

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



CHAPITRE 1

Introduction

Projection de la variabilité et du changement climatique

Il n'est pas inutile en préambule de rappeler que le climat est variable et que cette variabilité peut se traduire en impacts significatifs sur les ressources en eau et la sécurité des citoyens. Ainsi, chaque année, des millions de personnes sont affectées par des épisodes de sécheresses ou d'inondations. Il est désormais généralement admis que le changement climatique a une influence croissante à la fois sur la fréquence et la sévérité des événements hydrométéorologiques extrêmes (IPCC, 2012 ; Quevauviller, 2014). L'importance de la variabilité et du changement climatique, en particulier de leurs impacts sur le mode d'existence des citoyens et sur l'environnement, est clairement reconnue par la plupart des scientifiques et des législateurs. Cette prise de conscience ne se reflète toutefois pas encore pleinement dans la gestion des ressources en eau telle qu'elle est mise en œuvre dans le contexte de la directive-cadre sur l'eau (Commission européenne, 2000) détaillée dans le chapitre 7. En effet, si de nombreux experts et parties prenantes dans le secteur de l'eau sont conscients des impacts climatiques sur la gestion des ressources en eau, les mesures d'adaptation au changement climatique et leur intégration dans le cycle de gestion, par exemple des réseaux hydrographiques, sont difficiles à appréhender. De nombreux gestionnaires sont confrontés à la difficulté d'utilisation des scénarios et des projections climatiques en raison de leur incertitude inhérente, et ce *a fortiori* à l'échelle locale où les incertitudes sont souvent les plus importantes. La recherche est en cours pour fournir des éléments concrets répondant à ces difficultés (voir Chapitre 8), et la législation européenne développe des orientations visant à intégrer la dimension climatique dans le système de gestion des ressources en eau. Toutefois, attendre plus de certitudes pour adapter la gestion des ressources en eau ferait prendre un retard considérable à l'efficacité de l'adaptation, tant les incidences du changement climatique sur les ressources en eau sont déjà bien visibles et également vouées à prendre de l'ampleur au fil du temps.

L'objet de cet ouvrage est ainsi de fournir un état (non exhaustif !) des connaissances sur l'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau et les législations (en particulier européennes) qui les concernent, ainsi que sur les mesures d'adaptation étudiées à ce jour. Il se repose sur des ouvrages issus de programmes de recherche européens, en particulier publiés par Ludwig *et al.* (2009) et Quevauviller (2014a). Le

but est de donner un aperçu de la science du climat (appliquée à l'eau), des méthodes de projections et de leurs limites, et de leurs applications dans la législation, en se référant au cadre réglementaire européen et à des exemples de projets de recherche visant à contribuer à la formulation de nouvelles politiques environnementales (ou à la révision de politiques existantes) dans le secteur de l'eau, y compris des événements extrêmes. Des ouvrages (en français) traitent des aspects théoriques du changement climatique et de leurs impacts dans des régions, par exemple au niveau national (Suisse par Beniston, 2009) ou régional (Aquitaine par Le Treut *et al.*, 2013).

La variabilité du climat est une constante qui existe à diverses échelles, du niveau global aux échelles régionales et locales, impliquant de nombreuses variables dont la température. Aux termes « changement climatique » est associée la notion que les activités humaines ont « très vraisemblablement » (selon le 4^e rapport et le 5^e rapport d'évaluation du GIEC, Groupement intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007 et 2014) une influence sur le climat global moyen dont les effets se discernent de la variabilité naturelle à des échelles saisonnières ou décennales. De nombreuses évaluations ont été conduites par le GIEC et divers instituts de recherche, et la littérature est riche en interprétations sur le changement et la variabilité du climat. Notons d'ailleurs que la communauté scientifique est parfois divisée en ce qui concerne les interprétations des causes du changement climatique. Au-delà des controverses, chacun s'accorde à reconnaître que la recherche est indispensable pour acquérir les connaissances qui nous permettront d'affiner de plus en plus notre compréhension des variations de température, de précipitations, d'humidité atmosphérique et des sols, ainsi que de nombreuses autres variables à diverses échelles spatiales (Van den Hurk et Jacob, 2009).

La nature, l'amplitude et la prévisibilité de la variabilité climatique dépendent fortement des échelles temporelles et spatiales considérées. À l'échelle globale, le changement climatique est directement lié aux variations de forçage solaire, les oscillations de phénomènes à large échelle telles que l'oscillation nord-atlantique (NAO), la composition de l'atmosphère (variant en fonction de l'activité volcanique et les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre), et l'état biophysique de la surface des terres et des océans. À l'échelle régionale (sous-entendu à l'échelle des principaux bassins versants), la variabilité du climat est accentuée par des variations de la circulation atmosphérique et des interactions locales entre les terres et l'atmosphère (Ludwig *et al.*, 2009).

L'adaptation des humains à la variabilité et au changement climatique est aussi ancienne que l'humanité elle-même. Toutefois, l'adaptation au changement climatique pour les hydrosystèmes relève du défi, car elle oblige à reconnaître cette variabilité comme l'hypothèse majeure de la gestion de la ressource, contrairement au concept central de la pratique de l'ingénierie des ressources en eau appelé « stationnarité » par Milly *et al.* (2008). En effet, la gestion hydraulique est fondée sur des relations d'intensité-durée-fréquence pour les débits des rivières par exemple, qui sont issues de l'analyse statistique et probabiliste de données historiques. Ainsi, l'hypothèse est que les systèmes naturels varient à l'intérieur de frontières matérialisées par les données historiques. Or c'est bien ceci qui est en train de changer. Les données climatiques historiques sont *in fine* de moins en moins pertinentes pour établir la planification actuelle et future, ce qui pose également un problème de formation. Cependant, en dépit des incertitudes et de certains déficits de connaissances, on dénombre aujourd'hui un ensemble important de données scientifiques qui illustre les formes de modifications plus ou moins complexes que peuvent prendre les

effets du changement climatique sur le cycle de l'eau. Ces données donnent déjà une vue d'ensemble des situations auxquelles sont susceptibles d'être confrontés les gestionnaires des hydrosystèmes.

La prise de conscience croissante des influences anthropiques probables sur le climat global fait que les besoins d'adaptation au changement anticipé sur de longues périodes de temps sont de plus en plus pris en considération. À cet égard, nous pouvons distinguer des échelles temporelles différentes dans le secteur de l'eau (Van den Hurk et Jacob, 2009) :

- *l'échelle de temps synoptique*, dans laquelle les systèmes climatiques individuels peuvent évoluer vers des événements hydroclimatiques extrêmes ;
- *l'échelle de temps saisonnière*, dans laquelle les anomalies persistantes de précipitations se traduisent en des risques accrus d'inondations ou de sécheresses ;
- *l'échelle décennale*, dans laquelle une appréciation des tendances globale et régionale durant les prochaines décennies est pertinente pour la planification et la mise en œuvre de mesures de gestion des ressources en eau ;
- *l'échelle centennale*, dans laquelle des changements dans les moyennes (par exemple, moyennes sur trente ans, réglementaire et appelée « la normale ») de variables climatologiques et météorologiques peuvent affecter la conception d'infrastructures liées à la sécurité, au transport ou aux ressources en eau.

