

# Avant-propos

Cet ouvrage a été développé dans le cadre de la troisième année de la formation d'ingénieur de l'Ecole Polytechnique. Il répond à un double objectif :

- Explorer plusieurs problèmes concrets de mécanique des fluides environnementale pour en dégager des concepts de base utiles pour l'ingénieur ou le chercheur.
- Assimiler la démarche de modélisation en mécanique des fluides pour comprendre ou maîtriser le milieu naturel.

L'ouvrage est structuré en trois parties et neuf chapitres qui peuvent être lus indépendamment les uns des autres.

Chaque chapitre se termine par un formulaire récapitulatif des résultats essentiels, une liste des notations ainsi que des exercices corrigés permettant d'assimiler le cours. Des exercices supplémentaires sont proposés à la fin de l'ouvrage. Un certain nombre de documents complémentaires sont disponibles à l'adresse électronique suivante :

<http://thual.perso.enseeiht.fr/see/index.htm>

# Introduction

L'eau est à la base de toute vie sur Terre. La description du cycle de l'eau (voir Figure 1) fait appel à de nombreuses disciplines ou sous-disciplines : thermodynamique, physicochimie, biologie, mécanique du solide, sociologie ... et mécanique des fluides. Ce dernier point de vue est abordé dans cet ouvrage en privilégiant le point de vue de l'hydraulique continentale et côtière.

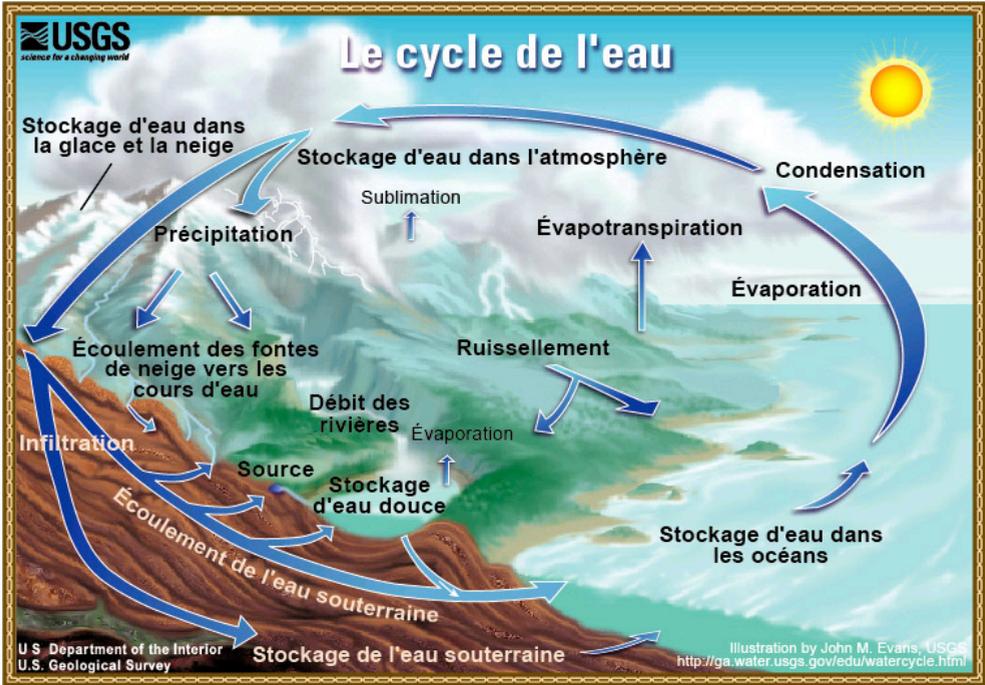


FIG. 1 – Le cycle de l'eau. Schéma USGS.

