagi à un réchauffement de même ordre de grandeur que celui vers lequel nous nous dirigeons, de comprendre comment elle s'y est adaptée, comment les écosystèmes et la biodiversité ont été affectés, comment le cycle de l'eau a été impacté. Un point critique qui va devoir être étudié est l'impact de la vitesse du réchauffement sur la capacité d'adaptation et de résilience des écosystèmes et de la biodiversité. Là aussi, l'étude de l'environnement éémien par des palynologues devrait faire progresser la connaissance sur ce problème. Il semble donc indispensable qu'un programme de recherche majeur soit lancé par l'Europe sur l'étude de cet épisode climatique clé, pour une meilleure compréhension du futur.

On a déjà beaucoup écrit sur le sujet. En revanche, alors que généralement les communautés concernées travaillent indépendamment, cet ouvrage ouvre des pistes pour rapprocher les scientifiques, les industriels, les décideurs, les parties prenantes. La démarche de rapprochement qui est développée en détail dans cet ouvrage est très originale et en fait un ouvrage unique, qui intéressera non seulement les décideurs et les politiques, mais aussi les parties prenantes, le monde de la recherche et le monde académique.

Francis Grousset

Directeur de recherche CNRS honoraire

AVANT-PROPOS

Le diagnostic du risque climatique et de l'influence de la composition chimique de l'atmosphère n'est pas un fait nouveau. On accorde même à Svante Arrhénius, chimiste suédois (1859-1927), la première estimation en 1896 de la composition de l'atmosphère, dans laquelle l'auteur explique que la combustion d'énergie fossile peut avoir un lien avec le climat. En 1935, un modèle à compartiments prenant en compte la biosphère et développé par le Russe Kostitzin tente de réfuter les hypothèses d'Arrhénius sur les évolutions passées de l'atmosphère (Deléage, 2000). C'est le début de la modélisation climatique ! Après une période d'oubli de ces études, le dernier diagnostic remonte aux années 1970 par le constat qu'après une période de quasi-stabilité durant les 10 000 dernières années de l'histoire de la planète, la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone, ne cesse d'augmenter. Dès 1979, un rapport de l'Académie des sciences américaine, qui s'était alors concentrée sur les effets directs sur le climat de la teneur en CO₂ de l'atmosphère, concluait que de nombreux travaux scientifiques convergeaient vers le fait qu'un doublement de la teneur en dioxyde de carbone sur la première moitié du XXI^e siècle suffirait à augmenter la température globale de 3 °C (+ ou - 1,5 °C) (Charney, 1979) avec des effets majeurs sur le climat et les activités humaines à l'échelle régionale. Les deux échelles, globale et régionale, sont clairement affichées comme interdépendantes. Pour certains climatologues, c'est certainement suite à cette prise de conscience du risque attaché à ces modifications rapides du climat qu'un « groupe de scientifiques bénévoles, constamment renouvelés, et chargé d'exprimer les éléments de consensus et de désaccord au sein de la communauté scientifique » s'est constitué. Le Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ou GIEC (IPCC en anglais pour *Intergovernmental Panel on Climate Change*) a ainsi été créé en 1988 par deux institutions des Nations unies : l'Organisation météorologique mondiale (OMM, WMO en anglais pour *World Meteorological Organisation*) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE, UNEP en anglais pour *United Nations Environment Programme*). Le GIEC est donc ouvert, par essence, à tous les pays membres de ces deux organisations. Le GIEC a pour mandat d'évaluer, sans parti pris, de manière méthodique et objective, l'information scientifique, technique et socio-économique disponible en rapport avec la question du changement du climat. Même s'il n'est pas un organisme de recherche, ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue. L'une des principales activités du GIEC consiste à procéder, à intervalles réguliers, à une évaluation de l'état des connaissances relatives au changement climatique. Le GIEC publie ainsi deux types de rapports : des rapports scientifiques sur l'avancée des connaissances sur l'évolution du climat et des synthèses destinées aux acteurs politiques. C'est sur la base des travaux du GIEC que s'est tenue la Conférence des Parties (COP, *Conference of Parties*) à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), adoptée en 1992, et à son protocole de Kyoto adopté en 1997, dont la 21^e édition se tiendra à Paris à la fin de l'année 2015.