La variabilité du climat peut ainsi être abordée comme les résultats combinés de processus différents se déroulant à différentes échelles temporelles et spatiales. En pratique, les événements météorologiques sont affectés par les circulations atmosphériques et les phénomènes locaux. Les anomalies météorologiques saisonnières sont liées à des variations à large échelle des températures de la surface des mers et des océans ou aux taux d'humidité stockée dans les sols ou sous forme de neige. Des changements à de plus longues échelles peuvent être attribués à des variations lentes de la chaleur des océans et à des variations à large échelle de composition atmosphérique. Il existe toutefois une corrélation claire entre les différents horizons temporels (Ludwig *et al.*, 2009). La réponse d'un événement météorologique local à une anomalie importante liée à la température océanique, telle que le phénomène El Niño, peut être variable dans différentes zones du globe. Une bonne projection d'un tel événement local requiert donc une représentation fiable de la variabilité météorologique à court terme et des processus locaux. De même, les projections de changement de la température océanique globale moyenne pour les prochaines décennies dépendent des estimations de la quantité de chaleur stockée dans les océans qui, à son tour, dépend fortement des interactions entre les océans et l'atmosphère à des intervalles de temps beaucoup plus courts.

1. Évolution récente du climat

Chaque année depuis déjà 1993, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) publie, selon les résultats des analyses de sa Commission de climatologie (en collaboration avec ses 189 membres), un état du climat de l'année écoulée (OMM, 2014). Elle l'intitule *Déclaration sur l'état du climat mondial de l'année écoulée*. Cet état est tout d'abord purement descriptif avec un exposé des moyennes annuelles

des variables météorologiques présentées à l'échelle mondiale et régionale. Il cherche ainsi à donner un aperçu de l'évolution de l'année à ces échelles en tenant compte de six régions qui structurent l'OMM : l'Afrique (région I), l'Asie (région II), l'Amérique du Sud (région III), l'Amérique du Nord, l'Amérique centrale et les Caraïbes (région IV), le Pacifique sud-ouest (région V) et l'Europe (région VI). Par ailleurs, cette déclaration cherche à relater les principaux événements climatiques mondiaux, encore appelés phénomènes extrêmes, ainsi qu'à positionner l'année par rapport aux tendances globales d'évolution du climat. La popularité de ce document, aussi bien auprès du grand public que des médias et de la communauté scientifique, montre la nécessité de revenir sur le climat perçu au quotidien et d'en exposer objectivement les variables et origines, tout en ne perdant pas de vue la complexité de la variabilité des phénomènes météorologiques indépendamment de la certitude de la tendance du réchauffement global en cours.

1.1. Principaux faits du 4^e rapport du GIEC

La publication du 4^e rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, 2007) laisse peu de doute quant à l'augmentation des températures moyennes à la surface du globe depuis la moitié des années 1970. Le rapport estime de plus que cette augmentation est *très probablement* liée aux activités humaines. Les implications de cette augmentation globale de température sur le secteur de l'eau sont nombreuses et ont été documentées dans de multiples rapports, articles et livres (par exemple, Ludwig *et al.*, 2009 ; Beniston, 2009) ; elles seront discutées dans le chapitre 3. Dans ce chapitre, la discussion porte sur la mise en évidence des augmentations de température durant les dernières décennies et sur des observations et études pertinentes pour les gestionnaires de l'eau.

Les concentrations moyennes globales de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde d'azote (N₂O) ont augmenté en raison de l'activité humaine. Le rapport du GIEC souligne que cette augmentation est très probablement la cause d'une élévation globale des températures continentales et océaniques (environ 0,7 °C par siècle), de la fonte des neiges et des glaciers et de l'augmentation du niveau des mers (environ 17 cm par siècle). De nombreux changements du système climatique ont été observés, y compris des changements de températures et d'étendue de la calotte polaire en zone arctique, des variations de taux de précipitation à long terme, de la salinité des océans, des régimes des vents, ainsi que de l'occurrence d'aléas climatiques extrêmes (Ludwig *et al.*, 2009). Le paradigme simple que les précipitations moyennes augmentent dans les zones humides de hautes latitudes et les tropiques, et diminuent dans les zones subtropicales plus sèches, a été confirmé par les observations réalisées en Europe du Nord et aux États-Unis (augmentations de 5 à 10 %) et en Afrique du Nord (réductions), avec un impact sur le ruissellement (Figure 1-1).

Toutefois, les diminutions de taux de précipitations en Afrique Centrale et de l'Ouest et les augmentations observées en Amérique du Sud et au nord-ouest de l'Australie ne s'accommodent pas de ce tableau trop simple. Par exemple, aucun changement n'a été observé pour ce qui concerne le cycle diurne de température de surface, l'étendue de la calotte polaire dans la zone antarctique et les phénomènes localisés comme les tornades et les orages.

