

CHANGEMENT CLIMATIQUE AU MAROC, GESTION DE L'EAU ET LUTTE CONTRE LA DESERTIFICATION, la dimension humaine

Abdellah LAOUINA¹

Professeur à l'Université Mohammed V-Agdal, FLSH, Chaire UNESCO-GN, BP 1040, Rabat,
coordinateur du Comité national scientifique et technique – changements climatiques
email : laouina@menara.ma

Dans le contexte des environnements semi-arides fragiles, la vulnérabilité au changement, qu'il soit d'origine climatique ou lié aux transformations dans l'utilisation des terres, est très grande, souvent accompagnée d'une augmentation de la menace de crise hydraulique et de dégradation des ressources naturelles (Coelho & al., 2000 ; Ragab & Prudhomme, 2000).

Dans les trois domaines du changement climatique, du déficit hydrique et de la désertification, la responsabilité anthropique est forte et s'exprime en termes d'émissions de gaz à effet de serre, de surpompage, de gaspillage ou de pollution de l'eau, de prélèvement excessif de bois ou de surpâturage. Les changements initiés par l'homme, notamment l'affectation des terres, les évolutions technologiques, mais aussi les changements juridiques ou institutionnels, sont aussi importants, sinon plus que les facteurs d'ordre naturel. Enfin, l'intervention de l'homme, notamment les décisions et les choix politiques, à la recherche d'alternatives, est fondamentale pour la correction ou l'atténuation des tendances négatives engagées.

Les impacts et rétroactions entre secteurs multiples sont la règle dans le suivi des phénomènes des changements. Le changement climatique induit des effets sur les ressources en eau et en terres et peut être considéré comme une pression supplémentaire pouvant conduire à la désertification et au stress hydrique. Par ailleurs, la dégradation des terres et du couvert végétal et la réduction du potentiel en eau, dans les sols notamment, conduisent à l'éclaircissement de la densité végétale et donc à la réduction du rôle que joue la végétation comme puits pour le carbone et mènent ainsi à une exagération de l'effet de serre. Les ressources en eau, superficielles et souterraines s'en ressentent, avec des effets complexes, parfois en contradiction avec les facteurs qui en sont à l'origine.

1- Le changement climatique

1-1- A l'échelle de la planète

Les rapports du GIEC, notamment le dernier (GIEC, 2007) sont formels : un réchauffement sans équivoque avec un rythme actuel de 0.13° /10 ans, une élévation du niveau de la mer qui, aujourd'hui atteint le rythme de 3.1 mm/an, due d'abord à l'expansion marine du fait du réchauffement mais aussi à la fonte et au recul des neiges et des glaces. Sur 150 ans, l'augmentation totale de température est de 0,76° (GIEC, 2007).

A cause de la très forte augmentation d'émissions de GES, depuis la révolution industrielle, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère en Eq C est de 379 ppm en 2005 alors qu'elle tournait autour de 280 avant 1850. Cette concentration risque de continuer à augmenter, plus ou moins vite selon les efforts mis en place pour atténuer les émissions. De ce fait, les projections du réchauffement mondial, selon divers modèles annoncent des valeurs de 1.8° à 4° d'ici 2100.

Cette situation s'explique autant par la multiplication des facteurs d'émissions de GES (industries et transports) que par la réduction des puits de carbone, due aux changements dans l'utilisation des terres (déforestation et dégradation végétale). L'accroissement le plus rapide de la concentration de GES s'est fait lors des 10 dernières années, avec un rythme de 1,9 ppm /an (GIEC, 2007). La part des émissions de CO₂ issu des énergies fossiles atteint la valeur de 7,2 Gt de carbone par an, alors que les changements dans le couvert végétal et l'utilisation des sols contribuent pour 1/5 à 1/6 des émissions

totales. La concentration d'aérosols a un effet relatif de refroidissement et contrecarre donc relativement le forçage radiatif dû à la concentration de GES.

L'effet est important sur les températures, le niveau océanique et le manteau nivo-glaciaire. En plus du réchauffement et de l'élévation du contenu de l'air en vapeur d'eau, il faut signaler le réchauffement en profondeur de l'eau marine (jusqu'à 3000 m de profondeur) - ce qui aboutit à l'expansion de la masse océanique - et le déclin des glaciers de montagne, des calottes glaciaires, des chutes neigeuses et de l'enneigement. La remontée marine qui a enregistré une moyenne de 1,8 mm sur les 40 dernières années s'est accélérée pour atteindre le rythme actuel de 3,1 mm/an. Elle a donné pour le 20^e siècle un cumul de 0,17 m.

Le changement affecte aussi les précipitations, mais de manière plus différenciée à l'échelle des régions. Globalement, on enregistre des épisodes de sécheresses plus longues et plus sévères, depuis 1970 (Mokssit & El Khatri, 1995). C'est le cas de la sécheresse du Sahel. On enregistre aussi une augmentation de fréquence des événements de fortes précipitations, car l'air plus chaud contient plus de vapeur d'eau et peut donc générer – si les autres conditions le permettent – des pluies prolongées et intenses. Les cyclones tropicaux sont plus violents et plus fréquents. Enfin les épisodes de vagues de chaleur sont plus marqués, alors que le nombre de périodes froides tend à se réduire. Les projections pour le futur sont pessimistes, même si de gros efforts sont fournis pour réduire la croissance rapide des émissions de GES.

1-2- A l'échelle du Maroc

A l'échelle du Maroc, des projections par modélisation ont été faites à l'horizon 2020 (MATUHE-UNDP, CNI, 2001). Ces projections annoncent une augmentation de la température moyenne d'environ 0,6 à 1,1° sur 20 ans (selon les modèles utilisés). Par contre, pour les précipitations, les modélisations donnent une plus grande dispersion des résultats (on aurait une réduction moyenne de 4% sur 20 ans). La fréquence et l'intensité des événements extrêmes seront en hausse (orages frontaux et convectifs, sécheresses très sévères, nombre de jours de pluie plus réduit).

Une simulation des changements thermiques et pluviométriques pour la période 1990-2050 a été faite dans le cadre du Projet inter - universitaire CLIMED (Portugal, Hollande, Maroc, Tunisie), financé par l'Union Européenne. Les impacts du changement climatique ont été modélisés par l'utilisation de la technique de "downscaling" à partir des résultats du modèle de circulation générale de l'Université de Melbourne (Simmonds & al., 1988) vers le modèle local MM5 (Dudhia, 1993).

