

Quel scénario de changement climatique retenir pour une analyse d'impacts?

CLAUDE BOCQUILLON, WAJDI NAJEM & ANTOINE HREICHE

CREEN, Université Saint Joseph, BP 11-0514 Riad-el-Solh, Beyrouth, Liban

claude.bocquillon@fi.usj.edu.lb

Résumé Les horizons de prévision de doublement du CO₂ (2050) avec les conséquences en termes climatiques, sont comparables aux délais de planification et de mise en œuvre des aménagements. Ces risques doivent être pris en compte par les aménageurs. La difficulté réside dans l'évaluation de l'incertitude liée à ce risque dans le cas d'une zone géographique réduite de 10 000 km², le Liban. Des problèmes existent à tous les niveaux de la modélisation: les modèles globaux de changement climatique présentent des résultats de validation en conditions actuelles, relativement faibles; les différences d'échelle considérables entre la taille des mailles des GCM et la taille des bassins hydrologiques; l'incertitude sur la signification des paramètres de la modélisation hydrologique; la propagation des incertitudes dans la chaîne des modélisations non linéaires. Cette cascade d'incertitudes, impossible à analyser correctement, rend le diagnostic très subjectif. Il importe de rester réaliste lorsqu'on propose un scénario au décideur.

Mots clefs changement climatique; impacts; Méditerranée

Which climate change scenario to keep for analysing impacts?

Abstract The time horizons of the forecast of doubling CO₂ (2050) and its consequences in climatic terms, are comparable with the times of planning and implementation of installations. It is thus normal that these risks are taken into account by developers. The difficulty lies in the quantification of this risk. A qualitative analysis of uncertainties was made in the case of a specific geographical area, i.e. Lebanon (10 000 km²). Problems exist at all the levels of modelling: in global models of climatic change and their uncertainties. In particular: their validation in current conditions is relatively weak; the problems of scaling involved in the considerable difference between the size of the meshes of GCM and size of the watersheds; the uncertainty of the significance of hydrological model parameters; and propagation of uncertainties in the chain of modelling. This cascade of uncertainties, which is difficult to analyse correctly, makes the diagnosis subjective. It is important to remain realistic when one proposes a scenario to the decision maker.

Key words climate change; impacts; Mediterranean

INTRODUCTION

Les caractéristiques du climat, en particulier les précipitations et la température conditionnent le cycle de l'eau qui détermine les conditions de la vie terrestre. Certaines tendances ont déjà été mises en évidence. Le rapport de l'IPCC de 1996 présente l'évolution des données de précipitations et de température durant le 20^{ème} siècle (Karl, 1995) pour 10 régions du globe. Si les tendances de précipitations ne sont pas toujours évidentes pour certaines régions, la température a augmenté régulièrement de l'ordre de 0.01°C an⁻¹. Les outils susceptibles de prévoir les conséquences des perturbations climatiques sur le cycle de l'eau ou "modèles" doivent se baser sur l'analyse de l'ensemble des mécanismes en jeu (physiques, biologiques, et économiques). A chaque étape de l'analyse correspond un type de modèle. Les modèles de climat ou GCM (Global Change Model) peuvent être soit à l'échelle du globe (GCM à basse résolution), soit à une échelle régionale (GCM haute résolution). Les modèles du cycle de l'eau continental, à l'échelle d'un territoire, ou d'un bassin versant peuvent être physiques ou à défaut conceptuels. Les modèles de production agricole peuvent être soit dans le cadre d'un type de production donnée (le blé par exemple), soit dans le cadre du développement agricole en envisageant des évolutions de type culture et de pratiques agricoles. Enfin des modèles économiques, plus ou moins élargis à un ensemble de facteurs économiques avec analyse des coûts génèrent des flux de produits et des flux financiers. Les modèles d'impacts nécessitent le choix d'un scénario climatique. Ce choix se révèle difficile pour les petits territoires.

LES MODELES DE CHANGEMENT CLIMATIQUES

Les modèles de changement globaux ou GCM génèrent l'évolution des variables climatiques à partir des équations de conservation de la quantité de mouvement, de l'énergie et de l'humidité.