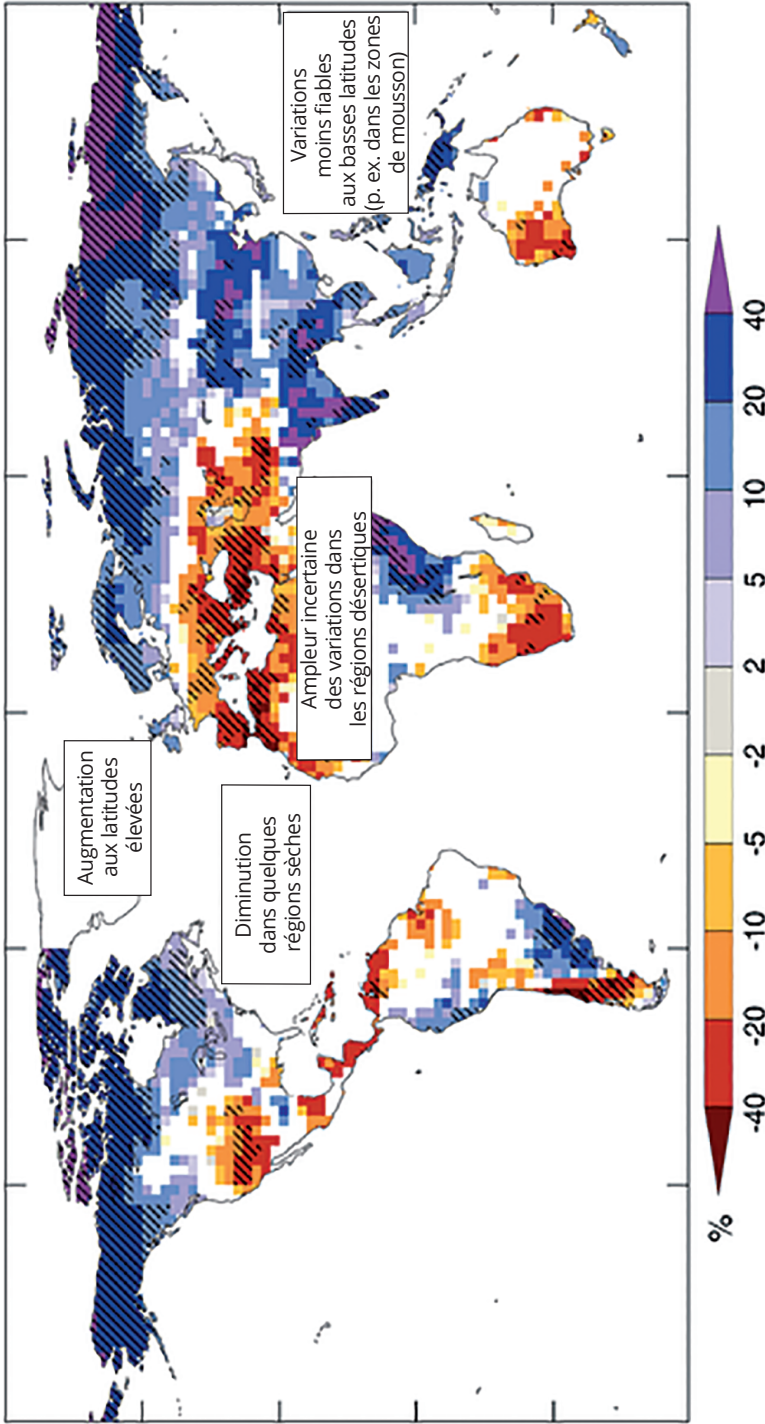


Figure 1-1. Changements relatifs à grande échelle du ruissellement annuel pour la décennie 2090-2099 par rapport à 1980-1999. Les zones en blanc désignent les régions pour lesquelles moins de 66 % de l'ensemble des douze modèles climatiques utilisés dans le scénario A1B du SRES (scénario d'émission des activités humaines) concordent sur le signe du changement, et les zones hachurées les régions pour lesquelles plus de 90 % des modèles concordent sur ce signe (Milly *et al.*, 2005 ; IPCC, 2007. D'après le rapport GIEC de 2007).

1.2. Détection de tendances dans le contexte de signaux fluctuants

Bien qu'il puisse sembler facile de définir une tendance comme un signal qui augmente ou diminue en fonction du temps, leur détection est loin d'être aisée en pratique. Les tendances doivent en effet être détectées par le biais de séries de données collectées dans le temps, qui fluctuent de manière considérable à des échelles de temps diverses (fluctuations quotidiennes, mensuelles, saisonnières ou interannuelles). Une tendance significative (sur le plan statistique) d'un signal fluctuant dépend donc de différents facteurs, entre autres la *durée de la série de données* (liée à l'échelle de temps du phénomène) car il est plus facile de détecter une tendance à l'aide de longues séries temporelles (*a fortiori*, les tendances sont difficiles à établir pour des épisodes de courte durée). Le fait que l'année la plus chaude depuis la fin du XIX^e siècle est 1998 (et non, par exemple, 2007 ou 2003) n'exclut pas l'existence d'une tendance significative au cours du XX^e siècle. La *variabilité du phénomène* est également importante : une variabilité élevée rend difficile la détection d'une tendance. C'est ce qui rend l'identification de tendances de températures (relativement fortes en comparaison à la variabilité interannuelle et étroitement liées aux radiations dues aux gaz à effets de serre) plus aisée que celles des tendances en précipitations ou vents moyens ; celles-ci ont un bruit de fond beaucoup plus important et un lien plus faible aux effets radiatifs. Toutefois, la nature erratique des précipitations extrêmes engendre que leurs tendances sont moins compliquées à détecter que les tendances moyennes (Ludwig *et al.*, 2009). La détection des tendances repose sur des séries de données en principe homogènes. Cet aspect est loin d'être trivial, car de nombreuses stations d'observation météorologiques ont changé de localisation, de type de capteurs, de méthodes d'étalonnage, etc., sans que cela soit forcément documenté.

Une des difficultés réside également dans l'évaluation de la capacité des océans à « absorber » de l'énergie calorifique.

1.3. Tendances récemment observées

1.3.1. Évolution de la température de l'air

Les séries de données des températures globales moyennes sont devenues suffisamment longues pour permettre la détection de tendances claires et leur comparaison avec les projections publiées dans le 4^e rapport d'évaluation (AR4) du GIEC (IPCC, 2007). Il s'avère que les projections du GIEC sont conservatives au regard des tendances observées en température et du niveau de la mer depuis 1990 ; en d'autres termes, les tendances observées sont plus élevées que celles des projections du GIEC (Rahmstorf *et al.*, 2007). Bien que la période de comparaison entre les observations et les projections soit trop courte pour pouvoir exclure l'influence de la variabilité naturelle, les résultats soulèvent néanmoins la question d'un changement climatique plus accentué que celui projeté par le rapport du GIEC.

De plus, les séries de données de température en Europe ont montré une augmentation rapide par rapport à l'élévation globale moyenne : en fonction des zones géographiques, la température régionale entre 1950 et 2007 a augmenté de plus de 2,5 fois par rapport à l'augmentation de la température globale moyenne, en particulier durant le printemps et l'été (Ludwig *et al.*, 2009). Les scénarios futurs (tenant

compte des observations disponibles) tendent à montrer que les températures au niveau des masses continentales et des hautes latitudes augmentent plus vite qu'au niveau des océans et des zones tropicales. De plus, les tendances en précipitations (extrêmes) deviennent détectables et significatives ; par exemple une augmentation de précipitations extrêmes a été détectée en Allemagne durant l'hiver, le printemps et l'été alors qu'une diminution a été observée en automne (Zolina *et al.*, 2008). Il est bien sûr impossible d'extrapoler ces résultats à d'autres régions, et la recherche travaille pour permettre une évaluation plus systématique de ces tendances en Europe.

La variabilité de la vitesse du réchauffement de la basse atmosphère est parfois avancée pour expliquer la variabilité du changement climatique. Or il s'agit là d'une réduction dangereuse de la « machine climatique » et surtout d'une sous-estimation de l'importance de la quantité d'énergie issue de l'aggravation de l'effet de serre générée par les gaz à effet de serre accumulés par les océans. En effet, le dernier rapport du GIEC (AR5) estime l'énergie excédentaire pour la période 1971-2010 à environ 271×10^{21} joules. Or, si traduire l'effet de cet excédent uniquement par l'échauffement des basses couches est réducteur, c'est parce que seul 1 % de cette énergie réchauffe l'atmosphère. La fraction qui réchauffe le sol et fait fondre les glaciers serait six fois plus importante tandis que tout le reste de l'énergie excédentaire, soit 93 %, réchauffe les océans. Cependant, la traduction de cette « absorption » est d'autant plus difficile que la circulation océanique n'est ni stable, ni homogène, ni même véritablement connue.

1.3.2. Élévation de la température de l'océan

L'étude de l'évolution de la température de la masse océanique terrestre globale est déterminante dans la compréhension des phénomènes climatiques. Toutefois la faiblesse des données reste un frein à la modélisation des circulations océaniques. La série de données disponibles est tout d'abord représentée par des mesures de température de surface classiques acquises grâce aux navires ou par satellite, puis surtout par les données du réseau global de flotteurs Argo. Ce projet remonte à la décision, en 1997, de recueillir un ensemble d'observations sans précédent pour regrouper des données sur les courants océaniques à environ 1 000 m de profondeur afin d'améliorer les prévisions climatiques. Lancé en 2000 par la Commission océanographique intergouvernementale de l'Unesco (COI) et l'Organisation météorologique mondiale (OMM), ce programme fournit les profils verticaux de température et de salinité des océans depuis la surface jusqu'à 2 000 mètres de profondeur tous les dix jours. Ce laps de temps correspond en fait au temps de plongée et de remontée de la bouée automatisée. Plus de trente pays ainsi que l'Union européenne participent directement à la mise en place de ce réseau qui évolue continuellement. Fin 2007, le projet Argo avait atteint son objectif initial de 3 000 flotteurs. En 2014, le projet le dépasse même puisque l'on dénombre plus de 3 500 flotteurs. Chaque année ce sont 800 nouveaux flotteurs qui sont déployés pour maintenir un réseau minimum de 3 000 flotteurs actifs, compte tenu de la durée de vie moyenne d'environ quatre ans pour les flotteurs. Les données et leur ré-analyse montrent, malgré un léger plateau dans les années 2000 (Trenberth, 2010 ; Trenberth et Fasullo, 2013), l'évolution de la quantité d'énergie accumulée dans la colonne d'eau (Figure 1-2). Le réchauffement pour la couche 700 m, situé autour de $0,2 \text{ W/m}^2$, ne s'est révélé en fait qu'après les années 2000. Malgré ces efforts, la durée des observations reste un peu trop courte pour distinguer la part due au changement climatique d'origine

anthropique de celle due à la variabilité naturelle à différentes échelles de temps du système complexe océan-atmosphère.

