

## Occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, transport sédimentaire et barrages

GIL MAHE<sup>1</sup>, MOHAMED ADERGHAL<sup>2</sup>, JAMAL ALKARKOURI<sup>3</sup>,  
HAMID BENABDELFADEL<sup>4</sup>, DJILALI BENSAFIA<sup>5</sup>, TELESOPHORE BROU<sup>6</sup>,  
MILOUD CHAKER<sup>2</sup>, MOHAMED CHIKHAOUI<sup>7</sup>, SYLVIE COUPLEUX<sup>8</sup>,  
REMI CROUZEVALLE<sup>9</sup>, CLAUDINE DIEULIN<sup>1</sup>, ANAS EMRAN<sup>2</sup>,  
MOHAMED EZZAOUINI<sup>10</sup>, EMMANUELLE GOUSSOT<sup>11</sup>, FAIZA HALLOUZ<sup>12</sup>,  
KENZA KHOMSI<sup>13</sup>, ABDELLAH LAOUINA<sup>5</sup>, NADIA MACHOURI<sup>5</sup>,  
VERONIQUE MALEVAL<sup>8</sup>, MOHAMED MEDDI<sup>12</sup>, MEDARE NGING<sup>7</sup>,  
OLIVIER PLANCHON<sup>14</sup>, BOUALEM REMINI<sup>5</sup>, NATHALIE ROUCHE<sup>1</sup>,  
HASNA SAADI<sup>12</sup>, MOHAMED SFA<sup>2</sup>, MOHAMED SINAN<sup>15</sup>, MARIA SNOUSSI<sup>2</sup>,  
SABRINA TAIBI<sup>12</sup>, SAMIR TOUMI<sup>12</sup>, ARMAND TRA BI<sup>8,16</sup>,  
SAMIR YAHIAOUI<sup>12</sup> & ABDELAZIZ ZEROUALI<sup>10</sup>

*1 HydroSciences Montpellier, France*

*gil.mahe@ird.fr*

*2 Université Mohammed 5, Rabat, Maroc*

*3 Université de Kenitra, Maroc*

*4 Direction de la recherche et de la Planification de l'Eau, Rabat, Maroc*

*5 Université Saad Dahlab Blida, Algérie*

*6 Université de la Réunion, France*

*7 Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc*

*8 Université d'Artois, Arras, France*

*9 Université de Limoges, France*

*10 Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia, Ben Slimane, Maroc*

*11 AgroParisTech, Paris, France*

*12 Ecole Nationale d'Hydraulique de Blida, LGEE, Blida, Algérie*

*13 Météorologie Nationale, Casablanca, Maroc*

*14 LISAH, Montpellier, France*

*15 Ecole Hassania des Travaux Publics, Casablanca, Maroc*

*16 Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire*

**Résumé** En Afrique du nord, le comblement des retenues par les sédiments est un problème majeur pour les barrages. La relation avec l'évolution de l'occupation des sols et le changement climatique est mal connue. L'hypothèse est que les changements d'usage des sols et l'augmentation de la pression agricole, associés à une diminution durable des pluies, fragilisent les sols et les rendent plus sensibles à l'érosion. Deux grands bassins versants sont étudiés dans le cadre du programme SIGMED (approche spatialisée de l'impact des activités agricoles sur les transports solides et les ressources en eau de grands bassins versants): l'oued Bouregreg au Maroc et l'oued Mina en Algérie. Un des objectifs est de suivre l'évolution de l'occupation du sol pour identifier les zones sensibles et de comparer avec la sédimentation dans les barrages. L'érosion en provenance des versants immédiats des barrages pourrait constituer une source majeure en sédiments dans les retenues, et être le lieu privilégié d'opérations de protection et de restauration de la végétation, pour prévenir les risques de comblement.

**Mots clés** Bouregreg; Mina; Maroc; Algérie; SIGMED; sédiments; barrage; occupation du sol; érosion

### Land-cover on two great basins in Algeria and Morocco, sediment transport and dams

**Abstract** In North Africa, the filling of dams by sediments is a major problem. Relationships with the evolution of land use and climate change are poorly understood. The hypothesis is that changes in land use and increasing agricultural pressure, associated with a sustained decrease in rainfall, fragilize soils and make them more susceptible to erosion. Two major watersheds are studied in the framework of SIGMED (spatial approach of the impact of agricultural activities on sediment transport and water resources in large catchments): Wadi Bouregreg in Morocco and Wadi Mina in Algeria. One of the objectives is to follow the evolution of land-cover to identify sensitive areas and compare with sedimentation in dams. Erosion from the immediate banks of the dams could be a major source of sediment in reservoirs and be the focus area for operations of protection and restoration of vegetation, preventing the risk of filling.

**Key words** Bouregreg; Mina; Morocco; Algeria; SIGMED; sediments; dam; land cover; erosion

## INTRODUCTION

Le projet SIGMED propose une approche Spatialisée de l'Impact des activités agricoles au Maghreb sur les transports solides et les ressources en Eau De grands bassins versants (Mahé *et al.*, 2011).

Ce projet fait référence à des objectifs du Plan Bleu (2005) pour relever les défis du développement durable en Méditerranée: conserver sols et paysages, mieux valoriser les ressources en eau, revaloriser les liens sociétés-environnement, et développer une recherche multidisciplinaire ouverte au dialogue.