La figure 1 résume les caractéristiques principales du cycle de l'eau. Les grandes lignes de la circulation générale de l'atmosphère et des océans, qui gouvernent au premier ordre le transport de l'eau, sont décrites dans de nombreux ouvrages pédagogiques (voir par exemple [3]). Au-delà de la description du cycle de l'eau, il est important de prendre en compte le changement climatique observé et prévu qui en perturbe le fonctionnement et le fait passer au centre des préoccupations de l'homme et des industries qui en dépendent ou dont il découle.

L'évolution du climat du siècle passé et du siècle à venir est décrite dans les rapports quadriennaux du "Groupe Intergouvernemental d'Etude du Climat

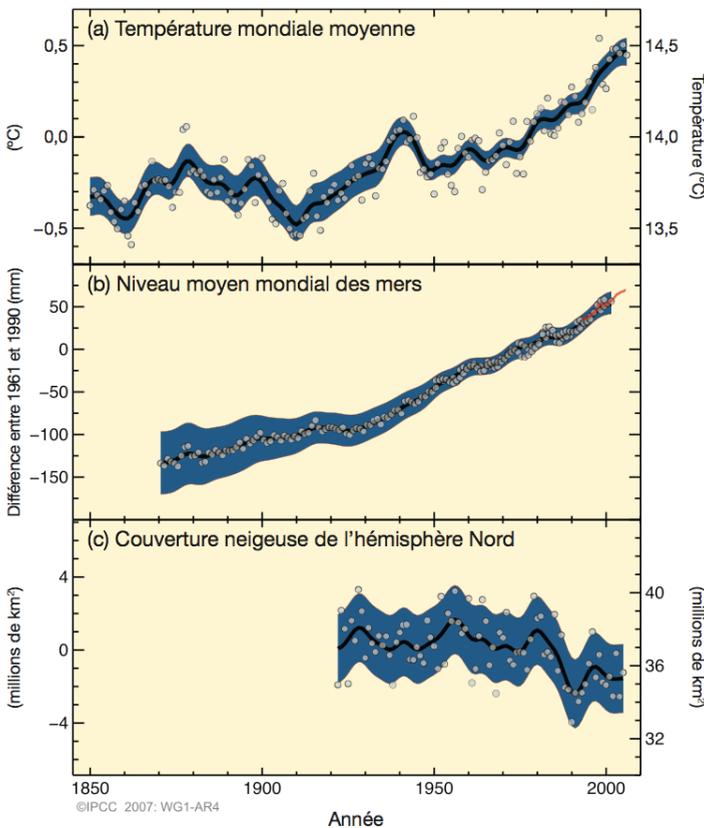


FIG. 2 – Changements de température, du niveau des mers et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord. Rapport IPCC 2007.

(GIEC)”, ou “Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)” [1]. La figure 2 montre que la température moyenne du globe a augmenté de  $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un siècle et continue de croître de  $0.1$  à  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  par décennie. Le niveau des mers a augmenté d’environ  $20\text{ cm}$  et continuera sa progression pendant des siècles, par inertie, bien au-delà d’une éventuelle stagnation de la concentration des gaz à effet de serre. La couverture neigeuse du globe a reculé de  $10\%$  et continuera à se résorber jusqu’à la disparition de nombreux glaciers.

Les simulations numériques de plusieurs modèles climatiques indépendants montrent en effet (voir figure 3) que la température globale continuera à augmenter de  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un siècle si aucune mesure n’est prise pour réduire l’émission des gaz à effet de serre. La prévision du changement de régime des précipitations est l’un des exercices les plus difficiles de la modélisation climatique. La figure 4 montre que les précipitations diminueront jusqu’à  $20\%$  dans les zones arides tandis qu’une augmentation du même ordre de grandeur dans les régions tempérées est prévue en hiver.