Si l'on peut définir le climat comme l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérise l'état moyen de l'atmosphère pour une localité précise à un moment donné, en l'état actuel des connaissances, il reste compliqué d'établir la dynamique

d'un climat moyen de la planète Terre. Pourtant tous les scientifiques sont unanimes sur un réchauffement climatique en cours et la quasi-totalité d'entre eux y voient une implication directe des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ainsi, l'observation des modifications de l'état moyen de l'atmosphère terrestre cherche à trouver des justifications dans les interactions avec toutes les composantes terrestres à savoir entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère ainsi que la lithosphère. Aussi c'est bien à l'explication des faits et à la prévision d'un climat futur que travaillent depuis plus de dix ans les experts du GIEC pour qui « le réchauffement du système climatique est sans équivoque ». Les travaux du GIEC, relatés par leurs rapports successifs dont le premier fût achevé en 2001, font la démonstration de cette affirmation par la forte corrélation entre l'évolution de la teneur en CO₂ de l'atmosphère en liaison avec l'explosion de la consommation d'énergie fossile à partir du début du xx^e siècle et l'augmentation de la température de l'air. Après une première série de scénarios SRES pour *Special Report on Emissions Scenarios* qui était fondée sur l'estimation des émissions des gaz à effet de serre évaluées à partir de projections socio-économiques (4^e rapport d'évaluation, *Assessment Report 4 AR4*, IPCC, 2007), le GIEC nous propose aujourd'hui une nouvelle approche qui permet un travail en parallèle et en cohérence des climatologues et des économistes. En effet, pour son 5^e rapport (AR5), le GIEC a défini quatre scénarios de référence qualifiés de profils représentatifs d'évolution des concentrations (RCP, pour *Representative Concentration Pathways*) de gaz à effet de serre (GES), mais aussi d'ozone et de précurseurs des aérosols pour le xxi^e siècle et au-delà, puisque les projections sont proposées jusqu'en 2300. Ces scénarios peuvent alors correspondre à des efforts plus ou moins grands de réduction des émissions de GES au niveau mondial. Pour chacun de ces quatre « profils représentatifs », les climatologues déduisent les conditions climatiques et les impacts du changement climatique associés. En parallèle, les sociologues et les économistes travaillent sur des scénarios présentant diverses caractéristiques de développements socio-économiques et diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation. Cinq familles de scénarios, nommés SSP pour *Shared Socio-economic Pathways*, ont ainsi été définies.

L'objet de cet ouvrage n'est pas d'établir un état de l'art sur les modèles climatiques et les quelques controverses qui demeurent, mais bien de comprendre où en sont les évolutions des études d'impact des changements climatiques sur les ressources en eau.

Au-delà de la variabilité spatiale et temporelle naturelle de la distribution de l'eau, l'impact du changement climatique, toujours selon le GIEC, concerne tous les compartiments du cycle de l'eau, à savoir sur l'évapotranspiration de la biosphère et l'évaporation des nappes d'eau libres, l'humidité du sol, les précipitations, la neige et les glaciers, le ruissellement et l'écoulement dans les versants, les débits dans les cours d'eau, l'infiltration et la recharge des aquifères, et enfin le niveau des mers. Aussi, l'eau et le changement climatique sont liés dans tous les compartiments de la sphère climatique : atmosphère, hydrosphère et biosphère. C'est dire si les impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau peuvent prendre des formes multiples !

Si encore trop peu d'études permettent d'affirmer aujourd'hui quels seront les impacts directs du changement climatique sur le cycle de l'eau et les événements extrêmes d'inondations et de sécheresses, plusieurs observations d'évolution dans les compartiments de l'hydrosphère sont déjà attribuées au changement climatique, et l'étude des modèles climatiques et hydrologiques à l'échelle des bassins versants progresse. Or les premiers résultats semblent converger vers une variabilité de situations au cours du siècle, c'est-à-dire aussi vers des situations parfois opposées pour une même région entre excédent et déficit par rapport à la situation normale de référence.

Ainsi, la gestion de la ressource en eau est face à un défi majeur : la capacité à s'adapter à l'excès comme à la pénurie. Quelle sera l'ampleur des modifications ? Comment réguler les usages dans un contexte de variabilité ? Y a-t-il de fortes distorsions géographiques ? Comment distinguer les problématiques aux différentes échelles spatiales et temporelles ? Finalement, pourquoi établit-on un lien entre changement climatique, eau et sécurité ?

