

La gestion intégrée des ressources en eau et l'adaptation au changement climatique

H. MOUMNI¹, K. SEBARI¹, A. HAMMANI¹

(Reçu le 05/03/2019; Accepté le 01/08/2019)

Résumé

Au Maroc, la gestion des ressources en eau, caractérisées par la rareté et l'irrégularité, est amenée à faire face à la pression de plus en plus importante des demandes mais aussi au changement climatique. Des mesures d'adaptation à ce changement sont nécessaires pour assurer un développement durable des ressources. Cet article présente la problématique de la gestion des ressources en eau face au changement climatique. Il présente une revue bibliographique sur la modélisation hydrologique et la stationnarité des conditions climatiques. Il traite les différents outils utilisés pour la prise de décision et présente l'approche globale de la gestion des systèmes hydrauliques dans un contexte de changement climatique. L'article cite à titre d'exemple le cas du bassin de Sebou. Ce bassin draine un tiers des eaux superficielles du Maroc. Plusieurs composantes naturelles et anthropiques régissent son cycle hydrologique. Une synthèse des travaux antérieurs sur l'impact conjugué des aménagements hydrauliques et du changement climatique sur ce bassin est présentée. L'analyse des différents modèles fréquemment utilisés dans la gestion des ressources en eau conduit à soulever certaines limites et met en évidence la nécessité de développer d'autres approches et outils d'aide à la décision plus adéquats. Notamment, une approche intégrée permettant l'évaluation de la résilience des systèmes hydrauliques au changement climatique et l'évolution des demandes.

Mots clés: Ressources en eau, système hydraulique, changement climatique, adaptation

Integrated water resources management and adaptation to climate change

Abstract

In Morocco, the management of water resources, characterized by scarcity and irregularity, has to cope with the increasing pressure of demands as well as climate change. Adaptation measures to these changes are needed to ensure sustainable resource development. This article presents the problem of water resources management in the face of climate change. A bibliographic review on hydrological modeling and stationarity of climatic conditions is presented. The article deals with the various tools used for decision making and presents the global approach to the management of hydraulic systems in a context of climate change. The case of the Sebou basin is presented as an example; this basin drains a third of the surface waters of Morocco. Several natural and anthropogenic components govern its hydrological cycle. A synthesis of previous works on the combined impact of hydraulic structure and climate change on this basin is presented. The analysis of the various models frequently used in the management of water resources leads to raising certain limits and highlights the need to develop other more appropriate approaches and tools. In particular, an integrated approach to assess the resilience of hydraulic systems to climate change and the evolution of water demands.

Keywords: Water resources, hydraulic system, climate change, adaptation

INTRODUCTION

Le quatrième rapport d'évaluation (AR4) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) indique que le réchauffement du système climatique est sans équivoque (IPCC, 2007). Le climat de la planète est soumis à des variations naturelles, néanmoins les scientifiques ont démontré que les rejets anthropiques de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont la cause des changements dans le climat (IPCC, 2007). Il y a moins de consensus sur l'ampleur du changement des variables climatiques, mais plusieurs études ont montré que le changement climatique aura un impact sur la disponibilité et la demande des ressources en eau (Bigelow and Zhang, 2018; Kundzewicz *et al.*, 2018; Kusangaya *et al.*, 2014).

L'Afrique est particulièrement touchée par le changement climatique, et y est très vulnérable (Adenle *et al.*, 2017). Cette vulnérabilité est liée à l'importance que revêt le secteur agricole pour les moyens d'existence et la sécurité alimentaire de la population, à sa place dans l'économie

et au manque de moyens pour l'adaptation au changement climatique (Busby *et al.*, 2014; Calzadilla *et al.*, 2013; Filho *et al.*, 2018). L'évolution de la demande en eau due à la croissance démographique et les usages exercent de fortes pressions sur les ressources en eau. Le changement climatique menace de mettre davantage de pression sur les ressources en eau et la sécurité alimentaire (Ayanlade *et al.*, 2018; Faramarzi *et al.*, 2013; Goulden *et al.*, 2009). Les effets du changement climatique combinés à la vulnérabilité de l'agriculture et des moyens d'existence en Afrique exigent que des mesures efficaces d'atténuation du changement climatique et d'adaptation à ses effets soient mises en place dans la région (Epule *et al.*, 2017; Nguimalet *et al.*, 2016).

L'accord de Paris a établi un objectif mondial d'atténuation et d'adaptation pour accroître la résilience au changement climatique et réduire la vulnérabilité à ces changements (Tobin *et al.*, 2018). Pour capitaliser les efforts de l'accord de Paris, la Cop 22 organisée au Maroc avait

¹ Département Eau, Environnement, Infrastructure, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

pour objectif de débloquer le financement des mesures d'adaptation au changement climatique en se concentrant principalement sur les pays en développement qui sont les plus vulnérables au changement climatique. Lancée cette occasion, l'initiative Triple A: «Adaptation de l'Agriculture Africaine», vise à réduire la vulnérabilité de l'Afrique et de son agriculture au changement climatique. Cette initiative favorise la mise en place de projets concrets pour améliorer la gestion des sols, la maîtrise de l'eau agricole et la gestion des risques climatiques (Ghezloun *et al.*, 2017). L'Initiative triple A vise aussi l'accélération du financement des projets d'adaptation de l'agriculture africaine, notamment grâce au fonds climat.

Le Maroc, à l'instar de nombreux pays en développement, est fortement impacté par le phénomène du changement climatique. Ces ressources en eau, caractérisées par leur rareté et leur irrégularité temporelle et variabilité spatiale sont soumises à une pression croissante liée à la poussée démographique, au développement de l'agriculture irriguée ainsi qu'au développement urbain, industriel et touristique. Ces eaux sont aussi sous l'influence négative de l'effet du changement climatique, ainsi que des considérations écologiques et environnementales. Les impacts liés au climat, conjugués à la demande en eau croissante, rendraient la satisfaction des besoins en eau pour les différents usages de plus en plus difficile (Schilling *et al.*, 2012; Seif-Ennasr *et al.*, 2016).