Ce projet permet à un groupe de chercheurs de disciplines complémentaires de faire progresser les connaissances sur la problématique des relations homme/climat/environnement. Ces activités se situent également dans les problématiques du programme MEDFRIEND de l'UNESCO (Programme Hydrologique International), réseau de chercheurs qui offre un cadre scientifique international aux coopérations Sud-Sud et Sud-Nord autour de la Méditerranée en hydrologie, climat et impacts du changement climatique sur les ressources en eau.

Les relations entre activités agricoles/occupation du sol et transports solides sont peu suivies et peu quantifiées aux échelles nationales. Or c'est important dans un contexte de changement climatique et:

- d'augmentation de la population rurale et des besoins en eau,
- de changement des pratiques agricoles,
- d'augmentation du risque d'érosion du fait de la dégradation des états de surface.

Une meilleure connaissance de la variabilité des flux solides en fonction des aménagements et de l'occupation du sol est indispensable, pour prédire des conséquences en aval et pour aider à atténuer les causes possibles de l'augmentation des flux solides.

Les observations sont effectuées d'abord à l'échelle des communautés villageoises et des terroirs/petites unités hydrographiques. Dans une seconde phase on spatialise les résultats à l'échelle de grands bassins versants (Mahé *et al.*, 2010).

## DESCRIPTION DU PROJET ET SES ATTENDUS

Le projet a pour objectif l'étude de la relation entre les activités humaines – et en particulier agricoles – et le transport de sédiments dans les bassins-versants de deux grands barrages d'Algérie et du Maroc.

Les résultats attendus sont de plusieurs ordres: synthèse et approfondissement des connaissances scientifiques sur le sujet d'étude; renforcement des liens inter-universitaires Sud-Sud et Nord-Sud; intégration des équipes impliquées dans des structures scientifiques internationales; formation d'étudiants.

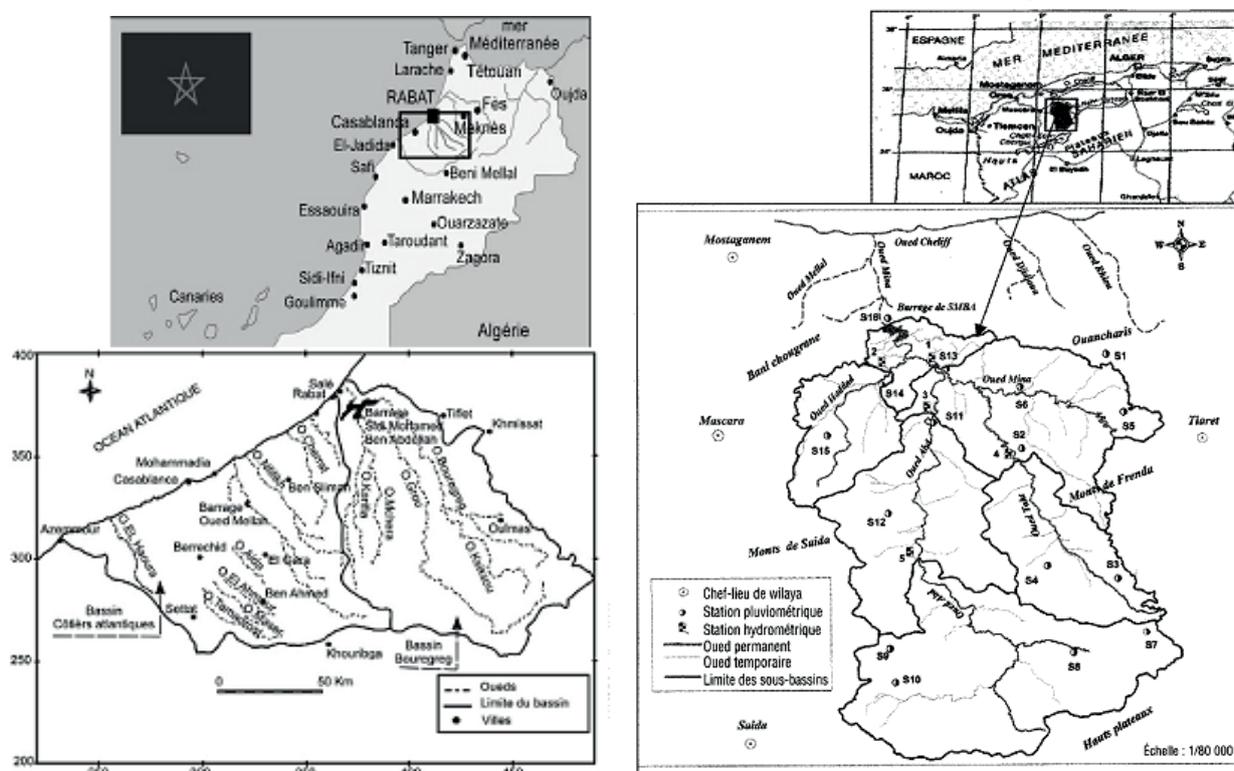
Les deux bassins étudiés sont le Bouregreg au Maroc et l'Oued Mina en Algérie (Fig. 1). Ces deux bassins ont déjà fait l'objet d'études localisées de l'érosion et du transport solide, cependant, aucune étude n'a abordé à une échelle plus large les relations entre les activités humaines et les transports solides. Il est donc jusqu'à présent difficile d'imputer avec précision l'évolution constatée en de nombreux endroits de l'érosion et du transport de sédiments à un type particulier d'évolution paysagère ni ses relations supposées avec des activités agricoles et/ou le changement climatique.