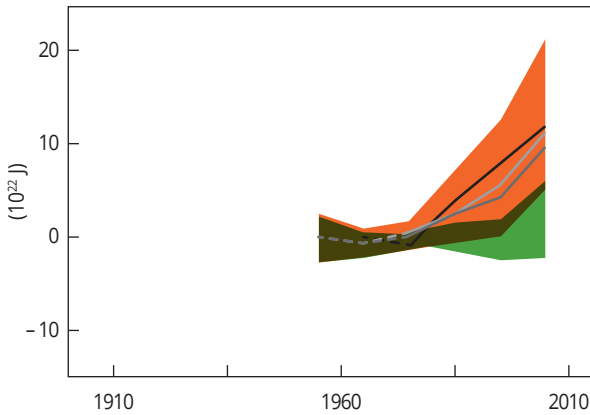


Figure 1-2. Chaleur contenue dans la partie superficielle des océans (0 à 700 m de profondeur) en joules pour les observations (traits pleins et en pointillés en noir et gris), selon des modèles tenant uniquement compte du forçage naturel (en vert) et selon des modèles tenant compte des forçages naturels et anthropiques (en orange) (d'après AR5, IPCC).

1.3.3. Élévation du niveau moyen de la mer

Le phénomène d'élévation du niveau des mers est une certitude selon toutes les mesures dernièrement réalisées. Les premières mesures utilisées pour ce constat remontent tout d'abord aux marégraphes qui depuis la fin du XIX^e siècle étaient installés dans les ports pour surveiller les marées. Cela a permis de donner une mesure du niveau de certaines mers, en particulier celles habitées. L'analyse des enregistrements de ces marégraphes indique que la mer est montée de façon significative, à une vitesse moyenne d'environ 2 mm par an. Cette vitesse est à considérer avec toutes les précautions d'usage en raison de l'impossibilité de donner une évaluation de la qualité de la continuité des données. Toutefois, si cette élévation était confirmée, cela représenterait une accélération de 20 fois par rapport aux derniers siècles. Cette hausse du niveau de la mer est estimée à 20 cm en moyenne au cours du XX^e siècle ; elle semble unanimement attribuée au réchauffement climatique.

Le suivi de ces mesures est complété depuis 1992 par les observations du satellite altimétrique Topex-Poséidon lancé par Ariane 4 grâce à une collaboration entre le CNES et la NASA (Figure 1-3), puis plus précisément par le satellite Jason-1 lancé en 2001 suivi de Jason-2 lancé en 2008. Ces derniers satellites donnent naissance à des cartographies avec une grande précision et à l'échelle mondiale de la hauteur de la surface des océans. Par différence, il est ainsi possible d'estimer l'évolution du niveau de la mer essentiellement caractérisée, à l'échelle globale, par une élévation.

Les projections issues du 4^e rapport du GIEC, comparativement aux observations depuis 1800, sont présentées dans la figure 1-4.

Selon le 4^e rapport du GIEC, le rythme d'élévation aurait augmenté entre le milieu du XIX^e siècle et le milieu du XX^e siècle. La progression du taux moyen d'élévation annuelle a été estimée à 1,7 +/- 0,5 mm/an pour le XX^e siècle. Sur la période

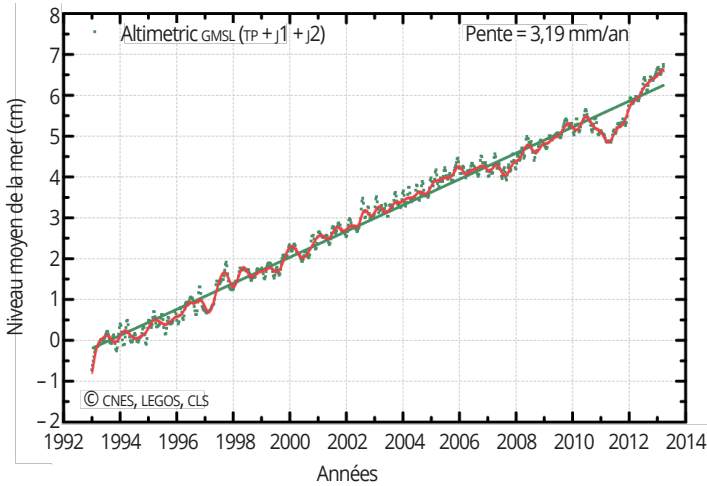


Figure 1-3. Élévation moyenne du niveau de la mer mesurée par satellite depuis 1992 (adapté d'après CLS/CNES/Legos).

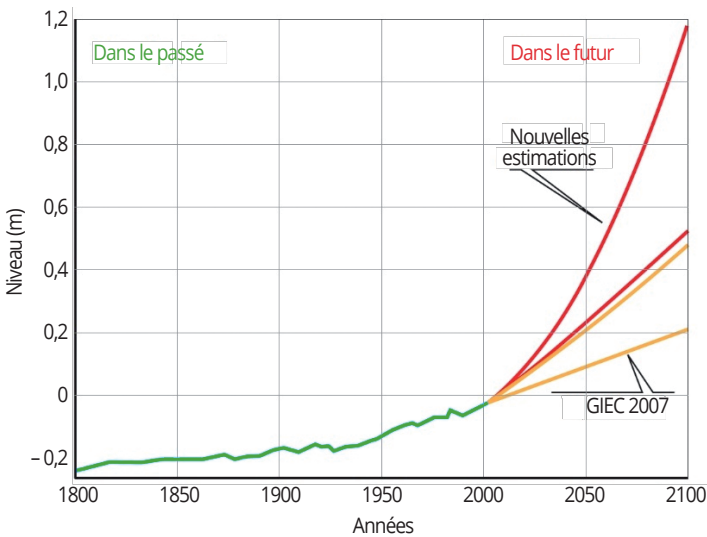


Figure 1-4. Élévation du niveau mondial moyen des mers mesurée et projetée selon le 4^e rapport du GIEC (La Jeunesse, 2015, *Changement climatique et impacts sur l'eau. Tech. Ing.* ; d'après Cazenave et Llovel, 2009).

1993-2003, c'est une élévation de $3,1 \text{ mm} \pm 0,7 \text{ mm/an}$ qui est mesurée. Toutefois, régionalement, les variabilités sont grandes avec des hausses plus importantes observées, et donc également aussi des baisses notables dans certaines régions dont l'océan Pacifique.

Si l'on tente d'expliquer les différents phénomènes impliqués dans l'élévation du niveau de la mer, on peut en citer trois principaux :

- la dilatation thermique ;
- la fonte des glaces des continents ;
- la subsidence de plaques continentales dans les deltas.

Sur la période 1993-2003 et encore aujourd'hui, la dilatation par le réchauffement des masses d'eaux océaniques représenterait à elle seule plus de 50 % de l'élévation constatée (Tableau 1-I).