L'étude de l'évolution des facteurs climatiques a démontré une augmentation des températures et une accentuation de la variabilité climatique. Cela s'est particulièrement caractérisé par une modification de l'intensité et de la répartition des précipitations, une réduction des ressources hydriques et une amplification des phénomènes extrêmes (El Jihad *et al.*, 2014; Khattabi *et al.*, 2014; Stour and Agoumi, 2008; Trambly *et al.*, 2012). Il s'avère primordial de prendre en considération les vulnérabilités au changement climatique et les possibilités d'adaptation au niveau des stratégies de développement du Maroc. Le Maroc s'est doté, ces dernières années, de nouvelles stratégies à portées sectorielles. Pour maximiser les conditions de réussite de ces stratégies, une approche d'adaptation à même de réduire les vulnérabilités afférentes au changement climatique paraît nécessaire. Le concept de vulnérabilité d'un système pris en considération ici englobe à la fois l'évaluation des risques climatiques pouvant affecter ce système ainsi que l'appréciation de sa capacité d'adaptation. A cet effet, l'Institut Royal des Études Stratégiques (IRES).

Pour anticiper les questions de gestion des ressources en eau, une connaissance fine des systèmes hydrologiques est nécessaire. Cependant, le lien direct entre la variabilité hydrologique et la variabilité climatique est parfois difficile à identifier et isoler pour les grands bassins versants (Milano *et al.*, 2013). Ces derniers intègrent la réponse hydrologique au changement climatique, environnementaux et anthropiques à de larges échelles spatiales et temporelles (Zamrane, 2016). Pour mettre en évidence la complexité des interactions entre les forçages climatiques, les pressions humaines et les écoulements, une analyse des données disponibles est nécessaire avant toute tentative de modélisation sur un bassin comportant de complexes hétérogénéités (Collet *et al.*, 2014). Pour comprendre les impacts du changement climatique sur la vulnérabilité

des régimes hydrologiques, il est fondamental d'analyser et de caractériser la variabilité hydroclimatique sur une longue période.

Un des enjeux majeurs de la recherche sur la variabilité climatique au Maroc est de quantifier son impact sur les ressources en eau (Bahin Yoli Baudet *et al.*, 2017). Pour faire face à cette pénurie des ressources en eau, le Maroc a très tôt donné une grande importance aux aménagements hydrauliques et à la mobilisation des ressources en eau. Le bassin versant du Sebou est l'un des principaux bassins hydrauliques ayant bénéficié de ce programme d'aménagement avec environ 13 barrages. Ce bassin versant a aussi connu la mise en eau en 1997 du barrage Al Wahda au niveau du sous bassin l'Ouergha. La capacité de sa retenue le place comme le deuxième plus grand barrage en Afrique. Avec une capacité de 3,8 milliards de mètres cubes, le barrage est destiné à l'alimentation en eau potable, l'irrigation, la production d'énergie et surtout la protection de la plaine du Gharb contre les inondations.

BASSIN DE SEBOU: VARIABILITÉ HYDROCLIMATIQUE ET OUVRAGES HYDRAULIQUES

Plusieurs travaux de recherche ont étudié la variabilité spatiotemporelle des séries climatiques et hydrologiques dans le bassin versant du Sebou sur une longue période moyennant des méthodes statistiques (Boukrim *et al.*, 2011; Eudes *et al.*, 2017; Haida *et al.*, 1999; Zamrane, 2016). L'imperméabilité de ses terrains, formés essentiellement de marnes Crétacé, empêche le développement des ressources en eau souterraines. Pourtant, ses eaux de surface sont vulnérables à plusieurs contraintes naturelles et anthropiques. L'étude d'impact du changement climatique met en évidence un réchauffement annuel de 0,15 °C et un déficit pluviométrique annuel d'environ 4 mm observé de 1982/83 à 2007/08 qui forme la période hydrologiquement la plus sèche qu'a connu le bassin de l'Ouergha. La comparaison entre les deux périodes : 1957/58-1970/71 et 1970/71-2007/08 montre une diminution des débits des oueds suivant la baisse des pluies. La réduction de ces débits a entraîné des déficits hydrologiques considérables oscillant d'une station à l'autre de 40,8% à 49,5%. Le rapport entre la lame d'eau tombée et celle ruisselée montre un déficit d'écoulement de 368 mm. Le coefficient de ruissellement de 49,4% indique que 50% de la pluie n'a pas ruisselé mais est sûrement évaporée et évapotranspirée puisqu'elle ne peut pas s'infiltrer. Cette situation critique que subissent les ressources en eau du bassin versant de l'Ouergha, exige une bonne gestion pour minimiser la pénurie surtout avec l'accentuation de la sécheresse météorologique. Le bassin versant du Sebou, d'une superficie de 40 000 km², est caractérisé par des reliefs qui diffèrent du nord au sud par leur hypsométrie, leur étendue et leur composition lithologique. Ce contraste morpholithologique influence fortement la répartition des pluies et le régime d'écoulement des oueds. Ainsi le Rif, au nord, avec ses versants abrupts et son important réseau hydrographique, fournit les plus grands volumes d'eau de type torrentiel (en moyenne 2,6 x 10⁹ m³/an). Ces travaux dévoilent une grande différence entre les comportements des cours d'eau du moyen Atlas et du Rif. En effet, pour le