Après avoir rappelé les modes de prédiction de la variabilité et du changement climatique et les scénarios utilisés pour prédire le climat futur à différentes échelles temporelles dans ses deux premiers chapitres, cet ouvrage présente, dans son troisième chapitre, un état des impacts possibles connus, bien que non exhaustif, du changement climatique sur le cycle de l'eau. Les mesures de gestion, comprenant les principes de gestion intégrée des ressources en eau dans le contexte de la variabilité climatique, sont rappelées et les mesures d'adaptation au changement climatique sont discutées, ainsi que les mesures de planification à l'épreuve du climat dans les chapitres 4, 5 et 6. L'ouvrage aborde ensuite les principaux atouts et points à développer du cadre réglementaire de la politique de l'eau dans l'Union européenne et les implications du changement climatique. Enfin, l'ouvrage donne dans ses derniers chapitres un aperçu de programmes de recherche européens et de l'état d'avancement de la création d'interface entre science et législation.

**Isabelle La Jeunesse
Philippe Quevauviller**

LISTE DES PRINCIPAUX ACRONYMES

| | |
|----------------|--|
| ACQWA | Projet européen sur les impacts climatiques sur l'eau |
| AEE | Agence européenne pour l'environnement |
| AMO | Oscillation atlantique multi-décennale |
| AR4 (ou AR5) | Rapport d'évaluation du GIEC (<i>Assessment Report</i>) |
| BAT (ou MTD) | Meilleures techniques disponibles (<i>Best Available Techniques</i>) |
| CAFE | Programme « air pur pour l'Europe » |
| CCNUCC | Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques |
| CEPMMT | Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme |
| CFP | Cadre financier pluriannuel |
| CIRCE | Projet européen sur le changement climatique en Méditerranée |
| CIS | Stratégie commune de mise en œuvre de la DCE (<i>Common Implementation Strategy</i>) |
| Climate-ADAPT | Plateforme européenne en ligne sur l'adaptation |
| CLIMB | Projet européen sur l'impact du climat sur l'eau et la sécurité |
| CLIWASEC | Groupe de projets sur le changement climatique en Méditerranée |
| CMIP5 | 5 ^e phase du projet d'inter-comparaison de modèles couplés |
| CNES | Centre national d'études spatiales |
| CNRM | Centre national de recherches météorologiques (France) |
| COI | Commission océanographique intergouvernementale de l'Unesco |
| COP | Conférence des Parties |
| CORDEX | <i>Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment</i> |
| CORFU | Projet européen sur la résilience aux inondations dans les villes |
| DCE | Directive-cadre européenne sur l'eau |
| DROUGHT-RSPI | Projet européen sur les sécheresses et l'interface science-législation |
| ENSEMBLES | Projet européen sur les modèles climatiques |
| ENSO | Oscillation El Niño (<i>El Niño Southern Oscillation</i>) |
| ERANET | Coordination de programmes nationaux de recherche |
| EUWATERMAN | Projet européen sur la gestion intégrée des ressources en eau |
| FAO | <i>Food and Agriculture Organization</i> |
| FPEIR | Forces directrices, pressions, état, impact et réponses |
| GES | Gaz à effet de serre |
| GIEC (ou IPCC) | Groupement intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| GIRE (ou IWRM) | Gestion intégrée des ressources en eau |

- GMES *Global Monitoring for Environment and Security* (COPERNICUS)
- GWP *Global Water Partnership*
- HFA Cadre d'action Hyogo sur la réduction des risques de catastrophes
- Horizon 2020 Programme-cadre de recherche européen (2014-2020)
- ICPDR Commission internationale pour la protection du Danube
- INTERREG Projets régionaux financés par les fonds structurels européens
- IMPRINTS Projet européen sur les inondations soudaines et les coulées de boues
- JRC *Joint Research Center* (Centre communautaire de recherche)
- LEMA Loi française sur l'eau et les milieux aquatiques
- LIFE Instrument financier pour l'environnement (Commission européenne)
- MCG Modèle de circulation générale
- MCR Modèle de circulation régionale
- MICORE Projet européen sur les tempêtes côtières
- NAO Oscillation nord-atlantique
- NAP Plans nationaux d'adaptation
- NAPA Programme nationaux d'actions d'adaptation
- NCEP *National Center for Environmental Prediction*
- NOAA Administration américaine pour les océans et l'atmosphère
- NQE Norme de qualité environnementale
- OCDE Organisation de coopération et de développement économique
- OIEau Office international de l'eau
- OMM Organisation météorologique mondiale
- OMS Organisation mondiale de la santé
- ONG Organisation non gouvernementale
- PAC Politique agricole commune
- PCMDI *Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison*
- PCRD Programme-cadre de recherche et de développement
- PDO Oscillation pacifique décennale
- PGBH Plan de gestion des bassins hydrographiques
- PPR Plans de prévention des risques
- PRUDENCE Projet européen sur les simulations du climat à l'échelle régionale
- RCP Profil représentatif d'évolution de concentrations (*Representative Concentration Pathways*)
- RIOB Réseau international des organismes de bassin
- SIG Système d'information géographique