Tableau 1-I. Évolution de l'élévation du niveau de la mer entre 1961 et 2003 et les phénomènes impliqués (d'après IPCC, 2007).

| Augmentation du niveau des mers (mm/an) et contribution à la croissance mesurée | | | | |
|---|----------------------|--------------|------------------|--------------|
| Facteurs | 1961-2003 | | 1993-2003 | |
| | Dilatation thermique | 0,42 ± 0,12 | 23 % | 1,6 ± 0,05 |
| Fonte des glaciers et calottes polaires | 0,50 ± 0,18 | 28 % | 0,77 ± 0,22 | 25 % |
| Fonte des couvertures glacières du Groenland | 0,05 ± 0,12 | 3 % | 0,21 ± 0,07 | 7 % |
| Fonte des couvertures glacières de l'Antarctique | 0,14 ± 0,41 | 8 % | 0,21 ± 0,35 | 7 % |
| Somme des contributions des facteurs | 1,1 ± 0,5 | 61 % | 2,8 ± 0,7 | 90 % |
| Augmentation mesurée | 1,8 ± 0,5 | 100 % | 3,1 ± 0,7 | 100 % |
| Différence | 0,7 ± 0,7 | 29 % | 0,3 ± 1,0 | 10 % |

D'après IPCC, *Climate Change 2007: Synthesis Report, Fourth Assessment Report*. Groupement intergouvernemental sur l'évaluation du climat. Cambridge University Press, Cambridge.

C'est l'effet que l'on redoute le plus en dehors de tout catastrophisme sur la fonte des glaciers (les « réfrigérateurs » de la Terre) et une rétroaction possible avec une accélération du réchauffement. Le réchauffement de l'atmosphère se transmet ainsi à l'océan par divers processus physiques. Directement, le réchauffement se produit par un plus fort rayonnement et par conduction *via* l'atmosphère et l'apport d'eaux plus chaudes. Or un accroissement de 1 °C de la température d'une colonne d'eau de mer à 15 °C de 1 000 m d'épaisseur entraîne théoriquement une augmentation de niveau de 16 cm. Toutefois, un réchauffement homogène d'une telle colonne d'eau n'est absolument pas réaliste en l'état de la circulation thermo-haline océanique. En effet, la diffusion vers les couches profondes de l'échauffement de surface est un processus très complexe et encore peu compris, qui doit être intégré dans le cadre plus vaste de la circulation océanique à l'échelle de l'océan mondial. Elle pourrait par exemple prendre la forme d'une moindre production d'eaux profondes froides d'origine circumpolaire avec des implications sur le déplacement des courants chauds tels que le Gulf Stream. C'est pourquoi les projections de l'élévation du niveau de la mer sont entachées d'incertitudes représentées par la multitude de valeurs que peut prendre l'élévation moyenne entre les différents scénarios du GIEC (voir Figure 1-4). Le dernier rapport du GIEC, l'AR5, montre cependant une progression de l'élévation moyenne qui se situe dans la continuité de la tendance observée depuis le début du siècle. Ainsi, si le réchauffement ne s'avère pas aussi important que les modèles du GIEC, la mer continue, en moyenne, son ascension. Or face à l'inertie thermique des océans, le phénomène ne sera pas réversible à moyen voire à long terme, et aura des répercussions sur la circulation générale et le cycle de l'eau.

1.3.4. Évolution de la circulation thermo-haline

La circulation thermo-haline désigne une circulation océanique permanente à grande échelle (Figure 1-5). Comme son nom l'indique, cette circulation est engendrée par des écarts de température et de salinité entre les masses d'eau. Une augmentation de température de l'eau diminue sa densité tandis qu'une augmentation de sa salinité augmente la densité de l'eau : plus une eau est dense et plus elle plonge. La variabilité de densité est liée, en règle générale, au fait qu'une eau à la surface des océans sous les basses latitudes bénéficie d'un apport important de chaleur qui lui permet d'atteindre des températures entre 25 et 30 °C. Tandis que sous les hautes latitudes, et notamment dans les régions polaires, les eaux peuvent atteindre -2 °C. Ainsi, les eaux douces ou plus chaudes ont tendance à rester en surface tandis que les eaux qui se refroidissent, voire sont plus salées, sont susceptibles de plonger. C'est dire la multitude de situations possibles en fonction des facteurs climatiques. Toutefois, cette circulation thermo-haline est malgré tout assez stable et prend la forme d'un tapis roulant à l'échelle du globe. Ce sont les eaux profondes, qui prennent principalement naissance en Atlantique nord, qui s'écoulent en direction de l'Atlantique sud. C'est vers 60° de latitude sud que ces eaux profondes sont entraînées d'ouest en est dans l'Atlantique sud puis s'en retournent en se réchauffant.

Pour autant, la variabilité de température de l'air peut avoir un impact sur la température de surface des océans et générer, en fonction de son ampleur et de mécanismes non encore totalement compris, des variations dans la circulation des océans. Or il a été observé un déclin de cette circulation entre 1997 et 2010 (Mercier *et al.*, 2014), déclin associé à une diminution du transport de chaleur vers le nord depuis les années 1990. Un adoucissement des eaux en Atlantique nord et une augmentation de la salinité dans les eaux tropicales entre 1950 et 1990 sont des phénomènes également constatés et avancés pour être liés au réchauffement global et expliquer ce changement d'intensité de la circulation thermo-haline.

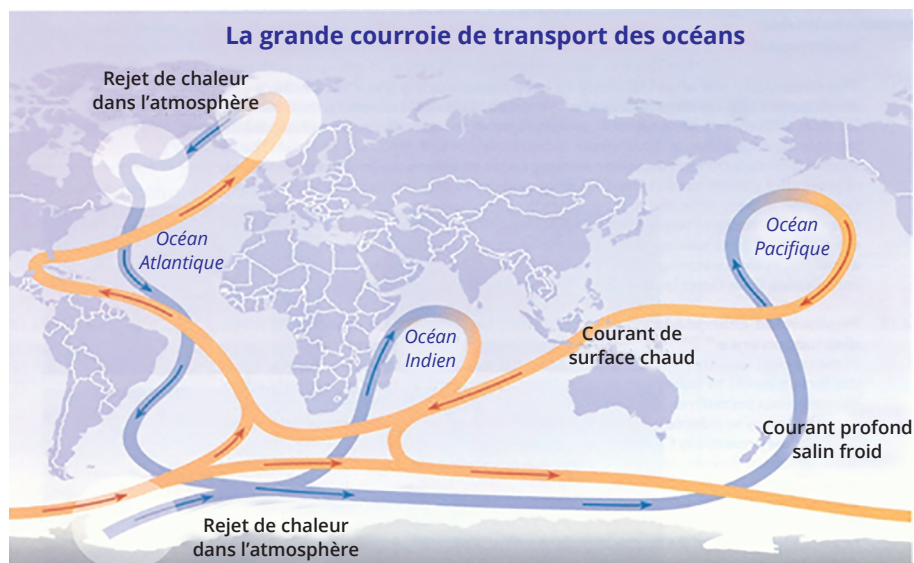


Figure 1-5. Circulation thermo-haline représentant le « tapis roulant » (d'après GRIDA-Arendal, UNEP, IPCC).