haut Sebou et ses affluents, la nature karstique des terrains et les caractéristiques climatologiques permettent de régulariser les débits en année humide et de réduire les effets de la sécheresse en année sèche à travers la constitution d'une importante réserve souterraine. Dans les sous bassins rifains, les terrains imperméables et les fortes pentes favorisent la formation de fortes crues en années humides, et des étiages accentués en années sèches. Les résultats de ces travaux sur le bassin de Sebou montrent que le climat a connu de fortes fluctuations interannuelles avec une succession de périodes sèches et humides jusqu'à 1979 suivi d'une période sèche très marquée entre 1980 et 1995 et une reprise de l'alternance d'années humides et d'années sèches entre 1996 et 2013. L'analyse des relations pluie/débit associée aux tests statistiques de détection de rupture a permis de différencier l'impact climatique de l'impact anthropique lié aux effets des barrages. Les ruptures sont démontrées à travers la relation pluie/débit qui diffère entre la période avant la construction des barrages (1939-1973) et la période après la construction des barrages et aussi à travers la réduction des apports liquides qui engendre des déficits hydrologiques variant entre 40 et 90% respectivement sur le Sebou et sur l'Ouergha (Eudes *et al.*, 2017). Cependant, la construction des barrages n'est pas la seule cause de ces évolutions, les changements observés sur les débits sont cohérents avec ceux observés sur les pluies, la diminution de la pluviométrie a contribué à la diminution des débits. D'après les travaux de (Eudes *et al.*, 2017), des mesures d'adaptation sont nécessaires sur le bassin de Sebou vu l'impact des aménagements hydrauliques associé au changement climatique attendu sur les écoulements superficiels. Ces mesures d'adaptation doivent concerner la régulation des débits par les grands ouvrages destinés au soutien en étiage, à l'écriture des crues et à la production de l'énergie électrique.

À la lumière de ces travaux sur le bassin de Sebou, trois conclusions sont à retenir. La première est liée à la nécessité de renforcer le réseau de mesure sur ce bassin afin de mieux caractériser l'évolution du climat et contribuer à une meilleure adaptation aux effets néfastes du changement climatique. La deuxième conclusion soulève le besoin de renforcer la compréhension de la relation entre les contraintes climatiques, la dynamique des écoulements et les perturbations anthropiques du cycle de l'eau. Ceci peut être réalisé par le recours à la modélisation hydrologique. La troisième conclusion souligne l'importance de l'amélioration des outils de gestion rationnelle des ressources en eau et des mécanismes d'adaptation au changement climatique sur le bassin de Sebou. Le développement d'une approche intégrée dans ce sens constitue un moyen incontournable pour la gestion et le partage de la ressource entre les différents secteurs de demande.

LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

La modélisation du cycle de l'eau s'intéresse à la représentation des variations spatiales et temporelles des flux d'eau à l'échelle du bassin versant à l'aide de bilans de masse, de quantité de mouvements et d'énergie thermique (Villeneuve *et al.*, 1998).

Pour modéliser les processus de production et de transfert, un très grand nombre d'outils ont été développés depuis le début des années soixante. L'abondance des modèles

témoigne de la variété des approches possibles pour conceptualiser les processus et la diversité des contextes étudiés. Les modèles hydrologiques peuvent être classés selon trois critères principaux: la manière dont les processus d'écoulement sont décrits, la représentation spatiale du bassin versant, et le domaine temporel.

Selon Villeneuve *et al.* (1998), deux approches de la représentation des processus hydrologiques sont à distinguer dans le cadre de la modélisation. La première approche est plutôt empirique et tente de reproduire le comportement d'un bassin versant par un ensemble de réservoirs interconnectés. La seconde approche est plutôt mécaniste et s'appuie fondamentalement sur des équations traduisant des lois physiques qui seront résolues numériquement dans le cadre d'une discrétisation spatiale et/ou temporelle appropriée.

Pour ce qui est de la discrétisation temporelle, on distingue les modèles événementiels et les modèles continus. Les modèles événementiels ont pour but de reproduire la réponse du bassin à un événement pluvieux (études des crues) (Sanyal *et al.*, 2014). Les modèles continus, quant à eux, ont pour but de simuler le comportement du bassin sur une longue période continue, la finalité étant l'évaluation des apports (Seyoum *et al.*, 2013).

Pour ce qui est de la représentation spatiale, on distingue les modèles globaux et les modèles distribués. Un modèle global n'implique aucune discrétisation spatiale. Les valeurs des paramètres sont homogènes sur la zone d'étude, et les conditions de précipitations, températures, occupation du sol, types de sols, etc. sont uniformes sur l'ensemble de cette entité. Un modèle distribué permet de prendre en considération la variabilité spatiale des données à travers une discrétisation du bassin en plusieurs sous-entités. Les paramètres physiques sont représentés par des valeurs spécifiques à chaque unité spatiale. À titre d'exemples de modèles empiriques spatialisés on trouve les modèles CEQUEAU de Morin (1981) et TOPMODEL de Kirkby and Beven (1979). Parmi les modèles physiques distribués, on retrouve les modèles SHE de Abbott *et al.*, (1986), KINEROS de Woolhiser (1989), HEC-HMS (USACE, 2009) et SWAT (Arnold *et al.*, 1998) pour n'en citer que quelques-uns.

L'approche distribuée a l'avantage de capturer la variabilité spatiale et temporelle des composantes du cycle de l'eau et permet d'étudier les conséquences de changement d'échelle. En contrepartie, elle exige une connaissance géographique et physique détaillée du bassin versant, un nombre important de paramètres requis pendant la phase de préparation des données d'entrées et des contraintes lors du calage.

Pour les besoins de modélisation hydrologique distribuée, les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection spatiale sont d'excellents moyens de traitement et de recueil des données. Le SIG est utilisé pour analyser les informations spatiales et fournir au modèle hydrologique les données d'entrée telles que les précipitations, la température, l'évaporation, les propriétés des sols, l'occupation des sols, les caractéristiques des nappes, l'humidité des sols, etc. L'occupation du sol est une importante caractéristique du processus d'écoulement qui affecte l'infiltration, l'érosion et l'évapotranspiration.

Parmi les applications courantes de la télédétection en modélisation hydrologique, l'utilisation des cartes satellitaires pour déterminer l'impact de l'occupation du sol sur le comportement hydrique des bassins versants (Sanyal *et al.*, 2014; Younis and Ammar, 2017).