Plusieurs phases d'analyse ont été conduites (Van Dijck & al., 2006):

- l'application du GCM (modèle de circulation générale) à la région méditerranéenne, en se basant sur des mesures statistiques;
- la sélection de journées particulières, ayant un intérêt hydrologique dans la région de Rabat ;
- la conduite de simulations utilisant le modèle local MM5 et leur comparaison avec les données climatiques de ces périodes;
- l'application du modèle local à des événements pluviométriques particuliers;
- le traitement de données et leur analyse pour les préparer en vue de la modélisation hydrologique;
- la prospective climatique 2050 pour la région atlantique du Maroc.

Le modèle de circulation générale utilisé correspond à une résolution spatiale de 3,75° de longitude et 2,25° de latitude. Il inclut à la fois les variations saisonnières et diurnes. La simulation pour 1990 correspond au forçage de GES de la fin du 20^e siècle (348 ppm). Celles de 2050 considèrent l'augmentation prévue par les recherches en terme de concentration de GES (environ 634 ppm).

L'événement pluviométrique a été défini comme correspondant à une chute de ≥ 5 mm par jour, durant plus de 2 jours consécutifs, en comparaison avec les enregistrements de la station de Rabat. La durée des événements simulés (moyenne de 3 jours), la moyenne de pluie pour chacun (10 – 30 mm / jour) et l'occurrence plus fréquent en novembre, décembre et janvier correspondent bien aux enregistrements actuels de la station.

Les simulations de températures pour l'espace Maroc en 1990 ont été comparées aux données de la station pour la période 1960 – 90. Les températures ont été préférées à d'autres données pour réaliser cette comparaison en raison de leur meilleure représentativité. Comme les résultats ont été concluants, il a été décidé d'utiliser le modèle local MM5 pour la simulation des températures et des précipitations dans la région des Shoul, pour 1990 et 2050.

Le modèle local MM5 a été appliqué pour zoomer les événements pluviométriques dans l'espace réduit que représente l'espace Shoul et plus particulièrement le bassin - versant de Matlaq.

Les moyennes de températures et de précipitations ont été calculées pour la région Maroc. Les données journalières ont été agrégées dans 4 séries saisonnières (hiver, printemps, été et automne) pour les deux dates de 1990 et 2050. Les températures du Maroc en 2050 auront ainsi augmenté de 2,4° en hiver et de 1,7° en automne. Les précipitations décroîtront en toute saison de 0,2 mm/j en hiver et de 0,3 mm/j en automne. La variabilité augmentera en automne et sera plus modérée au printemps. Les températures minimales augmenteront en hiver de 3,1°, ce qui réduira d'autant les périodes de gel et le nombre de nuits froides (Van Dijck, 2006).

Les événements pluviométriques simulés en 1990 et 2050 donnent des caractéristiques comparables en terme de durée, mais le volume simulé en 2050 sera plus important et donc de plus forte intensité.

1-3- Les enjeux du changement climatique

Les enjeux du changement climatique sont multiples car de nombreux systèmes naturels et humains sont sensibles au climat. Les modifications en cours ont des effets multiples, dont plusieurs sont négatifs. On peut les évaluer au niveau du bilan offre / demande, en produits alimentaires, en eau, ...; on peut aussi les appréhender à travers la possibilité ou non d'utiliser certaines ressources, notamment pour les loisirs; mais on peut aussi s'intéresser aux valeurs attachées à certaines ressources perçues comme purement économiques et donc à valeur simplement marchande ou au contraire à d'autres ressources beaucoup plus précieuses et faisant partie du patrimoine, parfois même de l'identité d'un territoire ou d'une communauté. Plus simplement dit, on peut affirmer que le changement climatique "impacte" fortement le développement durable dans toutes ses composantes.

Ces enjeux sont d'autant plus importants que les systèmes ont une sensibilité de plus en plus accrue. Le changement climatique a des effets importants directs et indirects, sur le régime hydrique, les systèmes vivants, les sols et sur l'économie à travers l'agriculture, notamment, mais aussi sur toute une série de manifestations à caractère plus en relation avec l'homme et la société, comme la santé, la qualité de la vie etc. Il intervient aussi en augmentant la vulnérabilité des systèmes naturels et en exposant l'homme et son environnement à des phénomènes de stress plus aigus, même là où localement on pourrait s'attendre à une amélioration de la qualité du milieu (exemple du réchauffement dans les zones froides).

Pour réduire ces impacts directs et indirects et pour limiter la vulnérabilité des systèmes, les sociétés sont amenées à prendre des mesures d'ordre politique, mais aussi des mesures spontanées adoptées par les populations. Les choix politiques pour parer à ces nouvelles situations sont de deux ordres.

-On peut agir pour l'atténuation des changements climatiques, en remontant aux sources du problème et en essayant soit de limiter les sources d'émissions de GES responsables du réchauffement, soit en augmentant les possibilités de séquestration du CO₂ dans ce qu'on appelle les puits de carbone (forêts, autres formes de végétation à fort pouvoir d'absorption de CO₂, conservation de la matière organique des sols).

-L'autre possibilité est d'agir pour s'adapter aux effets du changement et pour réduire au maximum la vulnérabilité des systèmes. Cet effort est d'autant plus réussi qu'il débute tôt, anticipant ainsi sur des effets non encore déclarés ou encore modérés.

Mais les risques sont difficiles à préciser, du fait de l'importance des incertitudes concernant les rétroactions dans les systèmes.

Le monde est par ailleurs hétérogène sur le plan du développement des capacités sociales à réagir et à s'adapter. Les sciences humaines n'ont d'ailleurs pas suffisamment développé d'outils d'analyse pour

évaluer les coûts et les valeurs des ressources dégradées, totalement perdues et celles que l'on a pu conserver, grâce à un effort, lui-même difficile à évaluer. Les scénarios d'incidence se basent sur les évaluations, elles – mêmes basées sur des modèles d'impacts prévisibles. Cela dépend de la sensibilité des systèmes au changement, selon une ampleur et un rythme plus ou moins importants, de la fragilité intrinsèque des ressources qui peut exagérer cette sensibilité et de la capacité de la société à s'adapter.

Si on prend le secteur de l'eau pour exemple, les changements en terme de moyenne, de gamme et de degré de variabilité temporelle des températures et des précipitations auront sans aucun doute de larges effets en matière d'écoulement fluvial, avec notamment des modifications de volume, de durée et de fréquence des débits. Mais du fait de la variabilité des comportements hydrologiques selon le climat, d'une région à l'autre, et donc de l'importance de la réaction hydrologique aux facteurs autres que le climat (lithologie, relief, couvert végétal, ...) l'incertitude dans ce domaine est loin d'être négligeable. Selon le GIEC (2001), les éléments les plus sûrs sont l'effet du recul de l'enneigement et de la hausse de l'évaporation sur les débits. On parle là, d'un degré élevé de confiance. En ce qui concerne la part de l'écoulement fluvial et de la recharge des nappes (infiltration) l'effet du changement climatique varie d'une région à l'autre et selon les scénarios.