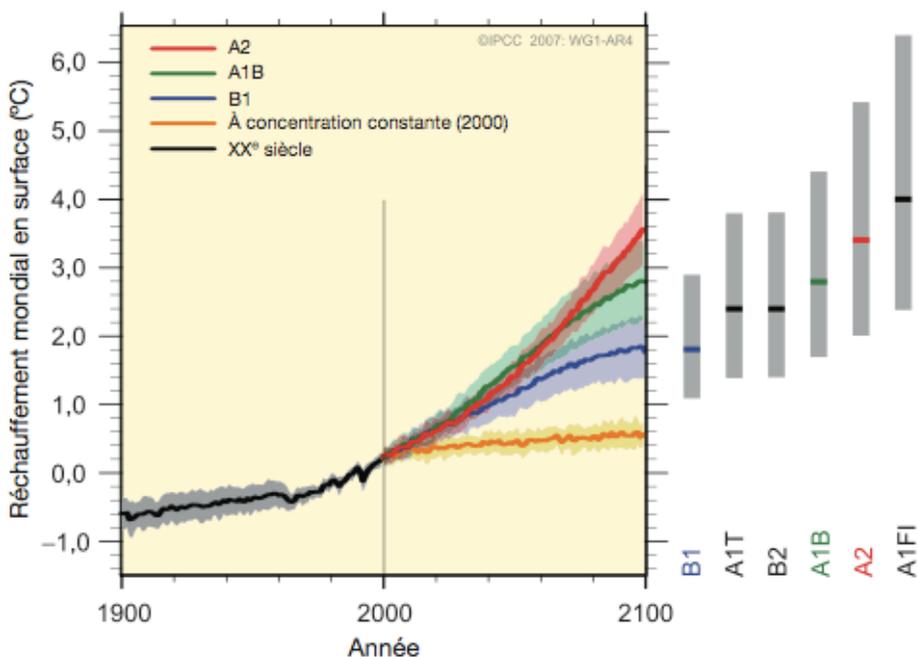


FIG. 3 – Moyennes des multi-modèles et fourchettes estimées du réchauffement en surface. Rapport IPCC 2007.

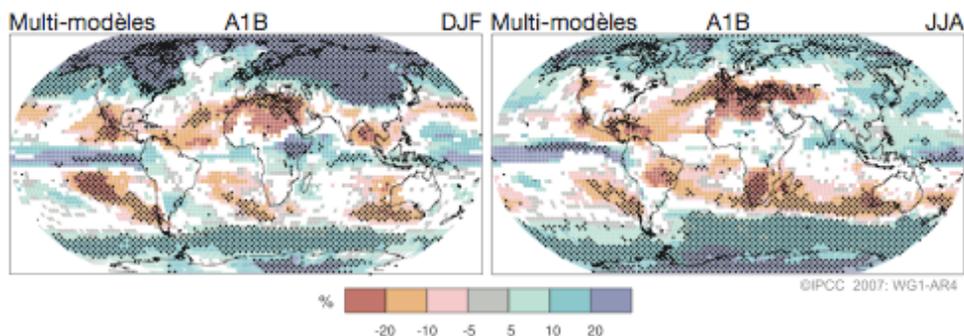


FIG. 4 – Simulation de la répartition des modifications des précipitations d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. a) Hiver. b) Été. Rapport IPCC 2007.