Depuis 1980, plusieurs modèles ont été proposés dont les résultats sont raisonnablement comparables, lorsqu'ils utilisent des hypothèses d'évolution des gaz à effet de serre identiques. Les échéances considérées sont les années 2050 et 2100. Dans le modèle du Hadley Center (à titre d'exemple, les autres modélisations étant très semblables), la surface du globe terrestre est découpée en éléments de 3.75° en longitude et de 2.5 en latitude. La maille de base dans les conditions locales est de 300 × 250 km (longitude × latitude). Cette maille s'étend de Beyrouth au désert syrien, de Haïfa à Lattaquié. La diversité des climats qu'elle est censée représenter est considérable, de sommets toujours enneigés aux déserts totalement arides. La maille représente 75 000 km² soit 7.5 fois la taille du Liban. Les résultats obtenus pour la température et la pluviométrie en 2050, sont présentés sur la Fig. 1, extraite des cartes établies par Ragab & Prudhomme (2000). La variabilité saisonnière des écarts est plutôt faible et dans la fourchette des incertitudes. En 2050, il est prévu une augmentation moyenne de 2.5°C (3°C en été et 2°C en hiver). La baisse de pluviométrie est de l'ordre de 5% en hiver, la baisse en été n'est pas significative. Le programme de recherches GICC (Gestion des Impacts du Changement Climatique) a concentré un ensemble de partenaires dans le cadre du bassin du Rhône (dans sa partie française). Une simulation dans les conditions actuelles (300 ppm de CO₂) a été comparée à un état de référence réalisé à partir d'un vaste ensemble de variables hydrologiques rassemblées dans une base de données constituée pour les besoins du programme. Les simulations ont été faites à partir de 6 modèles différents: 4 à basse résolution (mailles de l'ordre de 70 000 km²) et 2 modèles haute résolution (mailles de 10 000 à 2500 km²). Les différences entre les basses et hautes résolutions sont faibles. Les températures sont assez bien simulées (surtout en hiver). Les simulations des précipitations sont plus problématiques, avec des pluies hivernales plus dispersées (des écarts allant du simple au double). On peut dire que les GCM représentent assez mal l'état actuel. On peut attribuer cette dispersion aux paramètres des modèles physiques qu'ils contiennent, et tenter de corriger ces erreurs de dérive, par la «méthode des anomalies»: l'état futur est calculé avec l'état actuel, corrigé par la différence entre les simulations de l'état actuel et l'état futur. Malgré cette correction, les divergences restent encore importantes. Stainforth (2005) a mis en place un grand ensemble de calcul parallèle distribué dans le public scientifique, afin de réaliser une analyse de sensibilité des résultats aux estimations des paramètres. Le modèle retenu est le HDM3. Chaque simulation comporte un jeu de deux ou trois valeurs de paramètres et constitue une version possible du modèle. L'analyse des résultats conduit à des conclusions différentes d'une analyse de sensibilité paramètre par paramètre, sans doute en raison de fortes non linéarités, et de la structure chaotique des équations. L'analyse de la courbe de fréquence des élévations thermiques moyennes, montre une accumulation autour de 3°C avec très peu de cas au-dessous de 2°C, et une longue queue avec des cas exceptionnels à plus de 12°C. Cette analyse montre l'incertitude qui règne sur les GCM. Le champ de précipitation obtenu par les divers scénarios est très variable, et des écarts particulièrement importants peuvent être notés dans certaines régions (Murphy *et al.*, 2004). En particulier, certaines versions conduisent à des réductions importantes des précipitations dans l'Est du bassin méditerranéen. Les résultats sont en cours de confirmation.

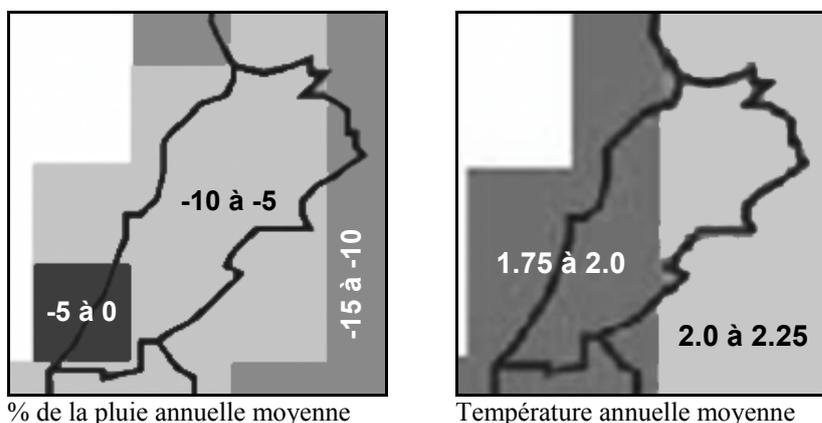


Fig. 1 Changement climatique en Méditerranée Orientale (d'après Ragab & Prudhomme, 2000).

LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DES BASSINS

Le milieu continental est structuré en bassins hydrologiques dont la taille, la structure et le comportement sous l'action des forçages atmosphériques, sont d'une extrême diversité. Les outils susceptibles de prédire de façon aussi précise que possible le comportement des bassins et les variables qui les caractérisent (débits, niveaux de nappe, états hydriques des sols) existent en grand nombre. Deux conceptions différentes de la modélisation du fonctionnement des bassins s'opposent. Les modèles conceptuels visent à représenter les processus physiques de base des transferts par des algorithmes essentiellement calibrés grâce aux données du passé. Développés depuis les années 60, ils ont fait la preuve de leur efficacité: Stanford Watershed Model (SWM; Crawford et Linsley, 1966), Hydrological Simulation Model (HBV; Bergstrom, 1995). Un modèle spécifique au climat méditerranéen a été développé par Hreiche (2003) et appliqué à plusieurs bassins libanais. La principale critique qui peut être faite à ces modèles tient à la faible consistance physique de leur paramétrage. Ces modèles se trouvent donc très dépendants des mesures passées, et en particulier sont assez peu efficaces sur des bassins non jaugés. Les modèles physiques représentent (dans la mesure du possible) de façon explicite les mécanismes physiques en jeu, par exemple le Système Hydrologique Européen (SHE; Abbot *et al.*, 1986). D'un point de vue prédictif, l'utilisation de paramètres ayant une signification physique claire et théoriquement mesurable est plus satisfaisante. De nombreuses méthodes de détermination des paramètres physiques, leur variabilité spatiale, leurs incertitudes ont été faites. Bathurst (1986) a par exemple défini des procédures de calibration des paramètres. Mais le nombre de mesures à effectuer pour estimer les paramètres physiques fait que cette approche ne peut être appliquée qu'à de petits bassins expérimentaux avec beaucoup d'observations de terrain. Dans l'état actuel des connaissances, aucune des deux approches n'est pleinement satisfaisante.

Le premier impact d'un réchauffement concerne l'évolution du manteau neigeux, par modélisation de la fusion du manteau. Ce terme peut être très important, en particulier au Liban, où le volume stocké par la neige représente près de 50% des précipitations. Le second impact a trait à l'évapotranspiration du sol et de la végétation (ET). La référence de l'évapotranspiration est l'ETmax correspondant à une disponibilité en eau non limitante (potentiel nul dans la plante). Mais l'évapotranspiration ET n'est qu'une fraction de ETmax car les plantes se protègent des pertes en eau afin d'assurer leur survie (Perrier et Tuzet, 2005). Cette adaptation entraîne une certaine régulation du prélèvement sur la ressource. Ces diverses considérations font que la plupart des modélisations de bassin dans l'objectif de tester les impacts hydrologiques de changements climatiques sont des modèles hybrides. La gestion de la neige et l'évaporation sont gérés par des modèles physiques, le transfert étant conceptuel et calé sur les données du passé. Un exemple de cette méthode est fourni par le programme GICC-Rhone: la neige et l'évaporation sont modélisées par le modèle physique ISBA, qui décrit les phénomènes physiques issus des bilans hydrique et énergétique à l'échelle locale.