Si on analyse des cas d'effets des changements climatiques et leurs réponses possibles, on trouve des résultats très disparates. En Espagne, la baisse attendue des apports d'eau pourrait être d'au moins 17% pour 2030. Les réponses à cette baisse se basent d'abord sur la simulation des besoins des cultures, pour adapter les techniques et méthodes d'irrigation et sur la simulation des autres demandes –comme le tourisme- pour déterminer les remplacements possibles des cultures abandonnées et souffrir au minimum des impacts. On en tire donc la conclusion que, si le changement climatique est important, les autres changements, d'ordre maîtrisable par l'homme (exemple des pratiques d'usage des ressources ou des méthodes de gestion) sont au moins aussi importants.

Ce qui est plus sûr, c'est que les pays responsables des changements climatiques ne sont pas forcément les plus vulnérables. Les zones les plus vulnérables sont beaucoup plus fortement affectées, du fait du faible accès aux ressources, à l'information et à la technologie appropriée pour y faire face et à cause du déficit en compétences humaines et de l'inefficacité des institutions. Or, la qualité de la réponse et sa rapidité dépendent de la capacité d'adaptation et d'anticipation. Par ailleurs, l'homme a plus prise sur l'usage et la gestion de la demande que sur les mécanismes d'offre; or l'action sur la demande doit être menée dans un contexte réellement participatif.

II- Dégradation des terres, végétation et sols

Sur ce chapitre, la forte responsabilité de l'homme est évidente du fait de l'effet de pression sur les écosystèmes et les ressources (Coelho & al., 2000 ; Laouina, 2001). La spirale de la dégradation des terres peut être illustrée par le schéma suivant : le recul de la végétation, dû au changement climatique ou à des causes anthropiques (surpâturage, surprélèvement de bois ou défrichement total), induit une élévation des températures et l'augmentation de vitesse des vents à la surface du sol et donc la diminution d'humidité de la basse atmosphère. L'évaporation augmente ainsi et pompe l'humidité des sols qui ont tendance à s'assécher et à perdre de leur stabilité structurale, du fait la dégradation de la matière organique ; ils deviennent ainsi plus pauvres, ce qui constitue une menace pour le couvert végétal et en augmente la vulnérabilité aux processus de dégradation.

La dégradation des terres peut être envisagée de deux manières. La description et la mesure permettent d'en cerner l'extension et la sévérité. L'analyse de certains indicateurs (épaisseur du sol, texture, structure...) permet aussi d'évaluer le degré de vulnérabilité du sol à la dégradation et donc d'adopter un comportement protecteur pour éviter de déclencher la spirale de dégradation des terres déjà décrite (Laouina, 2002 ; 2006).

Le Maroc, pays de transition bioclimatique et écologique entre la Méditerranée et le Sahara, possède des ressources fragiles, menacées de dégradation rapide, en cas de surprélèvement. Les milieux naturels sont fortement soumis à la pression anthropique (Laouina, 2002). La très forte occupation de l'espace et l'exploitation soutenue des ressources cantonne les milieux naturels réellement intacts sur des superficies excessivement réduites. Même l'espace naturel, très étendu en montagne, dans les

steppes présahariennes et au Sahara, est toujours un espace plus ou moins utilisé par les populations rurales et de plus en plus par les touristes.

Les sols sont très vulnérables et largement soumis à l'érosion. La forêt est en recul rapide; les parcours steppiques sont menacés par la désertification; des biotopes précieux sont constamment et irrémédiablement perdus. Des catastrophes naturelles menacent le territoire, alors que la planification à long terme pour y remédier et les plans d'urgence de sauvegarde sont rarement conçus ou exécutés. Tous ces aspects confondus ont des impacts sur la disponibilité future des ressources.

Ceci s'explique par le fait que l'exploitation des ressources naturelles assure une large part de l'économie et conditionne le développement du monde agricole et rural. L'agriculture de montagne joue un rôle social important; c'est en ces termes que l'érosion des sols coûte très cher à la collectivité et la lutte anti-érosive ne peut devenir réellement efficace que par le développement des montagnes et la gestion patrimoniale des forêts et des autres ressources des bassins-versants. Les parcours d'altitude et les parcours steppiques représentent un bien inestimable dont la surexploitation peut conduire à une crise économique et sociale à brève échéance. Il est donc nécessaire de sauvegarder ces ressources par une politique d'aménagement spatial où l'espèce précieuse et le milieu protégé sont à intégrer en tant qu'éléments dynamiseurs de la conception globale. La mobilisation de moyens humains à l'occasion d'une action de conservation peut créer une dynamique locale qui influe alors sur l'ensemble des secteurs et mener ainsi, dans une perspective de développement territorial.

Les ressources naturelles et écologiques constituent une richesse, dont la dégradation peut représenter une contrainte au développement humain et économique et souvent une menace pour l'équilibre social. La prise de conscience est effective de la part des responsables, des opérateurs économiques et de la population en général, du caractère épuisable des ressources et de la dégradation, source d'appauvrissement. Mais la recherche ne s'est pas suffisamment orientée vers l'analyse des secteurs porteurs d'une nouvelle dynamique de développement, en étudiant la contribution possible de la valorisation de l'environnement et du patrimoine, dans l'effort de développement humain et territorial. Ainsi, la protection des ressources naturelles et de la biodiversité devrait aller de pair avec la valorisation des sites d'intérêt écologique par diverses activités comme l'écotourisme ou avec la production agricole biologique et labellisée dans des espaces circonscrits hautement productifs. La composante écologique doit donc être conçue comme base de développement, soutien du développement et non plus comme entrave au développement.

La disparition physique des écosystèmes constitue une perte souvent définitive; mais la destruction interne, parfois sournoise des écosystèmes n'est pas moins grave, car l'appauvrissement des cortèges floristique et faunistique, l'absence de régénération, le déséquilibre des peuplements conduisent à un dysfonctionnement majeur de la dynamique écologique. Cette évolution altère profondément la qualité des milieux et ne leur permet plus d'assumer pleinement leur rôle écologique, ce qui aboutit à la destruction à terme, du patrimoine naturel.