2. Prévisibilité de la variabilité climatique à l'échelle saisonnière

Les prédictions (prévisibilité), les projections, les scénarios sont des termes différents, bien que souvent interchangeable en langue française contrairement à la langue anglaise qui dans le domaine de la prévision météorologique différencie les termes *prediction*, *prognostic*, *outlook*, *forecast*, *foresight*. Ainsi, une *prédiction* se réfère à la prévision d'une situation future ; ce terme est peu utilisé en climatologie car il est présomptueux de « prédire » une tendance, on parle plutôt de « projeter » (projections) ou de « prévisibilité ». Les « prévisions » peuvent être déterministes (« demain, il va pleuvoir ») ou probabilistes (« la probabilité qu'il pleuve demain est supérieure de 50 % par rapport à la moyenne »). La prévisibilité d'un phénomène peut être définie comme le degré auquel son évolution peut être distinguée par rapport à des conditions initiales identifiées et de l'évolution connue de facteurs affectant le phénomène. Il dépend donc des échelles spatiales et temporelles du phénomène. Des *projections* peuvent être réalisées par exemple à l'aide de modèles, mais elles ne peuvent pas être considérées comme des prédictions. Une série de projections est souvent interprétée comme une prévision probabiliste, mais cette interprétation est discutable si la qualité des projections ne peut pas être fermement déterminée (par exemple, en l'absence de données suffisantes pour les valider). Un *scénario* est une projection qui se fonde sur une série d'hypothèses ; par exemple, pour une évolution temporelle supposée de concentrations de gaz à effet de serre, la température globale moyenne est déduite d'un ensemble de projections climatiques issues de modèles. Toutefois, pour un scénario donné (lié à une évolution de concentration supposée), le climat futur pourra évoluer dans de multiples directions sans qu'il soit, au sens strict, possible de le prédire (van den Hurk et Jacob, 2009).

La prévisibilité du climat aux échelles globale et régionale et les informations utilisées pour cette prévisibilité varient en fonction des échelles temporelles et des régions considérées. La prévisibilité se base sur au moins deux sources distinctes : les conditions initiales et le forçage par des changements externes. Ainsi, une prévision météorologique doit se baser sur des données fiables des conditions initiales de l'atmosphère et du continent concerné, et sur un modèle météorologique solide permettant de décrire la dynamique évolutive de ces données. Les développements des connaissances scientifiques et de la capacité des modèles ont permis d'améliorer les prévisions météorologiques d'approximativement un jour depuis les années 1970 jusqu'à environ sept jours à l'heure actuelle (van den Hurk et Jacob, 2009). Toutefois, les prévisions opérationnelles dans le secteur de l'eau se basent en général sur les probabilités d'événements hydrologiques extrêmes, et les prévisions moyennes sont souvent d'importance relativement moindre. Les prévisions météorologiques probabilistes réalisées depuis les années 1990 se sont focalisées sur l'évaluation de risques, par exemple, de crues fluviales extrêmes, de précipitations intenses, de tempêtes ou d'autres phénomènes météorologiques pouvant avoir un impact sur la société.

Pour ce qui concerne les échelles temporelles plus longues (par exemple saisonnières), la connaissance des conditions initiales des composantes « lentes » du système climatique est également requise, par exemple la température des couches supérieures de l'océan et de la surface des mers. Pour ce qui est des conditions initiales, on trouve l'état

atmosphérique, l'humidité des sols et la couverture de neige continentale. De plus, la prévisibilité à des échelles temporelles de plusieurs années varie très largement avec les saisons et à l'échelle du globe car la nature chaotique de la dynamique atmosphérique affecte considérablement les corrélations dans le temps. Or l'état atmosphérique joue un rôle très important pour les latitudes tempérées. Des prédictions saisonnières sont néanmoins bien effectuées en routine par de nombreux services météorologiques au niveau mondial. Le paramètre majeur pour forcer une année à se comporter différemment d'une autre reste la température de surface de la mer dans les régions tropicales. Dans ce contexte, l'oscillation El Niño (ou *El Niño Southern Oscillation*, ENSO) est une source importante de prévisibilité aux échelles saisonnières (*voir plus loin*).

2.1. Outils de prévisions saisonnières

De grands progrès ont été accomplis depuis plus de 20 ans en matière de prévisions saisonnières, certes comme déjà évoqué par l'apparition des modèles de circulation générale atmosphérique initialisés par des observations à la fin des années 1970, puis par leur couplage à des modèles globaux océaniques au début des années 1990, et enfin et surtout par l'apparition de l'océanographie opérationnelle au début des années 2000. Ainsi, de nombreux outils de prévisions saisonnières ont pu être développés depuis le début de cette période et la plupart des grands centres de prévision numérique réalisent d'ailleurs ce type de prévision. On peut notamment citer le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), les services météorologiques nationaux comme Météo-France, le *Met Office* anglais, les services japonais, coréen, chinois, indien, canadien, australien, marocain, le *National Center for Environmental Prediction* américain (NCEP). Des organismes de recherche produisent également ce type de prévisions : l'Institut Max-Planck en Allemagne, l'*International Research Institute for Climate Prediction* (IRI) aux États-Unis, le CPTEC (centre de recherche brésilien) ou le CNRM (Centre national de recherches météorologiques) en France.

Les outils de prévisions saisonnières ne sont pas destinés à « prédire » un événement spécifique à un jour donné, mais plutôt à établir la probabilité que la moyenne saisonnière de température ou de précipitation est plus élevée ou plus faible que la moyenne climatique. Les outils existants peuvent être divisés en deux catégories : statistiques et numériques (Palmer et Anderson, 1994). Dans certains cas, une combinaison des outils est utilisée.

Les *méthodes statistiques* se fondent sur des corrélations d'observations de la température de surface des mers et des variations climatiques régionales pour établir des prévisions. Il existe à peu près une cinquantaine d'années d'observations tout au plus à disposition des modèles. Toutefois, en ce qui concerne les prévisions saisonnières, cela ne représente en fait qu'une cinquantaine de situations. Or les saisons hivernales et estivales sont liées à des mécanismes différents en Europe et peuvent résulter, même si les caractéristiques semblent similaires à des phénomènes différents, de multiples causes. Les variations liées au phénomène El Niño représentent une source importante pour la prévisibilité (*voir plus loin*). Par exemple, les deux phénomènes El Niño majeurs de la deuxième moitié du *xx*^e siècle se sont traduits par un hiver normal (1982-1983) et un hiver très doux (1997-1998) en France. En effet, en plus des probabilités d'anomalies de taux de précipitations, elles sont

souvent utilisées pour la sélection d'années analogues sur le plan historique, qui s'avèrent utiles pour des applications dans les domaines hydrologiques et agricoles (*voir* par exemple Hamlet et Lettenmaier, 2000, cité par van den Hurk et Jacob, 2009). Toutefois, ces applications souffrent des séries limitées d'observations et donc de l'insuffisante validation des outils.

Bien que les projections climatiques n'indiquent pas de variations fortes de fréquence ou de structure du phénomène El Niño (Sterl *et al.*, 2007), les corrélations statistiques observées à l'heure actuelle pourront être différentes pour les conditions climatiques futures.

Les *méthodes numériques* utilisent un ensemble de projections couplant des modèles de circulation générale océans-atmosphère qui sont initialisés avec un état « observé » des conditions océaniques, continentales et des calottes glaciaires. Cette approche tient compte de l'incertitude inhérente introduite par la nature chaotique du système climatique. Toutefois, la qualité des données établissant « l'état initial » est assez pauvre compte tenu du manque d'observations de routine, et donc continu, des océans et des continents peu habités (van den Hurk et Jacob, 2009).