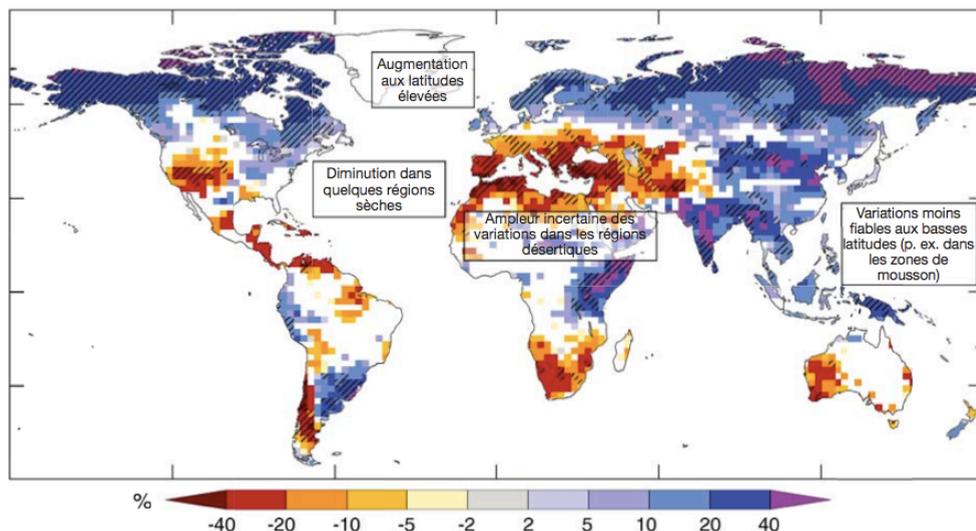


FIG. 5 – Projections et cohérence des simulations concernant les variations relatives du ruissellement d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Rapport IPCC 2007.

Le débit des fleuves suit cette tendance, comme le montre la figure 5, la diminution de la pluviométrie étant souvent amplifiée par l'augmentation de l'évaporation. La diminution des ressources en eaux dans certaines régions et l'augmentation des crues dans d'autres régions (ou les mêmes) va modifier drastiquement l'hydrologie continentale. L'élévation du niveau de la mer va changer sensiblement l'érosion des côtes par la houle.

Le présent ouvrage n'aborde que les aspects spécifiques de la mécanique des fluides que sont le ruissellement de surface, l'hydraulique des rivières, l'écoulement de l'eau souterraine, le stockage d'eau douce et la dynamique de l'océan dans les régions côtières. À plusieurs égards, le point de vue de l'ingénieur sera privilégié, la compréhension des phénomènes étant motivée par les aménagements qui permettent la maîtrise de l'eau.

Face aux bouleversements du climat, l'ingénieur est confronté à de nouveaux défis. Les métiers de l'ingénieur concernés par le cycle de l'eau et la mécanique des fluides sont nombreux. Une meilleure maîtrise des ressources en eau sera nécessaire en réponse à sa raréfaction et à l'augmentation de la demande. Une gestion optimisée des eaux souterraines au même titre que sa protection contre la pollution devient indispensable. L'accroissement de la fréquence et de l'amplitude des inondations nécessitera de nouveaux aménagements hydrauliques et un effort accru de modélisation. L'augmentation du niveau de la mer et de la fréquence des tempêtes nécessitera de nombreux aménagements pour la protection du littoral. Enfin, la recherche de nouvelles sources d'énergie, en