La responsabilité internationale et régionale de ce patrimoine impose d'assurer la pérennisation des richesses pour le bénéfice des générations futures, en en valorisant les composantes principales. C'est pourquoi la politique de protection doit s'appuyer sur la structuration de l'espace, en fonction d'une « zonation par objectifs » distribuant rationnellement les vocations dégagées, en fonction des contraintes locales et du contexte écologique, humain et économique. La prise en compte des avis locaux est nécessaire; il s'agit de « créer un espace de dialogue et de négociation » et non pas d'imposer une vision technocratique (Eaux et Forêts, 1995). Les espaces protégés contribueront ainsi à la constitution de banques de matériel génétique et à la sauvegarde des « derniers réservoirs génétiques, dynamiseurs des flux géniques, indispensables à l'épanouissement des formes de vie sur terre ».

La protection du patrimoine naturel est à envisager d'un point de vue intégré; en ciblant les espèces menacées et les habitats précieux, on prend aussi en considération les grands bassins, les systèmes hydrologiques, les budgets sédimentaires, les milieux côtiers, les forêts, le sol, les nappes phréatiques et le sous-sol, autant de maillons d'une chaîne indispensable au maintien des grands équilibres écologiques planétaires et bases vitales pour le développement de la communauté humaine.

La programmation des aménagements de protection et de réhabilitation des habitats, de repeuplement faunistique s'articule nécessairement avec une politique de valorisation écotouristique. Même si la protection de la nature n'est pas affaire de "rentabilité" car son impact économique n'est perceptible que sur le long terme. L'approche purement sentimentale a par contre prouvé son inefficacité. Il s'agit en fait de préconiser une voie médiane avec à la fois une ferme volonté de protéger le patrimoine, quel qu'en soit le coût et d'en valoriser rationnellement certaines composantes, apportant ainsi une certaine intégration au sein du tissu social et économique.

Mais il existe aussi une interaction forte entre les processus de dégradation des terres (désertification) et ceux du changement climatique. Celui-ci, par l'exagération de l'irrégularité des pluies (événements extrêmes), par le réchauffement, responsable de l'augmentation de l'ETP, et par la diminution des pluies (envisagée de manière unanime pour la région méditerranéenne), initie des processus de dégradation des terres et, cela, au même titre que du fait d'une utilisation excessive, ou irrationnelle des ressources. La dégradation de la végétation et de la matière organique du sol oriente à la fois vers un processus de désertification et un processus de moindre séquestration du CO₂. Ce dernier processus expliquera ainsi une exagération de l'effet de serre, lui-même source d'une désertification plus poussée.

III- Comportement de l'eau et des terres, effets du Changement Climatique et relations avec le couvert végétal

3-1- Résultats globaux des modélisations

Les résultats de la Communication Nationale Initiale (MATUHE, 2001) prédisent une baisse des débits et de la recharge de la nappe phréatique, du fait de l'augmentation de l'évapotranspiration et de la baisse des précipitations, générées par l'effet de serre. Or, les ressources en eau disponibles sont déjà déficitaires dans plusieurs bassins hydrauliques (Margat, 1995 ; Aït Kadi, 1998). La seule alternative est donc d'adopter des comportements d'économie de l'eau, pour faire face à la nouvelle situation, pouvant générer dans certaines régions, des pénuries prononcées.

Les modélisations réalisées prédisent aussi une concentration plus grande des précipitations dans le temps et donc des effets adverses en terme de crues dévastatrices et de déficits accusés, ce qui oblige à programmer des équipements hydrauliques ayant de plus grandes capacités de réserve et donc plus coûteux. La baisse des débits et la plus forte concentration auront aussi des effets sur la qualité de l'eau (moins auto-épuration, envasement des retenues...).

Les méthodes d'appréhension de ces tendances posent néanmoins des problèmes en terme d'incertitudes relativement à certaines des conclusions et posent donc le problème de la fiabilité à l'échelle de chaque région, de résultats globaux, difficiles à transposer à certains espaces, du fait de la grande variabilité des conditions. Cela s'explique par la multiplicité des déterminants du débit et la complexité des réactions selon le poids que joue localement chacun de ces déterminants.

3-2- Changement climatique, couvert végétal et hydrologie

Les effets de la variabilité et du changement climatique sur l'hydrologie sont ambigus et parfois contradictoires. On peut rapporter le cas de l'Afrique tropicale qui a enregistré une diminution générale des pluies ; pourtant la réponse hydrologique est très variable d'une zone à l'autre. Dans la zone tropicale humide, il s'en est suivi une baisse généralisée des débits. Par contre, au Sahel, on a souvent enregistré une certaine augmentation des débits, du fait de l'accroissement de la part du ruissellement direct sur des terres stérilisées par la dégradation.

Le comportement hydrique des terres est variable sous forêt, dans les parcours et dans les terres cultivées ; c'est pourquoi il doit être suivi sur le terrain en utilisant plusieurs techniques (mesures du ruissellement et de la perte en terre sur parcelles (Laouina & al., 2000 ; 2003 ; Nafaa, 2002), estimations du ruissellement et de la turbidité, par simulation de pluie, mesure des débits liquide et solide, suivi de paramètres multiples et de leur évolution spatio-temporelle (Laouina et al., 2004, Van Dijck, 2006).

Ce comportement diffère en fonction des caractéristiques physiques du sol, de la topographie et de l'exposition (Conacher & Sala eds., 1998), mais aussi selon leur utilisation agro-pastorale, les modes et techniques de gestion de l'eau et des terres (Roose & al., 1993).

Les modes de gestion des terres sont souvent inadéquats, avec des pratiques qui accentuent la vulnérabilité des terrains. Les transformations agraires en cours peuvent exagérer les dynamiques hydriques, notamment le ruissellement et l'érosion. Ces dynamiques renforcent la situation de pénurie de l'eau in situ (réduction de l'infiltration) comme en aval (envasement de la retenue).

L'incertitude provient de la variabilité de comportement d'un même type de paysage naturel. De nombreux auteurs se sont intéressés au comportement hydrologique des milieux forestiers et sont unanimes sur le rôle régulateur des débits, joué par la forêt ainsi que sur le rôle de réduction des transports solides. Mais les résultats des recherches divergent en ce qui concerne les volumes d'écoulement issus des massifs forestiers. Le comportement hydrologique varie selon la nature des peuplements (feuillus, conifères), la composition floristique, le taux de recouvrement des sols et le degré de dégradation. Le changement climatique qui aurait, après une période d'inertie, un effet en terme de recouvrement végétal, aura donc forcément par ce biais aussi un autre impact hydrologique. Mais cet impact reste très difficile à simuler.