Les outils statistiques et numériques pour les prévisions saisonnières reposent tous sur des sources existantes de prévisions à l'échelle saisonnière concernée. La source principale est celle des données de température de surface océanique (pour laquelle El Niño est prédominant), mais d'autres sources sont également considérées et discutées dans les prochains paragraphes. Pour réaliser cette prévision, les climatologues se basent en fait sur les modèles numériques utilisés non seulement pour la prévision météorologique à court terme mais aussi couplés à un modèle océanique déterminant. C'est donc bien sûr la capacité à modéliser les variabilités de la composante océanique que butent actuellement les climatologues.

Toutefois, il existe des synergies quant à l'utilisation des données. Par exemple, Météo-France produit mensuellement des prévisions saisonnières à plusieurs mois d'échéance à l'aide de son modèle numérique Arpège-Climat. La résolution spatiale de ce modèle est d'environ 150 km. Or ce modèle est l'une des composantes du système multi-modèles appelé « Euro-Sip », qui produit des prévisions saisonnières en prenant en compte les résultats de quatre modèles internationaux, à savoir celui français, anglais, américain et le modèle du CEPMMT cité ci-dessus.

Aussi, ces outils ont été élaborés pour prévoir la moyenne trimestrielle correspondant à une « saison » des paramètres météorologiques principaux que sont la température et les précipitations pour les trois prochains mois à venir. Cette prévision est réalisée à l'échelle d'une couverture spatiale assez importante, dite « zone », comme l'Europe de l'Ouest par exemple. L'objectif est totalement différent des prévisions quotidiennes du temps qui portent sur une dizaine de jours avec des informations détaillées sur l'amplitude des variations journalières. Il s'agit plus ici de fournir une tendance du climat moyen du trimestre à venir. L'information météorologique produite n'est donc ni détaillée ni chiffrée mais qualitative. S'agissant de prévisions, plusieurs scénarios peuvent être formulés parmi trois scénarios prédéfinis : proche, en dessous ou au-dessus de la moyenne (normale calculée généralement sur trente ans). Pour la température, cela correspond à un scénario « normal », « froid » ou « chaud ». Pour les précipitations, on évoquera un scénario « normal », « sec » ou « humide ». Toutefois, il peut arriver qu'aucun scénario dominant ne se dégage clairement. Il peut donc être parfois impossible de privilégier une hypothèse plutôt qu'une autre. On évoquera alors qu'aucun scénario n'est privilégié, ce qui génère une quatrième réponse possible.

Il s'avère que de tels outils sont particulièrement efficaces dans les zones de basses latitudes et pour les saisons pour lesquelles des connexions existent vis-à-vis de l'évolution lente de la température de surface des mers et d'autres variables climatiques, et pour lesquelles la variabilité saisonnière du climat est substantielle. Dans les zones de faible variabilité saisonnière et pluriannuelle de précipitations moyennes (par exemple, latitudes moyennes ou régions désertiques), les possibilités de prévisions de conditions climatiques anormales sont moindres que celles dans les zones à variabilité importante (par exemple, zones continentales [sub]tropicales, ou régions affectées par la mousson).

2.2. Sources de prévisibilité à l'échelle saisonnière

2.2.1. L'oscillation El Niño (*El Niño Southern Oscillation, ENSO*)

Des variations irrégulières mais persistantes de température dans l'océan Pacifique équatorial sont étroitement associées au phénomène El Niño dont la période de retour, irrégulière, est comprise entre trois à sept ans. Ce phénomène est aujourd'hui clairement relié à un cycle de variation de la pression atmosphérique globale entre l'est et l'ouest de l'océan Pacifique généré par des variations de circulation atmosphérique entre les pôles et l'équateur. El Niño et La Niña, décrivant la période inverse, correspondent aux deux phases opposées du phénomène couplé océan-atmosphère que l'on nomme ENSO pour *El Niño-Southern Oscillation*.

Durant un événement El Niño, les températures de surface des mers sont plus chaudes que les températures moyennes autour de l'équateur dans la partie orientale du Pacifique (avec un pic de température vers novembre-janvier, incluant Noël, d'où le nom espagnol qui a été donné – par des pêcheurs péruviens qui avaient remarqué l'arrivée d'eau plus chaude sur les côtes à cette période – qui signifie « l'enfant Jésus »). Ce phénomène résulte d'une interaction entre l'océan et l'atmosphère, conduisant à des changements de températures de surface des océans qui affectent la distribution (et les taux) de précipitations tropicales et des vents atmosphériques au-dessus de l'océan Pacifique, ce qui en retour affecte les températures et les courants océaniques. Des détails sur les mécanismes et le degré auquel ils sont reproduits de manière adéquate dans les modèles actuels sont discutés par Neelin *et al.* (1998), cité dans van den Hurk et Jacob (2009). La force d'un événement ENSO est en général exprimée comme une anomalie de la température de surface océanique dans une région donnée du Pacifique au niveau de l'équateur. Des régions différentes sont définies, associées à des indicateurs ; par exemple des anomalies de température au long de la côte du Pérou et de l'Équateur sont liées à la variabilité des précipitations dans ces régions côtières. Le phénomène peut durer entre six et dix-huit mois avec une intensité maximale généralement constatée à la période de Noël. Toutefois, en raison de l'inertie thermique des océans, la propagation des effets d'El Niño se répercute à l'échelle globale par les échanges atmosphériques de grande échelle spatiale. Les effets de cette oscillation ENSO se font ainsi ressentir aussi bien aux latitudes tropicales qu'aux latitudes extratropicales et en été aussi bien qu'en hiver.

Le phénomène El Niño a ainsi un impact clair sur l'hydrométéorologie de nombreuses régions du monde. Les incidences les plus fortes se situent dans la zone pacifique équatoriale et les zones côtières bordant l'océan Pacifique. Au niveau européen, si un impact faible peut être noté durant le printemps dans les régions du sud-ouest de l'Europe (Van Oldenborgh *et al.*, 2000), aucune connexion entre El Niño et la variabilité du climat en Europe n'a été détectée (van den Hurk et Jacob, 2009).

Plusieurs indices statistiques sont utilisés pour déterminer les phases de l'ENSO. Il existe tout d'abord le *Southern Oscillation Index* (SOI), qui provient de la mesure des différences de pression de surface entre Darwin en Australie et l'île de Tahiti. Les séries de pression peuvent être moyennées à l'échelle mensuelle puis lissées afin d'éviter de prendre en compte d'autres phénomènes qui pourraient avoir lieu à l'échelle infra-mensuelle. Grâce au développement des observations globales, d'autres indices sont proposés mais ne seront pas décrits ici. Malgré l'importance du phénomène ENSO, la difficulté de prévoir correctement l'alternance de ses épisodes montre que d'autres sources de variabilité climatique doivent être correctement représentées dans les systèmes de prévision saisonnière. Les avancées dans les connaissances et l'analyse de l'état de surface des océans par satellite et par des missions plus locales par l'équipement de réseaux de bouées ancrées laissent prévoir des améliorations dans l'acquisition des données nécessaires à la compréhension de ces phénomènes complexes et résolument non totalement indépendants.