Les travaux de recherche portent sur les aspects suivants:

- Relation entre variabilité hydroclimatique et transports solides; pour replacer les événements mesurés par rapport à la variabilité hydroclimatique naturelle. L'étude hydroclimatique est réalisée à partir des données fournies par les services nationaux et les organismes gestionnaires des barrages, et à l'aide des logiciels gratuits MVR et Khronostat développés par l'IRD.
- Caractérisation des transports solides (matières en suspension) pour les deux bassins, et détermination des relations avec les éléments physiques naturels du bassin – géologie, pédologie, couverture végétale, relief, pentes, etc. La modélisation de la dégradation des terres

(estimation des quantités érodées) est réalisée par l'application de la méthode USLE. Les mesures hydrologiques associées sont basées sur les données existantes, complétées par des campagnes ponctuelles.

- Rôle des activités humaines sur les changements d'états de surface et l'aptitude au ruissellement et à l'érosion; pour réaliser une typologie de la susceptibilité à l'érosion des différents sols en fonction des types d'activités agricoles. L'étude de l'occupation du sol et des activités socio-économiques est basée sur l'analyse d'images multi-échelle (haute basse résolution), qui permet de suivre et de quantifier les évolutions des états de surface. L'étude des dynamiques de l'occupation du sol implique le couplage des données de télédétection avec des données terrain, des données de statistiques socio-économiques et démographiques au sein d'un SIG. Toutes les activités sont reportées et en accès libre sur le site internet de présentation du projet et des résultats: <http://armspark.msem.univ-montp2.fr/medfriend/>



**Fig. 1** Bassin versant du Bouregreg, et bassins côtiers de Rabat à Casablanca (gauche)(d'après El Bouqdaoui *et al.*, 2008), et bassin versant de l'Oued Mina en Algérie (droite)(d'après Achite et Meddi, 2004).

## CARACTERISTIQUES DES BASSINS ET DES RETENUES

Le Bouregreg est l'un des principaux fleuves marocains, d'une superficie d'environ 9500 km<sup>2</sup> et long de 240 kilomètres il prend naissance dans le massif du Moyen Atlas à l'altitude de 1627 m au niveau du Jbel Mtourzgane et se jette dans l'océan Atlantique à Rabat-Salé. Son débit moyen depuis 1971 s'élève à 23 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> mais, en période de crues, il peut dépasser 1 500 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Le volume total moyen ruisselé est d'environ 660 millions de m<sup>3</sup> en année moyenne. Peu avant son embouchure, le Bouregreg est barré par le barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA) mis en service en 1974 et d'une capacité de 1.025 milliards de m<sup>3</sup> depuis sa surélévation en 2006.

L'oued Mina est un affluent de l'Oued Chellif, le plus grand fleuve algérien. Sa superficie est d'environ 5800 km<sup>2</sup> à la hauteur du barrage Sidi Mohamed Ben Aouda et le réseau s'étend sur une

distance de près de 150 km. Le débit moyen est d'environ  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à l'entrée du barrage. Le volume du barrage était de 235 millions de  $\text{m}^3$  à la mise en service en 1978.

## PREMIERS RESULTATS

### Hydroclimatologie

Le but de cette partie est de suivre l'évolution de la fréquence des situations météorologiques locales rares et très rares entre 2005 et 2009 et de déterminer les types de temps associés à ces situations en 2009, sur le bassin du Bouregreg. Les événements extrêmes sont responsables de phénomènes érosifs intenses, et le changement climatique en cours devrait provoquer un plus grand nombre de situations météorologiques extrêmes dans la région (Driouech *et al.*, 2008). L'étude est effectuée à partir des données journalières de température maximale et minimale, enregistrées entre 2005 et 2009 sur 40 stations du réseau synoptique de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) du Maroc et traitées par saison et par région en se basant sur 25 régions climatiquement homogènes (Khoms *et al.*, 2013).

Les situations rares des températures maximales (minimales) sont choisies selon la méthode de la moyenne des maxima (minima). Les situations très rares sont distinguées par la méthode de la moyenne plus/moins deux fois l'écart type, l'étude de leur fréquence est réalisée durant les années 2005 à 2009, alors que l'étude des types de temps associés n'a été réalisée que pour l'année 2009.

L'évolution des températures maximales et minimales est irrégulière et diffère selon la saison et la région. Les événements rares de température maximale de l'été sont plus fréquents en 2005 et 2009, leurs températures s'écartent de la moyenne de la saison de  $7.4^\circ\text{C}$  pour l'ensemble du pays. La région de Larache (côte atlantique nord) est la plus touchée par cette hausse et la région d'Essaouira (côte atlantique sud) la moins concernée. Les événements rares de température minimale de l'hiver sont enregistrés pendant les années 2006 et 2008. La région de Sidi Slimane (plaine du Gharb, nord du Maroc) est la plus touchée par la baisse des températures. En ce qui concerne les types de temps, les événements rares de température maximale résultent le plus souvent d'un « temps perturbé de sud-ouest », de « l'axe dorsale sur le Maroc » ou du « front quasi-stationnaire marocain » alors que les événements liés aux températures minimales résultent généralement de « la décharge d'air polaire continental » (Khoms *et al.*, *under press*).