Pour mieux estimer l'impact de la dégradation du couvert végétal sur le ruissellement, deux types de dispositifs expérimentaux ont été appliqués, dans quatre régions marocaines, la forêt de Ksar el Kébir, la Mamora, la forêt de Benslimane, et la forêt de Bou Khouali dans le Maroc oriental (Laouina & al., 2000 ; 2003):

- des mesures du ruissellement et de la perte en terre sur « parcelles Wischmeier »,
- une estimation du ruissellement et de la turbidité, par simulation de pluie, sur micro-parcelles.

Globalement, le ruissellement intervient de manière systématique sous couvert d'eucalyptus plantés, comme sur les sols dénudés ; il enregistre une forte fréquence sous forêt dégradée ; par contre, il devient exceptionnel sous chênaie mise en défens. Le tassement du sol, la diminution du taux de recouvrement par les herbacées et de l'apport organique sont les causes majeures de la diminution de l'infiltration. Mais pour le cas des couverts d'eucalyptus, l'hydrophobicité du sol est sans doute l'explication du refus systématique d'infiltration.

Par ailleurs, les eaux de ruissellement issues des massifs forestiers sont faiblement chargées en particules détritiques, alors que des taux assez élevés de turbidité sont enregistrés sous forêt fortement dégradée.

3-3- Méthodes d'études de détail, à la recherche des déterminants de l'écoulement

Pour modéliser le comportement hydrologique d'un bassin-versant, en fonction de la variabilité du climat et de l'utilisation des sols, le suivi est plus complexe, car il faut, en plus de l'observation du terrain, et de la mesure répétitive de paramètres divers, disposer des moyens hydrologiques pour effectuer un bilan en eau (mesure en continu des précipitations et de l'écoulement). Il sera alors possible d'effectuer une modélisation spatialisée afin de situer les sites fragiles et les causes de fragilité. On pourra aussi simuler les effets du changement d'un ou plusieurs paramètres, le climat en l'occurrence, sur l'écoulement.

Le micro-bassin expérimental de Matlaq (Laouina & al., 2004 ; Van Dijck & al., 2006) a été sélectionné dans la commune des Sehoul, au S de la Mamora (bassin du Bouregreg, immédiatement en amont de la retenue de barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah). La méthode retenue se base sur l'instrumentation de ce petit bassin-versant comportant un type dominant d'occupation des sols (des cultures annuelles, à dominance céréalière) afin de faciliter l'analyse du comportement hydrologique. Les deux stations hydrologique et climatologique indiquent, à l'échelle d'un pas de temps très court, les relations chutes de pluie/écoulement.

Le travail utilise les données de ces mesures, mais se base aussi sur des investigations plus globales sur le milieu : sols, dynamique de l'eau, évolution des versants, simulation de pluie et calcul de

l'infiltration et du ruissellement selon la variété des terroirs et des conditions locales. La cartographie de l'utilisation du sol est confortée par des enquêtes socio-économiques sur les modes de gestion de l'eau et les pratiques de culture et d'utilisation des sols.

La pluie et les débits du micro-bassin ont été enregistrées continuellement depuis Juillet 2001 par, respectivement, un pluviographe digital « data logger », un pluviographe mécanique et deux stations hydrologiques emboîtées, au sein du bassin-versant de Matlag, le long du même cours d'eau avec, chacune, un déversoir en V, équipé d'un limnigraphe enregistreur. L'instrumentation du micro-bassin permet de maîtriser la dimension hydrologique globale, à deux échelles, amont et aval. Avec les moyens d'enregistrement automatique des pluies et des ruissellements et grâce au modèle LISEM, il est possible de spatialiser afin de comprendre la contribution des différents champs et formes d'occupation des terres.

Le couvert végétal et les états de surface des sols sont considérés comme paramètres importants pour la compréhension du comportement des versants face au ruissellement. Leur variation spatiale et leur développement au cours de l'année culturale ont été suivis par un échantillonnage sur 10 parcelles représentant la variation topographique, les types de sols et les occupations de sols existant dans le micro-bassin. Chacune de ces dix parcelles a été à son tour échantillonnée aléatoirement en 10 micro-parcelles de 1 m², à l'intérieur desquelles on a procédé à des mesures régulières des paramètres de surface comme la végétation, la croûte de battance et la pierrosité. Les dix grandes parcelles ont fait aussi l'objet de mesures de la texture des sols, de stabilité des agrégats, de rugosité de surface, de cohésion et d'humidité. La variation spatiale et dans le temps de l'humidité des sols a été suivie par des mesures au TDR sur 3 transects à 20 m de distance et sur des intervalles de 0-6 et de 10-16 cm de profondeur. Cinq campagnes de mesures ont été réalisées comprenant une phase sèche, deux phases moyennement humides au début de l'automne et à la fin de l'hiver, et une phase très humide.

Certaines propriétés hydriques des terrains ont été étudiées comme l'évolution de l'imbibition des sols, la capacité d'infiltration, les coefficients de ruissellement et le transport solide, à l'aide de simulations de pluie. Deux campagnes de simulations ont été effectuées à deux stades différents d'humidité, en utilisant un simulateur de pluie, doté d'un gicleur, à 2m de hauteur, d'une intensité de l'ordre de 50 mm/h sur une micro parcelle de 0.25 m². Les eaux de ruissellement avec la matière en suspension sont recueillies toutes les 5 minutes ; l'humidité est enregistrée toutes les minutes sur l'intervalle de 0 à 6 cm avec TDR.

Le comportement hydrologique du micro-bassin a été modélisé avec LISEM (Limbourg Soil Erosion Model), un modèle dynamique et spatialisé (Jetten, 2001) afin de reconstruire la répartition spatiale du ruissellement et de l'érosion, et l'évolution du ruissellement pendant un événement pluvieux. Les variables de sortie sont le volume ruisselé total du bassin, le débit de pointe à l'exutoire, le temps d'arrivée à l'exutoire du débit de pointe et le coefficient de ruissellement. L'étalonnage du modèle pour des événements donnés a permis de comprendre le comportement hydrique et hydrologique du bassin-versant face aux différentes situations d'humidité et d'occupation du sol.