Plusieurs auteurs ont fait appel à la modélisation hydrologique pour comprendre le fonctionnement des bassins versants (Halwatura and Najim, 2013), estimer les risques d'inondations (Azam *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2017), estimer des débits sur des bassins non jaugés (Bangash *et al.*, 2012; Candela *et al.*, 2012), simuler l'impact de scénarii climatiques (Ardoin-Bardin *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2018; Pichuka *et al.*, 2017; Ruelland *et al.*, 2012), simuler la réponse hydrologique face à une évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol (Zhang *et al.*, 2018; Zope *et al.*, 2016). On trouve également des applications de la modélisation hydrologique dans les études de transfert de polluants, de simulation de l'impact de scénarii d'aménagement sur les bassins versants, les études de la stabilité des barrages et leurs ouvrages annexes (Ahn *et al.*, 2014; Tingsanchali and Tanmanee, 2012).

Les modèles utilisés par ces études sont variés. Le choix du modèle dépend des besoins de l'utilisateur et du contexte de l'étude. Le choix du modèle doit être fait en fonction de la connaissance du site, des données disponibles ainsi que le nombre de paramètres à renseigner et à caler. Un équilibre entre la complexité du modèle, la disponibilité de données et les questions auxquelles l'étude tente de répondre est à rechercher.

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, BESOIN D'ADAPTATION

«Stationarity is dead»: Milly *et al.*, (2008) rejettent l'hypothèse de stationnarité du climat tant utilisée par les études hydrologiques. Les systèmes hydrauliques et les règles de gestion doivent prendre en considération le changement climatique. Afin d'évaluer le climat futur, des scénarii d'émission de gaz à effet de serre régis par différentes contraintes telles que la croissance démographique, le développement socio-économique et technologiques sont étudiés. Ces différents scénarii sont exploités en tant que données d'entrée de modèles climatiques globaux qui reproduisent les processus physico-chimiques de l'atmosphère et des océans et les échanges complexes qui s'y produisent (IPCC, 2007). Les sorties des modèles climatiques globaux ne représentent pas les caractéristiques climatiques régionales ou locales vu leur grande résolution spatiale (IPCC, 2007). Des techniques de désagrégation spatiale (downscaling) sont développées afin de palier à ce problème et produire des séries de précipitation et de température à l'échelle régionale ou locale. Parmi ces techniques, on trouve d'une part les méthodes de désagrégation dynamiques basées sur le développement de modèles climatiques régionaux qui ont une résolution plus fine (Fowler *et al.*, 2007). D'autre part, les techniques de désagrégation statistiques qui utilisent des fonctions de transfert pour établir des relations statistiques entre les forçages climatiques à l'échelle locale et les variations simulées par les modèles climatiques globaux (Fowler *et al.*, 2007). Les prévisions météorologiques issues du downscaling sont utilisées en tant que données d'entrée

pour les modèles hydrologiques ou les modèles de gestion de l'eau. Les impacts du changement climatiques peuvent ainsi être déterminés à l'échelle du bassin hydrographique et pris en considération pour décider des règles de gestion des systèmes hydrauliques (Collet *et al.*, 2015; Georgakakos *et al.*, 2012; Mehta *et al.*, 2013; Seif-Ennasr *et al.*, 2016).

Bien que les modèles de circulation globaux soient très répandus dans les études d'impact du changement climatique, plusieurs auteurs ont souligné diverses sources d'incertitudes en relation avec les forçages climatiques futurs. En effet, l'évolution dans le futur de la croissance démographique, du développement socio-économique et technologique est incertaine. Par conséquent, les incertitudes touchent les scénarii d'émission des gaz à effet de serre qui seront les entrées des modèles climatiques globaux (MCG) (Quintana Seguí *et al.*, 2010). Chacun de ces modèles possède ses propres algorithmes mathématiques, les projections climatiques peuvent diverger d'un (MCG) à l'autre pour un même scénario d'émission des GES (Minville *et al.*, 2008). Une autre source concerne les techniques de descente d'échelle utilisées pour avoir des données régionales ou locales (Boé *et al.*, 2007). Ces incertitudes liés aux forçages climatiques futurs sont amplifiées par les modèles hydrologiques (Quintana Seguí *et al.*, 2010).

De nombreuses études ont tenté d'évaluer ces incertitudes. (Stainforth *et al.*, 2005) ont essayé de quantifier l'incertitude liée à la paramétrisation des modèles sur la détermination de la sensibilité du climat à un doublement de la concentration du CO₂. La gamme de sensibilité obtenue varie de 1,9°C à 11,5°C à l'horizon 2100. Cette gamme dépasse l'estimation reconnue de l'augmentation de la température globale à l'horizon 2100 et qui devrait se situer entre 1,4 et 5,8°C (Renard, 2006). Du point de vue hydrologique, Prudhomme *et al.*, (2003) ont étudié les incertitudes provenant de la chaîne de traitement des données nécessaires à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les régimes hydrologiques en période de crues. L'approche multi-scénario et multi-modèles a été adoptée dans cette étude; elle a utilisé plusieurs scénarii d'émission des gaz à effet de serre, plusieurs MCG, et plusieurs sensibilités du climat afin d'évaluer la réponse hydrologique au changement climatique. Les résultats ont montré que le choix du MCG est la source d'incertitude majeure alors que la réponse hydrologique semble moins sensible aux deux autres paramètres.

Pour réduire ces incertitudes, certains auteurs optent pour les générateurs de climat pour produire des séries chronologiques de précipitations et des températures au niveau local. La génération des séries futures se fait en perturbant les séries observées avec les variations moyennes des températures et des précipitations tirées des scénarios climatiques disponibles (Cheng *et al.*, 2017; Soundharajan *et al.*, 2016).

La quantification des scénarios futurs est limitée par de nombreuses sources d'incertitudes. Une étude complète du changement climatique sur les systèmes hydrauliques doit intégrer toutes ces incertitudes dans la gestion et la planification des ressources en eau ainsi que dans la conception des nouveaux ouvrages.