Le bassin versant de l'oued Mina présente une variabilité spatiale et temporelle importante des pluies et des débits (Meddi & Belhadj Bouchaib, 2010; Meddi *et al.*, 2010). Une régionalisation de la pluviométrie annuelle de ce bassin a été réalisée à partir des données de 26 stations pluviométriques sur la période 1930–2007. L'application de tests statistiques de détection des ruptures sur les séries chronologiques, indique une diminution des pluies annuelles de 19 à 20% sur le bassin de l'oued Mina vers 1976 le plus souvent, et une rupture dans les séries de débits mensuels et annuels de cinq postes hydrométriques, à partir du milieu des années 1970 et jusqu'au cours des années 1980. Sur l'ensemble du jeu de données de débits, tous les mois présentent des ruptures, et c'est durant les mois de février, mars et avril, de fin de saison humide, qu'elles sont les plus significatives. Durant les années récentes, aucun changement de tendance ne peut être observé sur les séries étudiées en Algérie, ni au Maroc (Singla *et al.*, 2010). Cette rupture climatique apparaît quelques années après celle observée en Afrique sub-saharienne, mais elle reste un fait climatique majeur à l'échelle continentale (Mahe *et al.*, 2013).

### Transports solides

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement les pays du Maghreb dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol. En Algérie, l'ampleur de ce phénomène est considérable. L'agressivité des pluies conjuguées à une absence de protection végétale, l'alternance de périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'action anthropique, entraînent l'envasement des retenues des barrages (Remini *et al.*, 2009).

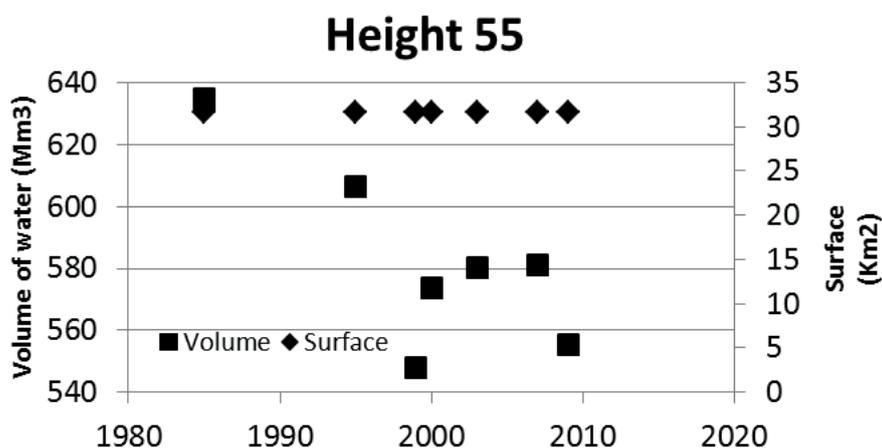
Le bassin versant de l'oued Mina est soumis à une forte érosion hydrique, les sédiments arrachés transportés par l'oued Mina se déposent dans le barrage Sidi M'hamed Ben Aouda qui a atteint un taux d'envasement de 50% depuis 1978 (Remini & Bensafia, 2012; Remini *et al.*, 2013). Les douze barrages les plus envasés d'Algérie, incluant celui étudié ici, ont perdu près de 600 millions de m<sup>3</sup> de volume utile pour un maximum de 1 milliard de m<sup>3</sup>, soit un taux d'envasement moyen de 60% (Remini *et al.*, 2009).

Les données de transport solide sont issues des prélèvements réguliers réalisés par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques depuis 1972 sur l'Oued Mina en Algérie. Il n'existe par contre que des mesures ponctuelles pour le Bouregreg. Le taux d'abrasion du bassin de l'oued Mina depuis 1972 a été évalué à 211 t/km<sup>2</sup> an. Cette valeur varie selon les auteurs et les périodes considérées: 187 t/km<sup>2</sup> an pour Achite & Meddi (2005), environ 220 t/km<sup>2</sup> an pour Touaibia *et al.* (2001), elle reste cependant relativement modérée par rapport à celles trouvées pour d'autres régions à régime hydrologique similaire, avec plus de 300 t/km<sup>2</sup> an (Achite & Meddi, 2005; Hallouz *et al.*, 2013).

Au Maroc les tonnages exportés peuvent être très élevés dans les oueds de la région nord des montagnes du Rif, avec des valeurs dépassant 5000 t/ km<sup>2</sup> an (Lahlou, 1994).

Sur l'oued Bouregreg les mesures ponctuelles de concentration en matières en suspension, effectuées par la Direction de l'Hydraulique, et leur transformation en débits solides, sont décrites par Elbaraka (2011). Contrairement à l'Algérie, peu de mesures existent. Avant la construction du barrage 2 années de mesures assez complètes ont permis de calculer une érosion spécifique de 185 t/km<sup>2</sup> an pour le sous-bassin de l'Oued Bouregreg à la station de Dar Es Soltane (3800 km<sup>2</sup>), noyée depuis par le barrage SMBA (Lahlou, 1971, 1986). Les données les plus récentes proviennent de mesures de concentrations effectuées ponctuellement par la direction de l'hydraulique entre 1978 et 1983. L'absence de suivi régulier des flux solides aux trois affluents majeurs au barrage SMBA, qui constituent le Bouregreg, ne permet pas de donner une valeur précise au taux d'abrasion, mais à partir des valeurs ponctuelles disponibles celui-ci se situe pour chaque affluent autour de 50 t/km<sup>2</sup> an, soit un ordre de grandeur cohérent avec les mesures de Lahlou.