- SRES Scénarios d'émission des activités humaines
SSP Scénarios socio-économiques (*Socio-Economic Pathways*)
STARDEX *Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions*
UE Union européenne
UNDP (ou PNUD) Programme des Nations unies pour le développement
UNECE Commission économique des Nations unies pour l'Europe
UN-ISDR Stratégie internationale de réduction des risques des Nations unies
WATCH Projet européen sur le changement global et l'eau
WCRP's *World Climate Research Programmes*
WISE *Water Information System for Europe*
WSI *Water Stress Index*

SOMMAIRE

| | |
|--------------------------------------|-----|
| Préambule | V |
| Préface | VII |
| Avant-propos | XI |
| Liste des principaux acronymes | XV |

CHAPITRE 1

| | |
|---|----|
| Introduction <i>Projection de la variabilité et du changement climatique</i> | 1 |
| 1. Évolution récente du climat | 3 |
| 1.1. Principaux faits du 4 ^e rapport du GIEC | 4 |
| 1.2. Détection de tendances dans le contexte de signaux fluctuants | 6 |
| 1.3. Tendances récemment observées | 6 |
| 2. Prévisibilité de la variabilité climatique à l'échelle saisonnière | 12 |
| 2.1. Outils de prévisions saisonnières | 13 |
| 2.2. Sources de prévisibilité à l'échelle saisonnière | 15 |
| 2.3. Différences régionales dans la prévisibilité du climat | 18 |
| 2.4. Disponibilité et formats des prévisions saisonnières | 19 |
| 2.5. Utilité des prévisions saisonnières | 19 |
| 3. Prévisibilité de la variabilité climatique à l'échelle décennale | 19 |
| 3.1. Utilisation des modèles climatiques | 20 |
| 3.2. Projections pour le futur proche | 21 |
| 3.3. Projections pour le ^{xxi} siècle vues par le GIEC | 23 |

CHAPITRE 2

| | |
|---|----|
| Scénarios de changement climatique aux échelles globale et locale | 25 |
| 1. La chaîne d'information sur le climat | 26 |
| 1.1. Gaz à effet de serre et température atmosphérique | 26 |
| 1.2. Scénarios SRES | 29 |
| 1.3. Modèles climatiques globaux | 30 |
| 2. Simulations du climat à l'échelle régionale en Europe | 32 |
| 2.1. Descente d'échelle | 34 |
| 2.2. PRUDENCE | 34 |
| 2.3. ENSEMBLES | 36 |
| 2.4. CORDEX | 37 |
| 2.5. Euro-CORDEX | 39 |
| 2.6. Exemple d'application à l'étude hydrologique : le projet CLIMB (FP7) | 39 |
| 3. La justification de nouveaux scénarios du GIEC | 46 |
| 4. Des scénarios climatiques taillés sur mesure | 49 |
| 4.1. Définition d'une année standard | 50 |
| 4.2. Atlas d'effets du changement climatique à l'échelle régionale | 50 |
| 5. Conclusions et perspectives | 51 |