MODÈLES DE GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU

Les pressions importantes sur les ressources en eau liées au changement climatique et aux usages de l'eau nécessitent une adaptation de la gestion des ressources et de la demande en eau. Plusieurs travaux de recherche ont développé des outils d'aide à la décision qui permettent de déterminer l'offre en eau, d'estimer l'évolution des demandes en eau et d'appliquer des scénarios d'évolution afin d'évaluer la satisfaction des besoins dans le futur. Ils s'agit de modèles pour la gestion intégrée des ressources en eau appliqués à différentes échelles spatiales.

A l'échelle globale, le modèle le plus utilisé est le modèle WaterGAP (Water Global Analysis and Prognosis), développé par l'Environmental Systems Research Center à l'Université de Kassel en Allemagne. Ce modèle permet une confrontation de la disponibilité des ressources en eau aux demandes à l'échelle du globe en tenant en compte le changement climatique et les effets anthropiques (Doell *et al.*, 2003). La résolution spatiale de ce type de modèle ne permet pas de les utiliser à l'échelle du bassin versant qui est l'unité locale de gestion des ressources en eau.

A l'échelle locale, il existe un très grand nombre de modèles dont le fonctionnement est semblable. Tous reposent sur la définition de réseaux hydrographiques principaux au niveau desquels des nœuds sont connectés pour représenter les demandes en eau, les barrages réservoirs et les transferts d'eau. Ces modèles visent à confronter l'offre et la demande en eau des différents usagers, à considérer les besoins écologiques et à fournir des modes de gestion de barrages de manière à assurer un stockage en prévision des besoins, un soutien aux débits d'étiages et une production effective d'énergie hydro-électrique. Certains

de ces modèles appliquent des méthodes d'optimisation alors que d'autres sont basés uniquement sur la simulation. Parmi les modèles permettant d'appréhender la satisfaction des demandes en eau, on peut citer pour exemple Mike Basin, développé par le Danish Hydraulic (Doulgeris *et al.*, 2012). Ce modèle permet d'évaluer la distribution des ressources en eau pour satisfaire les demandes, la qualité des cours d'eau mais ne permet pas d'établir des règles de priorité entre usagers. Le modèle WEAP (Water Evaluation And Planning), développé par le Stockholm Environment Institute (Yates *et al.*, 2005), est l'un des plus utilisés dans les travaux de recherche (Li *et al.*, 2015; Maliehe and Mulungu, 2017; Mehta *et al.*, 2013) et s'avère l'un des plus performants pour appréhender la capacité à satisfaire les demandes en eau. Le modèle simule un scénario de base de gestion de la demande et de l'offre en eau puis permet d'évaluer l'évolution du taux de satisfaction des demandes. Il dispose également d'un module de qualité des eaux, un module de préservation des écosystèmes et un module économique d'évaluation des coûts des systèmes d'approvisionnement en eau. Le modèle RIBASIM, développé par Deltares à Delft aux Pays-Bas (Van der Krogt, 2010), est un ensemble de modèles génériques permettant de simuler le comportement des bassins hydrographiques dans diverses conditions hydrologiques. Le modèle permet de comparer l'offre en eau et les demandes actuelles et futures à différents horizons (Omar, 2013; Pedro-Monzonis *et al.*, 2016). Il permet également d'évaluer la production végétale et les dommages causés aux cultures en raison de pénuries d'eau. Le modèle SWAT développé par des chercheurs du Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) (Arnold *et al.*, 1998); il permet d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques en vue de prédire les effets de la gestion des terres sur la ressource hydrique.

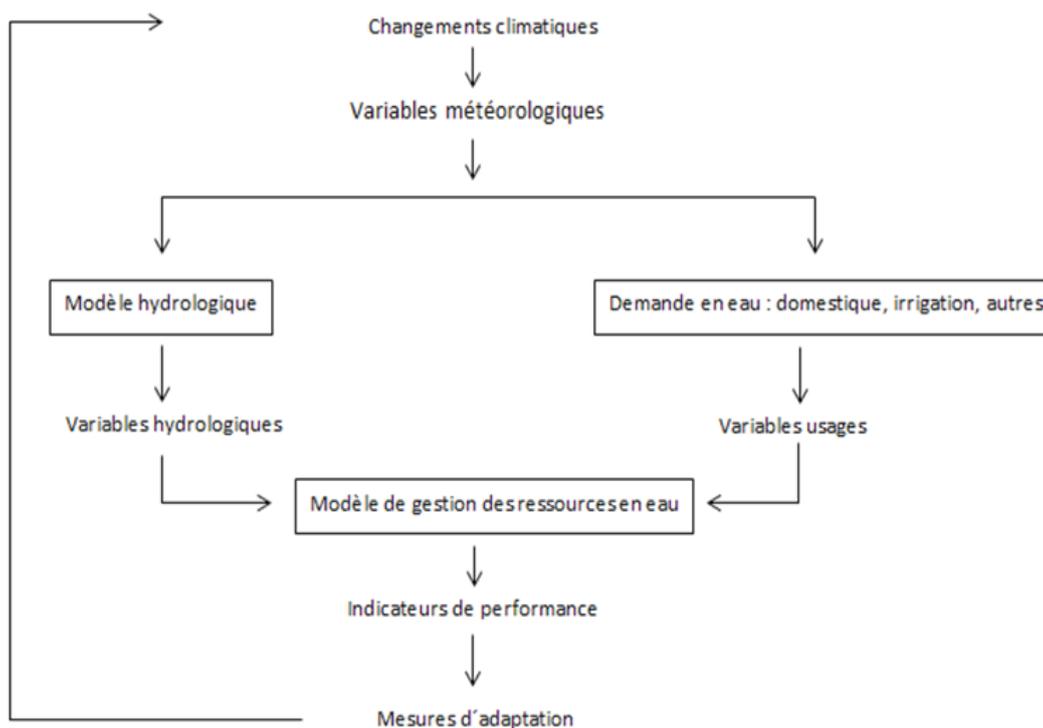


Figure 1: Méthodologie globale des études d'impact des changements climatiques et anthropiques sur la gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin versant

Tous ces modèles ont pour objectif d'établir le bilan offre demande en eau tenant compte des facteurs climatiques et anthropiques. Le choix du modèle dépend de la dimension spatiale, du contexte hydro-climatique et anthropique du système de gestion des ressources en eau et la disponibilité des données et des modèles.