Les indicateurs retenus par le modèle sont (Laouina & al., 2006) :

- la topographie de détail, par la construction d'un MNT à grande échelle, montrant les voies de cheminement possibles de l'eau sur les versants et dans les talwegs ;
- la nature des sols et leurs caractéristiques de surface, notamment leur structure, la pierrosité, la rugosité,
- les caractéristiques hydriques du sol : humidité, infiltration, conductivité saturée ;
- le degré de recouvrement des sols et une appréciation de la végétation et de l'interception, par la mesure de l'index foliaire et de la densité de recouvrement au niveau de la canopée notamment ;
- l'utilisation agraire du sol, la diversité des pratiques de culture et des techniques de gestion des eaux et des sols et leur effet sur le comportement de l'eau en surface.

Les transformations agraires ont des impacts sur l'écosystème, in situ sur la parcelle de terre et en aval à la suite des transferts hydriques et de matériaux (LAOUINA & al, 1992, 2000). Une différenciation importante apparaît, en fonction de l'utilisation des terres et de l'état de surface des sols. C'est pourquoi il a fallu adopter une approche pour suivre ces phénomènes :

-l'identification des formes d'utilisation des terres et des changements agraires en cours, notamment en terme de recouvrement des sols lors des phases les plus critiques et de pratiques de travail du sol pour la mise en place et pour la conduite des cultures ;

-l'appréciation des comportements des terres, en fonction de la typologie dressée et des impacts des changements d'affectation ou de techniques, sur la stabilité des champs et celle des versants, sur la dynamique des processus de ruissellement et de dégradation des sols (Le Bissonnais & al., 1995, 1998), ainsi que sur la nature même de ces processus. Au format du champ, sont menés des travaux relatifs aux techniques de labour (araire, labour mécanisé) et les pratiques agricoles ou d'ingénierie pour augmenter l'efficacité de l'eau par infiltration.

Ces transformations des activités agricoles et pastorales ont été étudiées par des observations, des enquêtes et des entretiens, pour l'identification et la connaissance des pratiques d'utilisation des sols et de gestion des eaux, l'analyse des impacts de chacune de ces pratiques, par observation, et l'estimation de la perception par les populations de ces phénomènes, et de leur disponibilité à s'organiser, à participer, à changer de pratiques et dans quelle mesure les paysans tentent d'adapter leurs pratiques aux nouveaux contextes, en vue d'un développement durable.

3-4- Les résultats

Le suivi du comportement hydrologique du bassin de Matlaq durant la période d'étude (2001 à 2003) a permis de recenser plus d'une dizaine de crues qui s'étalent en majorité sur les mois de novembre et décembre. Les crues se caractérisent par des temps de montée très brefs (temps de réponse <5mn) et une courbe de décrue assez courte, témoignant d'un fonctionnement hydrologique relativement simple sans intervention de la nappe phréatique ni de l'écoulement de sub-surface et probablement selon un schéma hortonien classique. Le débit de pointe, le 24/12/01 a atteint 590l/s, pour un volume écoulé de 1000 m³ qui représente environ 8% de coefficient de ruissellement. Ces crues à caractère brutal sont responsables de la mobilisation d'importantes quantités de sédiments de tailles variables issues du décapage des horizons de surface du sol et des arrachements directs au niveau des chenaux.

Les volumes pluviométriques supérieurs à 20 mm/jour, sont une condition de déclenchement des ruissellements généralisés. Le cumul sur plusieurs jours est important, mais c'est l'intensité d'un événement qui est décisive. Les classes d'intensités supérieures à 20 mm/h, mais encore plus celles dépassant les 40 mm/h ne sont enregistrées avec une fréquence significative qu'en automne.

On a enregistré des cas d'épisodes succédant à des journées de pluie antérieure avec imprégnation importante des sols, comme cela a été le cas en novembre 2002 (crues du 19, puis du 23/11, liées à une recrudescence de l'intensité de chute). Mais on a aussi des cas de ruissellement brutal, dès le premier jour de pluie du fait de très fortes intensités sur sol encore sec et dénudé.

Un autre facteur négatif réside dans l'intervention de pluies antérieures qui ferment la porosité du sol en développant une croûte de battance. Les tests de cohésion et de compaction menés, sur sol asséché, après de premières pluies, donnent des valeurs élevées. La rugosité s'abaisse par contre à des valeurs minimales après ces épisodes de première pluie, ce qui initie en cas de précipitation intense, le fonctionnement du ruissellement direct.

Dans toutes les crues enregistrées, le taux de recouvrement végétal moyen du bassin - versant était inférieur à une moyenne de 25 %. En cette période automnale, les champs sont soit encore en jachère pâturée, débarrassée de tout résidu de culture par le parcours excessif d'été, soit déjà labourés et donc entièrement dénudés, face à l'impact des pluies.

La succession des phénomènes peut se décomposer ainsi : le parcours estival excessif, du fait de la consommation des résidus végétaux et du fait du piétinement donne un sol à la fois dénudé, tassé, mais dont les particules de surface sont effritées. Les premières pluies d'automne reprennent ces particules faciles à mobiliser, les étalent et les tassent en surface sous forme de croûtes sédimentaires épaisses et compactées.

Le chenal principal montre une tendance à l'incision en trait de scie, du fait de l'abandon de la charge sur le plan de la terrasse alluviale bordant le lit du ruisseau et donc l'arrivée d'eaux peu chargées dans

le chenal. Cette incision a des effets de déstabilisation sur les berges qui montrent des affaissements suite au sapement des rives.

Le fonctionnement des griffes correspond au dépassement d'un seuil important dans la dynamique des versants. Les rigoles naissent surtout dans les champs fraîchement labourés, mais on les observe aussi sur de vieilles jachères abandonnées. Les premières sont effacées dans la saison même ou lors de l'année suivante, alors que les secondes deviennent matures et sont persistantes. Mais elles n'évoluent pas en ravines ; ces dernières sont spécifiques de sites particuliers, favorables à un creusement profond.

L'utilisation du modèle LISEM, couplé au SIG PCRaster, pour la spatialisation des phénomènes hydrologiques a permis de constater, lors des simulations, la présence des zones de ruissellement communes à tous les essais. Il s'agit de la partie centrale du bassin avec des pentes assez fortes (jusqu'à 65%), des parcelles en jachère prolongée, fortement piétinées par le bétail et des sols, peu épais et très dégradés. Ces zones compactées jouent un rôle important dans la genèse du ruissellement par leur action sur la réduction de l'infiltration. Les autres éléments qui contrôlent la production du ruissellement de surface sont la faible capacité d'infiltration des sols limoneux, aggravée par leur sensibilité à la battance et la faible épaisseur du sol (Van Dijck & al., 2006).