Afin de contourner ce problème de suivi aux stations, nous avons étudié les données issues des campagnes bathymétriques. Les volumes d'eau mesurés diminuent entre les relevés bathymétriques de 1985 et de 2009 à la cote de 55 m, d'environ 80 millions de m<sup>3</sup> (Fig. 2). Bien que le barrage ait été surélevé en 2006, nous utilisons la cote maximale de 55 m pour pouvoir comparer les hauteurs avant et après rehaussement. Cependant le relevé de 1999 est très douteux, et d'autres incertitudes sont probables. Il faut donc prendre ces résultats au conditionnel. La direction de l'hydraulique recommande de réduire de 20% le volume de vase pour obtenir un équivalent en matière sèche, soit un total d'environ 66 millions de m<sup>3</sup>. Le taux d'abrasion sur le

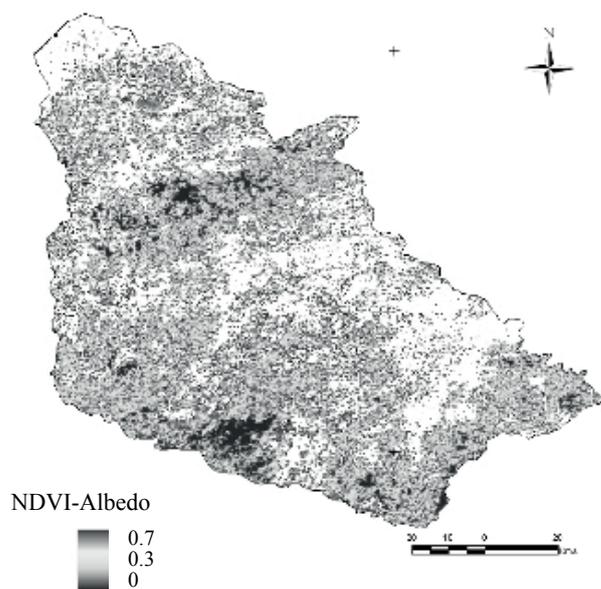


**Fig. 2** Volume d'eau du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur le Bouregreg au Maroc entre 1985 et 2009 à la cote 55 m. La surface ne varie pas, mais le volume d'eau diminue régulièrement (El Baraka, 2011).

bassin du Bouregreg entre 1985 et 2009 est donc d'environ 270 t/km<sup>2</sup>.an, ce qui semble trop élevé par rapport à la valeur donnée par Lahlou pour 1970. Cependant il n'est pas exclu que le taux d'érosion ait fortement augmenté au cours des dernières décennies du fait de l'augmentation de la dégradation des sols.

### Evolution des états de surface

L'évolution temporelle des données de l'indice de végétation normalisé (NDVI) est fortement liée à l'évolution de l'état de la surface, et permet de montrer les variations saisonnières et annuelles de la végétation (Brou *et al.*, accepté). La méthode adoptée pour réaliser cette étude de NDVI pour le Bouregreg se base sur la statistique descriptive de séries d'images de NDVI de MODIS et de NOAA de la période 1982 à 2009 (Mahé *et al.*, 2012a). L'étude analyse aussi les variations du VCI dans l'espace du bassin versant du Bouregreg de 2000 à 2009. Il ressort de ces analyses que l'activité de production végétale est en baisse depuis 1990 dans les régions de production agropastorales ainsi que dans certains îlots forestiers. Cette baisse est notamment remarquée en début et fin de saison culturale. Sur la Fig. 3 on distingue des zones à la couverture végétale plus fortement dégradée dans le centre du bassin, où se situe la plus grande partie des cultures céréalières. Cette évolution est liée autant à la baisse des pluies qu'à l'augmentation des températures de surface (Driouech *et al.*, 2008) et à l'augmentation de la population et des surfaces cultivées, donc plus sensibles saisonnièrement à l'érosion (Goussot, 2011).



**Fig. 3** Carte de dégradation des états de surface en 2007, sur le Bouregreg (Mahé *et al.*, 2012b). NDVI-Albedo de 0 à 0.7. En blanc et noir les zones dénudées.

Pour suivre l'évolution du couvert végétal au cours 12 dernières années au niveau du bassin versant de l'Oued Mina. Les données de NDVI en combinaison avec les données de précipitations, permettent d'identifier les changements subtils associés à la dégradation des terres. Les images de l'indice de végétation (NDVI) de SPOT VEGETATION sont calculés à partir des synthèses décennales depuis 1999, qui sont une moyenne des observations acquises respectivement en 24h et au cours des 10 derniers jours. Par ailleurs, des images Landsat TM de 30 m de résolution ont également été utilisées pour étudier la variation annuelle de la végétation. La méthode de comparaison des classifications de la végétation a été choisie pour détecter des changements de l'occupation du sol. Le principe de cette méthode est basé sur la classification de deux scènes

acquises à des dates différentes. Elle assigne d'abord des classes et détecte ensuite le changement. Cette méthode permet de fournir l'information détaillée du changement et préparer des cartes de changement.

Nous avons constaté que le couvert végétal dans la région d'étude a changé avec une tendance ondulante durant période 1999–2010. La valeur maximale annuelle de NDVI a augmenté légèrement, passant de 0.5 en 1999 à 0.6 en 2010. Cette tendance à la hausse est accompagnée par une tendance à la hausse de l'activité de la végétation. La moyenne annuelle des valeurs de NDVI maximale s'est produite durant l'année 2001 et 2003, tandis que les creux sont enregistrés dans 2002, 2005 et 2008. En 2000, la valeur annuelle maximale de NDVI a chuté à 0.38, valeur qui pourrait être influencée par une sécheresse.

En été, les valeurs mensuelles de maximum de NDVI ont montré forte augmentation, et une faible tendance croissante en hiver, en automne et au printemps a été enregistrée. Les zones agricoles ont été essentiellement contrôlées au cours de neuf dernières années.