Des indicateurs permettant l'évaluation des performances des systèmes hydrauliques face aux pressions climatiques et anthropiques sont importants. Parmi les indicateurs les plus répandus dans la gestion des systèmes hydrauliques ; les indicateurs introduits par (Fowler *et al.*, 2003; Hashimoto *et al.*, 1982; Sandoval-Solis *et al.*, 2011). Ces travaux proposent de mesurer la fiabilité, la vulnérabilité et la résilience pour évaluer les performances d'un système hydraulique.

La gestion de l'eau à l'échelle des systèmes hydrauliques est une problématique complexe. Les gestionnaires des ressources en eau adoptent des approches intégrées pour l'élaboration des politiques de gestion, de planification de l'eau et des stratégies d'adaptation. Les approches intégrées de gestion des systèmes hydrauliques confrontent les connaissances et les modèles de plusieurs disciplines d'où le rôle important que peut jouer les systèmes d'aide à la décision. L'évaluation des indicateurs de performance des systèmes hydrauliques selon les scénarios actuels et futurs fournit des informations sur les performances des systèmes dans des conditions changeantes et facilitent la prise de décision. La revue de littérature a permis de dégager la méthodologie globale des études de gestion intégrée des ressources en eau tenant compte du changement climatique et anthropique à l'échelle du bassin versant (Figure 1).

CONCLUSION

Le recours à la modélisation s'est imposé comme approche fondamentale pour évaluer les politiques de gestion et d'adaptation des ressources en eau au changement climatique. Plusieurs modèles ont été développés. L'apport de ces travaux est très importants et relève le besoin en travaux supplémentaires pour permettre de disposer d'outils d'aide à la prise de décision plus fiable et mieux adaptés.

La gestion des ressources en eau nécessite une bonne connaissance des hydrosystèmes ainsi que des usagers et leur besoins. Il faut tenir en compte les processus hydroclimatiques des bassins, l'évolution les différentes demandes, et la régulation des écoulements par les ouvrages hydrauliques. Il est donc nécessaire de développer une approche intégrée et interdisciplinaire qui permet d'évaluer l'impact du changement climatique et des usages de l'eau sur la capacité des ressources à satisfaire la demande. Des outils d'aide à la décision adoptant de telle approche seront d'une grande utilité pour l'évaluation des mesures d'adaptation à prendre en considération en vue d'améliorer la résilience des systèmes hydrauliques au changement climatique.

RÉFÉRENCES

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.* 87: 45–59.
- Adenle, A.A., Ford, J.D., Morton, J., Twomlow, S., Al- verson, K., Cattaneo, A., Cervigni, R., Kurukulasuriya, P., Huq, S., Helfgott, A., Ebinger, J.O. (2017). Managing Climate Change Risks in Africa - A Global Perspective. *Ecol. Econ.* 141: 190–201.
- Ahn, J.M., Lee, S., Kang, T. (2014). Evaluation of dams and weirs operating for water resource management of the Geum River. *Sci. Total Environ.* 478: 103–115.
- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturel, J.-E., Mahe, G., Niel, H., Dieulin, C. (2009). Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrol. Sci. J.* 54: 77–89.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, R.S., Williams, J.R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part i: Model Development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34: 73–89.
- Ayanlade, A., Radeny, M., Morton, J.F., Muchaba, T. (2018). Rainfall variability and drought characteristics in two agro-climatic zones: An assessment of climate change challenges in Africa. *Sci. Total Environ.* 630: 728–737.
- Azam, M., Kim, H.S., Maeng, S.J. (2017). Development of flood alert application in Mushim stream watershed Korea. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 21: 11–26.
- Bahin Yoli Baudet, E., Haida, S., Probst, J.-L. (2017). Analyse de la variabilité hydroclimatique et impacts des barrages sur le régime hydrologique d'une rivière de zone semi-aride: Le Sebou Au Maroc. *Eur. Sci. J.* 13: 509–525.
- Bangash, R.F., Passuello, A., Hammond, M., Schuhmacher, M. (2012). Water allocation assessment in low flow river under data scarce conditions: A study of hydrological simulation in Mediterranean basin. *Science of the Total Environment*, 440: 60-71.
- Bigelow, D.P., Zhang, H. (2018). Supplemental irrigation water rights and climate change adaptation. *Ecol. Econ.* 154: 156–167.
- Boé, J., Terray, L., Habets, F., Martin, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *Int. J. Climatol.* 27:1643–1655.
- Boukrim, S., Sadkaoui, N., Lahrach, A., Chaouni, A. (2011). Etude d'impact des changements climatiques sur les ressources hydriques du bassin versant de l'ouergha (Rif – Maroc) impact of climate change on water resources of the ouergha watershed (Rif, Morocco). *J. Eau Environ.* 10: 42–55.
- Busby, J.W., Smith, T.G., Krishnan, N. (2014). Climate security vulnerability in Africa mapping 3.01. *Political Geography*, 43: 51-67.