De ces travaux, on tire les conclusions suivantes sur les types de réponses hydrologiques possibles au changement climatique :

- le réchauffement et la réduction du volume des précipitations auront un impact négatif sur le bilan d'eau, notamment dans les terrains aux sols minces ou dégradés, à faible capacité de rétention ou de restitution d'eau ;

- la recrudescence des événements pluviométriques extrêmes (pluies très concentrées) sera à l'origine du fonctionnement de rigoles, de l'entraînement de grosses capacités de terres et de crues à forte charge et donc à fort effet d'envasement potentiel des retenues ;

- la raréfaction du couvert végétal du fait du changement climatique, comme de la dégradation des sols exagérera d'autant les processus d'érosion et réduira les possibilités de recharge des nappes phréatiques.

3-5- Les ressources en eau et en terres et leur gestion

Dans le contexte sud-méditerranéen de rareté des ressources en eau et de multiplicité des zones déficitaires, le changement climatique menace donc d'exagérer les déficits et les phénomènes de dégradation, même si de nombreuses incertitudes demeurent et même si les conclusions globales peuvent être entachées d'erreurs. Mais, vu l'incertitude, il est surtout important d'agir sur les autres changements maîtrisables par l'homme (recouvrement des terres, fragilité des sols, formes d'utilisation, gestion et institutions de l'eau).

Dans le bassin de Matlaq, par exemple, des réponses agricoles et de gestion des terres constituent des possibilités d'adaptation à effet non négligeable. La gestion du fumier actuellement est par exemple antinomique de l'objectif de conservation. Seules les parcelles de jardinage continuent à recevoir le fumier organique. Une meilleure distribution pourrait améliorer la stabilité structurale des sols et donc réduire le ruissellement direct. Les résidus de culture, autrefois entièrement broutés, peuvent de plus en plus rester intacts dans certaines parcelles clôturées et non pâturées ce qui pourrait améliorer les conditions hydriques et créer des cellules capables d'absorber les excès d'eau ayant entamé un processus de ruissellement. Les travaux des sols jouent aussi un rôle important. Des travaux moins déstabilisateurs pour les profils pourraient améliorer la cohésion des sols. Mais on peut aussi envisager des formes de conservation des eaux et des sols, avec terrassement et construction de ruptures (Chaker & al., 1996).

Mais il faut surtout insister sur la nécessité d'une prise en compte globale et de la conciliation entre objectifs multiples, parfois contradictoires. Dans le cas du Matlaq, en bordure de la retenue du barrage SMBA, il faut pouvoir concilier entre l'objectif agro-pastoral et de protection des sols, celui de la recharge de la nappe phréatique, celui de la réduction de l'envasement de la retenue pour la durabilité des volumes d'eau prévus pour l'alimentation du corridor urbain atlantique. Or, chacun de ces

objectifs suppose des méthodes particulières. Des compétitions sont possibles. C'est pourquoi l'aménageur se doit d'adopter une vision globale et intégrée (Aït Kadi, 1998).

Conclusion

Selon les scénarios les plus fiables, du fait de la baisse des débits et de la recharge de la nappe phréatique, due à l'augmentation de l'évapo-transpiration et à la baisse des précipitations, générées par l'effet de serre, le Maroc devra adopter des comportements d'économie de l'eau, pour faire face à la nouvelle situation, pouvant générer dans certaines régions des pénuries prononcées. Une concentration plus grande des précipitations dans le temps et des effets adverses en terme de crues dévastatrices et de déficits accusés, obligent à programmer des équipements hydrauliques ayant de plus grandes capacités de réserve et donc plus coûteux. La baisse des débits et la plus forte concentration auront aussi des effets sur la qualité de l'eau (moindre auto-épuration, envasement des retenues...).

La variabilité des comportements hydrologiques et des réponses aux changements climatiques signifie les difficultés qu'il y a à utiliser des modèles simples et plus encore des corrélations spatiales, même si les ressemblances de conditions semblent évidentes. Il est important de tenir compte de paramètres régionaux bien mesurés et suivis, dans le travail de mise en relation du changement climatique projeté avec les ressources en eau, le fonctionnement hydrologique et la stabilité des terres et des écosystèmes.

L'incidence forte des changements non climatiques - comme le changement du couvert végétal (dû beaucoup plus à l'action de l'homme qu'à l'effet climatique), celui des techniques d'occupation des terres, d'utilisation des ressources et des méthodes de gestion de ces ressources - indique qu'il faut s'intéresser aux paramètres sur lesquels l'homme peut avoir directement prise. En particulier l'effort d'adaptation doit s'impliquer dans les domaines de la gestion des ressources et de la gouvernance, dans le but de maîtriser les tendances négatives et les impacts responsables de dégradation. Et donc, en raison des incertitudes sur les effets hydrologiques des changements climatiques, il est urgent d'agir pour corriger les effets que l'on peut maîtriser.

C'est par la multiplication des travaux sur les corrélations possibles - changements climatiques / modes de gestion des ressources / efficacité des institutions en charge de ces ressources - que l'on pourra mieux répondre aux questions posées et proposer des moyens d'adaptation capables de minimiser les effets négatifs des tendances pressenties.

Vu les grosses incertitudes en terme de compréhension des déterminants du bilan d'eau, il est recommandé de renforcer les unités et pôles de recherche travaillant sur ces problématiques et d'améliorer la coordination entre intervenants dans ce domaine. C'est par la multiplication des travaux sur les corrélations possibles eau / changements climatiques / désertification que l'on pourra mieux répondre aux questions posées et proposer des moyens d'adaptation capables de minimiser les effets négatifs des tendances pressenties.

Sur le plan politique, en raison des interactions fortes des trois domaines climatique, hydrique et environnemental, il est avantageux d'opter pour des actions intégrées et gagnantes sur plusieurs plans : Ainsi, l'atténuation du changement climatique signifie la réduction des émissions de GES, ce qui pourrait concourir à stabiliser relativement l'effet de serre. Cette réduction des émissions et donc de la consommation d'énergie est par ailleurs, très positive dans les pays non producteurs d'énergie du fait du coût que représentent les importations de matières énergétiques fossiles. Mais l'atténuation des émissions (exemple de la rationalisation des transports) a aussi des retombées importantes en terme de réduction de la pollution de proximité.

L'adaptation au changement climatique, pour réduire les impacts et la vulnérabilité est en même temps la voie majeure pour la conservation des ressources, le développement de l'agriculture, la garantie d'une eau suffisante, régulière et de qualité.

La lutte contre la désertification, grâce à des changements positifs dans l'affectation des terres et des changements de pratiques, aura des effets indirects sur le changement climatique et sur les régimes hydriques.