2.2.2. L'oscillation nord-atlantique (NAO)

L'oscillation nord-atlantique (NAO) représente le premier mode de variabilité de la troposphère sur l'Atlantique nord extratropicale. Cette oscillation se traduit par des fluctuations de l'intensité du gradient de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande, avec une répercussion sur l'intensité et la direction du courant jet dirigé vers l'Europe ainsi que sur les dépressions et la répartition des précipitations sur le continent européen (Saunier-Batté, 2013). L'index NAO est ainsi positivement corrélé au régime de précipitations dans le nord de l'Europe et négativement corrélé dans la partie sud (principalement durant la saison hivernale). En phase positive de la NAO (NAO+), l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande sont renforcés. Le gradient de pression est plus élevé et induit des conditions plus humides et douces sur le nord de l'Europe. À l'inverse, la région méditerranéenne connaît des conditions alors plus sèches. Sur le continent américain, l'accentuation de la dépression d'Islande provoque l'arrivée d'air froid et sec sur le Québec et le Groenland, tandis que les hivers sont généralement plus doux et humides aux États-Unis. En phase NAO-, le courant jet est plus méridional du fait de l'affaiblissement des deux centres d'action. Le gradient de pression est lui aussi plus faible. Les dépressions se décaleraient alors vers le sud en inversant l'impact en termes d'humidité et de température préalablement décrit pour l'Europe et les États-Unis (Saunier-Batté, 2013). L'hiver 2009-2010 serait une parfaite illustration du phénomène avec un hiver particulièrement froid pour l'Europe associé à des conditions NAO- d'une longue persistance.

2.2.3. L'oscillation atlantique multi-décennale (AMO)

Il s'agit d'une oscillation océanique qui se traduit par des anomalies de température de surface de l'Atlantique nord principalement sur une période d'environ soixante-dix ans. Elle marque la variabilité des activités cycloniques de l'Atlantique, évaluée par la force des cyclones observés. Aussi on oppose une période active située au-dessus des normales saisonnières (AMO+) à une période inactive (AMO-) située en dessous des normales saisonnières. L'année 1995 marquerait le début du troisième cycle depuis les observations qui remontent à 1850. Nous serions donc actuellement dans une phase positive d'AMO (Figure 1-6).

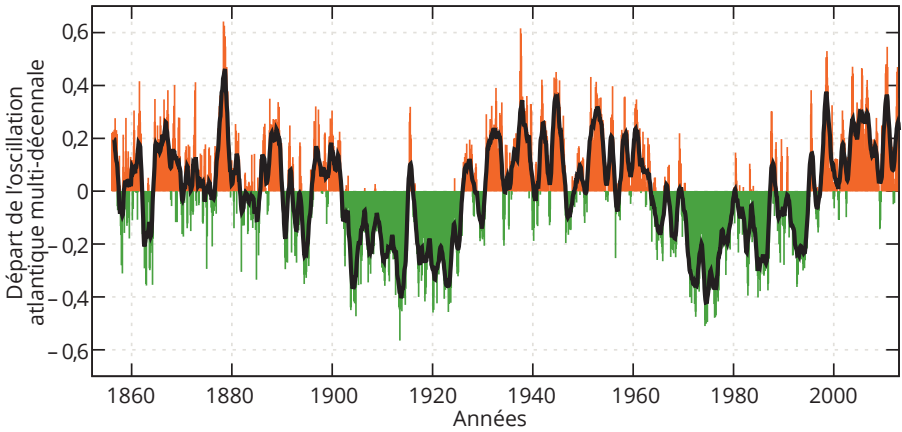


Figure 1-6. Cycles de l'oscillation atlantique multi-décennale (AMO) de 1856 à 2008 (adapté d'après NOAA, www.cdc.noaa.gov/data/).

À cette périodicité sont associées des saisons cycloniques plus actives dans l'Atlantique en phase chaude et une probabilité moindre de grande sécheresse sahélienne. On observe une corrélation positive entre la température océanique moyennée sur l'ensemble de l'Atlantique nord et les températures atmosphériques estivales. Elle impacte également significativement le régime des précipitations estivales en Europe et en Amérique du Nord. Aussi, il est important de prendre en compte la phase de l'AMO dans les prévisions décennales puisqu'à cette phase s'associent des fluctuations climatiques significatives.

On s'intéresse actuellement également aux liens que pourrait entretenir cette oscillation avec la circulation thermo-haline (Cassou, 2004).

2.2.4. L'oscillation pacifique décennale (PDO)

Cette oscillation océanique se traduit par des anomalies de température de l'océan Pacifique de structure comparable à l'ENSO mais sur une période de soixante ans environ. Cette période fait état d'une anomalie de température de surface du Pacifique avec des vents associés. Les années 2002-2003 marqueraient le début d'une phase PDO de faible anomalie négative (Figure 1-7). Elle serait associée à une plus forte

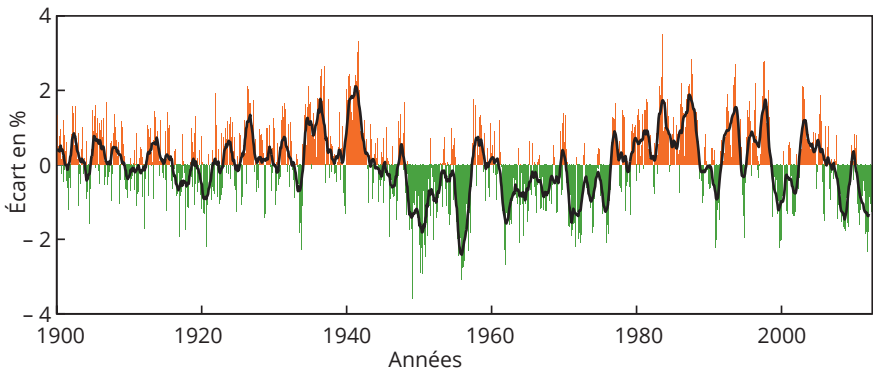
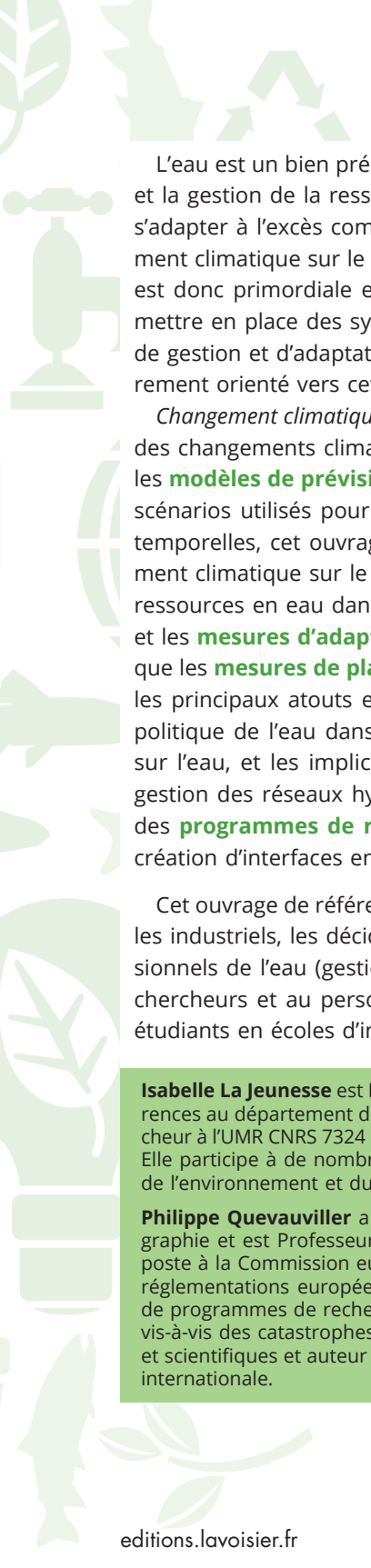


Figure 1-7. Indice mensuel de la PDO (1900-2008) (adapté d'après NOAA, www.cdc.noaa.gov/data/).



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.