CHAPITRE 3

Impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau 53

1. Changements récents du cycle de l'eau 54

2. Impacts du changement climatique sur l'eau et les ressources en eau 62

 2.1. Augmentation de la fréquence des événements extrêmes 62

 2.2. Acidification des écosystèmes et des eaux de surface 64

 2.3. Impact sur les ressources littorales 65

 2.4. Augmentation de l'intensité des sécheresses 72

3. Impacts du changement et de la variabilité climatique sur les ressources en eau 76

 3.1. Débits des rivières 76

 3.2. Eaux souterraines 79

 3.3. Élévation du niveau de la mer 80

 3.4. Inondations 81

 3.5. Aridification 82

 3.6. Qualité de l'eau et santé 83

 3.7. Environnement et écosystèmes naturels 88

4. Impacts à l'échelle régionale du changement et de la variabilité climatique sur les usages de l'eau 89

 4.1. La disponibilité rapportée à la population 90

 4.2. Évolution des usages de l'eau 92

 4.3. Vulnérabilité de certains territoires 97

 4.4. Conflits et rivalités d'usages liés à la rareté de l'eau 100

5. Impacts institutionnels potentiels du changement climatique 107

 5.1. Assurance 109

 5.2. Aspects institutionnels 110

CHAPITRE 4

Gestion de l'eau dans le contexte de la variabilité climatique actuelle 113

1. Principes de gestion intégrée des ressources en eau 115

 1.1. Principes de gestion des bassins hydrographiques 118

 1.2. Gestion opérationnelle 120

 1.3. Planification 125

 1.4. Soutien analytique 128

 1.5. Bassins hydrographiques internationaux 130

 1.6. Participation du public 134

 1.7. Comment mettre la gestion des bassins en pratique ? 138

2. Pratiques courantes d'utilisations de données climatiques pour la conception d'infrastructures liées à l'eau 139

 2.1. Analyses des extrêmes 139

 2.2. Conception d'infrastructures liées aux inondations 141

 2.3. Conception d'infrastructures liées aux sécheresses 143

 2.4. Autres aspects 144

| | |
|--|-----|
| 3. Pratiques courantes et historique de gestion de la variabilité climatique | 144 |
| 3.1. Prévisions des inondations et des sécheresses | 145 |
| 3.2. Établissement de priorités lors de sécheresses | 146 |
| 3.3. Gestion des réservoirs | 148 |
| 3.4. Stratégies indigènes pour traiter des sécheresses | 148 |
| 4. Considération de la variabilité et du changement climatique | 150 |
| 5. Prise en compte de la variabilité climatique historique et actuelle | 152 |
| 6. Utilisation de prévisions climatiques saisonnières | 155 |
| 6.1. Quand utiliser des prévisions saisonnières ? | 155 |
| 6.2. Exemples d'utilisations possibles de prévisions climatiques saisonnières pour la gestion des ressources en eau | 157 |
| 7. Lien entre la gestion de la variabilité climatique et l'adaptation au changement climatique | 158 |

CHAPITRE 5

| | |
|---|-----|
| Adaptation au changement climatique dans le secteur de l'eau | 161 |
| 1. Prise en compte des incertitudes futures dans la gestion de l'eau | 163 |
| 2. Quelles sont les exigences en matière d'adaptation pour la gestion de l'eau ? | 165 |
| 2.1. Gestion des risques climatiques dans le contexte de la gestion intégrée des ressources en eau | 167 |
| 2.2. Zones côtières | 172 |
| 2.3. Grandes bassins versants | 174 |
| 2.4. Sécheresses dans les zones arides | 175 |
| 3. Gestion des risques et adaptation dans le contexte des politiques de l'eau | 177 |
| 3.1. Mécanismes globaux | 178 |
| 3.2. Mécanismes régionaux | 180 |
| 3.3. Les politiques nationales face aux changements climatiques et l'eau | 180 |
| 3.4. Mise en œuvre d'initiatives locales | 183 |
| 4. De l'intégration de l'adaptation et de l'atténuation à la mal-adaptation | 185 |
| 5. Conclusions | 187 |

CHAPITRE 6

| | |
|---|-----|
| Mesures à l'épreuve du climat | 189 |
| 1. Gestion de l'eau à l'épreuve du climat : débats et paradigmes | 190 |
| 1.1. Gestion fondamentale des ressources en eau à l'épreuve du climat | 190 |
| 1.2. Gestion adaptative à l'épreuve du climat | 191 |
| 2. Conceptualiser la mise à l'épreuve du climat | 192 |
| 2.1. Explorer le futur avec une vision de mise à l'épreuve du climat | 192 |
| 2.2. Évaluation des stratégies d'adaptation | 193 |
| 3. Transparence | 195 |
| 4. Frontières entre la science, la législation et la société | 196 |

CHAPITRE 7

Cadre réglementaire de la politique de l'eau dans l'Union européenne – Implications du changement climatique 197