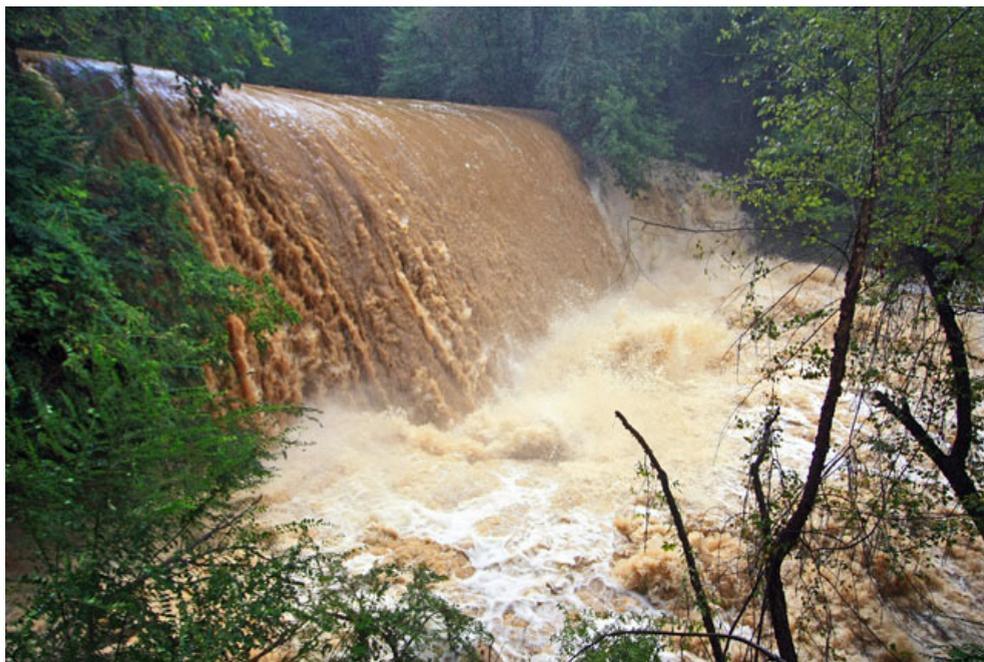


FIG. 6 – Crues et inondations. Photo USGC.



FIG. 7 – Érosion des côtes. Photo USGC.

remplacement des énergies fossiles, est de nature à développer la technologie permettant de récupérer l'énergie de la houle et des marées.

## Plan de l'ouvrage

La première partie de cet ouvrage présente les outils de base de la “mécanique des fluides” utiles pour aborder l'hydrodynamique de l'environnement. Le chapitre 1 est un cours de base sur la mécanique des milieux continus débouchant sur les équations de Navier-Stokes qui décrivent les écoulements incompressibles de fluides newtoniens. Deux exemples d'applications introduisant l'hydraulique en charge et à surface libre concluent ce chapitre. Le chapitre 2 s'intéresse aux écoulements potentiels dont le champ de vitesse est le gradient de la charge hydraulique, définie à partir de la pression et de l'altitude. Ce type d'écoulement se rencontre dans les milieux poreux et de nombreux exemples d'hydraulique souterraine illustrent ce chapitre. Le chapitre 3 aborde la modélisation de la turbulence et la paramétrisation du frottement sur des parois en fonction des grandeurs moyennes d'un écoulement. Ce chapitre est

illustré par l'exemple des pertes de charge dans des écoulements en conduites fermées.

La deuxième partie présente les principes de base de l'“hydraulique fluviale”. Le chapitre 4 traite de l'hydraulique à surface libre dans le cas des écoulements stationnaires et graduellement variés. Les concepts de charge hydraulique, de ressauts hydrauliques et de courbes de remous sont introduits. Le chapitre 5 aborde le cas des écoulements instationnaires en dérivant tout d'abord les équations de Saint-Venant à partir des équations de Navier-Stokes à surface libre. Les notions de courbes caractéristiques et de ressauts mobiles sont alors introduites sur le modèle des ondes de crues. Le chapitre 6 applique ensuite ces outils au cas des ondes de détente et de compression modélisées par les équations de Saint-Venant. Les relations de saut associées à ce modèle sont explicitées en ne retenant que les ressauts dont la dissipation d'énergie est positive.

La troisième partie aborde les concepts de base de l'“hydrodynamique marine”. Le chapitre 7 traite de la génération et de la dispersion des ondes de surface à l'aide des équations de Navier-Stokes à surface libre linéarisées. Les champs oscillants sont détaillés et la notion de vitesse de groupe est présentée à travers l'évolution des conditions initiales du système linéaire. Le chapitre 8 traite de la réfraction de la houle par une bathymétrie inhomogène. Les notions de tracé de rayons et de conservation de l'énergie sont illustrées à travers l'exemple des ondes de surface, mais leur présentation peut s'appliquer à tout type d'ondes. Le chapitre 9 complète l'étude des ondes de surface en évoquant les phénomènes de réflexion et de diffraction. Un aperçu général de la modélisation des ondes de marée est donné, motivant ainsi la présentation des oscillations de la surface libre en présence de rotation.

L'ensemble des notions abordées dans cet ouvrage devrait permettre à l'ingénieur ou au chercheur de disposer des concepts de base pour appréhender la plupart des problèmes de l'hydrodynamique de l'environnement et pour approfondir ses connaissances dans ce domaine.