Toumi *et al.* (2013) ont calculé le potentiel érosif (Fig. 4) d'après l'équation USLE qui tient compte des pentes, de l'exposition, du type de sol et de l'agressivité des pluies. Il est assez élevé dans une partie centrale du bassin aux sols sensibles et aux fortes pentes. Cette formule ne tient pas compte correctement de l'érosion en ravine, qui représente une part variable du volume érodé, assez importante sur certains terrains comme en Tunisie (Rebaï *et al.*, accepted), mais généralement considérée comme d'importance secondaire comparativement à l'érosion en nappe.

Cependant il semble important de mieux apprécier la part de l'érosion ravinatoire dans le total sédimenté dans les barrages. Sur les berges du barrage SMBA dans le bassin du Bouregreg nous avons débuté la mesure des volumes ravinés sur les berges du barrage, car elle pourrait être assez importante pour représenter un enjeu de développement de mesures locales contre l'érosion (Maleval, 2006).

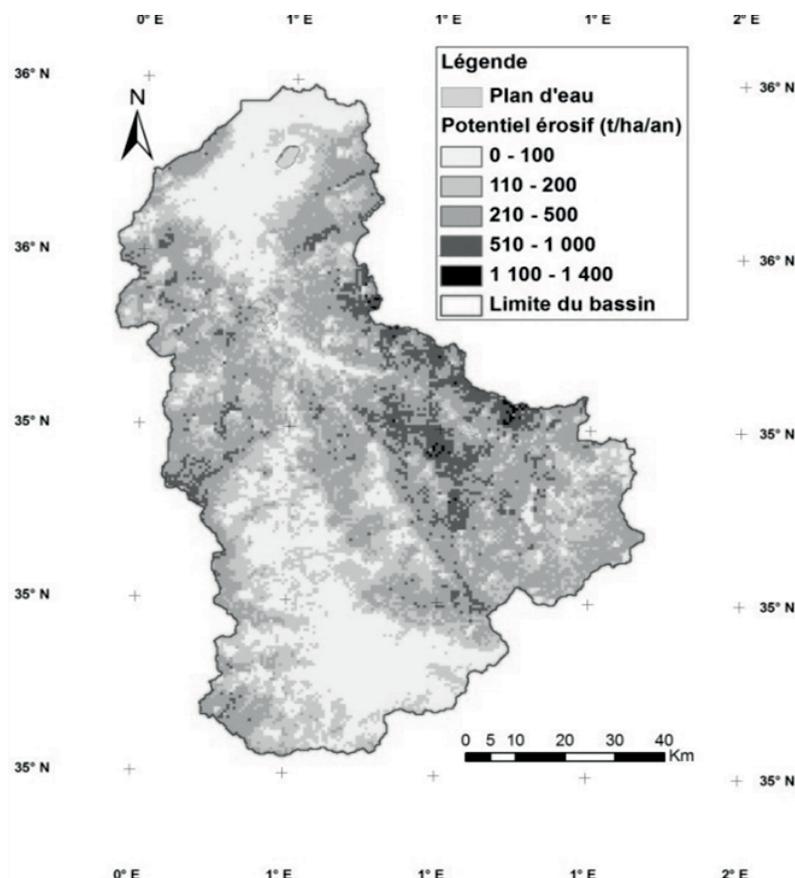


Fig. 4 Carte du potentiel érosif sur l'Oued Mina, en t/ha/an, selon l'équation USLE (Toumi *et al.*, 2013).

### Relations homme/environnement

Au cours des trente dernières années, les paysages du bassin versant du Bouregreg ont évolué sous l'effet de facteurs naturels et anthropiques (Laouina *et al.*, 2010a, 2010b; Aderghal *et al.*, 2013). A partir des images traitées il apparaît que les changements les plus visibles touchent les zones urbanisées dont la progression est évidente, notamment au niveau des grandes agglomérations situées sur le littoral et des communes en périphérie. En ce qui concerne les autres classes, et plus particulièrement les parcelles agricoles et les sols nus, malgré une précision globale toujours supérieure à 95%, les résultats observés révèlent certaines confusions. Elles sont notamment dues aux dates d'acquisition des images satellites qui peuvent varier d'un ou deux mois, entraînant ainsi des différences dans les stades de croissance des plantes et parfois la récolte de certaines cultures. Les confusions résultent aussi de la présence de champs cultivés dont la couverture du sol est réduite dans le temps (5–6 mois), laissant ainsi le sol nu le reste de l'année. De ce fait, selon les images, certaines parcelles sont parfois, à tort, considérées comme des sols nus.

Malgré cela, les résultats de ce travail montrent l'intérêt de l'utilisation de la télédétection et des SIG pour le suivi de la dynamique paysagère dans un territoire donné. Par ailleurs, le couplage des images satellites avec les statistiques agricoles (Fig. 5) permet de valider mais aussi de comprendre les résultats cartographiques, comme en 2000 où une faible pluviométrie en début de printemps entraîne le développement d'une végétation trop rare et une réponse radiométrique correspondant à un très faible NDVI (Goussot, 2011). Cette situation est corroborée par des rendements agricoles très faibles. D'autre part, l'échange de connaissances entre les différentes équipes en sciences environnementales et en sciences humaines a permis aux deux équipes de mieux comprendre les paramètres et les enjeux de chaque approche. Grâce à cet échange il est devenu très clair que les changements de pratiques agricoles et de gestion des terroirs, sur le bassin du Bouregreg, ont des conséquences très rapides et profondes sur l'environnement, la couverture végétale et la sensibilité à l'érosion.