1. Le cadre réglementaire établi par la directive-cadre sur l'eau 197
 - 1.1. Objectifs 197
 - 1.2. Mesures techniques 198
 - 1.3. Les directives « filles » 200
 - 1.4. Intégration des autres législations environnementales 201
 - 1.5. Étapes critiques de la DCE 206
 - 1.6. Dispositions de la DCE concernant la participation du public 207
 - 1.7. Stratégie commune de mise en œuvre de la DCE 208
2. Incidences du changement climatique sur la réglementation 210
 - 2.1. DCE et changement climatique 212
 - 2.2. Directives parentes et tendances dans le domaine des inondations et sécheresses 215
 - 2.3. Au niveau international 217
3. Perspectives vis-à-vis du changement climatique (en Europe) 219
 - 3.1. Plan d'action pour la sauvegarde des ressources en eau de l'Europe 219
 - 3.2. Stratégie d'adaptation au changement climatique de l'UE 227
4. Conclusions et perspectives pour la politique de l'eau de l'UE 233

CHAPITRE 8

Recherche européenne sur le changement climatique et l'eau *Exemples et perspectives* 237

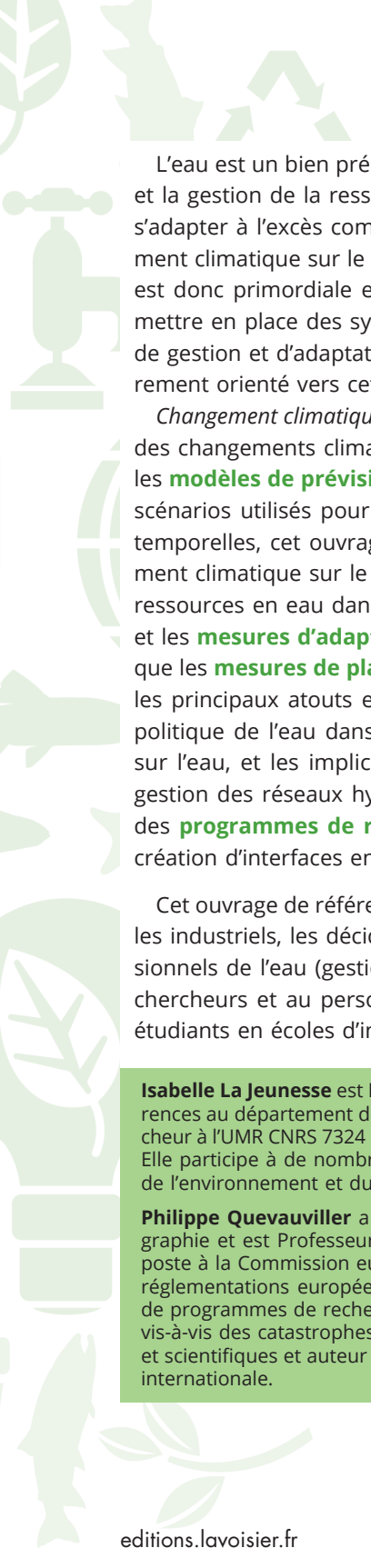
1. Intégration des avancées scientifiques dans le contexte de la gestion des eaux vis-à-vis du changement climatique 242
2. Financement de la recherche à l'échelle de l'UE 243
 - 2.1. Projets de recherche du 5^e PCRD 243
 - 2.2. Projets ciblés et intégrés du 6^e PCRD 244
 - 2.3. Projets ERA-NET du 6^e PCRD 245
 - 2.4. Le 7^e PCRD 245
 - 2.5. Projets de démonstration – Programme LIFE 246
3. Quelques exemples de projets de recherche en soutien à la législation traitant du changement climatique et des ressources en eau 247
 - 3.1. Recherche sur les scénarios climatiques 249
 - 3.2. Recherche sur les impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau 249
 - 3.3. Recherche sur les options et coûts en matière d'atténuation-adaptation 257
 - 3.4. Recherche sur les sécheresses et la rareté de l'eau 258
 - 3.5. Recherche sur les inondations 263
 - 3.6. Perspectives et besoins de recherche 268
4. Conclusions 269

CHAPITRE 9

Besoins d'interface entre la science et la législation dans le domaine de la gestion des risques climatiques 271