En plus d'une approche politique intégrée, ces trois domaines fondamentaux pour le développement durable du pays, imposent une communication adéquate et active. Il faut se baser sur des certitudes convaincantes sur l'origine, les mécanismes et les impacts. Il faut proposer des mesures à effet tangible, réformer le lieu de prise de décision et le placer au dessus des structures sectorielles. Il faut bien sûr, faire le choix pour le social, mais ne pas oublier l'écologique, notamment la biodiversité, le maintien des habitats et la conservation des espèces précieuses. Dans ces divers domaines, on ne peut trop insister sur l'importance de l'anticipation, c'est à dire, avoir en main une connaissance élaborée, fruit d'une recherche avancée, sur la base de mesures et études suffisantes. Une planification sérieuse doit être préparée, sur la base d'une prospective basée sur des indicateurs sûrs. Il faut enfin, des choix politiques et d'aménagements courageux, en remettant en cause, des vérités qui semblaient établies, mais que les études actuelles paraissent démentir.

Bibliographie

- Ait Kadi, M. 1998. Water sector development through effective policies, institutions and investments: a country perspective. Ministère de l' Aménagement du Territoire et de l'Environnement/Ministère des Affaires Etrangères. Conférence Internationale « Eau et développement durable ». Paris, 19-21 Mars 1998.
- Chaker M., El Abbassi H. et Laouina A., 1996 : Montagne, piémont, plaine: Investir dans les techniques de CES au Maroc oriental; in Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique. Sous la direction de REIJ C., SCXOONES I., et TOULMIN P., CTA- CDCE- KARTAHALA , pp. 75-86.
- Coelho, C., Sala, M., Gonzales del Tanago, M., Laouina, A., Hamza, A., Regaya, K., Ferreira, A., Carvalho, T., Chaker, M., Nafaa, R., Naciri, R., Boulet, A., Reina, L., & Bernia, S. (2000): Effects of land use and land management practices changes on land degradation under forest and grazing ecosystems. Final synthesis report, Project ERB-IC18-CT97-0147 (MEDCHANGE),
- Conacher A. & Sala M., 1998 Eds., Land degradation in Mediterranean environments of the world, Wiley, 491p.
- Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State –NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.* **121**, p. 1493-1513.
- Eaux et Forêts, 1995
- GIEC (2007): Résumé à l'intention des décideurs, Quatrième rapport d'évaluation du GIEC (Groupe de travail I)
- Jetten, V. 2002. LISEM user manual, version 2.x. Draft version January 2002. Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics, Utrecht University, The Netherlands, 48 pp.
- Laouina, A. Nafaa, R., Chaker, M., Naciri, R., Coelho, C., Ferreira, A., Carvalho, T. & Boulet, A. 2000. La problématique de la gestion de l'eau et du développement des communautés locales rurales au Maroc. *Mosella* 2000, tome XXV, No 3-4, p. 431-446.
- Laouina A., M. Chaker & R. Nafaa (2003) : Suivi et mesure de l'érosion hydrique des terres au Maroc, 15 ans de recherche et d'expérimentation, *Rev. Géogr. Maroc*, vol. 21, p. 79-98.
- Laouina A., Coelho C., Ritsema C., Chaker M., Nafaa R., Fenjro I., Antari M., Ferreira A. & Van Dijck S (2004) : Dynamique de l'eau et Gestion des terres dans le contexte du changement global, analyse agro-hydrologique dans le bassin du Bouregreg (Maroc), *Sécheresse*, vol. 15, n° 1, p. 66-77.
- Laouina & al., 2006
- Laouina, A. 2001. Problématique du développement durable et perspectives environnementales, in Berriane et Kagermeier (Eds.): *Le Maroc à la veille du troisième millénaire, Défis, chances et risques d'un développement durable. Actes du 6^{ième} col. maroco-allemand*, Paderborn, 2000. Rabat, 2001., p. 97-105.
- Laouina, A. 2002. Le développement agricole durable et la conservation des ressources naturelles au Maroc. Dans : *Techniques Traditionnelles de GCES en Milieu Méditerranéen. Bulletin Réseau Erosion* 21, 2002, p. 11-20.
- Laouina A. (2006) : L'approche régionalisée en vue de l'action de lutte contre la désertification. in *Développement rural, pertinence des territoires et gouvernance*, Publ. Inst. Nat. d'Aménagt et d'Urb. et RELOR, p. 105-119.
- Margat, J. 1995. Perspective des pénuries d'eau au Maghreb. In: *Eau, Gestion de la rareté, colloque international de l'Am. des Ing. Mar., Ponts et chaussées*, 1. p. 147-170.

- MATUHE, 2001. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement. First National Communication, United Nations Framework Convention on Climate change, COP7, 99 p.
- Mokssit, A. & El Khatri, S., 1995. La sécheresse dans le climat marocain. In: Eau, Gestion de la rareté, colloque international de l'Am. des Ing. Mar., Ponts et chaussées, 1. p. 147-170.
- Nafaa, R. 2002. Dynamique du milieu naturel de la Mamora. Paléoenvironnements et évolution actuelle de la surface. Thèse de Doctorat, Université Hassan II, Mohammedia. Publications de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Mohammedia. Série Thèses No 3.
- Ragab, R. & Prudhomme, C. 2000. Climate change and water resources management in the southern Meditarreanean and Middle East countries. Contribution to the 2nd World Water Forum, 17-22 March 2000, The Hague, Netherlands, 42 p.
- Roose, E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M et Morsli B., 1993 : Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne d'Algérie, Synthèse de 50 parcelles. Cahiers ORSTOM, Pédologie, 28, 2.
- Simmonds, I.; Trigg, G. and Law, R., 1988. The Climatology of the Melbourne University General Circulation Model. Publi. N° 31, Dept. of Meteor., University of Melbourne, 67 p.
- UNDP/GEF, 2002. Vulnerability of the Maghreb Region to Climate Change, and Needs for Adaptation (Algeria, Morocco, Tunisia). Regional Coordination of the UNDP/GEF, RAB/94/G31 Project, Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement, 11 p.
- Van Dijck, S.J.E., Laouina, A., Carvalho, A.V., Loos, S., Schipper, A., Van der Kwast, J., Nafaa, R., Antari, M., Rocha, A., Borrego, C. & Ritsema, C.J. (2006) : Desertification in northern Morocco due to the effects of climate change on groundwater recharge (Rabat region, Morocco), Proceedings of the Conference on "Desertification in the Mediterranean region, a security issue", Kepner, Rubio, Mouat & Pedrazzini eds, 549-577, Springer, Netherlands.