- Calzadilla, A., Zhu, T., Rehdanz, K., Tol, R.S.J., Ringler, C. (2013). Economywide impacts of climate change on agriculture in Sub-Saharan Africa. *Ecol. Econ.* 93: 150–165.
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., Gomez, M. (2012). Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Sci. Total Environ.* 440: 253–260.
- Cheng, C., Yang, Y.C.E., Ryan, R., Yu, Q., Brabec, E. (2017). Assessing climate change-induced flooding mitigation for adaptation in Boston's Charles River watershed, USA. *Landsc. Urban Plan.* 167: 25–36.
- Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V., Servat, E. (2014). Assessing the long-term impact of climatic variability and human activities on the water resources of a meso-scale Mediterranean catchment. *Hydrol. Sci. J.* 59: 1457–1469.
- Collet, L., Ruelland, D., Estupina, V.B., Dezetter, A., Servat, E. (2015). Water supply sustainability and adaptation strategies under anthropogenic and climatic changes of a meso-scale Mediterranean catchment. *Sci. Total Environ.* 536: 589–602.
- Doell, P., Kaspar, F., Lehner, B. (2003). A global hydrological model for deriving water availability indicators: Model tuning and validation. *J. Hydrol.* 270: 105–134.
- Doulgeris, C., Georgiou, P., Papadimos, D., Papamichail, D. (2012). Ecosystem approach to water resources management using the MIKE 11 modeling system in the Strymonas River and Lake Kerkini. **J. Environ. Manage.** 94: 132–143.
- El Jihad, M.-D., Peyrusaubes, D., El Bouzidi, A. (2014). Seasonal droughts and climate change in the Gharb (Morocco). Rur@lités, Le Gharb, un territoire à l'épreuve du changement climatique. Coordination: Moulay-Driss EL JIHAD et Daniel PEYRUSAUBES, 14–25.
- Epule, T.E., Ford, J.D., Lwasa, S., Lepage, L. (2017). Climate change adaptation in the Sahel. *Environ. Sci. Policy* 75: 121–137.
- Eudes, B.Y.B., Souad, H., Jean-Luc, P. (2017). Analyse de la variabilité hydroclimatique et impacts des barrages sur le régime hydrologique d'une rivière de zone semi-aride. *Le Sebou au Maroc*.
- Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Ashraf Vaghefi, S., Farzaneh, M.R., Zehnder, A.J.B., Srinivasan, R., Yang, H. (2013). Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. *J. Hydrol.* 480: 85–101.
- Filho, W.L., Balogun, A.-L., Ayal, D.Y., Bethurem, E.M., Murambadoro, M., Mambo, J., Taddese, H., Tefera, G.W., Nagy, G.J., Fudjumdjum, H., Mugabe, P. (2018). Strengthening climate change adaptation capacity in Africa- case studies from six major African cities and policy implications. *Environ. Sci. Policy* 86: 29–37.
- Fourth Assessment Report - Climate Change 2007 - The Physical Science Basis [WWW Document], n.d. URL <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/> (accessed 6.21.18).
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *Int. J. Climatol.* 27: 1547–1578.
- Fowler, H.J., Kilsby, C.G., O'Connell, P.E. (2003). Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. *Water Resour. Res.* 39: 1222.
- Gao, C., He, Z., Pan, S., Xuan, W., Xu, Y.-P. (2018). Effects of climate change on peak runoff and flood levels in Qu River Basin, East China. *J. Hydro-Environ. Res.*
- Georgakakos, A.P., Yao, H., Kistenmacher, M., Georgakakos, K.P., Graham, N.E., Cheng, F.-Y., Spencer, C., Shamir, E. (2012). Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: Reservoir management. *Journal of Hydrology*, 412: 34-46.
- Ghezloun, A., Saidane, A., Merabet, H. (2017). The COP 22 New commitments in support of the Paris Agreement. Energy Procedia, International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES 17, 21-24 April 2017, Beirut Lebanon 119, 10–16.
- Goulden, M., Conway, D., Persechino, A. (2009). Adaptation to climate change in international river basins in Africa: a review / Adaptation au changement climatique dans les bassins fluviaux internationaux en Afrique: une revue. *Hydrol. Sci. J.* 54: 805–828.
- Haida, S., Probst, J.-L., Snoussi, M., Fora, A. (1999). Hydrologie et fluctuations hydroclimatiques dans le bassin versant du Sebou entre 1940 et 1994. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 10: 221-226
- Halwatura, D., Najim, M.M.M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environ. Model. Softw.* 46: 155–162.
- Hashimoto, T., Stedinger, J., Loucks, P. (1982). Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation. *Water Resour. Res.* 18: 14-20.
- Khattabi, A., Chriyaa, A., Hammani, A., Moudoud, B. (2014). Vulnérabilités climatiques et stratégies de développement: Synthèse et recommandations stratégiques pour une prise en compte du risque «climat» dans les politiques et stratégies sectorielles.
- Kirkby, M.J., Beven, K.J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. J.* 24: 43–69.
- Kundzewicz, Z.W., Krysanova, V., Benestad, R.E., Hov, Ø., Piniewski, M., Otto, I.M. (2018). Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environ. Sci. Policy* 79: 1–8.
- Kusangaya, S., Warburton, M.L., Archer van Garderen, E., Jewitt, G.P.W. (2014). Impacts of climate change on water resources in southern Africa: A review. *Phys. Chem. Earth Parts ABC* 67–69, 47–54.