L'INTERFACE GCM—CONTINENT

Le couplage entre les variables issues des GCM et les modèles hydrologiques pose le problème du changement des échelles spatiales et temporelles. Les modèles de bassins nécessitent des échelles de temps et d'espace adaptées à leur taille. Les bassins libanais ont des tailles allant de quelques centaines à quelques milliers de km². Un modèle physique nécessiterait pour une description correcte un pas d'espace de quelques centaines de mètres et de temps de quelques heures. La disponibilité de mesures à de telles échelles étant exclue, la seule alternative est celle de la modélisation conceptuelle. Celle-ci nécessite un maillage d'une dizaine de km (ordre de distance des postes pluviométriques disponibles) et un pas de temps journalier (seule donnée climatique disponible). C'est la disponibilité de la donnée qui impose le choix de la modélisation. Mais les GCM sont à des échelles très éloignées de ces exigences. Les GCM à basse résolution comme celui du Hadley Center ont des mailles de 200–300 km, et des pas de temps de calcul journaliers (dont la fiabilité n'est pas considérée comme valable à ce pas). Des GCM à haute résolution ont été élaborés, par exemple pour le modèle Rhône les modèles LMD à pas de 100 km et CNRM à pas de 50 km. Ces échelles sont incompatibles avec la variabilité physique d'un pays comme le

Liban et l'application de scénario GCM à de telles régions apparaît comme hautement problématique. Des procédures de "down scaling" ont été mises au point pour interpoler les résultats issus d'un GCM. Dayan et Kock (1999) ont été utilisés la procédure du Climate Research Unit of East Anglia (IPCC, 1996) pour spatialiser les données d'un GCM sur la région côtière d'Israël. Ces procédures conservent la structure actuelle c'est-à-dire les gradients thermiques et pluviométriques. Ceci implique un changement de température locale identique en tout point de la maille du GCM et un changement de pluviométrie proportionnel en tout point. Ceci ne peut constituer qu'une première approximation, en attendant les résultats de GCM à pas plus fin. Un des résultats les plus nets du programme du GICC-Rhone est que l'incertitude la plus forte réside dans le choix du scénario atmosphérique. Les écarts entre les modèles hydrologiques sont faibles vis-à-vis des écarts issus des divers GCM.

LES MODELES D'IMPACTS

Les impacts principaux à envisager pour le Liban (Hreiche, 2003) concernent la disponibilité de la ressource et l'impact sur la végétation. Bien que la recherche sur le changement climatique date des années 70, peu d'attention a été portée aux impacts potentiels sur la production agricole avant les années 90. L'impact d'un changement climatique sur la production agricole peut être estimé soit par une modélisation structurale qui analyse la réponse d'une plante donnée et les conséquences en termes de productivité, soit par une modélisation par analogie spatiale qui recherche les conditions d'exploitation de régions ayant des climats actuels identiques aux climats locaux modifiés par le changement climatique. Les deux approches se complètent car la seconde exprime la façon dont le milieu agricole va réagir en adaptant ses productions aux nouvelles conditions. Tubiello *et al.* (2000) ont analysé l'impact d'un scénario de changement sur la production de blé sur deux périmètres situés en Italie, à partir d'un modèle de croissance et de productivité: CROPSYST. Ce modèle prend en compte les divers paramètres liés au changement climatique: l'augmentation de CO₂ accroît la photosynthèse et les productivités agricoles (Kimball, 1983). L'augmentation du rayonnement et de la température raccourcit les durées des cycles végétatifs. Ce modèle a été validé sur divers environnements en Italie (Donatelli *et al.*, 1997). Des stratégies d'adaptation ont été retenues, comme des plantations plus précoces des variétés de printemps. Tubiello *et al.* (2000) envisagent un effet négatif sur la production en région méditerranéenne où la limitation de la production est liée au stress hydrique, amplifié par une augmentation de la température. Les travaux récents montrent que les phénomènes sont plus globaux et que les modèles conventionnels d'analyse d'impacts ont des limites. En effet, les producteurs, les circuits de distribution et même les consommateurs sont susceptibles de s'adapter aux changements. Cette adaptation potentielle est reconnue et a déjà été observée dans l'histoire, mais les modèles sous estiment en général son importance et ses conséquences en terme d'économie de marché. L'agriculture est en compétition avec d'autres activités pour l'usage du sol et les investissements en temps et en argent. Les changements de production agricole peuvent amener des extensions de surfaces cultivées au détriment des forêts et des écosystèmes naturels avec des rétroactions sur le changement climatique. Enfin les réponses du monde agricole sont affectées par les politiques gouvernementales et les accords mondiaux.