1. Rappels du fondement scientifique des politiques de l'eau et du climat 273
 - 1.1. Étapes clés de la législation environnementale 273

| | |
|---|-----|
| 1.2. « Interfaces environnementales » et leurs liens avec la législation | 273 |
| 1.3. Identification des besoins de recherche en soutien à la législation environnementale | 276 |
| 1.4. Processus de consultation (implication des scientifiques) | 277 |
| 2. Interactions avec la communauté scientifique | 277 |
| 2.1. Science et législation : des partenaires « naturels » ? | 277 |
| 2.2. Besoins de synthèse et de traduction | 278 |
| 2.3. Plateformes d'échanges | 279 |
| 3. Besoins d'une politique intégrée | 279 |
| 3.1. Améliorations des liens entre la législation et la recherche | 279 |
| 3.2. Pratiques d'intégration de la science dans le processus législatif | 282 |
| 3.3. Besoin d'interface entre la science et la législation | 283 |
| 3.4. Développements scientifiques vers une politique environnementale intégrée | 287 |
| 4. Conclusions, perspectives | 288 |
| 4.1. Besoins de reconnaissance de la fonction de « médiateur-traducteur » | 288 |
| 4.2. Liens effectifs entre la science et la législation de l'international vers le régional | 290 |
| 4.3. Recommandations | 293 |
| CHAPITRE 10 | |
| Conclusion, perspectives | 297 |
| 1. Besoins de recherche | 299 |
| 2. Renforcement des réseaux multidisciplinaires-sectoriels | 299 |
| 3. Anticipation des révisions à venir | 300 |
| Bibliographie | 303 |
| Index | 319 |



L'eau est un bien précieux dont la préservation devient une priorité absolue et la gestion de la ressource en eau fait face à un défi majeur : la capacité à s'adapter à l'excès comme à la pénurie. L'évaluation des impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau, aux échelles globale, nationale et locale, est donc primordiale et implique de poursuivre les efforts développés pour mettre en place des systèmes de prévision ainsi que des méthodes efficaces de gestion et d'adaptation. Cet ouvrage unique en langue française est entièrement orienté vers cet objectif.

Changement climatique et cycle de l'eau permet de mieux aborder les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau. Après avoir rappelé les **modèles de prévision** de la variabilité et du changement climatique et les scénarios utilisés pour mieux anticiper le climat futur à différentes échelles temporelles, cet ouvrage présente un **état des impacts** connus du changement climatique sur le cycle de l'eau. Les **principes de gestion intégrée** des ressources en eau dans le contexte de la variabilité climatique sont rappelés et les **mesures d'adaptation** au changement climatique sont discutées, ainsi que les **mesures de planification** à l'épreuve du climat. Sont ensuite abordés les principaux atouts et points à développer du **cadre réglementaire** de la politique de l'eau dans l'Union européenne, en particulier la directive-cadre sur l'eau, et les implications du changement climatique sur le système de gestion des réseaux hydrographiques. Enfin, les auteurs donnent un aperçu des **programmes de recherche européens** et de l'état d'avancement de la création d'interfaces entre science et législation.

Cet ouvrage de référence ouvre des pistes pour rapprocher les scientifiques, les industriels, les décideurs et les parties prenantes. Il s'adresse aux professionnels de l'eau (gestionnaires, législateurs, industriels) mais également aux chercheurs et au personnel académique. Il est également recommandé aux étudiants en écoles d'ingénieur, master et doctorat.

Isabelle La Jeunesse est Docteur en géographie de l'environnement et Maître de conférences au département de géographie de l'Université François-Rabelais de Tours, chercheur à l'UMR CNRS 7324 CITERES et chercheur associé à l'UMR CNRS 6554 LETG-Angers. Elle participe à de nombreux programmes de recherche européens dans le domaine de l'environnement et du changement climatique.

Philippe Quevauviller a une HDR en chimie, il est Docteur en chimie et en océanographie et est Professeur associé à la Vrije Universiteit Brussel à Bruxelles (VUB). En poste à la Commission européenne depuis 1989, il a contribué au développement de réglementations européennes dans le domaine de l'eau et est désormais en charge de programmes de recherche européens dans le domaine de la sécurité des citoyens vis-à-vis des catastrophes. Il est membre de comités éditoriaux de revues techniques et scientifiques et auteur de nombreux ouvrages et articles dans la presse scientifique internationale.