Les solutions pour ralentir ou réduire l'érosion devraient passer un peu plus par l'implication des populations locales.

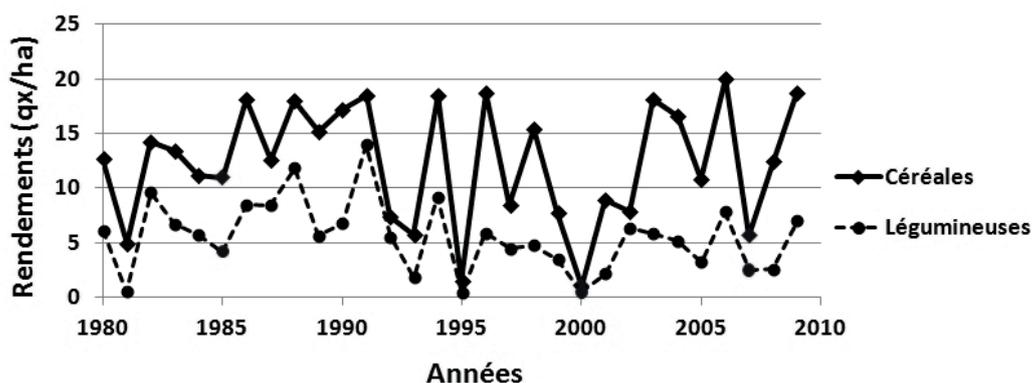


Fig. 5 Evolution des rendements céréaliers et des légumineuses de 1980 à 2009 sur les provinces de Rabat et Khémisset (Ministère de l'Agriculture, campagnes agricoles 1980 à 2009), sur le bassin du Bouregreg (Goussot, 2011).

### CONCLUSION

Les résultats obtenus sur les deux bassins versants commencent à être assez nombreux. Mais ils ne sont pas encore synthétisés ni n'ont été comparés de façon systématique entre les deux bassins. Cette étape viendra dans une phase ultérieure, quand plusieurs travaux en cours seront achevés.

Néanmoins, les résultats présentés ici témoignent des différentes approches qui ont eu lieu déjà sur les bassins, et ne présentent pas encore les résultats en cours de traitement de l'étude

démographique et de l'étude de l'érosion des berges du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur le Bouregreg.

Sur les deux bassins on a pu constater la très forte relation entre les activités humaines et la sensibilité de la couverture végétale et à l'érosion des sols (Mahe *et al.*, 2013), dans des climats dont le caractère semi-aride s'est affirmé durant les dernières décennies (Driouech *et al.*, 2008; Hallouz *et al.*, 2013), provoquant des sécheresses sévères, et une augmentation des températures maximales (Khomsî *et al.*, 2013). Une voie possible de remédiation au problème de l'envasement des barrages pourrait être une action localisée de protection des sols sur les berges immédiates des barrages, tenant compte des spécificités de l'occupation humaine (Laouina, 2010).

**Remerciements** Ce projet est financé par l'AUF-MeRSI 59113PS005 et l'IRD/HydroSciences Montpellier, et a bénéficié de soutiens de l'AIRD, de l'UNESCO (FRIEND), du CRASTE-LF/Rabat et des Instituts Français de Rabat, Alger, Tunis et Ndjamena.