CONCLUSIONS

Dans la perspective d'un changement climatique lié à l'augmentation des gaz à effet de serre, la prise en compte des impacts susceptibles d'affecter les conditions de vie humaine (partage de la ressource en eau, production alimentaire, conflits, etc.) ne peut se faire sans une connaissance quantitative de ces impacts et de leurs aléas. En l'absence de références dans le passé, cette connaissance passe par une représentation du fonctionnement ou "modèle" des divers compartiments physiques du cycle hydrologique: cycle atmosphérique (GCM), cycle continental (modèles de bassins), cycle végétal (ESP) et enfin des modèles macroéconomiques, dont Boussard et Christensen ont fourni un inventaire détaillé en 1997. La mise au point de ces outils, aussi performants que possible pose de nombreux problèmes en liaison avec leur enchaînement, leur

compatibilité, et la propagation de leurs incertitudes. Certaines non-linéarités et des effets de seuil rendent leur comportement parfois chaotique. Ils restent cependant la seule démarche possible et leurs résultats doivent être pris en compte au niveau des décisions, même s'il n'est pas possible de chiffrer leur fiabilité.

Dans un pays de faible dimension comme le Liban, à l'écart des grands programmes multinationaux, le maillon le plus faible dans la chaîne des modélisations est le modèle de climat. Dans ces conditions, il est nécessaire de retenir quelques scénarios de base simples (augmentation uniforme de température allant de 2°C à 4°C; changement de pluviométrie de 0% à 10%) et d'examiner les impacts sur la ressource en eau et la production agricole, afin d'intégrer ces éventualités à la planification du pays. La proximité des échéances, et leur caractère quasi inéluctable exigent leur intégration dans la prospective nationale.

Remerciements Cette étude fait partie du projet "Variabilité climatique en Méditerranée Orientale" ans le cadre du programme CORUS du Ministère des Affaires Étrangères de l'État Français.

REFERENCES

- Abbot, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. & Rasmussen, J. (1986) An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique "SHE". *J. Hydrol.* **87**, 45–59.
- Bathurst, J. C. (1986) Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Systeme Hydrologique European. *J. Hydrol.* **105**, 157–172.
- Bergström, S., (1995) The HBV model. In: *Computer Models of Watershed Hydrology* (ed. by V. P. Singh), 443–476. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.
- Boussard, J. M. & Christensen, A. K. (1997) Modèles Calculables d'Equilibre général, Risque et Place de l'Agriculture dans l'Economie Nationale: Application à la Pologne et à la Hongrie. *Economie Rurale*, 6.
- Crawford, N. H. & Linsley, R. K. (1966) Digital simulation in hydrology, Stanford watershed model IV. *Technical Report 39*. Stanford, University of California, USA.
- Dayan, U. & Koch, J. (1999) Implications of Climate Change on the Coastal Region of Israel. Mediterranean Action Plan, United Nations Environment Programme.
- Donatelli, M., Stockle, C. O., Ceotto, E. & Rinaldi, M. (1997) Evaluation of CropSyst for cropping systems at two locations of northern and southern Italy. *J. Agron.* **6**, 35–45.
- Hreiche, A. (2003) Modélisation-conceptuelle de la transformation pluie-débit dans le contexte méditerranéen. Thèse, Université Montpellier II—Beyrouth, Liban.
- IPCC (1996) *The Science of Climate Change* (ed. by J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg & K. Maskell). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Karl, T. R., Bretherton, F., Easterling, W. & Trenberth, K. (1995) Long-term climate monitoring of the Global Climate Observing Systems (GCOS). *Climatic Change* **31**, 135–147.
- Kimball, B. A. (1983). Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observation. *Agron. J.* **75**, 779–786.
- Murphy, J., Sextor, D., Barnett, D., Jones, G., Webb, M., Collins, M. & Stainforth, D. (2004) Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* **430**, 768–772.
- Perrier, A. & Tuzet, A. (2005) Le cycle de l'eau et les activités au sein de l'espace rural. *CR Géoscience* **337**, 39–56.
- Ragab, R. & Prudhomme, C. (2000) Climate changes and Water Ressources Management in arid and semi arid regions. *S. Agric. Engng Res.* **759**, 1–32.
- Stainforth, D. A. (2005). Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature* **433**, 403–413.
- Tubiello, F., Donatelli, M., Rosenzweig, C. & Stockle, O. (2000) Effects of climate and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *Eur. J. Agron.* **13**, 179–189.