- Li, X., Zhao, Y., Shi, C., Sha, J., Wang, Z.-L., Wang, Y. (2015). Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. *Ocean Coast. Manag.* 106: 97–109.
- Maliehe, M., Mulungu, D.M.M. (2017). Assessment of water availability for competing uses using SWAT and WEAP in South Phuthiatsana catchment, Lesotho. *Phys. Chem. Earth Parts ABC, Infrastructural Planning for Water Security in Eastern and Southern Africa* 100: 305–316.
- Mehta, V.K., Haden, V.R., Joyce, B.A., Purkey, D.R., Jackson, L.E. (2013). Irrigation demand and supply, given projections of climate and land-use change, in Yolo County, California. *Agric. Water Manag.* 117: 70–82.
- Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., Servat, E., Fritsch, J.-M., Ardoin-Bardin, S., Thivet, G., Um, A., E Bataillon, P. (2013). Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 58: 498–518.
- Milly, P., Betancourt, J., Julio, Falkenmark, M., Malin, Hirsch, R., M, R., Kundzewicz, W, Z., Lettenmaier, P, D., Ronald, S., J, R. (2008). Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science* 319: 573–574.
- Minville, M., Brissette, F., Leconte, R. (2008). Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *J. Hydrol.* 358: 70–83.
- Morin, G. (Ed.) (1981). *Modèle Cequeau: Manuel d'utilisation, Rapport scientifique*. Institut National de la Recherche Scientifique, Eau. Université du Québec. INRS, Québec.
- Nguimalet, C.-R., Mahe, G., Laraque, A., Orange, D., Yakoubou, M. (2016). Note sur le changement climatique et gestion des ressources en eau en Afrique: repenser l'usage et l'amélioration des services éco-systémiques de l'eau. *Geo-Eco-Trop*, 40: 317–326.
- Omar, M.M. (2013). Evaluation of actions for better water supply and demand management in Fayoum, Egypt using RIBASIM. *Water Sci.* 27: 78–90.
- Pedro-Monzónis, M., del Longo, M., Solera, A., Pecora, S., Andreu, J. (2016). Water Accounting in the Po River Basin Applied to Climate Change Scenarios. *Procedia Eng.*, 162: 246–253.
- Pichuka, S., Prasad R, R., Maity, R., Kunstmann, H. (2017). Development of a method to identify change in the pattern of extreme streamflow events in future climate: Application on the Bhadra reservoir inflow in India. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 9: 236–246.
- Prudhomme, C., Jakob, D., Svensson, C. (2003). Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *J. Hydrol.* 277: 1–23.
- Quintana Seguí, P., Ribes, A., Martin, E., Habets, F., Boé, J. (2010). Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of hydrology*, 383:111–124.
- Renard, B. (2006). *Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France* (Thèse de doctorat). Institut national polytechnique, Grenoble, France.
- Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Collet, L., Roucou, P. (2012). Simulating future trends in hydrological regime of a large Sudano-Sahelian catchment under climate change. *J. Hydrol.* 424–425: 207–216.
- Sandoval-Solis S., McKinney D. C., Loucks D. P. (2011). Sustainability Index for Water Resources Planning and Management. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 137: 381–390.
- Sanyal, J., Densmore, A.L., Carbonneau, P. (2014). Analysing the effect of land-use/cover changes at sub-catchment levels on downstream flood peaks: A semi-distributed modelling approach with sparse data. *Catena* 118: 28–40.
- Schilling, J., Freier, K.P., Hertig, E., Scheffran, J. (2012). Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. *Agric. Ecosyst. Environ.* 156: 12–26.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K., Marquis, M., & Tignor, M. M. (Eds.). (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge university press.
- Seif-Ennasr, M., Zaaboul, R., Hirich, A., Caroletti, G.N., Bouchaou, L., El Morjani, Z.E.A., Beraaouz, E.H., McDonnell, R.A., Choukr-Allah, R. (2016). Climate change and adaptive water management measures in Chtouka Aït Baha region (Morocco). *Sci. Total Environ.* 573, 862–875.
- Seyoum, M., van Andel, S. J., Xuan, Y., & Amare, K. (2013). Precipitation forecasts for rainfall runoff predictions. A case study in poorly gauged Ribb and Gumara catchments, upper Blue Nile, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 61: 43–51.
- Soundharajan, B.-S., Adeloje, A.J., Remesan, R. (2016). Evaluating the variability in surface water reservoir planning characteristics during climate change impacts assessment. *J. Hydrol.* 538: 625–639.
- Stainforth, D.A., Aina, T., Christensen, C., Collins, M., Faull, N., Frame, D.J., Kettleborough, J.A., Knight, S., Martin, A., Murphy, J.M., Piani, C., Sexton, D., Smith, L.A., Spicer, R.A., Thorpe, A.J., Allen, M.R. (2005). Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature* 433: 403–406.
- Stour, L., Agoumi, A. (2008). Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Hydroécologie Appliquée* 16: 215–232.
- Tingsanchali, T., Tanmanee, S. (2012). Assessment of hydrological safety of Mae Sruai Dam, Thailand. *Procedia Eng.*, ISEEC 32: 1198–1204.
- Tobin, P., Schmidt, N.M., Tosun, J., Burns, C. (2018). Mapping states' Paris climate pledges: Analysing targets and groups at COP 21. *Glob. Environ. Change* 48:11–21.
- Tramblay, Y., Badi, W., Driouech, F., El Adlouni, S., Neppel, L., Servat, E. (2012). Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Glob. Planet. Change* 82–83: 104–114.

USACE. HEC-HMS 3.4. Hydrologic modeling system, Hydrologic Engineering Center. Davis, California: U.S. Army Corps of Engineers; 2009.

Van der Krogt, W. (2010). Technical Report: RIBASIM Version 7.01 User Manual Addendum. Deltares Institute, Netherlands.

Villeneuve, J., Hubert, P., Mailhot, A., Rousseau, A. (1998). La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. *Rev. Sci. Eau* 11: 19–39.

Woolhiser, D.A. (1989). KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Xu, X., Wang, Y.-C., Kalcic, M., Muenich, R.L., Yang, Y.C.E., Scavia, D. (2017). Evaluating the impact of climate change on fluvial flood risk in a mixed-used watershed. *Environ. Model. Softw.*

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. *Water Int.* 30: 487–500.

Younis, S.M.Z., Ammar, A. (2017). Quantification of impact of changes in land use-land cover on hydrology in the upper Indus Basin, Pakistan. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* 21: 255-263.

Zamrane, Z. (2016). Recherche d'indices de variabilité climatique dans des séries hydroclimatiques au Maroc: identification, positionnement temporel, tendances et liens avec les fluctuations climatiques: cas des grands bassins de la Moulouya, du Sebou et du Tensift, Thèse de Doctorat, Université Montpellier.

Zhang, L., Nan, Z., Yu, W., Zhao, Y., Xu, Y. (2018). Comparison of baseline period choices for separating climate and land use/land cover change impacts on watershed hydrology using distributed hydrological models. *Sci. Total Environ.* 622–623: 1016–1028.

Zope, P.E., Eldho, T.I., Jothiprakash, V. (2016). Impacts of land use–land cover change and urbanization on flooding: A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India. *Catena* 145: 142–154.