## REFERENCES

- Achite, M. & Meddi, M. (2004) Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* 15(4), 367–373.
- Achite, M. & Meddi, M. (2005) Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (nord-ouest algérien). *Revue des Sciences de l'Eau*, 18, 37–56.
- Aderghal, M., Laouina, A., Chaker, M. & Machouri, N. (2013) Evaluation des projets de lutte contre la dégradation des terres, la commune des Sehoul, Maroc. *Soumis à Sécheresse* (en révision).
- Brou, Y. T., Emran, A., Laouina, A., Chaker, M., Coupleux, S. & Boujrouf, S. (2013) Changement des états de surface, précipitations automnales et vulnérabilité des sols dans le bassin versant du Bouregreg au Maroc. *Revue des Sciences de l'Eau* (accepté).
- Driouech, F., Déqué, M. & Mokssit, A. (2008) Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco. *Climate Dyn.* Springer. doi 10.1007/s00382-008-0430-6.
- El Baraka, M. (2011) *Etude des transports solides sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc)*. Mémoire de Master 2, Hydrosciences Montpellier, Université Montpellier 2.
- El Bouqdaoui, K., Aachib, M., Blaghen, M. & Kholtei, S. (2008) Modélisation de l'écoulement de la nappe de Berrechid (Maroc). *La Houille Blanche* 2, 69–75, doi:10.1051/lhb:2008019.
- Goussot, E. (2011) *Dynamique de l'occupation du sol, en relation avec les activités agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc) de 1985 à 2011*. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, AgroParis Tech, Paris, France.
- Hallouz, F., Meddi, M. & Mahe, G. (2013) Analyse des ruptures dans les séries pluviométriques dans le bassin de l'oued Mina (Nord Ouest d'Algérie). *Revue des Sciences de l'Eau* (accepté).
- Hallouz, F., Meddi, M. & Mahe, G. (2013) Relation débit liquide-transport de matières en suspension dans le bassin de l'Oued Mina, en amont du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (Oued Cheliff), Nord-Ouest d'Algérie. *Soumis à Geodynamica Acta*. (soumis)
- Khomsî, K., Mahe, G., Sinan, M., Snoussi, M. & Trambly, Y. (2013) Evolution of rare events of extreme temperature in Morocco and related synoptic weather types. *Regional Environmental Change* (submitted).
- Khomsî, K., Mahe, G., Sinan, M. & Snoussi, M. (2013) Hydro-climatic variability in two Moroccan basins: A comparative analysis of temperature, rainfall and runoff regimes. In: *Climate and Land Surface Changes in Hydrology* (Proceedings of IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013). IAHS Publ. 362. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Laouina, A. (2010) Conservation des eaux et des sols au Maroc, la prise en compte de la diversité géographique. *Norois* 214, 85–99.
- Laouina, A., Aderghal, M., Al Karkouri, J., Antari, M., Chaker, M., Laghazi, Y., Machmachi, I., Machouri, N., Nafaa, R., Naïmi, K., Nouira, A. & Sfa, M. (2010) The efforts for cork oak forest management and their effects on soil conservation. *Forest Systems* 19(2), 263–277.
- Laouina, A., Aderghal, M., Al Karkouri, J., Chaker, M., Machmachi, I., Machouri, N. & Sfa, M. (2010) Utilisation des sols, ruissellement et dégradation des terres, le cas du secteur Sehoul, région atlantique, Maroc. *Sécheresse* 21(4), 309–316.
- Lahlou, A. (1971) *Etude du transport solide à la station Dar Es Soltane sur l'oued Bouregreg*. Rapport de travaux du service GDE: gestion des eaux, Ministère des travaux publics et des communications, Direction de l'hydraulique, Rabat, Maroc.
- Lahlou, A. (1986) Etude actualisée de l'envasement des barrages au Maroc. *Revue des Sciences de l'Eau* 6, 337–356.
- Lahlou, A. (1994) *Envasement des barrages au Maroc*. Editions Wallada, Casablanca, Maroc.
- Mahe, G., Aksoy, H., Brou, Y.T., Meddi, M. & Roose, E. (2013) Relationships between man, environment and sediment transport: a spatial approach. *Revue des Sciences de l'Eau* (accepté).
- Mahe, G., Bakalowicz, M., Boyer, J.F., Ferrari, E., Snoussi, M. & Touaibia, B. (2010) MEDFRIEND: global perspectives for the UNESCO research network in Hydrology for the Mediterranean. *Sécheresse* 21(4), 285–293.
- Mahe, G., Brou, Y. T., Aksoy, H., Meddi, M. & Roose, E. (eds) (2011) Relations homme/environnement et transports solides: une approche spatialisée. *Le Journal de l'Eau et de l'Environnement*, numéro 19, spécial Atelier Scientifique SIGMED/MEDFRIEND de Tipaza, Algérie, ENSH Blida (Ed.), 6–13.
- Mahe, G., Emran, A., Brou, Y.T. & Tra Bi, A. Z. (2012a) Analyse statistique de l'évolution de la couverture végétale à partir d'images MODIS et NOAA sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). *Géo Observateur* 20, 33–44.
- Mahe, G., Emran, A., Brou, Y.T. & Tra Bi, A. Z. (2012b) Impact de la variabilité climatique sur l'état de surface du bassin versant du Bouregreg (Maroc). *European J. Sci. Res.* 84(3), 417–425.

- Mahe, G., Lienou, G., Descroix, L., Bamba, F., Paturel, J. E., Laraque, A., Meddi, M., Habaieb, H., Adeaga, O., Dieulin, C., Chahnez Kotti, F. & Khomsi, K. (2013) The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment. *Hydrological Processes* (accepted).
- Maleval, V. (2006) L'apport d'un bilan sédimentaire en milieu lacustre. *Zeitschrift für Geomorphologie* 4(50), 465–477.
- Meddi, M. & Belhadj Bouchaib, F. (2010) Etude des crues dans le bassin du Chélif. Application de la méthode du Gradex. *Revue Nature & Technologie*, n°3/Juin, 21–28. [www.univ-chlef.dz/revueNatec](http://www.univ-chlef.dz/revueNatec).
- Meddi, M., Boucefiane, A. & Sadeuk Belabbed, A. (2010) Impact des changements climatiques sur les débits dans le bassin du Chélif, Algérie. In: *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010), 95–102. IAHS Publ. 340. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Plan Bleu (2005) Méditerranée: les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement. Edition de l'Aube, 428 p.
- Rebai, H., Raclot, D. & Ben Ouezdou, H. (2013) Efficacité des aménagements de lutte contre le ravinement (Cas du bassin versant d'El Hnach, Tunisie). *Hydrol. Sci. J.* (accepted).
- Remini, B., Leduc, C. & Hallouche, W. (2009) Évolution des grands barrages en régions arides: quelques exemples algériens. *Sécheresse* 20(1), 96–103.
- Remini, B. & Bensafia, D. (2012) The impact of climate changes on the acceleration of reservoir siltation in arid regions, the Algerian case study. *Elixir* 44, 7074–7076.
- Remini, B., Bensafia, D. & Mekhatri, A. (2013) Valorisation de la vase du barrage de SMBA. *Soumis à La Houille Blanche*. (soumis).
- Singla, S., Mahé, G., Dieulin, C., Driouech, F., Milano, M., El Guelai, F.Z. & Ardoin-Bardin, S. (2010) Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc. In: *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010), 679–687. IAHS Publ. 340. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Touaibia, B., Aïdaoui, A., Gomer, D., Achite, M. (2001) Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi-aride de l'Algérie du Nord. *Hydrol. Sci. J.* 46(1), 41–53.
- Toumi, S., Meddi, M., Mahe, G. & Brou, Y. T. (2013) Application de la télédétection et des SIG à la cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie). *Journal des Sciences Hydrologiques* (accepted)